



Integrated Optimization of Biofuel Supply Chain: A Fuzzy Logic-Based Approach

Elham Mohseni*

Dariush Mohamadi**

Extended Abstract

Introduction and Objectives: This study proposes a multi-objective planning model for optimizing the design of a sustainable renewable energy supply chain network based on multi-period biomass. Given the existing challenges in this field, multi-objective modeling has been employed as an innovative approach to improve sustainability and reduce environmental impacts. The main goal of this study is to simultaneously optimize the economic, environmental, and social aspects of the biofuel supply chain to reduce operational costs and carbon emissions while fully meeting consumer demand. This study aims to develop an efficient model for the advancement of the renewable energy supply chain, taking into account multiple complexities and uncertainties.

Methods: To manage uncertainties in key parameters, fuzzy logic has been used, allowing the integration of expert opinions with more realistic data. The proposed multi-objective model was solved using the epsilon constraint method to find Pareto-optimal solutions and the GAMS software. Multiple criteria were considered simultaneously to achieve optimal results across various dimensions. The proposed model can optimize supply chain performance in complex and uncertain environments with greater accuracy and provide different scenarios to improve efficiency and reduce related risks. Sensitivity analysis was also performed to identify key factors affecting system efficiency.

Received: Oct. 07, 2024; Revised: May. 25, 2025; Accepted: Jun. 08, 2025; Published Online: Jun. 22, 2025.

* Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

** Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Corresponding Author: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir



Findings: The results indicate that the proposed model leads to reduced operational costs, decreased carbon emissions, and improved sustainability and efficiency of the supply chain network. Sensitivity analysis revealed that parameters such as transportation costs and CO₂ emissions have a significant impact on overall system performance, with small changes in these parameters potentially causing large variations in the final outcomes. Additionally, adopting sustainable approaches and using fuzzy logic helped decision-makers make better decisions under uncertainty to optimize the network. The findings show that using sustainable methods can enhance various aspects of the supply chain. Furthermore, the analysis demonstrated that the fuzzy model provides more accurate parameter estimations, resulting in better decisions in response to environmental changes. The results highlight significant improvements in economic and environmental metrics compared to traditional methods that do not account for uncertainties.

Conclusion: This study demonstrated that using multi-objective fuzzy modeling can improve the sustainability and efficiency of the biofuel supply chain. Given the specific characteristics of the biofuel supply chain in Iran, recommendations for future development and enhancing the efficiency of this supply chain were presented, which can contribute to more optimal decision-making and sustainable development. This research indicates that using fuzzy optimization models can play a key role in improving managerial decisions in the face of uncertainties. Finally, applying this model to other energy supply chains can pave the way for developing similar methods to enhance efficiency and reduce environmental and economic risks on a larger scale.

Keywords: Multi-objective optimization, Uncertainty, Sustainability, Biofuel supply chain, Renewable energy, Fuzzy logic.

How to Cite: Mohseni, Elham; Mohamadi, Dariush (2025). Integrated Optimization of Biofuel Supply Chain : A Fuzzy Logic-Based Approach. *Ind. Manag. Persp.*, 15(2), 177–201 (*In Persian*).



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بهینه‌سازی یکپارچه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی: رویکرد مبتنی بر منطق فازی

الهام محسنی*

داریوش محمدی**

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه را برای بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین انرژی تجدیدپذیر پایدار مبتنی بر زیست‌توده در یک افق چند دوره‌ای پیشنهاد داده است. با توجه به چالش‌های موجود در این حوزه، از مدل‌سازی چندهدفه به عنوان رویکردی نوین برای بهبود پایداری و کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه بهینه‌سازی هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی است، به طوری که ضمن کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار گاز کربن، تقاضای مصرفی نیز به طور کامل برآورده شود. این مطالعه تلاش دارد تا با در نظر گرفتن عوامل پیچیده و عدم قطعیت‌های متعدد، مدلی کارآمد برای توسعه زنجیره تأمین انرژی تجدیدپذیر طراحی کند.

روش‌ها: برای مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای کلیدی، از منطق فازی استفاده شده است که امکان ترکیب نظرات کارشناسان با داده‌های واقعی‌تر را فراهم می‌کند. مدل برنامه‌ریزی چندهدفه با استفاده از روش افسیلون محدودیت برای یافتن راه‌حل‌های پارتو و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است. در این روش، معیارهای متعددی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده تا بتوان نتایج مطلوبی در ابعاد مختلف به دست آورد. مدل پیشنهادی در محیط‌های پیچیده و غیرقطعی زنجیره تأمین، قادر است بهینه‌سازی را با دقت بیشتری انجام دهد و سناریوهای مختلفی برای بهبود کارایی و کاهش ریسک‌های مرتبط ارائه کند. همچنین، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف انجام شده تا به شناسایی عوامل کلیدی مؤثر در کارایی سیستم کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱.

* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

** دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

نویسنده مسئول: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری مدل پیشنهادی باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش انتشار گاز کربن و افزایش پایداری و کارایی شبکه زنجیره تأمین شده است. تحلیل حساسیت نیز انجام شد و مشخص شد که برخی پارامترها مانند هزینه حمل‌ونقل و انتشار CO2 تأثیر بسزایی بر عملکرد کل سیستم دارند؛ به‌طوری که تغییرات کوچک در این پارامترها می‌تواند منجر به تغییرات بزرگ در نتایج نهایی گردد. همچنین، به‌کارگیری رویکردهای پایدار و مبتنی بر منطق فازی به تصمیم‌گیرندگان کمک کرده تا بتوانند در شرایط عدم قطعیت، تصمیمات بهتری برای بهینه‌سازی شبکه اتخاذ کنند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های پایدار می‌تواند به بهبود ابعاد مختلف زنجیره تأمین کمک کند. علاوه بر این، مدل فازی قادر است با افزایش دقت در تخمین پارامترها، نتایج مطلوب‌تری به دست دهد و تصمیمات بهتری در مواجهه با تغییرات محیطی اتخاذ گردد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی در مقایسه با روش‌های معمولی است که بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به کار گرفته می‌شوند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که استفاده از مدل سازی چندهدفه فازی می‌تواند منجر به بهبود پایداری و کارایی زنجیره تأمین سوخت زیستی گردد. با توجه به ویژگی‌های خاص زنجیره تأمین سوخت زیستی در ایران، پیشنهاداتی برای توسعه آینده و ارتقای کارایی این زنجیره ارائه شده است که می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه‌تر و توسعه پایدار کمک کند. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی فازی می‌تواند در مواجهه با عدم قطعیت‌ها نقشی کلیدی در بهبود تصمیمات مدیریتی داشته باشد. در نهایت، کاربرد این مدل در سایر زنجیره‌های تأمین انرژی نیز می‌تواند زمینه‌ساز توسعه روش‌های مشابه برای بهبود کارایی و کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی چندهدفه؛ عدم قطعیت؛ پایداری؛ زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی؛ انرژی‌های تجدیدپذیر؛ منطق فازی.

استناددهی: محسنی، الهام؛ محمدی، داریوش (۱۴۰۴). بهینه‌سازی یکپارچه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی: رویکرد مبتنی بر منطق فازی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۵(۲)، ۱۷۷-۲۰۱.



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل رشد سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه صنعتی، تقاضای جهانی انرژی به طور چشمگیری افزایش یافته است [۲۷]. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از این تقاضا از طریق سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ تأمین می‌شود [۳۶]. اگرچه این منابع از نظر اقتصادی مقرون به صرفه به نظر می‌رسند، اما با چالش‌های متعددی همچون نوسانات قیمت، وابستگی به واردات و انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای همراه هستند تا آنجا که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از بخش انرژی و فرایندهای صنعتی در سال ۲۰۲۱ به ۳۶.۳ میلیون تن رسید [۱۱].

توسعه پایدار (SD)^۱ رویکردی جامع و یکپارچه به مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که هدف آن ارائه خدماتی است که نیازهای اساسی بشر را به شیوه‌ای پاک‌تر، کارآمدتر و قابل استمرار در آینده تأمین کند [۲۰]. امروزه انرژی به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار و شکوفایی جوامع، نقشی غیرقابل انکار دارد. با این حال، افزایش مصرف انرژی می‌تواند مشکلاتی نظیر کاهش منابع طبیعی و آلودگی محیط زیست را به همراه داشته باشد [۳۳]. ارتقای بهره‌وری انرژی در فرایندهای مبتنی بر منابع پایدار، گامی مهم در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار است. انرژی پایدار شکلی از انرژی است که به گونه‌ای تولید و مصرف می‌شود که تمامی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را تضمین کند. برای کاهش وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند گاز طبیعی، نفت و زغال سنگ، توسعه منابع انرژی جدید و تجدیدپذیر ضرورتی انکارناپذیر است [۴].

انرژی‌های تجدیدپذیر (RES)^۲ به عنوان یکی از راه‌حل‌های اساسی برای مقابله با تغییرات اقلیمی، تأمین امنیت انرژی و تحقق رشد پایدار شناخته می‌شوند [۲۲]. تولید این نوع انرژی‌ها از طریق تکنیک‌هایی است که در مقایسه با سایر منابع انرژی، تأثیرات زیست‌محیطی کمتری دارند و به نظر می‌رسد که راه‌حلی مؤثر برای دستیابی به توسعه پایدار در سال‌های اخیر باشند امروزه توسعه و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت بسیاری پیدا کرده است، چراکه این منابع برای مقابله با چالش‌های تأمین انرژی و تغییرات اقلیمی امری ضروری به شمار می‌روند [۲۸]. سوخت‌های زیستی سوخت‌هایی هستند که از منابع زیست‌توده تولید می‌شوند و پتانسیل قابل توجهی برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی دارند؛ زیست‌توده به عنوان یک منبع پاک و تجدیدپذیر، پتانسیل ارتقای امنیت انرژی و کاهش وابستگی به واردات نفت و گاز را داشته و می‌تواند به صرفه‌جویی ارزی و کاهش هزینه‌های تولید منجر شود [۱۴].

بازار جهانی زیست‌توده در سال ۲۰۲۱ به ۱۱۰ میلیارد دلار رسید و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ به ۲۰۱.۲ میلیارد دلار افزایش یابد. تولید سوخت‌های زیستی در آمریکای جنوبی، اروپا، آسیا و آفریقا به سرعت در حال رشد است. کشورهایی مانند برزیل، چین و هند برنامه‌های توسعه تولید سوخت‌های زیستی دارند و اتحادیه اروپا با سیاست‌های زیست‌محیطی خودمصرف این سوخت‌ها را تشویق می‌کند [۲۵]. تولید سوخت زیستی در ایران به دلیل کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی هوا مورد توجه قرار گرفته و برنامه‌هایی برای افزایش این تولیدات در حال اجراست. ایران سالانه به یک میلیارد لیتر سوخت زیستی نیاز دارد و این نیاز در حال افزایش است [۳۲].

زیست‌توده چوب منبعی تجدیدپذیر و مهم در توسعه پایدار است که از منابعی مانند درختان و ضایعات جنگلی به دست می‌آید. این ماده برای تولید برق، گرما، سوخت و مواد شیمیایی استفاده می‌شود و مزایای آن شامل کاهش گازهای گلخانه‌ای، افزایش امنیت انرژی، ایجاد اشتغال در مناطق روستایی و بهبود محیط زیست است [۲۵]. درخت پالونیا، به عنوان یکی از سریع‌ترین درختان رشدکننده، قادر است به سرعت زیست‌توده چوبی فراوانی تولید کند و به منبعی مؤثر برای تولید انرژی زیستی تبدیل شود [۱۵]. با وجود چالش‌هایی همچون گونه‌های مهاجم و نیاز به سرمایه‌گذاری، حمایت دولتی و برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند بهره‌برداری پایدار از این منبع را تضمین کند [۲]. یکی از چالش‌های اصلی در توسعه این نوع انرژی‌ها هزینه بالای آنهاست. مهم‌ترین این هزینه‌ها هزینه‌های لجستیکی است. اگر زنجیره تأمین این انرژی‌ها به صورت بهینه طراحی شود، می‌توان بسیاری از این هزینه‌ها را کاهش داد تا تولید آنها به صرفه باشد.

زنجیره تأمین سوخت زیستی (BSCN)^۱ شامل مراحل تولید، برداشت، تبدیل زیست‌توده به سوخت و توزیع آن به مصرف‌کنندگان است. این زنجیره به سه بخش اصلی؛ بالادستی (تولید و تحویل زیست‌توده)، میانی (تبدیل به انرژی زیستی) و بخش پایین‌دستی (ذخیره‌سازی و توزیع انرژی) تقسیم می‌شود [۲۴]. با توجه به اهمیت فزاینده انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی با چالش‌های پیچیده‌ای مانند تغییرات اقلیمی، نوسانات قیمتی و سیاست‌های دولتی مواجه است. برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از رویکردهای چندهدفه که همزمان جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در نظر می‌گیرند، حیاتی است [۱۵].

یکی از مؤثرترین روش‌ها در این زمینه، بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر منطق فازی است. این روش با توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر را در زنجیره تأمین فراهم می‌کند. (رانسیکاربوم و پیتاکاسو^۲، ۲۰۲۴)، با بهره‌گیری از داده‌های نامطمئن و مبهم، منطق فازی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا شبکه‌های پایدارتر و انعطاف‌پذیرتری را طراحی کرده و همچنین به کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌ها دست یابند. منطق فازی نقش کلیدی در بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های انرژی ایفا می‌کند [۱۶]. سلیمان‌نژاد و همکاران (۲۰۲۲)، با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی، مدلی را برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین بیمارستان تحت شرایط عدم قطعیت و کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی سیستم پیشنهاد داده‌اند [۲۹]. همچنین زرین‌پور و امیدواری (۲۰۲۰)، یک مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی استراتژیک و عملیاتی زنجیره تأمین نفت ارائه کرده‌اند که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، به کاهش ریسک و افزایش کارایی زنجیره تأمین منجر شود.

شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به دلیل پیچیدگی‌های خاص و نیاز به هماهنگی بین منابع تجدیدپذیر و فرایندهای تولید، به یکی از حوزه‌های مهم پژوهشی تبدیل شده است. برخلاف زنجیره‌های سنتی، طراحی و بهینه‌سازی این زنجیره نیازمند تصمیم‌گیری‌های دقیق و نوآورانه در زمینه مکان‌یابی تأسیسات و بهینه‌سازی توزیع است تا بتوان پایداری و کارایی این شبکه را در مواجهه با چالش‌های محیط زیستی و اقتصادی تضمین کرد. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت و پارامترهای فازی برای زنجیره تأمین سوخت زیستی پیشنهاد شده است که در آن، اهداف هزینه کل، تقاضای تأمین نشده و تأثیرات م (ژحیط‌زیستی برای در نظر گرفتن جنبه‌های کلیدی پارادایم پایداری توسعه یافته‌اند. پژوهش حاضر برخلاف تحقیقات گذشته که تنها بر یک جنبه از زنجیره تأمین سوخت زیستی متمرکز بودند، رویکردی جامع و چندهدفه برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی با تأکید بر پایداری و مدیریت عدم قطعیت‌ها ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی با استفاده از تکنیک‌های فازی و سناریوهای احتمالی، علاوه بر طراحی زنجیره در پنج سطح مختلف، به تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی می‌پردازد.

این مقاله در پنج بخش ساختاریافته است. در بخش اول، به بررسی اهمیت موضوع و چالش‌های موجود در بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی پرداخته شده است. بخش دوم به‌مرور مطالعات مرتبط اختصاص یافته است. در بخش سوم، مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد می‌گردد. بخش چهارم به بررسی نتایج اختصاص دارد. در نهایت، تحلیل حساسیت، نتیجه‌گیری پژوهش و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده در بخش پنجم ارائه شده است.

۲. مبانی و چارچوب نظری تحقیق

زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به‌عنوان یک شبکه پیچیده از مراحل تولید، انتقال و توزیع سوخت‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شود که در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی، مورد توجه قرار گرفته است و بهینه‌سازی این زنجیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴۰].

1. Biomass Supply Chain Network

2. Ransikarbun & Pitakaso

زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی با چالش‌های متعددی چون؛ تأمین پایدار مواد اولیه، هزینه‌های بالای تولید و فراوری، نوسانات بازار و قیمت‌ها و همچنین مسائل مربوط به حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی مواجه است. این چالش‌ها به‌وضوح ضرورت وجود رویکردهای نوین و یکپارچه برای مدیریت مؤثر و بهینه‌سازی این زنجیره تأمین را نشان می‌دهند [۱۰، ۲۶].

پژوهش‌ها و مطالعات گسترده‌ای در خصوص این چالش‌ها و استراتژی‌های مقابله با آن‌ها انجام شده است. کاندپال و همکاران^۱ (۲۰۲۴)، به بررسی افزایش نرخ خرید سوخت‌های زیستی و مشکلات سرمایه‌گذاری پرداخته‌اند. واسی^۲ (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای مشکلات مرتبط با کشت زمین و دسترسی به منابع زیستی را تحلیل کرده است. پن^۳ و همکاران (۲۰۲۴)، پژوهشی در خصوص انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات آن بر محیط‌زیست انجام داده‌اند. عباسی و همکاران (۲۰۱۱)، هزینه‌های بالای حمل‌ونقل را بررسی کرده‌اند و قدیر و همکاران (۲۰۲۱) نیازها و ملزومات زیرساختی را بررسی نموده‌اند. علاوه بر این، گادج و همکاران^۴ (۲۰۲۰) بر لزوم استفاده از فناوری‌های پیشرفته و تحقیقاتی در بهینه‌سازی زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند [۱، ۱۳، ۲۳، ۲۴، ۳۵].

طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به‌عنوان یکی از حوزه‌های کلیدی و کاربردی تحقیقاتی در دهه اخیر، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. این محققان از تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی از جمله؛ شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی ریاضی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، برای بهینه‌سازی بخش‌های مختلف این فرایند پیچیده بهره می‌برند [۵]. توسعه مدل‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی نقش بسزایی در ارتقای کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی ایفا می‌کند. در این راستا، مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها شناخته می‌شوند. مدل‌های اولیه پیشنهادی از لحاظ پیچیدگی در سطح پایین‌تری قرار داشتند [۴].

اکثر مطالعات موجود، از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی قطعی برای طراحی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی استفاده کرده‌اند. بابازاده (۲۰۱۵) یک شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی مایع از گیاه جاتروفا را در شرایط عدم قطعیت طراحی و بهینه‌سازی کرد. مدل پیشنهادی برنامه ریزی ریاضی یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط بود که تمامی لایه‌های مربوط به زنجیره تأمین بیودیزل از مراکز تهیه فیداستاک تا مراکز مصرف بیودیزل را تحت شرایط عدم قطعیت در نظر می‌گرفت. برای مقابله با عدم قطعیت شناختی پارامترها، از رویکرد برنامه ریزی امکانی مبتنی بر اندازه اعتبار بهره گرفته می‌شود. در ادامه پس از تبدیل مدل فازی به مدل قطعی معادل آن، الگوریتم تجزیه بندرز تسریع شده برای حل مدل پیشنهادی که یک مساله با سائز بزرگ و واقعی است توسعه داده شد [۶].

کامبرو و همکاران^۵ (۲۰۱۵)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط صحیح (MILP) را برای طراحی زنجیره تأمین ضایعات جنگلی ارائه کردند که هدف آن حداکثرکردن ارزش فعلی خالص زنجیره تأمین است [۸]. آن و همکاران^۶ (۲۰۱۵) و داس و همکاران^۷ (۲۰۲۴) روشی را ارائه کردند که به طور هم‌زمان به محدودیت‌های منابع و تقاضا توجه دارد و به تعیین مکان و مقدار مواد اولیه و همچنین مکان و اندازه پالایشگاه‌ها کمک می‌کند [۳، ۹]. شوال پور و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه دادند که در آن، تقاضای سوخت زیستی از مدل‌های سری زمانی آرما پیروی می‌کرد. همچنین نشان دادند که چگونه ساختار سری‌های زمانی آرما برای تقاضای سوخت زیستی، طراحی زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۱].

بایرام زاده و محمدسعیدی (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به طراحی شبکه و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین پویای یکپارچه سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته و پالایشگاه‌های نفت با لحاظ کردن جریان‌های مالی پرداختند. در این مطالعه از سوی دیگر، با اعمال نمودن طراحی شبکه زنجیره تأمین پویا، دو دوره زمانی استراتژیک و تاکتیکی در مدلسازی در نظر گرفته شد که در آن امکان افزایش ظرفیت تسهیلات و فعال شدن تسهیلات

1. Kandpal et al.
2. Wassie
3. Pen et al.
4. Ghadge et al.
5. Cambero et al.
6. Ahn et al.
7. Das et al.

در هر دوره زمانی استراتژیک وجود داشت. همچنین علاوه بر جریان فیزیکی، بهینه‌سازی جریان مالی نیز لحاظ شد و ماکزیمم‌سازی تابع هدف کارایی برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین سوخت زیستی پیشنهاد شد [۷].

دلخوش و سجادی (۲۰۲۰)، مدلی برای زنجیره تأمین زیست سوخت جلبک‌های ریز باهدف تجاری‌سازی این منبع جدید ارائه کرده‌اند. این مدل بر بهینه‌سازی دومارحله‌ای متمرکز است [۱۱]. در تحقیق دیگری بابازاده و همکاران (۲۰۱۵)، مدلی مبتنی بر رویکرد پوششی داده‌ها (DEA) و برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین زیست‌توده پیشنهاد کرده‌اند که در آن مکان‌های کشت زیست‌توده با استفاده از معیارهای اجتماعی و اقلیمی ارزیابی شده و سپس مناطق مناسب برای کشت انتخاب می‌گردد [۶]. دوک و همکاران^۱ نیز در مطالعه‌ای یک مدل چند هدفه برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین زیست‌توده با در نظر گرفتن اثرات اقتصادی و کربن را ارائه کردند [۱۲].

برنامه‌ریزی فازی یکی دیگر از روش‌های محبوب برای مقابله با عدم قطعیت‌ها است. تانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۴)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی ارائه کرده‌اند [۳۴]. رانسیکاربوم و پیتاکاسو (۲۰۲۴)، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای زنجیره تأمین سوخت زیستی پایدار و سبز پیشنهاد داده‌اند [۲۵]. زرین پور و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای مدلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها طراحی و از برنامه‌ریزی تعاملی فازی و روش فازی بهترین-بدترین برای وزن‌دهی استفاده کرده‌اند [۳۸].

در سال‌های اخیر، توجه بیشتری به رویکرد بهینه‌سازی استوار به دلیل قابلیت‌های بالای آن در مدیریت ریسک و عدم قطعیت جلب شده است. کیم و همکاران^۳ (۲۰۱۱)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح استوار مبتنی بر سناریو برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی تحت عدم قطعیت تقاضا توسعه داده‌اند [۲۱]. ژانگ و ژیانگ^۴ (۲۰۱۷)، نیز در یک مطالعه موردی در شهر سوژو در چین، یک مدل ریاضی با سطوح استراتژیک و تاکتیکی ارائه کرده‌اند که بهینه‌سازی چندهدفه‌ای را تحت عدم قطعیت قیمت بیودیزل انجام می‌دهد [۳۹]. جدول ۱ برخی از مطالعاتی که درخصوص مدل‌های ریاضی تحت عدم قطعیت انجام شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. بررسی برخی از مطالعات طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت عدم قطعیت

منابع	رویکرد مدل‌سازی			پایداری		رویکرد مدل‌سازی عدم قطعیت			
	MOMILP	MILP	MINLP	اقتصادی	محیط زیست	اجتماعی	برنامه‌ریزی تصادفی	برنامه‌ریزی فازی	بهینه‌سازی استوار
رانسیکاربوم و پیتاکاسو (۲۰۲۴) [۲۵]	*							*	
داس و همکاران (۲۰۲۴) [۹]	*			*	*		*		
تانگ و همکاران (۲۰۲۰) [۳۴]	*			*				*	
بایرام‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) [۷]		*			*				*
زرین‌پور و همکاران (۲۰۱۹) [۳۷]	*						*	*	
ژانگ و ژیانگ (۲۰۱۷) [۳۹]			*				*		*
سانتیبانز-آگیلار و همکاران (۲۰۱۶) [۳۰]	*			*	*	*			

1. Duc et al.

2. Tong et al.

3. Kim et al.

4. Zhang & Jiang

منابع	رویکرد مدل‌سازی			پایداری		رویکرد مدل‌سازی عدم قطعیت			رویکرد حل
	MINLP	MILP	MOMILP	اقتصادی	محیط زیست	اجتماعی	برنامه‌ریزی تصادفی	برنامه‌ریزی فازی	بهینه‌سازی استوار
بابازاده و همکاران (۲۰۱۵) [۶]	*			*	*		*		الگوریتم تجزیه بندرز
کیم و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱]		*			*		*		الگوریتم ژنتیک ترکیبی
تحقیق حاضر		*		*	*	*	*		نرم‌افزار GAMS

در تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی، اغلب عدم قطعیت‌های مختلف و ترکیبی در دنیای واقعی به طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. از این رو، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی فازی چندهدفه مبتنی بر رویکرد فازی ارائه می‌شود. در این مدل، پارامترهای هزینه، عرضه و تقاضا به صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. طراحی مدل چند دوره‌ای است و به چالش‌هایی از جمله تغییرپذیری فازی در پارامترهای عرضه و تقاضا و همچنین هزینه‌های مرتبط با تقاضای نا پاسخگو برآورد نشده در شرایط عدم قطعیت پاسخ می‌دهد. علاوه بر این، مدل چندهدفه پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده است که هم‌زمان بهینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره و حداقل‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی را مدنظر قرار می‌دهد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به منظور بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت عدم قطعیت و با استفاده از منطق فازی، اهداف مختلفی از جمله کاهش هزینه‌ها، افزایش پایداری و بهبود کارایی زنجیره تأمین در نظر گرفته شده و به دلیل عدم قطعیت‌های ذاتی در عرضه و تقاضای سوخت زیستی و نوسانات قیمت‌ها، پارامترهای مربوط به هزینه‌ها، عرضه و تقاضا به صورت متغیرهای فازی مدل‌سازی شده است. شکل ۱، ساختار پیشنهادی این زنجیره تأمین را نمایش می‌دهد این مدل از پنج سطح مختلف تشکیل شده و شامل دو نوع مختلف زیست‌توده (توده چوب یا درخت پالونیا)، دو نوع انبار، مراکز فراوری، تأسیسات بیوگاز و مشتریان نهایی است. در این زنجیره، پس از برداشت زیست‌توده از مزارع، مواد اولیه به انبارها منتقل شده و سپس به مراکز پیش‌پردازش فرستاده می‌شوند. پس از انجام مراحل فراوری، مواد به تأسیسات بیوگاز انتقال یافته و در نهایت، انرژی زیستی تولید شده به مصرف مشتریان می‌رسد.



شکل ۱. ساختار پیشنهادی مدل زنجیره تأمین سوخت زیستی

مدل مورد اشاره به گونه‌ای طراحی شده که بتواند تصمیم‌های بهینه‌ای را به صورت چند دوره‌ای ارائه دهد. در هر دوره، اهداف بهینه‌سازی باتوجه به تغییرات پارامترهای فازی مورد بازنگری و بهینه‌سازی قرار گرفته است. توابع هدف مدل به دنبال کمینه‌کردن کل هزینه‌ها و انتشار گازهای کربن بوده تا تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی بهینه شده و اثر منافع اجتماعی نیز با کاهش تقاضای برآورد نشده مورد توجه قرار گرفته است.

مفروضات مدل:

- منابع اولیه زیست‌توده شامل توده چوب و پسماندهای جنگلی و همچنین درخت پالونیاست.
 - محل مزارع کاشت و برداشت، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز مشخص است.
 - هزینه‌های ثابت و دو پارامتر عرضه و تقاضا به صورت نامعین و فازی لحاظ گردیده است.
 - از دو نوع انبار (استیجاری و قابل احداث) باتوجه به حجم منابع برداشتی و بودجه موجود، با ظرفیت‌های مختلف، استفاده می‌گردد.
 - مراکز پیش‌پردازش دارای سه ظرفیت مختلف و از نوع متغیرهای باینری بوده و باتوجه به حجم عرضه انتخاب می‌گردند.
 - ظرفیت تأسیسات بیوگاز ثابت فرض می‌شود.
 - دو نوع وسیله نقلیه، شامل کامیون و تریلی مخزن‌دار با ظرفیت‌های مختلف به کار گرفته می‌شود.
 - مسیرهای حمل‌ونقل با مسافت‌های مختلف به صورت محدود مشخص شده است.
 - در مدل پیشنهادی، انتخاب بین احداث انبارها و یا اجاره آنها، مکان‌یابی مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز و در نظر گرفتن ظرفیت‌های مختلف برای آنها، به عنوان بخشی از توسعه مدل در نظر گرفته شده است. این ویژگی امکان کنترل بهتر هزینه‌ها را باتوجه به حجم منابع برداشت‌شده فراهم می‌کند.
 - مدل در چند سه دوره اجرا می‌شود. مقادیر عرضه در هر دوره متفاوت لحاظ شده است.
- در بین جنبه‌های مختلف عدم قطعیت در زنجیره تأمین سوخت زیستی، تأثیرات ناشی از عرضه و تقاضای نامطمئن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این معنا که داده‌های عرضه با درصدهای افزایشی یا کاهش‌ی یکنواخت تغییر می‌کنند تا عملکرد مدل ارزیابی شود. جهت حل مدل چندهدفه از روش محدودیت افسیلون استفاده شده است. این تکنیک امکان ارائه راه‌حل‌های بهینه و پایدار را در شرایط عدم قطعیت فراهم کرده و باعث ایجاد تعادل بین اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی می‌شود [۱۴].
- در نهایت، تحلیل حساسیت و تجزیه و تحلیل پارتو با پارامترهای مختلف مربوط به وزن اهداف برای تأیید و اعتبارسنجی عملکردهای مدل و مبادلات هدف انجام می‌شود تا عملکرد مدل و تعادل اهداف را بررسی و تأیید کند.

مدل‌سازی ریاضی

قبل از تشریح مدل ریاضی اجزاء مدل به شرح جدول‌های ۲ تا ۵ معرفی می‌شود.

جدول ۲. اندیس‌های مدل

اندیس‌ها		
i	مجموعه مزارع برداشت توده چوب و درخت پالونیا	r
p	نوع محصول برداشت شده (توده چوب یا درخت پالونیا)	d
j	مجموعه تعداد انبارهای قابل احداث	A ₁
استیجاری		
j'	مجموعه تعداد انبارهای قابل اجاره	A ₂
k	مجموعه مراکز پیش‌پردازش	A ₃
k'	مجموعه ظرفیت‌های مراکز پیش‌پردازش	A ₄
مجموعه مسیرهای منتخب از انبارها تا مراکز پیش‌پردازش		
مجموعه مسیرهای منتخب از مراکز پیش‌پردازش تا تأسیسات بیوگاز		
مجموعه مسیرهای منتخب از تأسیسات بیوگاز تا ذی‌نفعان		
t	دوره زمانی	

جدول ۳. پارامترهای مدل

پارامترها	
$Cfws1_{j1t}$	هزینه ثابت برای احداث انبار ۱ در دوره t (فازی)
$Cfws2_{j2t}$	هزینه ثابت برای احداث انبار ۲ در دوره t (فازی)

پارامترها	
$Cf\overline{w}C_{kkrt}$	هزینه ثابت برای دایر کردن مرکز پیش‌پردازش k با K' ظرفیت در دوره t (فازی)
$Cf\overline{B}G_{rt}$	هزینه ثابت برای دایر کردن پالایشگاه بیوگاز r در دوره t (فازی)
$\overline{C}V_t$	هزینه خرید زیست‌توده در دوره t (فازی)
$cvs1_{j_1pt}$	هزینه دستمزد انبارداری (احداث شده) j_1 و خشک کردن زیست‌توده نوع p در دوره t
$cvs2_{j_2pt}$	هزینه دستمزد انبارداری (استیجاری) j_2 و خشک کردن زیست‌توده نوع p در دوره t
cvw_{ipt}	هزینه دستمزد جمع‌آوری زیست‌توده نوع p از مزرعه i در دوره t
$cvwC_kt$	هزینه دستمزد کارکنان در مرکز پیش‌پردازش k در دوره t
$cvBG_{rt}$	هزینه دستمزد کارکنان در پالایشگاه بیوگاز r در دوره t
$dws1_{ij_1pA_1t}$	فاصله مسیر A_1 از مزرعه i تا انبار احداث شده j_1 با زیست‌توده نوع p در دوره t
$dws2_{ij_2pA_1t}$	فاصله مسیر A_1 از مزرعه i تا انبار استیجاری j_2 با زیست‌توده نوع p در دوره t
$dwc1_{j_1kpA_2t}$	فاصله مسیر A_2 از انبار احداث شده j_1 تا مرکز پیش‌پردازش k با زیست‌توده نوع p در دوره t
$dwc2_{j_2kpA_2t}$	فاصله مسیر A_2 از انبار استیجاری j_2 تا مرکز پیش‌پردازش k با نوع زیست‌توده نوع p در دوره t
dBG_{krA_3t}	فاصله مسیر A_3 از مرکز پیش‌پردازش k تا تأسیسات بیوگاز r در دوره t
ct	هزینه سوخت برای حمل‌ونقل در دوره t
f^{pt}	میزان مصرف سوخت برای حمل‌ونقل کامیون (کیلومتر بر لیتر) در دوره t
f^{tt}	میزان مصرف سوخت برای حمل‌ونقل تریلی مخزن‌دار (کیلومتر بر لیتر) در دوره t
MM	یک عدد بزرگ
ept	ضریب انتشار CO_2 برای حمل‌ونقل با کامیون (گرم در کیلومتر) در دوره t
ett	ضریب انتشار CO_2 برای حمل‌ونقل با تریلی مخزن‌دار (گرم در کیلومتر) در دوره t
$capws1_{j_1t}$	ظرفیت انبار احداث شده j_1 در دوره t
$capws2_{j_2t}$	ظرفیت انبار احداث شده j_2 در دوره t
$capwC_{kkrt}$	ظرفیت مرکز پیش‌پردازش k با مقدار K' در دوره t
$capBG_{rt}$	ظرفیت پالایشگاه بیوگاز r در دوره t
q^1	حداقل ظرفیت (۵ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز در هر دوره
q^2	حداقل ظرفیت (۶ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز در هر دوره
q^3	حداقل ظرفیت (۷ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز در هر دوره
q^4	حداقل ظرفیت (۸ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز در هر دوره
q^5	حداقل ظرفیت (۹ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز در هر دوره
cr^{W-BG}	نرخ تبدیل از زیست‌توده به بیوگاز (بر حسب مترمکعب/تن) در هر دوره
cr^{mk}	عامل تبدیل بر حسب مگاوات در هر دوره
cr^{BG-E}	نرخ تبدیل بیوگاز به برق (بر حسب مترمکعب/تن) در هر دوره
d^{min}	حداقل توافقی برق تولید شده برای جامعه (درصد) در هر دوره

جدول ۴. متغیرهای فازی مدل

متغیرهای فازی	
$\widetilde{S}_{ipt}$	مقدار عرضه زیست‌توده نوع p از مزرعه i در دوره t (فازی)
$\widetilde{d}_{at}$	مقدار برق موردنیاز به ازاء d متقاضی در دوره t (فازی)

جدول ۵. متغیرهای تصمیم مدل

متغیرهای تصمیم	
$L1_{ipt} \quad L2_{ipt}$	مقدار عرضه زیست‌توده نوع p از مزرعه i در دوره t

متغیرهای تصمیم	
01_{j_1pt}	مقدار زیست‌توده ذخیره شده نوع p در انبار احداث شده j_1 در دوره t
02_{j_2pt}	مقدار زیست‌توده ذخیره شده نوع p در انبار استیجاری j_2 در دوره t
M_{kt}	مقدار زیست‌توده فراوری شده در مرکز پیش‌پردازش k در دوره t
N_{rt}	مقدار خرده چوب استفاده شده در تأسیسات بیوگاز r در دوره t
B_{dt}	مقدار بیوگاز تولید شده به ازاء d متقاضی در دوره t
E_{dt}	مقدار برق تولید شده به ازاء d متقاضی در دوره t
$Yws1_{j_1t}$	متغیر تصمیم باینری برای احداث انبار j_1 . ۱ اگر انبار احداث شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
$Yws2_{j_2t}$	متغیر تصمیم باینری برای اجاره انبار j_2 . ۱ اگر انبار اجاره شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
$Ywc_{kk't}$	متغیر تصمیم باینری برای دایر کردن مرکز پیش‌پردازش k با ظرفیت k'. ۱ اگر مرکز پیش‌پردازش دایر شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
YBG_{rt}	متغیر تصمیم برای دایر کردن تأسیسات بیوگاز r در دوره t
$Xws1_{ij_1pA_1t}$	جریان حمل زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار احداث شده j_1 از مسیر منتخب A_1 در دوره t
$Xws2_{ij_2pA_1t}$	جریان حمل زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار استیجاری j_2 از مسیر منتخب A_1 در دوره t
$Xwc1_{j_1kpA_2t}$	جریان حمل زیست‌توده نوع p از انبار احداث شده j_1 به مرکز پیش‌پردازش k از مسیر منتخب A_2 در دوره t
$Xwc2_{j_2kpA_2t}$	جریان حمل زیست‌توده نوع p از انبار استیجاری j_2 به مرکز پیش‌پردازش k از مسیر منتخب A_2 در دوره t
XBG_{krA_3t}	جریان حمل زیست‌توده فراوری شده از مرکز پیش‌پردازش k به تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_3 در دوره t
XD_{drA_4t}	جریان حمل برق تولید شده برای متقاضی d از تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_4 در دوره t
Ud_{dt}	مقدار تقاضای برق برآورده نشده به ازاء d متقاضی در دوره t
$Wws1_{ij_1pA_1t}$	متغیر باینری برای نشان‌دادن انتقال زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار احداث شده j_1 از مسیر منتخب A_1 . ۱ اگر از مسیر استفاده شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
$Wws2_{ij_2pA_1t}$	متغیر باینری برای نشان‌دادن انتقال زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار استیجاری j_2 از مسیر منتخب A_1 . ۱ اگر از مسیر استفاده شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
$Wwc1_{j_1kpA_2t}$	متغیر باینری برای نشان‌دادن انتقال زیست‌توده نوع p از انبار احداث شده j_1 به مرکز پیش‌پردازش k از مسیر منتخب A_2 . ۱ اگر از مسیر استفاده شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
$Wwc2_{j_2kpA_2t}$	متغیر باینری برای نشان‌دادن انتقال زیست‌توده نوع p از انبار استیجاری j_2 به مرکز پیش‌پردازش k از مسیر منتخب A_2 . ۱ اگر از مسیر استفاده شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
WBG_{krA_3t}	متغیر باینری برای نشان‌دادن انتقال زیست‌توده فراوری شده از مرکز پیش‌پردازش k به تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_3 . ۱ اگر از مسیر استفاده شود و ۰ در غیر این صورت در دوره t
Q_{it}^1	متغیر باینری برای محدودکردن حداقل ظرفیت نصب شده (۵ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز در دوره t
Q_{it}^2	متغیر باینری برای محدودکردن حداقل ظرفیت نصب شده (۶ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز در دوره t
Q_{it}^3	متغیر باینری برای محدودکردن حداقل ظرفیت نصب شده (۷ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز در دوره t
Q_{it}^4	متغیر باینری برای محدودکردن حداقل ظرفیت نصب شده (۸ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز در دوره t
Q_{it}^5	متغیر باینری برای محدودکردن حداقل ظرفیت نصب شده (۹ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز در دوره t

مدل ریاضی در حالت قطعی

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

$$\begin{aligned} \text{Min } Z1 = & \left(\sum_{j_1} \sum_t \overline{cfws1}_{j_1t} Yws1_{j_1t} + \sum_{j_2} \sum_t \overline{cfws2}_{j_2t} Yws2_{j_2t} \right) \quad (\text{رابطه ۱}) \\ & + \left(\sum_k \sum_{k'} \sum_t \overline{cfwc}_{kk't} Ywc_{kk't} + \sum_r \sum_t \overline{cfBG}_r YBG_{rt} \right) + \left(\sum_i \sum_p \sum_t \overline{cv}(L1_{ipt} + L2_{ipt}) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_i \sum_p \sum_t cvw_{ipt}(L1_{ipt} + L2_{ipt}) + \sum_{j_1} \sum_p \sum_t cvs1_{j_1pt}O1_{j_1pt} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_t cvs2_{j_2pt}O2_{j_2pt} \\
& + (\sum_i \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws1_{ij_1pA_1t}ctXws1_{ij_1pA_1t}/f^{pt}) + (\sum_i \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws2_{ij_2pA_1t}ctXws2_{ij_2pA_1t}/f^{pt}) \\
& + (\sum_{j_1} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc1_{j_1kpA_2t}ctX1wc_{j_1kpA_2t}/f^{pt}) + (\sum_{j_2} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc2_{j_2kpA_2t}ctX2ws_{j_2kpA_2t}/f^{pt}) \\
& + (\sum_k \sum_r \sum_{A_3} \sum_t dBG_{krA_3t}ctXBG_{krA_3t}/f^{tt})
\end{aligned}$$

تابع هدف رابطه (۱) مجموع هزینه‌های احداث یا اجاره انبارها، مجموع هزینه‌های راه‌اندازی (شامل مزارع 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 مرکز پیش‌پردازش و تولید در تأسیسات بیوگاز) و کل هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع (شامل جریان حمل‌ونقل زیست‌توده چوب به مرکز پیش‌پردازش و خرده چوب‌ها به تأسیسات بیوگاز) را به حداقل می‌رساند. در این رابطه هزینه‌های راه‌اندازی انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز و خرید زیست‌توده به صورت فازی در نظر گرفته شده است.

$$\text{Min } Z2 = MM \sum_d \sum_t U_{dt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

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

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z3 = & (\sum_i \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws1_{ij_1pA_1t}eptWws1_{ij_1pA_1t} \\
& + \sum_i \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws2_{ij_2pA_1t}eptWws2_{ij_2pA_1t}) \\
& + (\sum_{j_1} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc1_{j_1kpA_2t}eptWwc1_{j_1kpA_2t}) \\
& + \sum_{j_2} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc2_{j_2kpA_2t}eptWwc2_{j_2kpA_2t}) \\
& + (\sum_k \sum_r \sum_{A_3} \sum_t dBG_{krA_3t}ettWBG_{krA_3t})
\end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

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

محدودیت‌ها

$$L1_{ipt} + L2_{ipt} \leq \widetilde{S}_{ipt} \quad \forall i p t \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{j_1} \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1t} = L1_{ipt} \quad \forall i p t \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{j_2} \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1t} = L2_{ipt} \quad \forall i p t \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$O1_{j_1pt} = \sum_i \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1t} \quad \forall j_1 p t \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$O2_{j_2pt} = \sum_i \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1t} \quad \forall j_2 p t \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_i \sum_p \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1t} \leq capws1_{j_1t} Yws1_{j_1t} \quad \forall j_1 t \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_i \sum_p \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1t} \leq capws2_{j_2t} Yws2_{j_2t} \quad \forall j_2 t \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$Yws1_{j_1 t} \leq 1 \quad \forall j_1 t \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$Yws2_{j_2 t} \leq 1 \quad \forall j_2 t \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_i \sum_{A_1} Xws1_{ij_1 p A_1 t} \leq \sum_k \sum_{A_2} Xwc1_{j_1 k p A_2 t} \quad \forall j_1 p t \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_i \sum_{A_1} Xws2_{ij_2 p A_1 t} \leq \sum_k \sum_{A_2} Xwc2_{j_2 k p A_2 t} \quad \forall j_2 p t \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$M_{kt} = \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1 k p A_2 t} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2 k p A_2 t} \quad \forall k t \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1 k p A_2 t} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2 k p A_2 t} \leq \sum_{k'} capwc_{kk'} Ywc_{kk'} \quad \forall k t \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{k'} Ywc_{kk' t} \leq 1 \quad \forall k t \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1 k p A_2 t} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2 k p A_2 t} \leq \sum_r \sum_{A_3} XBG_{kr A_3 t} \quad \forall k t \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$N_{rt} = \sum_k \sum_{A_3} XBG_{kr A_3 t} \quad \forall r t \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_k \sum_{A_3} XBG_{kr A_3 t} \leq capBG_{rt} YBG_{rt} \quad \forall r t \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_k \sum_{A_3} XBG_{kr A_3 t} \leq \sum_d \sum_{A_4} XD_{rd A_4 t} \quad \forall r t \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$YBG_{rt} = q^1 Q_{rt}^1 + q^2 Q_{rt}^2 + q^3 Q_{rt}^3 + q^4 Q_{rt}^4 + q^5 Q_{rt}^5 \quad \forall r t \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$YBG_{rt} \leq 1 \quad \forall r t \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$B_{dt} = cr^{W-BG} \sum_r \sum_{A_4} XD_{rd A_4 t} \quad \forall d t \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$E_{dt} = cr^{mk} cr^{BG-E} B_{dt} \quad \forall d t \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$E_{dt} \geq d^{min} \widetilde{d}_{dt} \quad \forall d t \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$Ud_{dt} = \widetilde{d}_{dt} - E_{dt} \quad \forall d t \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$MM(Wws1_{ij_1 p A_1 t}) \geq Xws1_{ij_1 p A_1 t} \quad \forall i j_1 p A_1 t \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$MM(Wws2_{ij_2 p A_1 t}) \geq Xws2_{ij_2 p A_1 t} \quad \forall i j_2 p A_1 t \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$MM(Wwc1_{j_1 k p A_2 t}) \geq Xwc1_{j_1 k p A_2 t} \quad \forall j_1 k p A_2 t \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$MM(Wwc2_{j_2 k p A_2 t}) \geq Xwc2_{j_2 k p A_2 t} \quad \forall j_2 k p A_2 t \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$MM(WBG_{kr A_3 t}) \geq XBG_{kr A_3 t} \quad \forall k r A_3 t \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$Yws1_{j_1 t}, Yws2_{j_2 t}, Ywc_{kk'}, Wws1_{ij_1 p A_1 t}, Wws2_{ij_2 p A_1 t}, Wwc1_{j_1 k p A_2 t}, Wwc2_{j_2 k p A_2 t}, WBG_{kr A_3 t}, \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$Q_{rt}^1, Q_{rt}^3, Q_{rt}^5 \in \{0,1\}$$

$$YBG_{rt}, Xws1_{ij_1 p A_1 t}, Xws2_{ij_2 p A_1 t}, Xwc1_{j_1 k p A_2 t}, Xwc2_{j_2 k p A_2 t}, XBG_{kr A_3 t} \geq 0 \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

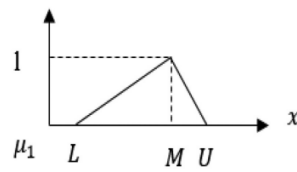
$$L1_{ipt}, L2_{ipt}, O1_{j_1 pt}, O1_{j_2 pt}, M_{kt}, N_{rt}, B_{dt}, E_{dt}, Ud_{dt}, Q_{rt}^2, Q_{rt}^4 \geq 0 \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

محدودیت (۴) تضمین می‌کند که میزان خرید زیست‌توده از هر مزرعه نمی‌تواند بیش از مقدار عرضه موجود زیست‌توده در هر مزرعه باشد. محدودیت‌های (۵) و (۶) بیان می‌کنند کل جریان حمل‌ونقل زیست‌توده از هر مزرعه به انبار احداث یا اجاره شده با مقدار خرید زیست‌توده از هر مزرعه یکسان است. دو محدودیت (۷) و (۸) نشان می‌دهند که مقدار زیست‌توده ذخیره شده در انبارها با جریان حمل آنها برابر است. طبق محدودیت (۹) و (۱۰)، جریان حمل شده زیست‌توده از مزارع کمتر از ظرفیت انبارهاست. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲)، احداث یا اجاره انبارها را محدود می‌کنند. دو محدودیت (۱۳) و (۱۴)، اولین معادله تعادل بین مزرعه-انبار و انبار-مراکز پیش‌پردازش است که نشان می‌دهند جریان حمل زیست‌توده از مزرعه به انبارها کمتر یا مساوی جریان حمل زیست‌توده از انبارها به مراکز پیش‌پردازش است. طبق محدودیت (۱۵)، مقدار زیست‌توده فراوری شده با مقادیر حمل شده زیست‌توده از انبارها برابر است. مطابق محدودیت (۱۶)، مقادیر حمل زیست‌توده از انبارها کمتر یا مساوی از ظرفیت مراکز پیش‌پردازش است. با توجه به اینکه هر مرکز پیش‌پردازش دارای چند ظرفیت مختلف است، رابطه (۱۷)، امکان گشایش مرکز پیش‌پردازش را فقط با یک ظرفیت محدود می‌کند. محدودیت (۱۸)، دومین معادله تعادل بین مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز را نشان می‌دهد. مقادیر حمل زیست‌توده فراوری شده با مقدار بیوگاز تولید شده برابر است. طبق محدودیت (۱۹)، مقدار بیوگاز تولید شده در تأسیسات بیوگاز برابر با مقدار حمل زیست‌توده فراوری شده از مرکز پیش‌پردازش به تأسیسات است. محدودیت (۲۰)، نشان می‌دهد مقدار حمل زیست‌توده فراوری شده کمتر یا مساوی ظرفیت تأسیسات بیوگاز است. محدودیت (۲۱) سومین معادله تعادل بین تأسیسات بیوگاز و ذینفعان (متقاضیان) است. محدودیت (۲۲)، با توجه به پنج ظرفیت تعبیه شده برای هر تأسیسات بیوگاز، فقط یک ظرفیت را در نظر می‌گیرد و محدودیت (۲۳) امکان انتخاب یک تأسیسات بیوگاز را با توجه به ظرفیت تعیین شده فراهم می‌کند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵)، به ترتیب مقدار بیوگاز و برق تولید شده را نمایش می‌دهند. محدودیت (۲۶) نشان می‌دهد مقدار برق تولیدی درصدی بیش از مقدار تقاضای مصرفی است. محدودیت (۲۷) مقدار تقاضای برق برآورده نشده را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۲) نیز اطمینان استفاده از مسیرهای منتخب، جهت حمل‌ونقل محصولات از مزرعه به انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز را نشان می‌دهند و جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی لحاظ شده است.

تعدیل مدل با روابط فازی

بهبودسازی چندهدفه مبتنی بر منطق فازی با توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر را در زنجیره تأمین فراهم می‌کند. با بهره‌گیری از داده‌های نامطمئن و مبهم، منطق فازی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا شبکه‌های پایدارتر و انعطاف‌پذیرتری را طراحی کرده و همچنین به کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌ها دست یابند. بنابراین منطق فازی نقش کلیدی در بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های انرژی ایفا می‌کند برای مدل‌سازی عدم قطعیت در هزینه‌ها، عرضه و تقاضا از نگرش فازی استفاده شده است. با توجه به اینکه در دنیای واقعی داده‌های مورد اشاره معمولاً با عدم دقت و ناپایداری همراه هستند، این متغیرها به شکل اعداد فازی در مدل گنجانده شده تا واقع‌گرایی بیشتری به تحلیل‌ها بخشیده شود. به همین منظور هزینه‌های راه‌اندازی، عرضه و تقاضا به صورت اعداد فازی مدل‌سازی شده است. برای مدیریت این پارامترهای فازی، از روش نوآورانه خیمنز و همکاران (۲۰۰۷)^۱ استفاده شده است [۱۸]. این روش به گونه‌ای طراحی شده است که مدل بهبودسازی خطی عدد صحیح مختلط فازی (FMILP) را به یک مدل قطعی معادل تبدیل می‌کند. در این رویکرد، اگر اعداد فازی به صورت مثلثی در شکل ۲ تعریف شوند و $\tilde{c} = \{L \ M \ U\}$ یک عدد فازی باشد رابطه (۳۶) را می‌توان تعریف کرد.

$$\begin{cases} f_c(x) = \frac{x-L}{M-L} & \text{if } L \leq x \leq M \\ 1 & \text{if } x = M \\ g_c(x) = \frac{U-x}{U-M} & \text{if } L \leq x \leq U \\ 0 & \text{if } x \leq M \text{ or } x \geq U \end{cases} \quad \text{(رابطه ۳۶)}$$



شکل ۲. توابع عضویت یک عدد فازی مثلثی

معادلات مربوطه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که بتوان پارامترهای فازی را به نحو مؤثری مدیریت کرد و مرزهای پارتو برای اهداف مختلف به دست آورد. بر اساس پیشنهاد خیمنز (۱۹۹۶)، می‌توان رابطه (۳۷) و (۳۸) را در نظر گرفت به صورتی که فاصله (EI) و مقدار مورد انتظار (EV) برای $\tilde{C}$ باشد [۱۷].

$$EI(\tilde{C}) = [E_1^c \ E_2^c] = \left[\int_0^1 f_c^{-1}(x) dx \int_0^1 g_c^{-1}(x) dx \right] = \left[\frac{L+M}{2} \ \frac{M+U}{2} \right] \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$EV(\tilde{C}) = \frac{E_1^c - E_2^c}{2} = \frac{L + 2M + U}{4} \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

بر اساس روش رتبه‌بندی اعداد فازی خیمنز و همکاران (۲۰۰۷)، می‌توان رابطه (۳۹) را برای یک مجموعه دو عدد فازی در نظر گرفت، اعداد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ به طوری که سطح $\tilde{b}$ کوچکتر از $\tilde{a}$ باشد.

$$\mu_M(\tilde{a} \tilde{b}) = \begin{cases} \mu_M(\tilde{a} \tilde{b}) & \text{if } E_1^a - E_2^b > 0 \\ 1 & \text{if } 0 \in [E_1^a - E_2^b \ E_2^a - E_1^b] \\ \frac{E_2^a - E_1^b}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_2^b)} & \text{if } E_1^a - E_2^b < 0 \\ 0 & \end{cases} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

وقتی $\mu_M(\tilde{a} \tilde{b}) \leq \alpha$ باشد نشان می‌دهد $\tilde{a}$ کوچکتر یا مساوی $\tilde{b}$ و محدودیت‌های فازی در مدل پژوهش به صورت رابطه (۴۰) تبدیل می‌شود.

$$\tilde{a}x \leq \tilde{b}x \geq 0 \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

طبق روابط فازی فوق رابطه‌های (۱)، (۴) و (۲۶) در مدل به روابط (۴۱) تا (۴۳) تغییر خواهند کرد.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z1 = & \left(\sum_{j1} \sum_t \frac{Lcfws1_{j1t} + 2Mcfws1_{j1t} + Ucfws1_{j1t}}{4} Yws1_{j1t} \right. \\ & + \sum_{j2} \sum_t \frac{Lcfws2_{j2t} + 2Mcfws2_{j2t} + Ucfws2_{j2t}}{4} Yws2_{j2t} \\ & + \left(\sum_k \sum_{k'} \sum_t \frac{Lcfwc_{kk't} + 2Mcfwc_{kk't} + Ucfwc_{kk't}}{4} Ywc_{kk't} \right. \\ & + \sum_r \sum_t \frac{LfBG_{rt} + 2MfBG_{rt} + UfBG_{rt}}{4} YBG_{rt} \\ & + \left(\sum_i \sum_p \sum_t \frac{Lcv_{ipt} + 2Mcv_{ipt} + Ucv_{ipt}}{4} (L1_{ipt} + L2_{ipt}) \right) \\ & + \sum_i \sum_p \sum_t cvw_{ipt} (L1_{ipt} + L2_{ipt}) + \sum_{j1} \sum_p \sum_t cvs1_{j1pt} O1_{j1pt} \\ & \left. + \sum_{j2} \sum_p \sum_t cvs2_{j2pt} O2_{j2pt} \right) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\sum_i \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws1_{ij_1pA_1t} ctXws1_{ij_1pA_1t} / f^{pt} \right) \\
& + \left(\sum_i \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_1} \sum_t dws2_{ij_2pA_2t} ctXws2_{ij_2pA_1t} / f^{pt} \right) \\
& + \left(\sum_{j_1} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc1_{j_1kpA_2t} ctX1wc_{j_1kpA_2t} / f^{pt} \right) \\
& + \left(\sum_{j_2} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} \sum_t dwc2_{j_2kpA_2t} ctX2ws_{j_2kpA_2t} / f^{pt} \right) \\
& + \left(\sum_k \sum_r \sum_{A_3} \sum_t dBG_{krA_3t} ctXBG_{krA_3t} / f^{tt} \right)
\end{aligned}$$

$$L1_{ipt} + L2_{ipt} \leq \frac{LS_{ipt} + 2MS_{ipt} + US_{ipt}}{4} \quad \forall i p t \quad \text{(رابطه ۴۲)}$$

$$E_{dt} \geq d^{min} \frac{Ld_{dt} + 2d_{dt} + Ud_{dt}}{4} \quad \forall d t \quad \text{(رابطه ۴۳)}$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل ارائه می‌شود. این نتایج شامل تحلیل عملکرد مدل در راستای دستیابی به اهداف مختلف از جمله کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی زیست‌محیطی و کاهش تأثیرات اجتماعی است. همچنین، ارزیابی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای کلیدی مانند عرضه و تقاضای فازی و نوسانات قیمت مواد اولیه انجام شده است. برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای مورد استفاده در مدل، از مطالعات پیشین در این حوزه استفاده شده و مفروضات کلیدی در جدول ۶ ارائه شده‌اند تا شفافیت بیشتری به فرآیند مدل‌سازی اضافه گردد.

جدول ۶. مفروضات و مقادیر برخی از پارامترهای مدل

پارامترها	مفروضات، مقادیر و توضیحات
$\widetilde{S}_{ipt}$	تعداد ۹ مزرعه جهت برداشت زیست‌توده چوب و درخت پالونیا فرض شده است. پیش فرض دوره اول امکان برداشت حدود ۳۰ تن زیست‌توده از هر مزرعه می‌باشد
$\widetilde{d}_{dt}$	تعداد ۵ مرکز تقاضای مختلف جهت برق تولیدی با تقاضا در دوره اول حدود ۴۰ مگاوات بر متر مکعب
$Yws1_{j_1}$	تعداد ۳ انبار قابل احداث با ظرفیت‌های ۶، ۷ و ۸ تن در هر دوره
$Yws2_{j_2}$	تعداد ۴ انبار استیجاری با ظرفیت‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ تن در هر دوره
$Ywc_{kk'}$	تعداد ۹ مرکز پیش‌پردازش، هر مرکز با سه ظرفیت مختلف ۵، ۷ و ۹ تن در هر دوره
YBG_r	تعداد ۵ تأسیسات بیوگاز با ظرفیت‌های ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ مگاوات در هر دوره
$Cfws1_{j_1t}$	هزینه ثابت دایر کردن هر انبار قابل احداث، حدود ۸۰ میلیارد تومان در هر دوره
$Cfws2_{j_2t}$	هزینه ثابت جهت اجاره یک‌ساله هر انبار استیجاری، حدود ۲۰ میلیارد تومان در هر دوره
$Cfwc_{kk't}$	هزینه ثابت دایر کردن هر مرکز پیش‌پردازش، حدود ۱۰۰ میلیارد تومان در هر دوره
$CfBG_{rt}$	هزینه ثابت دایر کردن هر تأسیسات بیوگاز، حدود ۱۵۰ میلیارد تومان در هر دوره
$\widetilde{cv}_t$	هزینه خرید هر تن زیست‌توده، حدود ۵۰۰ میلیون تومان در هر دوره
cvw_{ip}	هزینه دستمزد جمع‌آوری هر تن زیست‌توده ۳۰ تا ۵۰ هزار تومان در هر دوره
ct	هزینه مصرف سوخت برای حمل و نقل، ۳ هزار تومان بازای هر کیلومتر در هر دوره
f^{pt}	میزان مصرف سوخت برای کامیون ۰.۶ لیتر در هر کیلومتر در هر دوره
f^{tt}	میزان مصرف سوخت برای حمل و نقل تریلی مخزن‌دار ۰.۴ لیتر در کیلومتر در هر دوره
ept	ضریب انتشار CO2 برای حمل و نقل با کامیون ۰.۰۰۰۶ گرم در کیلومتر در هر دوره
ett	ضریب انتشار CO2 برای حمل و نقل با تریلی مخزن‌دار ۰.۰۰۲۳ گرم در کیلومتر در هر دوره

نتایج کاربرد روش اپسیلون محدودیت^۱: از آنجاکه مدل ارائه شده سه هدف اصلی (پایداری) را دنبال می‌کند، ضروری است از روشی استفاده شود که هر سه هدف را به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار دهد تا بتوان به بهترین راه‌حل ممکن دست پیدا کرد. در روش پیشنهادی مدل ارائه شده در نرم‌افزار گمز ورژن (۲۴.۸) اجرا و نقاط پارتویی با بهینه‌سازی هر یک از توابع هدف به‌صورت مجزا به دست آمدند که نتایج آن در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷. مقادیر توابع هدف

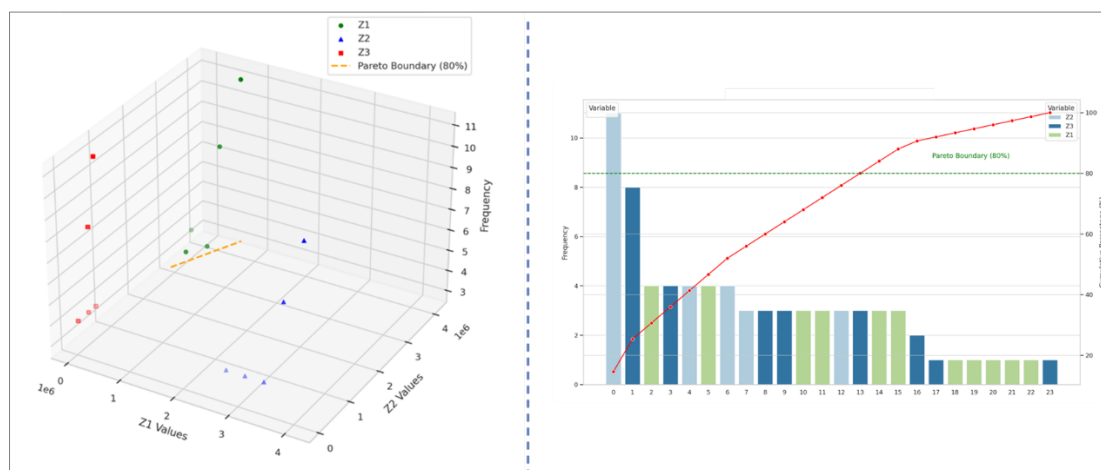
Z1	Z2	Z3
۱۳۴.۳۶۰۱۶۸	۴۱۴۳۰۰۰	۱۲.۹۲۰

برای ایجاد مجموعه‌ای از نقاط پارتویی، با در نظر گرفتن یکی از توابع هدف به‌عنوان هدف اصلی و بقیه به‌عنوان اهداف فرعی و با استفاده از سه مقدار محدودیت برای هر هدف، مجموعه‌ای از نقاط پارتویی تولید گردید (جدول ۸). هدف از این کار، یافتن بهترین ترکیب‌ها برای توابع هدف بود که با استفاده از روش اپسیلون محدودیت ارائه شد و مرز پارتو مشخص گردید تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند با آگاهی از تبادله‌ها، مناسب‌ترین گزینه را برای بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب کنند.

جدول ۸. ترکیب‌های بهینه نقاط پارتو برای توابع هدف

Z1	Z2	Z3
۳۶۳۴۳۷.۳۸۵	۴۱۴۳۰۰۰	۷۲۲.۱۱
۶۴۷۲۲۱.۰۷۸	۲۷۹۱۲۰۰	۲۶۵.۲۷
۵۷۳۸۵۰.۱۴۵	۳۱۲۹۱۵۰	۸۷۶.۲۲
۵۰۲۱۳۴.۹۳۶	۳۴۶۷۱۰۰	۹۰۳.۱۸
۴۳۰۹۵۴.۹۵۵	۳۸۰۵۰۵۰	۰۲۸.۱۶
۳۶۰۱۶۸.۱۳۴	۴۱۴۳۰۰۰	۹۲.۱۲

شکل ۳ دو نمودار پارتویی دوبعدی و سه بعدی توابع هدف، به همراه مرز پارتو در هر کدام را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. تحلیل سه‌بعدی و دوبعدی مرز پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف

نمودار سه‌بعدی روابط بین متغیرهای Z1، Z2 و Z3 را به صورت هم‌زمان نمایش می‌دهد و نقاط پارتویی را به عنوان ترکیب‌های بهینه مشخص می‌کند. مرز پارتو نشان‌دهنده نقاطی است که بهینه‌سازی یک هدف بدون قربانی کردن دیگری ممکن نیست که این تبادله‌ها به تصمیم‌گیری بهتر کمک می‌کنند. نمودار دوبعدی فراوانی هر ترکیب و درصد تجمعی آن‌ها را نشان می‌دهد؛ مرز پارتو با یک خط افقی سبزرنگ مشخص شده است.

مدل پژوهش در سه دوره زمانی اجرا گردید. در هر دوره داده‌های عرضه با توجه به پیش‌بینی افزایش تعداد نقاط برداشت زیست‌توده چوب و درخت پالونیا، با افزایش نرخ یکنواخت ۵۰ درصد و داده‌های تقاضا نیز با در نظر گرفتن افزایش جمعیت (تعداد خانوارها در هر منطقه)، با افزایش نرخ ۵۰ درصد تنظیم شده است. جدول ۹ نتایج حاصل از حل مدل در طی سه دوره را نمایش می‌دهد. اهداف اصلی مدل شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها، حداقل نمودن تقاضای برآورده نشده و کاهش انتشار کربن (تأثیرات زیست‌محیطی) است.

جدول ۹. نتایج کلی حل مدل ریاضی چندهدفه فازی

جزئیات	مقادیر بهینه در هر دوره به تفکیک			مقادیر بهینه در کل دوره
	T=۳	T=۲	T=۱	
هزینه ثابت دایر کردن انبارها	۴۳۲.۰۰۰	۳۷۲.۰۰۰	۲۲۸.۰۰۰	۴۱۱.۰۰۰
هزینه ثابت دایر کردن مراکز پیش‌پردازش	۲۱۲۱.۰۰۰	۱۹۱۹.۰۰۰	۱۰۱۰.۰۰۰	۱۵۱۵.۰۰۰
هزینه ثابت دایر کردن تأسیسات بیوگاز	۱۶۵۹.۹۴۳	۱۴۶۷.۹۲۱	۷۵۷.۵۵۵	۱۲۹۱.۳۷۴
هزینه حمل‌ونقل (متغیر)	۴۳۴۶۸۶.۲۵۰	۳۸۵۸۶۸.۱۹۴	۱۹۳۷۶۵.۳۳۷	۳۳۷۳۰۵.۴۲۳
تأثیر محیط زیستی (میزان انتشارات CO2)	۲۰.۳۳۲	۱۸.۸۴۴	۸.۶۱۹	۱۴.۵۸۹
تقاضای برآورده نشده	۶۴.۲۰۰	۵۷.۳۰۰	۳۹.۷۰۰	۶۰.۵۰۰
تعداد مزارع جمع‌آوری زیست‌توده	۷	۵	۳	۷
تعداد انبارهای فعال احداث شده	۲	۰	۰	۲
تعداد انبارهای فعال استیجاری	۳	۳	۳	۳
تعداد مراکز فعال پیش‌پردازش	۳	۲	۲	۳
ظرفیت ۵ تن	۳	۲	۱	۳
ظرفیت ۷ تن	۲	۱	۰	۲
ظرفیت ۹ تن	۵	۳	۲	۵
تعداد تأسیسات فعال بیوگاز				

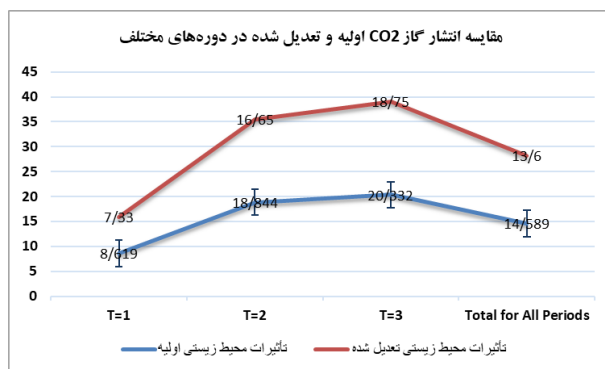
همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، در دوره‌های دوم و سوم با افزایش در میزان عرضه و تقاضا، تعداد مزارع برداشت زیست‌توده، انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در دوره دوم، زمانی که عرضه پیش‌بینی شده زیست‌توده چوب و تقاضای برق با افزایش ۵۰ درصدی مواجه می‌شود، تعداد مزارع جمع‌آوری زیست‌توده چوب، ۵ مکان تعیین شده است. در دوره اول و دوم انباری احداث نمی‌گردد؛ اما دوره سوم با افزایش عرضه و تقاضا ۲ انبار احداث می‌شود. در دوره سوم وقتی تعداد مزارع برداشت ۷ نقطه تعیین می‌شود، تعداد مراکز پیش‌پردازش نیز به ۹ مرکز افزایش می‌یابد که ۲ مرکز با ظرفیت ۹ تن دایر می‌شود. در همین دوره تمام تأسیسات بیوگاز نیز فعال هستند. به همین ترتیب هزینه‌های دایر نمودن تمام تجهیزات و هزینه‌های حمل‌ونقل نیز سیر صعودی پیدا می‌کنند. به همین ترتیب میزان انتشار گاز کربن و تقاضای برآورده نشده در دوره اول نسبت به دوره سوم کمتر نشان داده شده است. شکل ۴ نتایج جدول ۹ را برای هر شاخص کلیدی به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه شاخص‌های کلیدی مدل پژوهش در دوره‌های مختلف

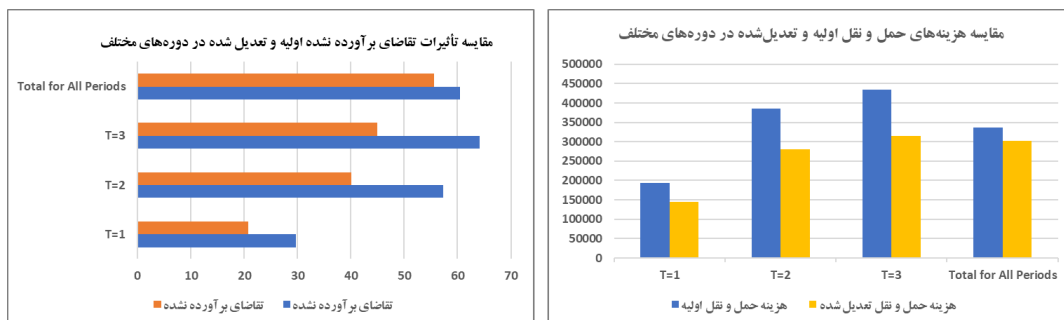
شکل ۴ تحلیل جامعی از شاخص‌های مختلف زنجیره تأمین در دوره‌های زمانی متفاوت ارائه می‌دهد. روند هزینه‌ها نشان می‌دهد که در دوره‌های اول تا سوم، هزینه حمل‌ونقل بیش از سایر هزینه‌ها افزایش یافته است. در بهینه‌سازی کل دوره‌ها نیز، هزینه‌ها به شکل موثرتری کنترل شده‌اند، اما هزینه حمل‌ونقل همچنان بیشترین سهم را دارد. نمودار تأثیرات محیط زیستی نیز افزایش انتشار گاز CO₂ را در دوره‌های مختلف نشان می‌دهد، اما در بهینه‌سازی کل دوره‌ها، انتشار CO₂ به سطح قابل قبولی کاهش یافته است. در خصوص تقاضای برآورده نشده نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. نمودار مقایسه تأسیسات فعال نشان می‌دهد که تعداد تأسیسات (مزارع، انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز) در دوره‌های اول تا سوم افزایش یافته است. در بهینه‌سازی کل سه دوره، تعداد تأسیسات فعال به گونه‌ای بهینه شده که نیازهای تولید و بهره‌وری بیشتر را به خوبی پاسخ دهد، که این امر نشان‌دهنده بهبود عملکرد زنجیره تأمین و بهینه‌سازی جامع عملیات در طول زمان است.

تحلیل حساسیت؛ تحلیل حساسیت به عنوان یک ابزار اساسی برای ارزیابی پایداری و قابلیت اعتماد مدل‌های بهینه‌سازی، نقشی کلیدی در شناسایی و درک اثرات تغییرات پارامترهای ورودی بر نتایج نهایی دارد [۲۵]. در این مطالعه از تحلیل حساسیت به عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری نتایج بهینه‌سازی زنجیره تأمین استفاده شده است. برای این منظور مقادیر انتشار گاز CO₂، هزینه سوخت (به میزان ۳۰ درصد) کاهش و حداقل درصد برق توافق شده (به میزان ۳۰ درصد) افزایش یافت تا تأثیرات این پارامترهای مهم، بر روی هزینه حمل‌ونقل و انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقاضای برآورده نشده مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۵ تحلیل حساسیت انتشار گاز CO₂ را در دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. انتشار CO₂ در دوره‌های اولیه روند افزایشی داشته و در دوره سوم به اوج خود رسیده است. با اجرای اقدامات بهینه‌سازی، این میزان به شکل قابل توجهی کاهش یافته است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که سیاست‌های کاهش انتشار و بهینه‌سازی فرایندها تأثیر مثبتی بر کاهش اثرات زیست‌محیطی داشته و می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی جهت دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری بسیار مؤثر باشد.



شکل ۵. تحلیل حساسیت تأثیرات زیست‌محیطی

شکل ۶ نیز اعمال سیاست تعدیل را بر دو پارامتر تقاضای برآورده نشده و هزینه‌های حمل‌ونقل نمایش می‌دهد. تقاضای برآورده نشده نیز در دوره‌های اول و دوم و سوم افزایش داشته است. اما پس از بهینه‌سازی، مجموع تقاضای برآورده نشده با کاهش روبرو شده که نشان‌دهنده بهبود عملکرد زنجیره تأمین در پاسخگویی به تقاضاها و افزایش سطح خدمات است. همچنین هزینه‌های حمل‌ونقل نیز پس از تعدیل در هر دوره کاهش یافته‌اند. این کاهش بیانگر اثربخشی استراتژی‌های بهینه‌سازی در کنترل هزینه‌های حمل‌ونقل بوده و اهمیت اعمال تغییرات بهینه‌سازی را در کاهش هزینه‌های کلی زنجیره تأمین به‌خوبی نمایش می‌دهد.



شکل ۶. تحلیل حساسیت تقاضای برآورده نشده و هزینه‌های حمل‌ونقل

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و تغییر سبک زندگی منجر به افزایش مصرف انرژی در سراسر جهان شده است. تأمین انرژی از سوخت‌های فسیلی پیامدهای منفی مانند محدودیت‌های تأمین انرژی و انتشار کلی گازهای گلخانه‌ای دارد. همان‌طور که جهان به تکامل خود ادامه می‌دهد، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و یافتن منابع انرژی جایگزین به طور فزاینده‌ای ضروری می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر بهترین راه برای همه کشورها برای کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی و درعین حال کاهش آلودگی است. زیست‌توده به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر یک منبع انرژی جایگزین است که می‌تواند نیازهای انرژی را برآورده کند و به گرمایش جهانی و کاهش تغییرات آب‌وهوایی کمک کند.

در میان بسیاری از گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر، انرژی زیست‌توده به دلیل تنوع منابع و دسترسی آسان از منابع مختلف در تمام طول سال، طیف وسیعی از کاربردها را پیدا کرده است. تضمین تأمین چنین منابع انرژی مبتنی بر یک زنجیره تأمین پایدار و مؤثر است. بهبود هم‌زمان عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره تأمین مبتنی بر زیست‌توده عامل کلیدی برای طراحی شبکه بهینه است. شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به دلیل پیچیدگی‌های خاص و نیاز به هماهنگی بین منابع تجدیدپذیر و فرایندهای تولید، به یکی از حوزه‌های مهم پژوهشی تبدیل شده است. برخلاف زنجیره‌های سنتی، طراحی و بهینه‌سازی این زنجیره نیازمند تصمیم‌گیری‌های دقیق و نوآورانه

در زمینه مکان‌یابی تأسیسات و بهینه‌سازی توزیع است تا بتوان پایداری و کارایی این شبکه را در مواجهه با چالش‌های محیط زیستی و اقتصادی تضمین کرد [۴].

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت و پارامترهای فازی برای زنجیره تأمین سوخت زیستی پیشنهاد می‌شود که در آن، اهداف هزینه کل، تقاضای تأمین نشده و تأثیرات محیط‌زیستی برای در نظر گرفتن جنبه‌های کلیدی پارادایم پایداری توسعه یافتند. مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل شد. تحلیل نتایج مدل نشان می‌دهد که این رویکرد، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری، تأثیرات زیست‌محیطی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اثربخشی مدل پیشنهادی به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی است. همچنین، تفاوت در سطح رضایت ذی‌نفعان و تعداد مزارع، انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز اهمیت تصمیمات استراتژیک در طراحی شبکه و تخصیص منابع را برجسته می‌سازد.

در میان رویکردهای موجود برای مدل‌سازی عدم قطعیت، از جمله برنامه‌ریزی تصادفی، استوار و منطق فازی، انتخاب روش مناسب به ماهیت داده‌ها و ویژگی‌های مسئله بستگی دارد. در این پژوهش، با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات آماری دقیق و وجود عدم قطعیت در پارامترهای برگرفته از منابع مختلف، منطق فازی به عنوان رویکردی مناسب‌تر نسبت به روش‌های مبتنی بر توزیع احتمالات یا کران‌های قطعی انتخاب شد. این روش با بهره‌گیری از بازه‌های فازی و توابع عضویت، امکان مدل‌سازی مؤثر عدم قطعیت‌های موجود را فراهم ساخته است. همچنین، نسبت به رویکردهای مبتنی بر سناریو یا تحلیل بدینانه، از پیچیدگی محاسباتی کمتری برخوردار است و نتایج آن برای تصمیم‌گیرندگان تفسیرپذیرتر است. از این رو، رویکرد فازی در این مطالعه گزینه‌ای واقع‌گرایانه و کارآمد برای طراحی بهینه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی بوده است.

در این مطالعه، از تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی تأثیر نوسانات هزینه‌ها، تقاضا، و انتشار گازهای گلخانه‌ای بر عملکرد کلی زنجیره تأمین سوخت زیستی استفاده شد. نتایج نشان داد که برخی پارامترها، مانند هزینه حمل‌ونقل و انتشار CO₂، به طور قابل توجهی بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و تغییرات جزئی در این پارامترها می‌تواند به تغییرات بزرگی در نتایج منجر شود. این امر بر اهمیت مدیریت دقیق و پایداری پارامترهای کلیدی و همچنین نیاز به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در جهت کاهش عدم قطعیت‌ها و دستیابی به عملکرد بهینه تأکید دارد. تحلیل حساسیت همچنین به شناسایی فرصت‌های بهبود در زنجیره تأمین کمک می‌کند و می‌تواند مبنایی برای تدوین سیاست‌های بهینه و افزایش تاب‌آوری سیستم در برابر تغییرات محیطی باشد.

مطالعه حاضر و نتایج آن با تحقیقات پیشین در زمینه بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی تطابق‌های قابل توجهی دارد. یافته‌های این پژوهش با مطالعات داتا و همکاران (۲۰۱۹) که به ضرورت رویکردهای نوین برای مدیریت و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی پرداخته‌اند، هم‌راستا است [۱۰]. همچنین، بررسی افزایش نرخ خرید سوخت‌های زیستی و مشکلات سرمایه‌گذاری توسط کاندپال و همکاران (۲۰۲۴) با چالش‌های مربوط به هزینه‌های تولید و فراوری که در این تحقیق نیز مطرح شده‌اند، مطابقت دارد [۱۹]. به طور مشابه، مطالعه واسی (۲۰۲۰) که به مسائل کشت زمین و دسترسی به منابع زیستی پرداخته است، با چالش‌های تأمین پایدار مواد اولیه در این تحقیق مرتبط است [۳۵]. نتایج این پژوهش که به تحلیل هزینه‌های حمل‌ونقل و زیرساخت‌های مورد نیاز پرداخته، با یافته‌های عباسی و همکاران (۲۰۱۱) و قدیر و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد [۱، ۲۴].

این تحقیق همچنین با مطالعات آذر و رئوفیان (۲۰۲۰) که از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و GIS برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین بهره برده‌اند، هم‌راستا است و بر اهمیت استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته تأکید می‌کند [۵]. استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر، مانند برنامه‌ریزی فازی و بهینه‌سازی چندهدفه، که توسط تانگ و همکاران (۲۰۱۴) و رانسیکاربوم و پیتاکاسو (۲۰۲۴) پیشنهاد شده، نیز در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است [۲۵، ۳۴]. به علاوه، این مطالعه بر لزوم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی استوار در مدیریت عدم قطعیت‌ها، همانند رویکردهای کیم و همکاران (۲۰۱۱) و ژانگ و ژیانگ (۲۰۱۷)، تأکید دارد [۲۱، ۳۹].

در عین حال، مدل این پژوهش نسبت به مدل رانسیکاربوم و پیتاکاسو (۲۰۲۴) از نظر ساختار شبکه، ابعاد پایداری و سطح تصمیم‌گیری جامع‌تر و کامل‌تر طراحی شده است. برخلاف مدل مذکور که در یک دوره زمانی و با تمرکز بر چهار سطح تولید و مصرف طراحی شده، مدل پیشنهادی در این مطالعه شامل یک ساختار پنج‌سطحی کامل (از مزرعه تا مصرف) است که انبارهای دو منظوره را نیز در دل شبکه جای داده و در قالب یک مساله چنددوره‌ای توسعه یافته است. استفاده از منطق فازی به عنوان رویکردی مستقل برای مدل‌سازی عدم قطعیت، به جای ترکیب با سناریوهای تصادفی، نیز موجب ساده‌سازی تحلیل، افزایش انعطاف‌پذیری و تسهیل تفسیر نتایج گردیده است.

بنابراین، این پژوهش نه تنها به تحلیل چالش‌های موجود در زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی پرداخته، بلکه با توسعه رویکردهای جدید، به بهینه‌سازی پایدار این زنجیره در شرایط عدم قطعیت کمک کرده و یافته‌های پیشین را تأیید و تکمیل می‌کند.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به پیش‌فرض‌های مدل اشاره کرد که ممکن است با پیچیدگی‌های دنیای واقع تطابق نداشته باشند و این موضوع عدم قطعیت‌های پویا را به طور کامل منعکس نمی‌کند. همچنین، اجرای مدل در نرم‌افزار GAMS به دلیل پیچیدگی مسئله و حجم بالای متغیرها، نیازمند زمان محاسباتی طولانی است که تحلیل سریع سناریوها را محدود می‌سازد. تمرکز بیشتر بر جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و عدم بررسی جامع ابعاد اجتماعی نیز از دیگر محدودیت‌ها است.

جهت ارتقای تحقیقات آینده و توسعه پژوهش، پیشنهاد می‌شود که مدل‌هایی جهت مدیریت عدم قطعیت‌های پویا و تغییرات غیرمنتظره در تأمین و تقاضا به کار گرفته شود. در کشور ایران، استفاده از مدل‌های مکانی - زمانی با رویکردهای GIS می‌تواند به بهینه‌سازی مکان‌یابی تأسیسات و شبکه توزیع کمک کند. به محققین آتی پیشنهاد می‌شود اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل را با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به زنجیره تأمین سوخت زیستی در ایران مورد آزمون قرار دهند. همچنین، بررسی سایر ابعاد اجتماعی و فرهنگی، به‌ویژه تأثیر زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی بر جوامع محلی و ایجاد فرصت‌های شغلی در مناطق روستایی، ضروری است. توسعه فناوری‌های بومی و روش‌های محاسباتی دیگر برای کاهش زمان اجرای مدل و افزایش دقت نتایج، به همراه سیاست‌های حمایتی دولت و تسهیلات مالی، می‌تواند به بهبود کارایی و پایداری زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی در ایران کمک کند. همچنین از آنجایی که روش اسپیلون-محدودیت برای حل مساله زنجیره تأمین در ابعاد بزرگ از کارایی لازم برخوردار نیست، لذا پژوهشگران آتی می‌توانند رویکردهای حل فراابتکاری یا الگوریتم‌های هوشمند چندهدفه با بکارگیری معیارهای مرسوم چندهدفه نظیر یکنواختی، گسترش، و پوشش مجموعه را مورد استفاده قرار دهند. جهت افزایش اعتبار نتایج مدل و ارزیابی عملی آن در شرایط واقعی، مطالعات میدانی با استفاده از داده‌های واقعی از پروژه‌های اجرایی یا محیط‌های صنعتی پیشنهاد می‌گردد تا قابلیت تعمیم و کاربست‌پذیری مدل در فضای عملیاتی سنجیده شود.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدهای بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

منابع

1. Abbasi, E., Abu Noori, A., & Mohammadzadeh, M. (2011). Economic evaluation of bioethanol production from sugarcane waste. *Financial Economics*, 161-194. (in Persian)
2. Abbasi, M., Pishvae, M. S., & Mohseni, S. (2021). Third-generation biofuel supply chain: A comprehensive review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129100.
3. Ahn, Y.-C., Lee, I.-B., Lee, K.-H., & Han, J.-H. (2015). Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain network: multi-period deterministic model. *Applied Energy*, 154, 528-542.
4. Awino, F. B., & Apitz, S. E. (2024). Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(1), 9-35.
5. Azar, A., & Raoufian, A. (2010). Optimization of quality function deployment using linear physical programming. Ministry of Science, Research, and Technology - Tarbiat Modares University. (in Persian).

6. Babazadeh, R. (2015). Design of liquid biofuel supply chain network from Jatropha plant in Iran under uncertainty. Ministry of Industrial and Systems Engineering - Tehran University. (in Persian).
7. Bairamzadeh S., & Saidi-Mehrabad M. (2019). An Integrated Hydrocarbon Biofuel and Petroleum Supply Chain: Designing and Planning a Dynamic Supply Chain Network. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 5(2), 97-143 (in Persian).
8. Cambero, C., Sowlati, T., Marinescu, M., & Röser, D. (2015). Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. *International Journal of Energy Research*, 39(4), 439-452.
9. Das, S. K., Vincent, F. Y., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2024). Location-allocation problem for green efficient two-stage vehicle-based logistics system: A type-2 neutrosophic multi-objective modeling approach. *Expert Systems with Applications*, 238, 122174.
10. Datta, A., Hossain, A., & Roy, S. (2019). An overview on biofuels and their advantages and disadvantages. *Asian Journal of Chemistry Asian Journal of Chemistry*, 31(8).
11. Delkhosh, F., & Sadjadi, S. J. (2020). A robust optimization model for a biofuel supply chain under demand uncertainty. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(2), 229-245.
12. Duc, D. N., Meejaroen, P., & Nananukul, N. (2021). Multi-objective models for biomass supply chain planning with economic and carbon footprint consideration. *Energy Reports*, 7, 6833-6843
13. 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.
14. Haghighi, A., & Babapour, A. (2018). Using renewable energy as an effective way to reduce environmental pollution. *Renewable and New Energy*. (in Persian).
15. Jakubowski, M. (2022). Cultivation potential and uses of Paulownia wood: A review. *Forests*, 13(5), 668.
16. Jana, D. K., Bhattacharjee, S., Dostál, P., Janková, Z., & Bej, B. (2022). Bi-criteria optimization of cleaner biofuel supply chain model by novel fuzzy goal programming technique. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 10004.
17. Jiménez, M. (1996). Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*, 4(04), 379-388.
18. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodri, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609.
19. 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*, 273-288. Springer.
20. 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.
21. Kim, J., Realff, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C., & Furtner, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 853-871.
22. Kiwaroun, 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Ren, J., An, D., Liang, H., Dong, L., Gao, Z., Geng, Y., Zhu, Q., Song, S., & Zhao, W. (2016). Life cycle energy and CO2 emission optimization for biofuel supply chain planning under uncertainties. *Energy*, 94, 670-682.
27. Rezaei, M., Chaharsooghi, S., Husseinzadeh Kashan, A., & Babazadeh, R. (2020). Optimal design and planning of biodiesel supply chain network: a scenario-based robust optimization approach. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 111-128 .
28. Salamanca, H., Chang, M., & Tian, X. (2012). Costs and prices for renewable energy development in industrialized countries and applications to China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6, 403-411.
29. Salmannejad, M., Mirghafouri, S. H. A., Andalib Ardakani, D., & Mirfakhraldini, S. H. (2022). Optimization of hospital supply chain under uncertainty: Application of fuzzy goal programming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(1), 161-191. (in Persian)
30. Santibañez-Aguilar, J. E., Morales-Rodriguez, R., González-Campos, J. B., & Ponce-Ortega, J. M. (2016). Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. *Journal of cleaner production*, 136, 224-245.

31. Shavvalpour S., Asadi M., & Ghaderi H. (2018). An Optimization Model for Biofuel Supply Chain. *Iranian Journal of Energy*, 21(1): 123-142. (in Persion).
32. Soleimani, A., & Abrumand Azar, P. (2015). A review of renewable energies and their environmental impacts in Iran. In *International Conference on Research in Science and Technology*. (in Persion)
33. 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.
34. Tang, D. Y. Y., Yew, G. Y., Koyande, A. K., Chew, K. W., Vo, D.-V. N., & Show, P. L. (2020). Green technology for the industrial production of biofuels and bioproducts from microalgae: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1967-1985.
35. Wassie, S. B. (2020). Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. *Environmental systems research*, 9(1), 1-29.
36. Zarei, M., Cherif, A., Yoon, H.-J., Liu, J. J., & Lee, C.-J. (2023). Optimal design of a biofuel supply chain using an augmented multi-objective and TOPSIS method. *Green Chemistry*, 25(10), 4067-4075. (in Persion)
37. Zarrinpour, N., & Khani, A. (2019). Design of second-generation green fuel supply chain from corn waste under uncertainty conditions. *The 16th International Conference on Industrial Engineering*. (in Persion).
38. Zarrinpour, N., & Zahra, A. (2020). A robust optimization model for strategic and operational design of the oil supply chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 10(4), 155-191. (in Persion)
39. Zhang, Y., & Jiang, Y. (2017). Robust optimization on sustainable biodiesel supply chain produced from waste cooking oil
40. Zhou, T., 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.