Iranian Journal of Biosystem Engineering ISNN: 2423-7841
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

The sustainable biofuel supply chain optimization with considering pricing under uncertainty

Leila Abdolmanafi[1] | Babak Javadi[2]✉
1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran. E-mail: Leila.manafi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran. E-mail: babakjavadi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 24, 2024

Revised: Sep. 25, 2024

Accepted: Nov. 4, 2024

Published online: Summer 2024

Keywords:
Sustainability,
Biofuel supply chain,
Biomass,
Uncertainty,
Pricing

ABSTRACT

The increasing population and changing lifestyles have significantly increased the energy demand in today's world. Therefore, the development of renewable energy systems such as biofuels is of paramount importance. However, managing the biofuel supply chain has many challenges due to its complexity and uncertainties. This research investigates the optimization of the biofuel supply chain using a comprehensive approach based on mathematical modeling. In this study, a mixed-integer linear programming model is developed to design a sustainable biomass supply chain. This model, by considering the uncertainty in raw material pricing, helps managers make optimal and efficient decisions. Additionally, using stochastic and robust optimization approaches, the model can manage risks arising from uncertainty. The results of the modeling show that under uncertainty, environmental and social welfare objectives are aligned. In other words, improving environmental performance also leads to increased social welfare. Moreover, changes in environmental costs have a significant impact on the level of social welfare

Cite this article: Abdolmanafi, L., Javadi, B., (2024) The sustainable biofuel supply chain optimization with considering pricing under uncertainty, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (2), 57-78. https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375626.665546
© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375626.665546

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Population growth, changing human lifestyles and rising living standards have led to an increase in energy consumption in industrialized countries. On the other hand, limited energy resources and environmental damage caused by fossil fuel consumption have led to global attention to renewable energy sources. The availability of renewable resources, the amount of abundance, and non-damage to the environment have increased the share of the global energy supply and the amount of attention to renewable energies in line with sustainable development. New research studies show that there is a direct relationship between the level of development in a country and energy consumption. Access to new energy sources in developing countries is important for improving the economic level of these countries. One of the new renewable energies is biomass energy. The importance of biomass in providing its low price is its native abundance and flexibility, which are used directly such as burning, and indirectly such as converting into biofuels.

Advanced production centers are increasingly characterized by their reliance on renewable energy sources such as tides, wind, sun, geothermal heat, and biomass. These renewable energies offer a clean and sustainable alternative to traditional fuels, providing social, environmental, and economic benefits.

However, in today's dynamic economic landscape, decision-makers and supply chain managers face significant uncertainties and challenges in ensuring sustainability throughout the bioenergy supply chain. One key challenge is biomass's seasonality, which can impact the efficiency and reliability of biofuel production.

In today's world, the issue of supply chain is raised as a major competitive advantage to reduce the cost price. Biofuel supply chain management also has many challenges due to its complex nature, including uncertainty in supply, pricing, logistics, production performance, and demand. Therefore, in this study, a model will be presented that will help biofuel supply chain managers design an efficient chain by considering the uncertainty in the pricing of raw materials with optimal tactical and strategic decisions.

Materials and Methods

In this research, a two-stage stochastic linear mixed integer mathematical model based on stochastic uncertainty for the design of a multi-period sustainable biomass supply chain including four levels of known suppliers, potential collection centers, potential biorefineries and combined facilities for biofuel production is developed and presented. Is. This stable stochastic mathematical model includes the economic aspects, the region's environment, and the chain's social welfare.

Results and Discussion

The economic objective is to maximize profit, the environmental aspect is to minimize the effects of greenhouse gases and operational processes, and the social aspect is to maximize the employment of people, the requested rights of employees, and the welfare resulting from the activities of the chain. Solving the model was done using the generalized constraint epsilon optimization method. The efficiency of the model has been checked in GAMS software version 24.2.1.

Conclusion

The developed stochastic model has been analyzed and investigated based on the stochastic data collected from previous studies in biomass. To measure the effectiveness and accuracy of the developed mathematical model, the changes in the reduction of economic profit, the reduction of environmental costs, and the increase of social benefits, the results of the implementation of this model in deterministic, scenario-based, and stable scenario-based random conditions to evaluate and evaluate the usefulness of the model Based on the changes of the parameters, it has been compared and verified that the approximate target values with random data are more optimal in stable stochastic conditions than in scenario oriented uncertainty conditions. The effects of changes in the values of random parameters of this model in 3 groups, capacity group (farm capacity, refinery production capacity, refinery stock storage capacity, and biomass collection center storage capacity), price and cost group (biofuel price, biomass recycling). The price and cost (of processing each biomass unit) and the biofuel demand group in a certain period with changes [-50%-50] have been evaluated and reviewed. The results show that the objectives are relatively opposite in parts of the Pareto front. Economic benefits and environmental costs are more contradictory and incompatible.

contribution statement:

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and

subsequent drafts.

Data Availability Statement:

Data available on request from the authors.

Acknowledgements:

The valuable collaboration of Dear researchers Ms. Behnaz Aghaabdollahian and Mr. Mohammadreza Abdali in this research is greatly acknowledged and appreciated. The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations:

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۵، شماره ۲ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

بهینه سازی زنجیره تامین پایدار سوخت‌زیستی با درنظرگرفتن قیمت گذاری تحت شرایط عدم قطعیت

لیلا عبدلمنافی [۱] | بابک جوادی [۲]✉ |

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: Leyla.manafi@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: babakjavadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۱۴
تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
پایداری،
زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی،
زیست‌توده،
عدم‌قطعیت،
قیمت‌گذاری

چکیده

در دنیای امروز، افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی، تقاضا برای انرژی را به شدت افزایش داده است. از این رو، توسعه سیستم‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سوخت زیستی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، مدیریت زنجیره تأمین سوخت زیستی به دلیل پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود، چالش‌های بسیاری را پیش رو دارد. پژوهش حاضر به بررسی بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی با رویکردی جامع و مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی پرداخته است. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک زنجیره تأمین زیست‌توده پایدار توسعه داده شده است. این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت‌گذاری مواد اولیه، به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات بهینه و کارآمدی اتخاذ کنند. همچنین، با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی تصادفی و استوار، مدل قادر است تا ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت را مدیریت کند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که در شرایط عدم قطعیت، اهداف زیست‌محیطی و رفاه اجتماعی با یکدیگر هم جهت هستند. به عبارت دیگر، بهبود عملکرد زیست‌محیطی به افزایش رفاه اجتماعی نیز منجر می‌شود. همچنین، تغییرات در هزینه‌های زیست‌محیطی تأثیر قابل توجهی بر میزان رفاه اجتماعی دارد.

استناد: عبدالمنافی؛ لیلا، جوادی؛ بابک، (۱۴۰۳) بهینه سازی زنجیره تامین پایدار سوخت‌زیستی با درنظرگرفتن قیمت گذاری تحت شرایط عدم قطعیت، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران*، ۵۵ (۲)، ۷۸-۵۷. https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375626.665546

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375626.665546

مقدمه

با توجه به کاهش شدید منابع سوخت‌های فسیلی و نگرانی روزافزون درباره محیط زیست، توجه به منابع انرژی پایدار بیش از پیش ضروری شده است. در این میان، انرژی‌های نوین مانند انرژی خورشیدی، بادی و زیست‌توده به عنوان جایگزین‌های مناسب برای سوخت‌های فسیلی مطرح شده‌اند. سوخت زیستی به دلیل تجدیدپذیر بودن و انتشار آلاینده‌های کمتر، نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و بهبود کیفیت هوا ایفا می‌کند. تولید سوخت زیستی نه تنها به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به ایجاد اشتغال و توسعه اقتصادی در مناطق روستایی نیز منجر شود. با این حال، توسعه صنعت سوخت زیستی با چالش‌هایی مانند هزینه بالای تولید، رقابت با تولید مواد غذایی و تأمین پایدار مواد اولیه همراه است. برنامه‌ریزی دقیق و جامع برای توسعه این صنعت، با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

امروزه سوخت‌های زیستی[1]به عنوان یکی از منابع انرژی پایدار، پتانسیل بالایی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی[2]و تجدیدناپذیر دارند. استفاده از سوخت‌های فسیلی منجر به گرم شدن زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده و آسیب‌های شدید و جبران‌ناپذیری به محیط زیست وارد می‌کند. بنابراین، استفاده بهینه از ضایعات زیستی از قبیل ضایعات کشاورزی، ضایعات جنگلی و زباله‌های شهری می‌تواند فرصت‌های اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی فراوانی را فراهم کند. زیست‌توده‌ها به عنوان یک منبع انرژی زیستی و کلیدی می‌توانند از بقایای جنگلی، محصولات زراعی انرژی‌زا، جلبک‌ها و زباله‌های کشاورزی تولید شوند. (Chiaramonti et al., 2017). سیستم‌های تولید انرژی زیستی به عنوان یکی از مهمترین راهکارها برای مقابله با چالش جهانی انرژی مطرح شده‌اند. با این حال، وجود عدم قطعیت در بخش‌های مختلف زنجیره تامین این انرژی‌ها، از جمله نوسانات قیمت مواد اولیه و تغییرات در سیاست‌های انرژی، کارایی و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از مهمترین چالش‌ها، فصلی بودن زیست‌توده‌ها به عنوان مواد اولیه اصلی تولید سوخت زیستی است که باعث ناپایداری در عرضه و قیمت این مواد می‌شود.از سوی دیگر، مطالعات نشان می‌دهد که بین سطح توسعه اقتصادی یک کشور و مصرف انرژی رابطه مستقیمی وجود دارد. بنابراین، دسترسی به منابع انرژی پایدار و مقرون به صرفه از جمله انرژی زیست‌توده، برای کشورهای در حال توسعه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انرژی زیست‌توده به دلیل مزایایی همچون تجدیدپذیری، فراوانی در بسیاری از مناطق و قیمت تمام شده نسبتاً پایین، می‌تواند نقش مهمی در توسعه اقتصادی و اجتماعی این کشورها ایفا کند.

با توجه به اهمیت انرژی زیست‌توده، مدیریت موثر زنجیره تامین این انرژی مستلزم در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله نوسانات قیمت، تغییرات در سیاست‌های انرژی و توسعه زیرساخت‌های لازم است. همچنین، تحقیقات و سرمایه‌گذاری در زمینه‌های مختلف مانند بهبود فرآیند تولید، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید، می‌تواند به گسترش استفاده از سوخت‌های زیستی کمک کند.

همچنین در دنیای امروز، مسئله زنجیره تامین به عنوان یک مزیت رقابتی عمده در راستای کاهش قیمت تمام شده مطرح است. مدیریت زنجیره تامین سوخت زیستی نیز به دلیل ماهیت پیچیده آن، با چالش‌های زیادی مواجه است که از جمله آن‌ها می‌توان به عدم قطعیت در تامین، قیمت‌گذاری، لجستیک، عملکرد تولید و تقاضا اشاره کرد (Awudu & Zhang, 2012). نوسانات شدید قیمت مواد اولیه، یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی مدیران زنجیره تامین سوخت زیستی است. برای مقابله با این چالش، در این پژوهش مدلی جامع ارائه می‌شود که به مدیران کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت مواد اولیه، زنجیره‌ای انعطاف‌پذیر و کارآمد طراحی کنند. این مدل با استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی، به مدیران امکان می‌دهد تا تصمیماتی در مورد مکان‌یابی تاسیسات، ظرفیت تولید، مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی حمل و نقل اتخاذ کنند که منجر به کاهش هزینه‌ها، افزایش سودآوری و بهبود عملکرد زنجیره تامین شود.در این تحقیق، یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی تصادفی دو مرحله‌ای استوار در شرایط عدم قطعیت تصادفی برای طراحی یک زنجیره تامین زیست‌توده پایدار چند دوره‌ای شامل چهار سطح تأمین‌کنندگان (معلوم)، مراکز جمع‌آوری بالقوه، پالایشگاه‌های زیستی بالقوه و تسهیلات ترکیبی[3]برای تولید سوخت زیستی از انواع زیست‌توده با در نظر گرفتن سطوح قیمتی عمده فروشی توسعه و ارائه شده است. مدل ریاضی تصادفی پایدار پیشنهادی، با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، به دنبال دستیابی به یک تعادل بهینه در زنجیره تامین سوخت زیستی است. هدف اقتصادی مدل، بیشینه‌سازی سودآوری زنجیره از طریق بهینه‌سازی تصمیمات تولید،

1Biofuel

2. Fossil fuels

۱- منظور از تسهیلات ترکیبی، تسهیلاتی است که در آن امکان تولید سوخت زیستی از انواع زیست توده فراهم است.

توزیع و فروش است. در عین حال، مدل تلاش می‌کند تا با حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های زنجیره را به حداقل برساند. همچنین، جنبه اجتماعی مدل به دنبال بیشینه‌سازی اشتغال‌زایی، بهبود شرایط کار، افزایش حقوق و دستمزد کارگران و ارتقای سطح رفاه جوامع محلی است. این مدل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، به دنبال یافتن راه‌حل‌هایی است که به بهترین شکل ممکن، منافع اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را با هم تطبیق دهد

پیشینهٔ پژوهش

زیست‌توده یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که با توجه به منابع متعدد زیست‌توده و انواع سوخت‌های زیستی، درخصوص تصمیم‌گیری‌های مربوط به تسهیلات، زیست‌توده‌ها و محصولات نهایی با درنظر گرفتن محدودیت‌ها و اهداف کاربردی، مطالعات زیادی انجام شده است. پیشینهٔ بررسی شده در حوزه زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی و زیست‌توده به شرح زیر است:

(Fattahi & Govindan, 2018)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی سناریو محور چند مرحله‌ای برای طراحی پایدار شبکه زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی اتانول چند دوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت تامین زیست‌توده و ریسک اختلال در ظرفیت انبارها با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی با توجه به ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی در یک مطالعه موردی در ایران ارائه کردند. این زنجیره شامل تامین‌کنندگان زیست‌توده، مراکز ذخیره‌سازی بالقوه، مجموعه پالایشگاه‌ها زیستی بالقوه و مراکز تقاضا با درنظر گرفتن مدل‌های حمل و نقل چندگانه، انواع زیست‌توده بقایای جنگلی و کشاورزی، انواع انتشار زیست محیطی، شاخص‌های اجتماعی متعدد و سطح ظرفیت‌های متعدد در تولید، مدل سازی شده است. .

(Chávez et al., 2018)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی چند هدفه برای طراحی پایدار شبکه زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی انعطاف پذیر چند دوره‌ای برای تولید اتانول زیستی از پسماندهای کشاورزی با اهداف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در یک مطالعه موردی در کلمبیا ارائه کردند. این زنجیره شامل تامین‌کنندگان زیست‌توده، مراکز جمع آوری بالقوه، پالایشگاه‌ها زیستی بالقوه و مراکز تسهیلات ترکیبی انواع زیست‌توده از بقایای قهوه، سطح ظرفیت‌های متعدد در مراکز جمع آوری، سطح ظرفیت‌های متعدد در پالایشگاه‌ها، افزایش ظرفیت جایگزین در مراکز جمع‌آوری و افزایش ظرفیت جایگزین در پالایشگاه‌ها، مدل سازی شده است.

(Mahjoub et al., 2020)، در مقاله ای مدل خطی دو هدفه چند دوره‌ای برای طراحی زنجیره‌تامین بیواتانول از زیست‌توده‌های نسل دوم و سوم (زیست‌توده‌های نسل دوم شامل بقایای حیوانی، کشاورزی و گیاه جاتروفا و زیست‌توده نسل سوم شامل ریز جلبک‌ها) با اهداف کاهش هزینه و حداکثر سازی تولید انرژی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد که تولید انرژی از ریز جلبک‌ها و جاتروفا نسبت به زباله‌های زیستی بهینه‌تر است.

(Kang et al., 2020)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی سه مرحله‌ای برای طراحی زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی چند دوره‌ای مبتنی بر ریز جلبک‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی با هدف حداقل سازی هزینه‌ها در یک مطالعه موردی در ایالت تگزاس آمریکا ارائه کردند. این زنجیره شامل پالایشگاه‌های بالقوه، نقاط تقاضای شهری، منابع آب شیرین، منابع دی‌اکسیدکربن و منابع آب فاضلاب ریز جلبک‌ها با در نظر گرفتن ظرفیت‌های متعدد در پالایشگاه‌ها زیستی، گونه‌های متنوع ریز جلبک‌ها و مسیرهای متعدد پالایشگاه‌های زیستی مدل سازی شده است.

(Saghaei et al., 2020)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط غیر خطی تصادفی سناریو محور با محدودیت شانس برای طراحی زنجیره‌تامین برق سبز زیست‌توده چوبی چند دوره‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت در کیفیت مواد، در دسترس بودن مواد و تقاضای بازار با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های زنجیره در یک مطالعه موردی در می‌سی‌سی‌پی ارائه کردند. این زنجیره شامل تامین‌کنندگان، نیروگاه‌های تولید انرژی بالقوه، انبارهای ذخیره‌سازی بالقوه و نقاط مصرف است که با در نظر گرفتن اندازه‌های متعدد انبارها، اندازه‌های متعدد نیروگاه‌های تولید انرژی مدل سازی شده است. برای حل مدل الگوریتم‌های ژنتیک [1] و آنتروپی متقابل بهبود یافته [2] به صورت ترکیبی استفاده شده است.

(Sharma et al., 2020)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی تصادفی دو مرحله‌ای سناریو محور بدون ریسک برای طراحی زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی فصلی با دوره‌های ماهیانه در فصل‌های برداشت و غیر برداشت برای بررسی تاثیر یارانه‌های دولتی بر بخش سوخت‌زیستی(زیست‌توده) سلولزی با اولویت ریسک‌های مختلف نسبت به عدم قطعیت مواد اولیه برای حداقل‌سازی هزینه‌های مورد انتظار

1. Genetic Algorithm (GA)
2. Improved Cross Entropy Algorithm (ICEA)

ارائه کردند. این زنجیره شامل مزارع تولید علف، پالایشگاه‌ها و تسهیلات ترکیبی است که با در نظرگرفتن زیست‌توده‌های متنوع(علف، ذرت، سویا، گندم، پنبه)، ظرفیت سالانه تسهیلات تبدیلی مدل‌سازی شده است. ارزش شرطی تحت ریسک به صورت یک مدل ریسک گریز با رویکرد CVAR بهینه سازی شده است.

(Nur et al., 2021)، مدل تصادفی سناریو محور دو مرحله‌ای برای طراحی زنجیره‌تامین سوخت‌زیستی چند دوره‌ای با در نظر گرفتن کیفیت زیست‌توده غیرقطعی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های زنجیره در یک مطالعه موردی ارائه کردند. این زنجیره شامل تامین‌کنندگان، پالایشگاه‌های بالقوه و انبارهای بالقوه است که با در نظر گرفتن زیست‌توده‌های متنوع، فناوری‌های تبدیلی متعدد، اندازه‌های متعدد انبارها، اندازه‌های متعدد پالایشگاه‌ها و شش مجموعه از ارتباط بین تسهیلات مدل سازی شده است. پارامترهای مختلف کیفیت زیست‌توده وابسته به زمان و آب و هوا (رطوبت، محتوای خاکستر، از دست دادن ماده خشک) در طراحی این زنجیره، نیاز به انبارهای اضافی و نیاز به افزایش میزان سرمایه گذاری اثرگذار است.

(O'Neill et al., 2022)، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی تصادفی سناریور محور دو مرحله‌ای برای زنجیره‌تامین زیست‌توده چند دوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت در یک مطالعه موردی در ایالت میشیگان آمریکا با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های کل و میزان اثرات انتشار گازهای گل‌خانه‌ای ارائه کردند. این زنجیره شامل مزارع برداشت برای انواع ترکیبات زیست‌توده، انبارهای ذخیره‌سازی و پالایشگاه‌ها با در نظرگرفتن مدهای حمل و نقل متعدد و اختیارات مدیریتی متمایز است. در این مدل ریاضی مکان‌یابی انباره‌ها و پالایشگاه‌های زیستی، فناوری‌های تبدیل، تصمیمات حمل و نقل و ... بهینه می‌شود.

(Zahraee et al., 2022)، در پژوهشی نظری تحلیلی انعطاف‌پذیری و پایداری زنجیره‌تامین زیست‌توده کشاورزی هنگام شیوع اپیدمی ویروس کرونا [1]براساس تغییرات تکنولوژیکی، عدم قطعیت‌ها، اختلالات و سیاست‌ها با هدف تحلیل و ارزیابی سیستم‌های تولید و عرضه زیست‌توده کشاورزی و بازیابی این سیستم‌های بعد از این دوران ارائه کردند.[2]

(Zarrinpoor & Khani, 2023)، در پژوهشی به صورت همزمان یک مدل چندهدفه نوین برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی با ادغام تصمیمات مالی، پایداری، تامین‌کنندگان و بازارهای بین‌المللی در نظر گرفتند. معیارهای انتخاب تامین‌کننده با استفاده از روش بهترین–بدترین فازی وزن‌دهی می‌شوند و تامین‌کنندگان با استفاده از روش تاپسیس فازی رتبه‌بندی می‌شوند. یک رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر معیار فازی Me برای مقابله با عدم قطعیت‌های پارامترها به کار گرفته شده است.

(Ransikarbum & Pitakaso, 2024) مدل‌سازی زنجیره تأمین زیست‌توده چوبی به منظور ارتقاء عملکرد مؤثر زیست‌سوخت را در نظر گرفتند. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) با اهداف متعدد برای ارزیابی زنجیره تأمین زیست‌سوخت پیشنهاد می‌شود. سپس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای ارزیابی داده‌های نامطمئن از تصمیم‌گیرندگان اعمال شده و با مدل ریاضی پیشنهادی ادغام می‌شود.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد اکثر کشاورزان اطلاعات کافی در مورد کاشت محصولات دارای انرژی زیست‌توده نسل دوم ندارند. برخی از مطالعات در ادبیات موضوع، عدم قطعیت را در پارامترهایی نظیر عرضه‌ی زیست‌توده، تقاضای سوخت‌زیستی، قیمت مواد اولیه زیست‌توده و سوخت‌های زیستی لحاظ نموده‌اند. تصمیمات تولید زیست‌توده به دنبال پویایی بازار، میزان عرضه، میزان تقاضا و قیمت زیست‌توده تعیین می‌شود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی، به طراحی یک سیاست قیمت‌گذاری بهینه برای زیست‌توده پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، افزایش تولید محصولات زراعی انرژی‌زا و در عین حال، تضمین پایداری زنجیره تامین، رعایت محدودیت‌های حمل‌ونقل، مقابله با عدم قطعیت‌های محیطی و ایجاد یک سیستم مقاوم در برابر تغییرات است. در این پژوهش، قیمت گذاری زیست‌توده مزارع کشت در یک زنجیره پایدار زیست در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، با رویکردی نوآورانه به موضوع قیمت‌گذاری زیست‌توده، به دنبال تعیین یک ساختار قیمتی بهینه برای زیست‌توده تولیدی در مزارع کشاورزی هستیم. هدف از این مطالعه، ایجاد یک زنجیره تامین پایدار برای سوخت‌های زیستی و همچنین رفع خلأ موجود در ادبیات پژوهشی در حوزه قیمت‌گذاری زیست‌توده است. نوآوری اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

طراحی زنجیره‌تامین زیست‌توده پایدار در شرایط غیر قطعی تصادفی

قیمت‌گذاری محصول در مزارع زیست‌توده

---

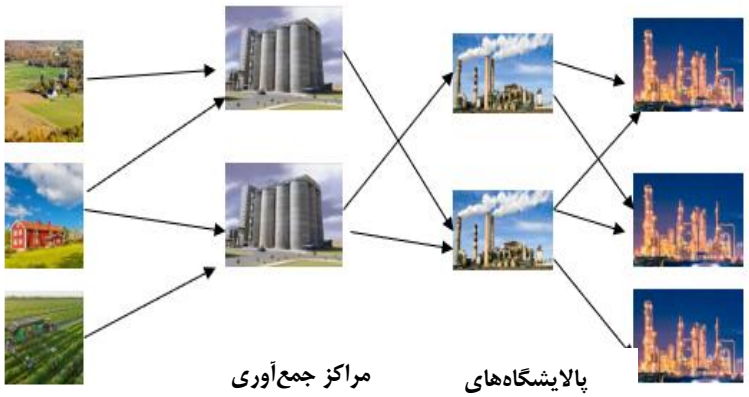
1 COVID-19

حداکثرسازی سود زنجیره
حداقل سازی اثرات انتشار کربن
حداکثر سازی رفاه اجتماعی
استوار سازی مدل مبتنی بر بهینه سازی استوار تصادفی
حل مدل ۳ هدفه با رویکرد بهینه سازی چند هدفه اپسیلون محدودیت تعمیم یافته

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، یک مدل ریاضی جامع برای طراحی یک زنجیره تأمین پایدار چند دوره‌ای برای تولید سوخت زیستی ارائه شده است. این زنجیره شامل چهار سطح اصلی شامل تامین‌کنندگان، مراکز جمع‌آوری، پالایشگاه‌ها و تسهیلات ترکیبی است. با توجه به نوسانات قیمت زیست‌توده، مدل پیشنهادی قادر به در نظر گرفتن این عدم قطعیت است. برای حل این مدل پیچیده، از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ای مانند روش اپسیلون محدودیت تعمیم یافته و روش سناریو محور تصادفی استوار مالوی استفاده شده است. هدف از این پژوهش، یافتن بهترین ترکیب از تأمین‌کنندگان، مراکز جمع‌آوری و پالایشگاه‌ها است که منجر به حداقل شدن هزینه‌ها، حداکثر شدن سود و کاهش اثرات زیست‌محیطی شود. نوآوری اصلی این پژوهش، در نظر گرفتن جنبه‌های پایداری در طراحی زنجیره تأمین و استفاده از یک مدل چند دوره‌ای برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است.

زنجیره تامین زیست‌توده پس از برداشت، زیست‌توده‌ها از مزارع به مراکز تامین و سپس به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند. در مراکز جمع‌آوری، زیست‌توده‌ها آماده‌سازی شده و به پالایشگاه‌های زیستی منتقل می‌شوند. پالایشگاه‌ها، این زیست‌توده‌ها را به سوخت زیستی تبدیل می‌کنند. ظرفیت تولید و نگهداری سوخت زیستی در هر پالایشگاه محدود است و در هر دوره زمانی ممکن است تغییر کند. تمام زیست‌توده دریافتی توسط پالایشگاه، در همان دوره به سوخت زیستی تبدیل می‌شود. سوخت زیستی مازاد، در هر دوره می‌تواند در انبار پالایشگاه نگهداری شده و سپس به تسهیلات ترکیبی فروخته شود .ساختار کلی این زنجیره تامین به شکل ۱ است:



شکل ۱. ساختار زنجیره تامین

در این مدل ظرفیت تولید و تامین مزارع کشت زیست‌توده، ظرفیت ذخیره‌سازی مراکز جمع‌آوری زیست‌توده، ظرفیت تولید در هر سطح پالایشگاه محدود است. سطح زیر کشت زیست‌توده، عملکرد هر هکتار از سطح زیر کشت، تقاضا، ظرفیت تولید پالایشگاه در هر سطح، ظرفیت موجودی پالایشگاه در هر سطح و تعداد مشاغل ایجاد شده توسط هر یک از تسهیلات در شرایط عدم قطعیت تصادفی مبتنی بر سناریو در نظر گرفته شده است. هزینه تولید، برداشت، پردازش و بازیافت انرژی زیست‌توده‌ها در مراکز تامین، هزینه خدمات و بازیابی در مراکز جمع‌آوری زیست‌توده‌ها، هزینه عملیاتی، تولید و نگهداری در هرسطح پالایشگاه‌ها، و بر اساس فاصله بین تسهیلات هزینه حمل و نقل بین هر یک از تسهیلات در نظر گرفته شده است.

متغیرهای تصمیم در این مدل انتخاب مزارع کشت زیست‌توده، احداث و مکان‌یابی مراکز جمع آوری زیست‌توده و پالایشگاه‌های زیستی در هر سطح و متغیرهای مثبت پیوسته برای جریان ارسال بین هر تسهیل با دیگر تسهیل مرتبط برای میزان مقادیر ارسالی در نظر

گرفته شده است. تصمیم‌گیری درباره این که کدام مزارع کشت زیست‌توده انتخاب شود، کجا مراکز جمع آوری زیست‌توده احداث و بازگشایی شود، کدام پالایشگاه و در چه سطحی احداث و بازگشایی شود و نحوه تخصیص جریان ارسالی زیست‌توده از تامین‌کنندگان به مراکز جمع‌آوری زیست‌توده، از مراکز جمع‌آوری زیست‌توده به پالایشگاه‌های زیستی و ارسال مراکز جمع‌آوری زیست‌توده از پالایشگاه‌های زیستی به تسهیلات ترکیبی از تصمیمات اصلی در این زنجیره زیست‌توده است.

مدل ریاضی پیشنهادی، ضمن در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی، به دنبال بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تامین است. هدف اقتصادی، حداکثر سازی سود؛ هدف زیست محیطی، حداقل سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست محیطی عملیات؛ و هدف اجتماعی، حداکثر سازی اشتغال، بهبود حقوق کارگران و افزایش رفاه اجتماعی است. در این مطالعه مفروضات زیر لحاظ می‌شوند:

نوع و ظرفیت وسایل نقلیه معلوم است.
ظرفیت تسهیلات ذخیره‌سازی متناسب با نوع عدم قطعیت برآورد می‌شود.
مکان‌های توزیع مواد اولیه معلوم است.
تعداد دوره‌های زمانی برای برنامه‌ریزی مشخص است.
الزامی در برآورده‌سازی تقاضای مشتری نیست.
در این زنجیره‌تامین چندین نوع زیست‌توده کشت و تامین می‌شود.
شرایط غیر قطعی تصادفی سناریو محور است.
جمع احتمال کل سناریوها باید برابر یک باشد.
تقاضای زیست‌توده به صورت غیر قطعی است.

مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل، پارامترهای ورودی، متغیرهای باینری و مثبت پیوسته، محدودیت‌های مدل با سه هدف پایداری مدل به صورت زیر است.[۱]

اهداف مدل

$$\text{Max } Z_1 = \sum_s AI_s + SAC_s - \left(TC_s + PC_s + IC_s + OC_s + PIC_s\right) \quad \text{رابطه ۱)}$$

$$AI_s = pb_{ts} \times QA_{rcts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$SAC_s = \sum_f \sum_j \sum_t u \times w_{fjts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$TC_s = \sum_f \sum_a \sum_j \sum_t kc_{fajt} \times de_{fa} \times QU_{fajts} + \sum_a \sum_r \sum_j \sum_v \sum_t lc_{arjvt} \times ge_{ar} \times QN_{arjvts} + \sum_r \sum_c \sum_j mc_{rct} \times hc_{rc} \times QA_{rcts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۴)}$$

$$PIC_s = \sum_f \sum_j \sum_t \sum_p price_p \times \vartheta_{fjp} \times \varphi_{fjts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۵)}$$

$$GC_s = \sum_f \sum_a \sum_j \sum_t cg \times QU_{fajts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۶)}$$

$$PC_s = \sum_a \sum_r \sum_j \sum_v \sum_t cc \times QN_{arjvts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۷)}$$

$$IC_s = \sum_r \sum_t h \times I_{rts} \quad \forall s \quad \text{رابطه ۸)}$$

۱. جداول ۸ و۹ که مربوط به پارامترها و علائم ریاضی است، در پیوست درج شده است.

$$OC_s = \sum_a \sum_t n_a \times ii_{ats} + \sum_r \sum_l \sum_t b_{rl} \times Y_{rlts} + \sum_a \sum_v \sum_t e_v \times \omega_{avts} + \sum_f \sum_t m_f \times ff_{fts} \quad \forall s$$ رابطه۹)

$$\text{Min } Z_2 = \sum_s ETC_s + EOC_s$$ رابطه۱۰)

$$ETC_s = \sum_f \sum_a \sum_j \sum_t cet_t \times QU_{fajts} \times EU_{fajt} + \sum_a \sum_r \sum_j \sum_v \sum_t cet_t \times QN_{arjvts} \times EN_{arjvt} + \sum_r \sum_c \sum_t cet_t \times QA_{rcts} \times EA_{rct} \quad \forall s$$ رابطه۱۱)

$$\text{Max } Z_3 = \sum_s Jgf_s + Jga_s + Jgr_s + Jgc_s + Cfs_s$$ رابطه۱۲)

$$Jgf_s = \sum_f \sum_t UEFJ_{ft} \times EFJ_{ft} \times ff_{fts} \quad \forall s$$ رابطه۱۳)

$$Jga_s = \sum_a \sum_t UEFA_{ats} \times EFA_{at} \times ii_{ats} \quad \forall s$$ رابطه۱۴)

$$Jgr_s = \sum_r \sum_l \sum_t UEFR_{rts} \times EFR_{rlts} \times Y_{rlts} \quad \forall s$$ رابطه۱۵)

$$Jgc_s = \sum_c \sum_t UEFC_{cts} \times EFC_{ct} \quad \forall s$$ رابطه۱۶)

$$Cfs_s = \sum_r \sum_c \sum_t \frac{QA_{rcts}}{BIO} \quad \forall s$$ رابطه۱۷)

تابع هدف Z_1 حداکثرسازی سود کل زنجیره‌تامین است. تابع هدف Z_2 حداقل‌سازی میزان انتشار کربن در زنجیره‌تامین را نشان می‌دهد. تابع هدف Z_3، حداکثرسازی رفاه اجتماعی را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های مدل

$$\sum_l Y_{rls} \le 1 \quad \forall r, s$$ رابطه ۱۸)

$$\sum_f QU_{fajts} \ge \sum_r \sum_v QN_{arjvts} \quad \forall a, j, t, s$$ رابطه۱۹)

$$V \times \sum_a \sum_j \sum_v QN_{arvjts} \ge \sum_c QA_{rcts} \quad \forall r, t, s$$ رابطه۲۰)

$$\sum_a \sum_j QU_{fajts} \le ff_{fts} \times \sum_j cf_{fj} \quad \forall f, t, s$$ رابطه۲۱)

$$\sum_r \sum_j \sum_v QN_{arvjts} \le ll_{ats} \times \sum_j O_{aj} \quad \forall a, t, s$$ رابطه۲۲)

$$\mu \times \sum_a \sum_j \sum_v QN_{arjvts} \le \sum_l X_{rl} \times Y_{rlts} \quad \forall r, t, s$$ رابطه۲۳)

$$I_{rts} \le u_{rl} \times Y_{rlts} \quad \forall r, t, s$$ رابطه۲۴)

$$\mu \times \sum_a \sum_j \sum_v QN_{arjvts} + l_{rt} - 1s = \sum_c QA_{rcts} + l_{rts} \quad \forall r, t, s$$ رابطه۲۵)

$$\omega_{avts} \le ii_{ats} \qquad \forall a, v, t, s \qquad \text{رابطه۲۶}$$

$$\sum_r \sum_j QN_{arjvts} \le cta_{av} \times \omega_{avts} \qquad \forall a, v, t, s \qquad \text{رابطه۲۷}$$

$$\sum_j QN_{arjvts} \le ctar_{arv} \times \omega_{avts} \qquad \forall a, r, v, t, s \qquad \text{رابطه۲۸}$$

$$\sum_p price_p \le 1 \qquad \text{رابطه۲۹}$$

$$\sum_a QU_{fajts} + W_{fjts} = \sum_P price_p \times \vartheta_{fjps} \times \varphi_{fjts} \qquad \forall f, j, t, s \qquad \text{رابطه۳۰}$$

$$\sum_r QA_{rcts} + ud_{cts} = d_{cts} \qquad \forall c, t, s \qquad \text{رابطه۳۱}$$

$$ff_{fts}, ii_{as}, Y_{rls}, price_p \in \{0, 1\} \qquad \forall f, a, r, l, p, s \qquad \text{رابطه۳۲}$$

$$QU_{fajts}, QN_{arjvts}, QA_{rcts}, I_{rts}, w_{fts}, ud_{cts} \ge 0 \qquad \forall f, a, r, c, j, v, t, s \qquad \text{رابطه۳۳}$$

محدودیت ۱۸، نشان می‌دهد فقط یک پالایشگاه در یک مکان در یک سطح احداث و بازگشایی در هر سناریو می‌شود. محدودیت ۱۹ و ۲۰، توازن جریان ورود و خروج بین تسهیلات زنجیره را در هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت ۲۱، حداکثر ظرفیت هر مزرعه زیست‌توده را در هر سناریو بیان می کند. محدودیت‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ به ترتیب حداکثر ظرفیت جمع‌آوری، تولید پالایشگاه‌ها و نگهداری موجودی پالایشگاه‌ها را در هر سناریو نشان می‌دهند. محدودیت ۲۵، توازن موجودی در پالایشگاه‌ها را در هر سناریو نشان می‌دهند. محدودیت ۲۶، نشان دهنده این است که در هر سناریو یک مد حمل و نقل در صورتی توسط مرکز جمع‌آوری زیست‌توده استفاده می‌شود که اگر مرکز جمع‌آوری زیست‌توده احداث و بازگشایی شده باشد. محدودیت ۲۷، ظرفیت حمل و نقل برای مرکز جمع‌آوری را در هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت ۲۸، تضمین می‌کند در هر سناریو کل مواد ارسالی با استفاده از یک روش حمل و نقل محدود به ظرفیت آن روش حمل و نقل است. محدودیت ۲۹، اطمینان می‌دهد که فقط یکی از قیمت‌های عمده فروشی مواد اولیه زیست‌توده را انتخاب می‌شود. محدودیت ۳۰، عرضه زیست‌توده براساس قیمت و عملکرد مزارع در هر سناریو را نشان می‌دهد. محدودیت ۳۱، نحوه پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری را در هر سناریو می‌دهد. محدودیت‌های ۳۲ و ۳۳، متغیرهای باینری و مثبت را نشان می‌دهند.

یکی از رایج‌ترین روش‌های بهینه‌سازی بعد از سال ۱۹۹۰ میلادی، در حوزه تحقیق در عملیات و علوم کنترلی برای بهینه‌سازی مدل‌ها در شرایط غیر قطعی، بهینه‌سازی از نوع استوار تصادفی است. (Mulvey et al., 1995)، یک مدل ریاضی مبتنی بر سناریو برای بهینه‌سازی مدل‌ها با پارامترهای غیرقطعی به صورت استوار ارائه داد. در این مدل بهینه‌سازی استوار، دو نوع استواری درنظر گرفته شده است که نوع ۱ استواری جواب و نوع ۲ استواری مدل نام دارد. استواری جواب نشان دهنده این است که در هر سناریوی موجود، جواب‌های خروجی تقریبا بهینه و استواری مدل نشان دهنده این است که در هر سناریوی موجود، جواب‌های خروجی تقریبا شدنی است. در این بهینه سازی، برای استوار ماندن مدل و استوار ماندن جواب در تابع هدف جریمه در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی استوار مالوی، نوعی از برنامه‌ریزی تصادفی است.

در مدل این پژوهش پارامترهای مدل، اهداف و محدودیت‌ها با بکارگیری روش بهینه‌سازی استوار تصادفی مالوی به صورت زیر بازنویسی شد:

پارامتر

λ ضریب کنترل تبادل استواری جواب و مدل

ω میزان جریمه به ازای هر واحد تقاضای برآورده نشده

متغیر

θ_s ضریب خطی سازی در سناریو s ، $\theta_s \geq 0$

δ_s تقاضای پاسخ داده نشده در سناریو s

تابع هدف

$$MaxZ_1 = \sum_s ps_s (AI_s + SAC_s - (TC_s + PC_s + IC_s + OC_s + PIC_s))$$

$$-\lambda \sum_s ps_s (((AI_s + SAC_s - (TC_s + PC_s + IC_s + OC_s + PIC_s))$$

$$+\sum_{s'} ps_{s'} (AI_{s'} + SAC_{s'} - (TC_{s'} + PC_{s'} + IC_{s'} + OC_{s'} + PIC_{s'})))$$

$$+(2 \times \theta_s)) - \omega \sum_s ps_s \times \delta_s$$ رابطه۳۴)

محدودیت

$$\left(\begin{array}{l} \left(AI_s + SAC_s - \left(TC_s + PC_s + IC_s + OC_s + PIC_s\right)\right) - \\ \sum_{s'} ps_{s'} \times \left(\begin{array}{l} AI_{s'} + SAC_{s'} - \\ \left(TC_{s'} + PC_{s'} + IC_{s'} + OC_{s'} + PIC_{s'}\right) \end{array} \right) \end{array} \right)$$
$$+\left(2 \times \theta_{1s}\right) \geq 0 \quad \forall s$$ رابطه۳۵)

$$d_{cts} - \sum_r QA_{rcts} - ud_{cts} = \delta_s \quad \forall s$$ رابطه۳۶)

در رابطه ۳۴، هدف اول مدل با تغییرات بر اساس رویکرد مالوی بازنویسی شده است. محدودیت ۳۵، محدودیت خطی‌سازی شده هدف است. محدودیت ۳۶، میزان تخطی در عدم پاسخ به تقاضا را نشان می‌دهد.

رویکرد بهینه سازی چند هدفه اپسیلون محدودیت تقویت شده

مراحل روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده به شرح زیر است:

استفاده از روش لکسیکوگراف برای تشکیل جدول بازده اهداف

انتخاب یکی از اهداف به عنوان هدف اصلی

تعیین بهترین و بدترین مقدار دیگر اهداف از جدول بازده

تعیین دامنه هر یک از اهداف دیگر

ایجاد برش در دامنه اهداف (مقدار هر یک از این برش‌ها برای هر هدف f_i، به عنوان یکی از ε_iها به کار رود)

تابع هدف اصلی، تابع هدف روش اپسیلون محدودیت و سایر اهداف به شکل محدودیت در مدل قرار می‌گیرد.

مدل به ازای هر یک از مقادیر $\varepsilon_i, \ldots, \varepsilon_k$ حل می‌شود.

اجرای مدل و تشکیل جواب‌های پارتو

روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده برای مدل حداقل‌سازی به شرح زیر است:

$$\mathrm{Min}\left(\mathrm{f}_1(\mathrm{x}) + \mathrm{eps} \times \left(\mathrm{s}_2 + \mathrm{s}_3 + \ldots + \mathrm{s}_\mathrm{n}\right)\right)$$ رابطه۳۷)

$S.t.$

$$\mathrm{f}_2(\mathrm{x}) + \mathrm{s}_2 \leq \mathrm{e}_2$$ رابطه۳۸)

$$\mathrm{f}_2(\mathrm{x}) + \mathrm{s}_3 \leq \mathrm{e}_2$$ رابطه۳۹)

$$\mathrm{f}_\mathrm{n}(\mathrm{x}) + \mathrm{s}_\mathrm{n} \leq \mathrm{e}_\mathrm{n}$$ رابطه۴۰)

$$\mathrm{x} \in \mathrm{N},\ \mathrm{s}_\mathrm{i} \in \mathrm{R}^+$$ رابطه۴۱)

در تابع هدف eps عددی بسیار کوچک است. برای بی‌مقیاس سازی واحدهایی نظیر زمان، مسافت، هزینه و ... تابع هدف در این روش به شکل زیر است:

$$\mathrm{Min}\left(f_1(x)-\mathrm{eps}\times\left(s_2/r_2+s_3/r_3+\ldots+s_n/r_n\right)\right) \quad \text{(رابطه۴۲)}$$

در تابع هدف r_n دامنه هدف nام است.

یافته‌های پژوهش

پس از بیان مسئله و ارائه مدل بر اساس مفروضات در زمینه تولید سوخت‌زیستی از زیست‌توده و در نظر گرفتن قیمت‌گذاری در زیست‌توده، در این قسمت نتایج تحلیل و بررسی داده‌ها برای سنجش اعتبار و تایید صحت به صورت جدول‌های عددی و نمودارها ارائه شده است. مقادیر پارامترهای این فصل به صورت تصادفی از مطالعات پیشین مرتبط در زمینه زنجیره‌های تامین زیست‌توده و سوخت‌های زیستی انتخاب شده است همچنین به منظور حل، از روش دقیق برای حل مدل استفاده شده است. با ارجحیت هدف اقتصادی تشکیل جبهه جواب‌های پارتو این مدل در نمونه مورد آزمایش با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه اپسیلون محدودیت تعمیم یافته انجام شده است. کارایی مدل با اجرای کد پیاده سازی شده آن در نرم افزار GAMS نسخه ۲۴/۲/۱ با لپ تاب ۵ هسته‌ای و با پردازنده GHZ ۴/۵ با حل کننده خطی $CPLEX$ در اندازه نمونه ارائه شده بررسی و آزمایش شده است.

براساس پارامترهای منتخب تصادفی اعتبار سنجی و بررسی تایید صحت مدل توسعه داده شده با استفاده از روش دقیق و تشکیل جبهه جواب‌های پارتو با اپسیلون محدودیت تعمیم انجام شده است. یک نمونه مسئله با اندازه‌های [F]=۴، [A]=۳، [R]=۵، [C]=۷، [J]=۲، [L]=۳، [V]=۳، [P]=۴، [T]=۴، [S]=۴ برای تحلیل و بررسی مدل در نظر گرفته شده است. جبهه نقاط پارتو بر مبنای ارجحیت هر هدف ترسیم و بررسی شده است. در نواحی پارتوی مدل، میزان تضاد و یا سازگاری مشهود بین ۳ هدف تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته است. اهداف مدل به صورت قطعی، تصادفی، استوار تصادفی قیاس و بررسی شده است.

با ثابت نگه داشتن ۲ هدف دیگر، مقدار هدف مورد نظر به شکل تک هدفه بدست آورده شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول۱. مقادیر هر هدف به شکل تک هدفه

هدف	مقدار هدف		
	قطعی	**تصادفی سناریو**	**استوار تصادفی**
اقتصادی	۱۹۹۹۷۵۲/۶۶	۱۵۹۴۰۹۵/۰۷	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵
زیست محیطی	۴۱۱۶۶/۵۴	۲۰۲۸۵۱/۰۳	۹۲۴۱۳/۰۸
اجتماعی	۱۱/۵۷	۱۴/۵۳	۱۴/۵۳

بر اساس اهمیت هر یک از اهداف در تصمیم‌گیری و اولویت هر هدف، هدف اقتصادی و زیست‌محیطی کمینه و هدف اجتماعی بیشینه شده است. این ارزیابی در شرایط قطعیت، تصادفی و عدم قطعیت شدید (استوار تصادفی) و با در نظر گرفتن نمونه‌ای تصادفی از پارامترها و وزن‌دهی هر هدف، انجام شده است:

جدول۲. مقادیر هدف اقتصادی در نواحی نقاط پارتو مبتنی بر ارجحیت هر یک از اهداف

هدف	مقدار هدف اقتصادی		
	اولویت هدف اقتصادی	**اولویت هدف زیست محیطی**	**اولویت هدف اجتماعی**
قطعی	۱۹۹۹۷۵۲/۶۶	۸۸۹/۱۴	۱۹۹۹۷۵۲/۶۶
سناریو	۱۶۵۵۳۶۹/۵۶	۱۹۱۴/۶۹	۱۱۰۸۰۶۵/۴۱
رباست	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۷۵۰/۱۰	۱۰۲۰۸۴۴/۲۸
بهترین جواب	۱۹۹۹۷۵۲/۶۶	۱۹۱۴/۶۹	۱۹۹۹۷۵۲/۶۶

جدول ۲ نشان می‌دهد که وقتی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی با بالاترین اولویت در نظر گرفته می‌شوند، یک تعارض ثابت بین آن‌ها وجود دارد. یعنی با افزایش اهمیت یکی، دیگری کاهش می‌یابد. با این حال، با اولویت دادن به هدف اجتماعی، مقدار هدف اقتصادی به صورت نوسانی تغییر می‌کند. این نوسانات ممکن است به دلیل عوامل تصادفی در مدل باشد. از سوی دیگر، با افزایش اهمیت هدف

اقتصادی، اهداف اجتماعی و اقتصادی به طور کلی هم‌راستا می‌شوند. نتایج بهینه‌سازی استوار نشان می‌دهد که عدم قطعیت در مدل تأثیر زیادی بر سود نهایی دارد و به طور کلی باعث کاهش آن می‌شود.

جدول ۳. مقادیر هدف زیست محیطی در نواحی پارتو مبتنی بر ارجحیت هر یک از اهداف

هدف	مقدار هدف زیست محیطی		
	اولویت هدف اقتصادی	اولویت هدف زیست محیطی	اولویت هدف اجتماعی
قطعی	۴۱۱۶۶/۵۴	۰/۰۰	۴۱۱۶۶/۵۴
سناریو	۲۰۲۸۵۱/۰۳	۰/۰۰	۱۶۳۴۳۹/۴۹
رباست	۹۲۴۱۳/۰۸	۰/۰۰	۷۳۸۹۷/۳۴
بهترین جواب	۴۱۱۶۶/۵۴	۰/۰۰	۴۱۱۶۶/۵۴

جدول ۳ نشان می‌دهد که بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، به ویژه زمانی که یکی از آن‌ها با اولویت بالا در نظر گرفته می‌شود، یک تعارض ذاتی وجود دارد .با اولویت دادن به هدف زیست‌محیطی، هزینه‌های زیست‌محیطی به شدت افزایش می‌یابد .همچنین، با افزایش توجه به هدف اجتماعی، هزینه‌های زیست‌محیطی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که منجر به کاهش رفاه اجتماعی می‌شود .این نشان می‌دهد که بهبود وضعیت زیست‌محیطی اغلب با هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی همراه است. با استفاده از رویکرد استوار تصادفی و کاهش اولویت رفاه اجتماعی، می‌توان تا حدودی هزینه‌های زیست‌محیطی را کاهش داد، اما این امر ممکن است به قیمت کاهش سودآوری و رفاه اجتماعی تمام شود.

جدول۴. مقادیر هدف اجتماعی در نواحی پارتو مبتنی بر ارجحیت هر یک از اهداف

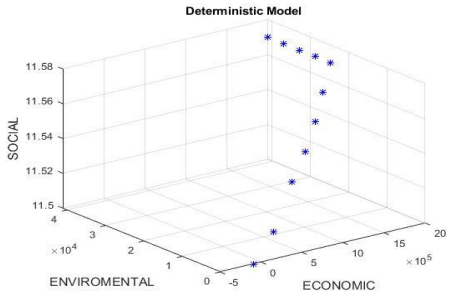
هدف	مقدار اجتماعی		
	اولویت هدف اقتصادی	اولویت هدف زیست محیطی	اولویت هدف اجتماعی
قطعی	۱۱/۵۷	۱۰/۲۱	۱۱/۵۷
سناریو	۱۳/۰۱	۵/۶۷	۱۴/۵۳
استوار	۱۴/۵۳	۵/۶۷	۱۴/۵۳
بهترین جواب	۱۴/۵۳	۱۰/۲۱	۱۴/۵۳

جدول۴ نشان می‌دهد که بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، به ویژه زمانی که یکی از آن‌ها با اولویت بالا در نظر گرفته می‌شود، یک تعارض مستقیم وجود دارد. با اولویت دادن به هدف اجتماعی، هزینه‌های زیست‌محیطی افزایش می‌یابدکه این نشان می‌دهدکه بهبود وضعیت اجتماعی‌اغلب با افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی همراه است. شکل‌های ۲ تا ۱۰ جبهه نقاط پارتو مبتنی بر ارجحیت اهداف نمایش داده شده است. بر اساس این شکل‌ها نقاط پارتو بررسی و تحلیل شده است. در شکل‌های ۲ تا ۴ نقطه جواب‌های پارتو در شرایط قطعیت نشان داده شده است. جواب پارتو در شکل ۲ با ترجیح بیشینه سازی سود اقتصادی در شرایط قطعیت ۱۰ نقطه نشدنی و ۱۱ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. در بیشتر نقاط این جبهه هدف زیست محیطی از مقداری مشخص با کاهش سود اقتصادی در حال کاهش است. اگر هزینه‌های زیست محیطی به صفر برسد، سود اقتصادی درکمترین مقدار قرار می‌گیرد. در زمان بیشینه بودن هدف اجتماعی، مقدار هدف اقتصادی در حداکثر و هدف زیست محیطی تدریجاً نزولی خواهد بود. جواب پارتو در شکل ۳ با ترجیح کمینه سازی هزینه‌های زیست محیطی در شرایط قطعیت کاملاًشدنی و ۲۲ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. در بیشتر نقاط این جبهه هدف زیست‌محیطی از مقداری مشخص با افزایش سود اقتصادی در حال افزایش است و در بازه‌های مشخص سود اقتصادی در مقدار بیشینه قرار می‌گیرد و زمان بیشینه بودن هدف اجتماعی، مقدار هدف اقتصادی در حداکثر و هزینه‌های زیست محیطی در بیشترین مقدار خواهد بود.

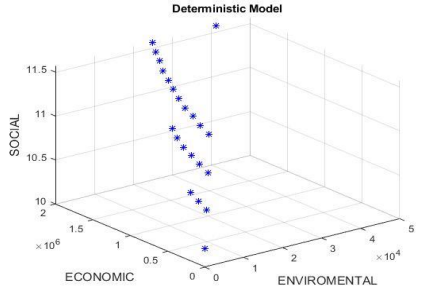
جواب پارتو در شکل ۴ با ترجیح بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی در شرایط قطعیت ۱۰ نقطه نشدنی و ۱۲ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. سود اقتصادی در نیمی از نقاط این جبهه پارتو دراری بیشینه مقدار است و زمانی که رفاه اقتصادی در حد اندک شروع به کاهش کند، سود اقتصادی شروع به کاهش و هزینه‌های زیست محیطی به صورت نوسانی افزایش و کاهش نشان می‌دهند. زمانی که مقدار هدف اجتماعی در کمترین مقدار قرار گیرد، سود اقتصادی بسیار کاهش و هزینه‌های زیست به صفر می‌رسد.

در شکل‌های ۵ تا ۷ نقطه جواب‌های پارتو در شرایط تصادفی مبتنی بر سناریو نشان داده شده است. جواب پارتو در شکل ۵ با ترجیح

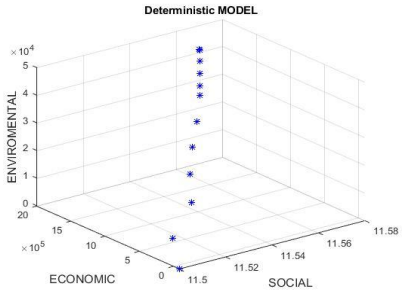
بیشینه سازی سود اقتصادی در شرایط تصادفی ۲ نقطه نشدنی و ۱۱۲ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. مقادیر سود اقتصادی به صورت بازه‌ای از بیشترین مقدار به حداقل مقدار در این جبهه پارتو می‌رسد و زمانی که سود اقتصادی در کمترین مقدار ممکن خود قرار دارد، هدف زیست محیطی حداقل است. در یکی از بازه‌ها زمان بیشینه بودن هدف اجتماعی، مقدار هزینه‌های زیست محیطی به صفر رسیده مقدار هدف اقتصادی کمترین سود را نشان می‌دهد. در این جبهه رفاه اجتماعی از مقدار حداقل خود در چند بازه نوسان نشان می‌دهد و در قسمت‌هایی از جبهه تقریبا صعودی می‌شود تا به حداکثر می‌رسد.



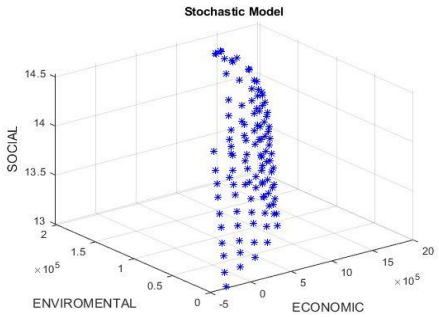
شکل ۲. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف اقتصادی در شرایط قطعی



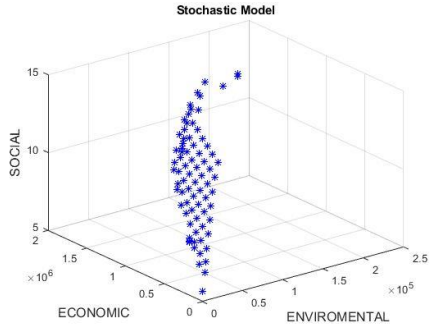
شکل ۳. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف زیست محیطی در شرایط قطعی



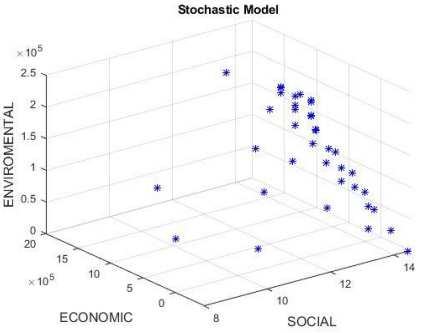
شکل ۴. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف رفاه اجتماعی در شرایط قطعی



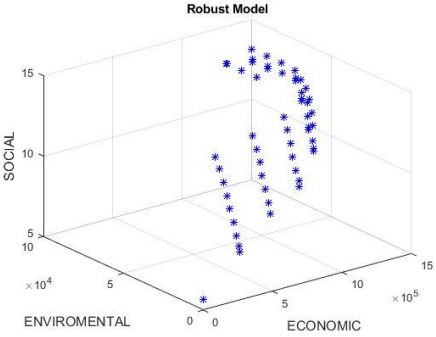
شکل ۵. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف اقتصادی در شرایط تصادفی



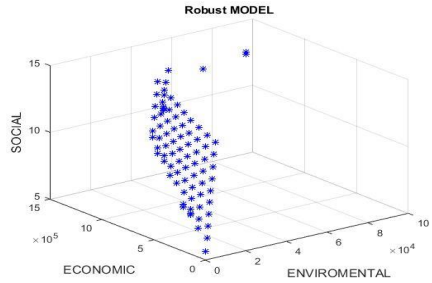
شکل۶. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف زیست محیطی در شرایط تصادفی



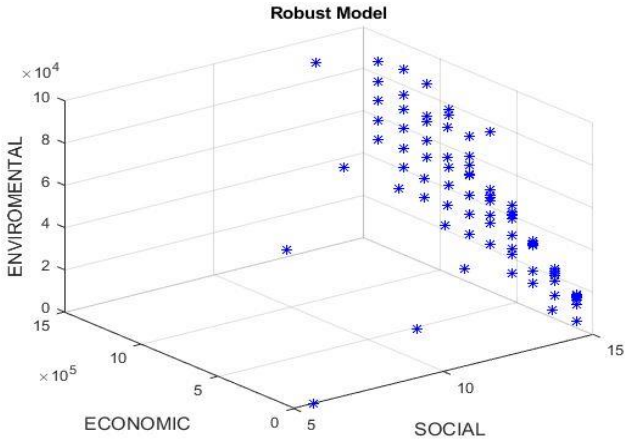
شکل۷. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف رفاه اجتماعی در شرایط تصادفی



شکل ۸. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف اقتصادی در شرایط استوار تصادفی



شکل۹ . ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف زیست محیطی در شرایط استوار تصادفی



شکل ۱۰. ناحیه جواب پارتو با ترجیح هدف رفاه اجتماعی در شرایط استوار تصادفی

جواب پارتو در شکل۶ با ترجیح کمینه‌سازی هزینه‌های زیست محیطی در شرایط تصادفی دارای ۲ نقطه نشدنی و ۵ نقطه بهینه شدنی را نشان می‌دهد. مقادیر سود اقتصادی به صورت بازه‌ای از کمترین مقدار به حداکثر مقدار در این جبهه پارتو می‌رسد و زمانی که سود اقتصادی درکمترین مقدار ممکن خود قرار دارد، هدف زیست محیطی حداقل است. و زمان بیشینه بودن هدف اجتماعی، مقدار هزینه‌های زیست محیطی در حد بالایی قرار دارد و مقدار هدف اقتصادی سود قابل قبولی را نشان می‌دهد. در این جبهه رفاه اجتماعی از مقدار حداقل خود در چند بازه نوسان نشان می‌دهد و در قسمت‌هایی از جبهه تقریبا صعودی می‌شود تا به حداکثر می‌رسد.

جواب پارتو در شکل۷ با ترجیح بیشینه سازی رفاه اجتماعی در شرایط تصادفی دارای ۹ نقطه نشدنی و ۳۶ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سود اقتصادی و هزینه‌های زیست‌محیطی در طول زمان نوساناتی دارند. زمانی که تلاش می‌کنیم هزینه‌های زیست‌محیطی را به صفر برسانیم، سود اقتصادی نیز به شدت کاهش می‌یابد. با این حال، در این حالت، رفاه اجتماعی به بالاترین حد خود می‌رسد. مقایسه با شرایط قطعی نشان می‌دهد که در شرایط عدم قطعیت، سود اقتصادی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نقطه جواب‌های پارتو در شرایط استوار تصادفی نشان داده شده است. جواب پارتو در شکل ۸ با ترجیح بیشینه سازی سود اقتصادی در شرایط استوار تصادفی دارای ۱۰ نقطه نشدنی و ۵۵ نقطه بهینه شدنی بدون تکراری را نشان می‌دهد. مقادیر سود اقتصادی به صورت بازه‌ای از بیشینه مقدار به حداقل نزولی است و زمانی که سود اقتصادی در کمترین مقدار ممکن خود قرار دارد، هدف زیست محیطی حداقل است. زمان بیشینه بودن هدف اجتماعی، مقدار هدف اقتصادی زیست محیطی بسیار در حد قابل قبولی خواهد بود. در برش‌های انتهایی این جبهه مقادیر رفاه اجتماعی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

جواب پارتو در شکل ۹ با ترجیح‌کمینه‌سازی هزینه‌های زیست محیطی در شرایط تصادفی دارای ۲ نقطه نشدنی و ۸۷ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. مقادیر سود اقتصادی به صورت بازه‌ای از کمترین مقدار به حداکثر مقدار خود در این جبهه می‌رسد و زمانی که سود اقتصادی درکمترین مقدار ممکن خود قرار دارد، هدف زیست محیطی حداقل است.

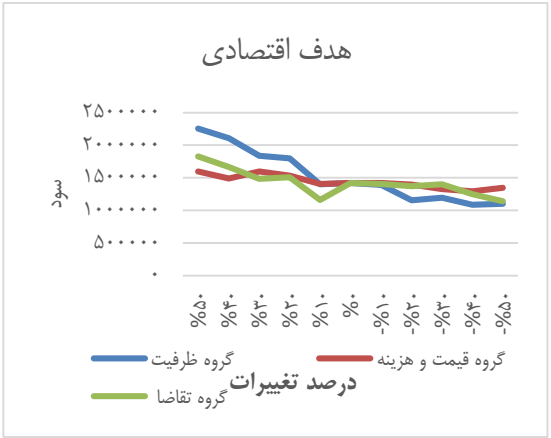
جواب پارتو در شکل ۱۰ با ترجیح بیشینه سازی رفاه اجتماعی در شرایط ۱۰ نقطه نشدنی و ۸۱ نقطه بهینه شدنی بدون تکرار را نشان می‌دهد. سود اقتصادی و هزینه‌های زیست محیطی در بازه‌های متعددی به شکل مقطعی از مقدار حداقل افزایش می‌یابند و زمانی که مقدار هدف اجتماعی در حداقل است سود اقتصادی بسیار کاهش و هزینه‌های زیست محیطی حداقل خواهد شد.

برای سنجش صحت و اعتبار مدل پارامترهای تصادفی و احتمالی مدل بررسی و تحلیل شده است. با توجه به این که در فعالیت‌های تجاری کاهش هزینه اهمیت زیادی دارد، هدف اقتصادی در اولویت قرار گرفته است. اثرگذاری درصد میزان تغییرات پارامترها بر روی مقدار هر یک از اهداف در جدول ۵ نشان داده شده است:

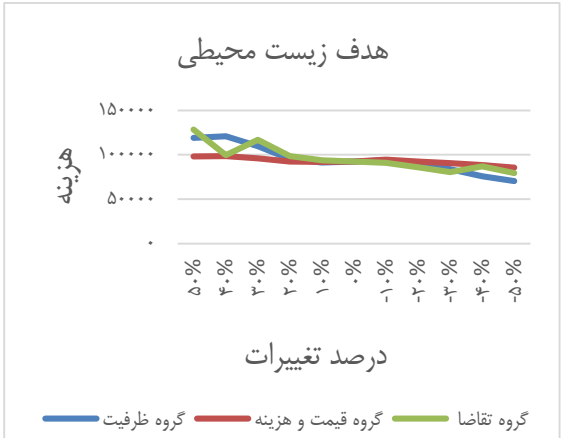
جدول ۵. تحلیل درصد تغییرات پارامترهای تصادفی بر هر یک از اهداف با ارجحیت سود اقتصادی

پارامتر	درصد تغییرات	مقادیر توابع اهداف		
		اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی
میزان تقاضای سوخت‌زیستی	۲۰٪ افزایش	۱۵۰۷۸۴۵/۹۶	۹۸۴۱۳/۰۸	۱۳/۵۷
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۳۷۲۵۰۶/۳۲	۸۵۷۶۵/۴۱	۱۲/۰۸
قیمت سوخت‌زیستی	۲۰٪ افزایش	۱۵۹۶۸۶۷/۵۱	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۷۴
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۲۸۴۰۱۵/۴۴	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۰
سطح زیر کشت مزرعه زیست‌توده	۲۰٪ افزایش	۱۴۶۵۳۸۹/۴۴	۹۱۶۷۸۴/۵۶	۱۲/۴۸
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۳۷۹۷۷۵/۶۱	۹۳۰۶۵/۸۸	۱۲/۴۸
عملکرد هر هکتار از سطح زیر کشت زیست‌توده	۲۰٪ افزایش	۱۴۶۵۳۸۹/۴۴	۹۱۶۷۸۴/۵۶	۱۲/۴۸
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۳۷۹۷۷۵/۶۱	۹۳۰۶۵/۸۸	۱۲/۴۸
ظرفیت تولید پالایشگاه	۲۰٪ افزایش	۱۷۹۹۷۶۸/۲۵	۹۵۳۷۷/۹۸	۱۲/۴۸
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۱۸۶۹۷۴/۱۲	۹۰۸۵۳/۵۵	۱۲/۴۸
ظرفیت نگهداری موجودی پالایشگاه	۲۰٪ افزایش	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	میزان اولیه	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸
	۲۰٪ کاهش	۱۴۱۹۷۶۱/۲۵	۹۲۴۱۳/۰۸	۱۲/۴۸

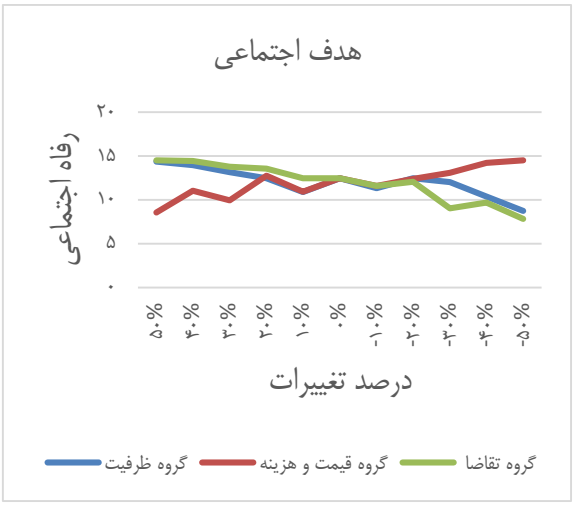
در این بخش، تأثیر تغییرات ۵۰ درصدی (افزایش یا کاهش) در ظرفیت‌ها (مانند ظرفیت مزرعه و پالایشگاه)، قیمت‌ها (مانند قیمت سوخت زیستی و بازیافت زیست‌توده)، هزینه‌ها (هزینه پردازش زیست‌توده) و تقاضا بر اهداف پایداری بررسی شده است. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۱۳-۱۱ ارائه شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که افزایش قیمت سوخت زیستی منجر به افزایش سود اقتصادی اما کاهش رفاه اجتماعی می‌شود. با توجه به نتایج، افزایش سود اقتصادی به عنوان یک اولویت در نظر گرفته شده است تا بتوان همزمان به کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و افزایش رفاه اجتماعی کمک کرد.



شکل ۱۱. مقایسه میزان تغییرات سود اقتصادی مبتنی بر تغییرات ۳ گروه پارامتر

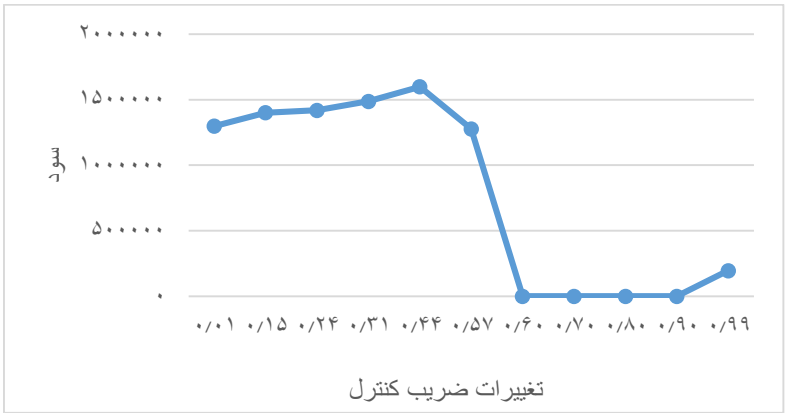


شکل ۱۲. مقایسه میزان تغییرات هزینه‌های زیست محیطی مبتنی بر تغییرات ۳ گروه پارامتر



شکل ۱۳. مقایسه میزان تغییرات رفاه احتماعی مبتنی بر تغییرات ۳ گروه پارامتر

ضریب کنترلی λ تبادل میان استواری جواب و استواری مدل را انجام می‌دهد. در بازه تغییرات ۰ تا ۵ مقادیر سود مقادیر شود افزایشی است. در مقدار ضریب 0/44 نوسانات کاهشی نشان می‌دهد. سپس تا قبل از ضریب 0/99 مقدار بهینه‌ای برای سود مشاهده نمی‌شود. در ضریب 0/99 مقدار ۱۹۵۵۷۸/۴۵ را نشان می‌دهد که بسیار کمتر از سود است. این تغییرات در شکل ۱۴ ترسیم شده است.



شکل ۱۴. مقایسه میزان تغییرات سود اقتصادی مبتنی بر تغییرات ضریب کنترل

برای ارزیابی مدل تصادفی در نمونه مورد آزمایش در ۴ سناریو، از ۳ روش امید ریاضی جواب قطعی سناریوها[1] امید ریاضی جواب سناریوها در مدل تصادفی[2]و امید ریاضی جواب سناریوها در حالت مرجع[3]استفاده شده است. حل مدل ریاضی با روش HN از دو روش WS و EEV سخت‌تر خواهد بود زیرا، در این روش همه سناریوها باید با یکدیگر در نظر گرفته شود. برای تسهیل رویکرد HN در نظر گرفتن کران‌های بالا و پایین Z_{HN} برای کاهش سناریو کاربردی و مناسب است. رابطه بین مقادیر ۳ روش مذکور به صورت زیر است:

$$Z_{WS} \leq Z_{HN} \leq Z_{EEV}$$ رابطه۴۳)

مقادیر Z_{WS} مربوط مربوط به زمانی است که اطلاعات کاملی از آینده مشخص و در اختیار نیست. مقادیر Z_{HN} مربوط مربوط به زمانی است که اطلاعات کامل از داده‌های مدل در اختیار است. مقادیر Z_{EEV} مربوط مربوط به زمانی است که تمامی سناریوها در تصمیمات نقش دارند. این مقادیر بهتر از مقادیری است که تنها مبتنی بر میانگین سناریوها است. شاخص اهمیت جمع آوری اطلاعات آینده و شاخص اهمیت استفاده از بهینه سازی تصادفی به صورت روابط زیر است:

1Wait and See Solution(WS)
2Here and Now Solution (HN)
3Expected result of using the EV(EEV)

$$EVPI = Z_{HN} - Z_{WS}$$ رابطه ۴۴)

$$VSS = Z_{EEV} - Z_{HN}$$ رابطه ۴۵)

بر اساس جدول‌های ۶ و ۷ ارزیابی مدل قطعی و استوار تصادفی در شاخص‌های فوق انجام شده است.

جدول ۶. سناریوهای تصادفی برای ارزیابی مدل استوار تصادفی

ابعاد مسئله f.a.r.c.l.j.v.t.p.s	سناریو	احتمال سناریو	تقاضا	نرخ تبدیل زیست‌توده	عملکرد هر هکتار	هزینه بازیابی
۴،۳،۵،۷،۳،۲،۳،۴،۴،۴	۱	۰/۴۰	(۰/۷۰۰-۱/۰۰۰)	(۰/۶ -۰/۸)	۰/۶۷	۷
	۲	۰/۳۳	(۹۰۰-۷۵۰)	(۰/۵۷ -۰/۷۳)	۰/۷	۸
	۳	۰/۱۲	(۱۷۰۰-۹۵۰)	(۰/۸ -۰/۹)	۰/۸۵	۸
	۴	۰/۱۵	(۸۰۰--۲۰۰۰)	(۰/۷ -۰/۸۵)	۰/۷۳	۵
سناریوی مرجع			(۲۵۰۰-۷۹۰)	(۰/۰-۶۱۵/۸۷۳)	۰/۸۱۲	۷/۷۶

جدول۷. تغییرات مقادیر هدف در سناریوهای مختلف

ابعاد مسئله f.a.r.c.l.j.v.t.p.s	سناریو	احتمال سناریو	مقدار تابع هدف	
			قطعی	استوار تصادفی
۴،۳،۵،۷،۳،۲،۳،۴،۴،۴	۱	۰/۴۰	۲۴۸۷۰۳۴/۵۵	۱۶۲۹۶۵۲/۳۳
	۲	۰/۳۳	۲۰۹۶۳۱۱/۲۷	
	۳	۰/۱۲	۲۱۹۵۶۶۸/۷۳	
	۴	۰/۱۵	۱۹۹۸۲۱۰/۱۵	
سناریوی مرجع			۱۳۰۴۷۹۹/۱۰	

$$Z_{WS} = ۲۴۸۷۰۳۴/۵۵ \times ۰/۴۰ + ۲۰۹۶۳۱۱/۲۷ \times ۰/۳۳ + ۲۱۹۵۶۶۸/۷۳ \times ۰/۱۲ + ۱۹۹۸۲۱۰/۱۵ \times ۰/۱۵$$

$$Z_{HN} = ۲۱۳۳۰۸۶/۱۱ \times ۰/۴۰ + ۱۸۲۴۵۹۲/۳۱ \times ۰/۳۳ + ۱۷۸۴۰۴۴/۶۲ \times ۰/۱۲ + ۱۶۷۷۸۱۵/۰۵ \times ۰/۱۵$$

$$Z_{EEV} = ۲۰۰۹۹۷۵/۰۱ \times ۰/۴۰ + ۱۶۱۱۳۶۹/۷۲ \times ۰/۳۳ + ۱۳۸۶۹۱۲۰ /۰ \times ۳۷/۱۲ + ۱۰۲۸۸۹۱ /۵۸ \times ۰/۱۵$$

$$EVPI = \left|Z_{HN} - Z_{WS}\right| = ۱۹۲۱۱۰۷/۵۱۸۲ - ۲۲۴۹۸۰۸/۳۰۹۲ = ۳۲۸۷۰۰/۷۹۱ \cong -۱۴/۷٪$$

به دلیل شرایط عدم قطعیت موجود سود پیش بینی شده حدود ۱۴/۷٪ کاهش داشته است. یا به تعبیر دیگر تصمیم گیرندگان سیستم برای کسب اطلاعات کامل درباره پارامترهای نامشخص هستند.

$$VSS = \left|Z_{EEV} - Z_{HN}\right| = ۱۶۵۶۵۰۵/۲۲۹ - ۱۹۲۱۱۰۷/۵۱۸۲ = ۲۴۶۶۰۲/۲۸۹۲ \cong -۱۴/۸۹٪$$

نتیجه رابطه فوق نشان می‌دهد که با نادیده گرفتن شرایط عدم قطعیت، سود احتمالی مورد انتظار ۱۴/۸۹٪ کاهش داشته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی تصادفی دو مرحله‌ای استوار در شرایط عدم قطعیت تصادفی برای طراحی یک زنجیره‌تامین زیست‌توده پایدار چند دوره‌ای شامل: چهار سطح تامین‌کنندگان معلوم، مراکز جمع‌آوری بالقوه، پالایشگاه‌های زیستی بالقوه و تسهیلات ترکیبی برای تولید سوخت‌زیستی از انواع زیست‌توده توسعه و ارائه شده است. در این مدل، متغیرهای تصمیم انتخاب مزارع کشت زیست‌توده، احداث و مکان یابی مراکز جمع آوری زیست‌توده و پالایشگاه‌های زیستی در هر سطح و متغیرهای مثبت پیوسته برای جریان ارسال بین هر تسهیل با دیگر تسهیل مرتبط برای میزان مقادیر ارسالی در نظر گرفته شده است. ظرفیت تولید و تامین مزارع کشت زیست‌توده، ظرفیت ذخیره سازی مراکز جمع‌آوری زیست‌توده، ظرفیت تولید در هر سطح پالایشگاه محدود است. این تحقیق شامل ۳ هدف پایدار است: ۱- هدف اقتصادی به منظور بیشینه‌سازی سود، ۲-جنبه زیست محیطی برای حداقل‌سازی تاثیرات گازهای گل‌خانه‌ای و پردازش‌های عملیاتی و ۳-بعد اجتماعی با هدف بیشینه سازی اشتغال افراد، حقوق در خواستی شاغلین و رفاه حاصل از فعالیت‌های زنجیره توسعه و ارائه شده است.

مدل تصادفی توسعه داده شده مبتنی بر داده‌های تصادفی گرد آوری شده از مطالعات پیشین در حوزه زیست‌توده تحلیل و بررسی شده است. برای سنجش کارایی و درستی مدل ریاضی توسعه داده شده، تغییرات کاهش سود اقتصادی، کاهش هزینه‌های زیست محیطی

و افزایش منافع اجتماعی نتایج اجراهای این مدل در شرایط قطعی، تصادفی مبتنی بر سناریو و استوار تصادفی مبتنی بر سناریو برای ارزیابی و بررسی مطلوبیت مدل مبتنی بر تغییرات پارامترها مقایسه و بررسی شده است که به طور تقریبی مقادیر اهداف با داده‌های تصادفی، در شرایط استوار تصادفی بهینه‌تر از شرایط عدم قطعیت سناریو محور است. اثرات تغییرات مقادیر پارامترهای تصادفی این مدل در ۳ گروه شامل: ۱- ظرفیت (ظرفیت مزرعه، ظرفیت تولید پالایشگاه، ظرفیت نگهداری موجودی پالایشگاه و ظرفیت ذخیره سازی مرکز جمع‌آوری زیست‌توده)، ۲- قیمت و هزینه (قیمت سوخت‌زیستی، قیمت بازیافت زیست‌توده و هزینه پردازش هر واحد زیست‌توده) ۳- تقاضای سوخت‌زیستی در یک بازه مشخص با تغییرات [۵۰٪+،۵۰٪-] ارزیابی و بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد اهداف به طور نسبی در قسمت‌هایی از جبهه پارتو تضاد دارند. سود اقتصادی و هزینه‌های زیست محیطی تضاد و ناسازگاری بیشتری دارند. تابع رفاه اجتماعی با سود اقتصادی بیشتر هم راستا و به ندرت تضاد دارد. با توجه به نتایج تغییرات، هزینه‌های زیست‌محیطی بیشترین اثر بر میزان رفاه اجتماعی را دارد. همچنین ارزیابی اهداف پایداری با ارجحیت افزایش سود اقتصادی برای گام برداشتن در تحقق کاهش هزینه‌های زیست محیطی و افزایش رفاه اجتماعی است.

به منظور توسعه مطالعات آینده پیشنهاداتی به صورت زیر قابل ارائه است:

در نظر گرفتن عوامل اثر گذار در قیمت گذاری مانند؛ قیمت سوخت، نرخ سودهای بانکی، نوسانات ارزی و میزان صادرات

در نظر گرفتن چند نوع سوخت‌زیستی به عنوان محصولات نهایی

در نظرگرفتن رقابت در فروش زیست‌توده

در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات و تاب‌آوری زنجیره

در نظر گرفتن پایایی زنجیره در بروز اختلال در شرایط عدم قطعیت

در نظر گرفتن بیشینه‌سازی میزان خلوص سوخت‌های زیستی تولید شده

استفاده از روش الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل

استفاده از دیگر روش های حل دقیق

پیوست

جدول ۸. اندیس‌های به کار رفته در مدل ریاضی

نماد	شرح	نماد	شرح
F	مجموعه مزارع زیست‌توده معلوم	L	مجموعه سطح‌های ظرفیت هر پالایشگاه
A	مجموعه مراکز جمع‌آوری زیست‌توده بالقوه	V	مجموعه مدهای حمل و نقل برای مراکز جمع‌آوری زیست‌توده
R	مجموعه پالایشگاه‌های بالقوه	T	مجموعه دوره‌های زمانی
C	مجموعه تسهیلات ترکیبی معلوم	P	مجموعه قیمت‌ها
J	مجموعه مواد اولیه تهیه سوخت‌زیستی	S	مجموعه سناریوهای احتمالی

جدول ۹. پارامترهای به کار رفته در مدل ریاضی

نماد	شرح	نماد	شرح
pb_{ts}	قیمت سوخت‌زیستی در دوره t در سناریو s	de_{fA}	فاصله حمل و نقل از مزرعه f به مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a
m_f	هزینه ثابت انتخاب مزرعه f	ge_{ar}	فاصله حمل و نقل از مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a به پالایشگاه r
n_a	هزینه ثابت احداث و بازگشایی مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a	hc_{rc}	فاصله حمل و نقل از پالایشگاه r به تسهیلات ترکیبی c
b_{rl} .	هزینه ثابت احداث و بازگشایی پالایشگاه r در سطح l	kc_{fajt}	هزینه حمل و نقل زیست‌توده j ارسال شده از مزرعه f به مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a در دوره t

e_v	هزینه ثابت استفاده از مد حمل و نقل v	lc_{arvjt}	هزینه حمل و نقل زیست‌توده j ارسال شده از مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a به پالایشگاه r. مد حمل و نقل v. در دوره t
u	قیمت بازیافت زیست‌توده	mc_{rct}	هزینه حمل و نقل سوخت‌زیستی ارسال شده از پالایشگاه r به تسهیلات ترکیبی c در دوره t
cc	هزینه پردازش هر واحد زیست‌توده	d_{cts}	حداکثر میزان تقاضای سوخت‌زیستی تسهیلات ترکیبی c در دوره t در سناریو s
cg	هزینه خدمات و بازیابی مراکز جمع‌آوری زیست‌توده	cf_{fj}	حداکثر ظرفیت مزرعه f زیست‌توده j
h	هزینه نگهداری هر واحد سوخت‌زیستی در هر دوره	x_{rls}	حداکثر ظرف تولید پالایشگاه r در سطح lدر سناریو s
ceo_t	هزینه انتشار کربن عملیاتی در دوره t	u_{rls}	حداکثر ظرفیت نگهداری موجودی پالایشگاه r در سطح l در سناریو s
cet_t	هزینه انتشار کربن حمل و نقل در دوره t	o_{aj}	حداکثر ظرفیت ذخیره سازی مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a برای (ماده اولیه) زیست‌توده j
μ	نرخ تبدیل زیست‌توده به سوخت‌زیستی	cta_{av}	حداکثر ظرفیت حمل و نقل مد v در جمع‌آوری زیست‌توده a
ϑ_{fjps}	سطح زیر کشت مزرعه f از مواد اولیه نوع زیست‌توده j هنگام ارائه قیمت p در سناریو s	$ctar_{arv}$	حداکثر ظرفیت حمل و نقل مد v میان جمع‌آوری زیست‌توده a و پالایشگاه r
φ_{fjts}	عملکرد هر هکتار از سطح زیر کشت زیست‌توده j مزرعه f در دوره t. در سناریو s.	EO_{arjt}	میزان انتشار کربن عملیاتی ناشی از (ماده اولیه) زیست‌توده j برای تولید سوخت‌زیستی از مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a به از پالایشگاه r در دوره t
EN_{arjvt}	میزان انتشار کربن حمل و نقل ناشی از ارسال (ماده اولیه) زیست‌توده j از مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a به به پالایشگاه r مد حمل و نقل v در دوره t	EU_{fajt}	میزان انتشار کربن حمل و نقل ناشی از ارسال (ماده اولیه) زیست‌توده j از مزرعه f به مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a در دوره t
EA_{rct}	میزان انتشار کربن حمل و نقل ناشی از ارسال سوخت‌زیستی از به پالایشگاه r به تسهیلات ترکیبی c در دوره t	$UEFJ_{ft}$	نرخ استخد رعه f در دوره t
EFJ_{fts}	تعداد مشاغل ایجاد شده توسط مزرعه f در دوره t در سناریو s	$UEAJ_{at}$	نرخ استخدام مرکز جمع‌آوری a در دوره t
EAJ_{ats}	تعداد مشاغل ایجاد شده توسط مرکز جمع‌آوری زیست‌توده a در دوره t در سناریو s	$UERJ_{rt}$	نرخ استخدام پالایشگاه r در دوره t
ERJ_{rlts}	تعداد مشاغل ایجاد شده توسط پالایشگاه r در سطح l در دوره t در سناریو s	$UECJ_{ct}$	نرخ استخدام تسهیلات ترکیبی c در دوره t
ECJ_{cts}	تعداد مشاغل ایجاد شده توسط تسهیلات ترکیبی c در دوره t در سناریو s	BIO	مقدار سوخت‌زیستی بدست آمده از مواد اولیه زیست‌توده نسل اول

REFERENCES

Awudu, I., & Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 2). https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.016

Chávez, M. M. M., Sarache, W., & Costa, Y. (2018). Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 116*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.001

Fattahi, M., & Govindan, K. (2018). A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: A real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 118.*

https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.08.008

Kang, S., Heo, S., Realff, M. J., & Lee, J. H. (2020). Three-stage design of high-resolution microalgae-based biofuel supply chain using geographic information system. *Applied Energy*, *265*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114773

Mahjoub, N., Sahebi, H., Mazdeh, M., & Teymouri, A. (2020). Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model. *Journal of Cleaner Production*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120355

Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, *43*(2). https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264

Nur, F., Aboytes-Ojeda, M., Castillo-Villar, K. K., & Marufuzzaman, M. (2021). A two-stage stochastic programming model for biofuel supply chain network design with biomass quality implications. *IISE Transactions*, *53*(8). https://doi.org/10.1080/24725854.2020.1751347

O'Neill, E. G., Martinez-Feria, R. A., Basso, B., & Maravelias, C. T. (2022). Integrated spatially explicit landscape and cellulosic biofuel supply chain optimization under biomass yield uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, *160*. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107724

Ransikarbum, K., & Pitakaso, R. (2024). Multi-objective optimization design of sustainable biofuel network with integrated fuzzy analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122586

Saghaei, M., Ghaderi, H., & Soleimani, H. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*, *197*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117165

Sharma, B. P., Yu, T. E., English, B. C., Boyer, C. N., & Larson, J. A. (2020). Impact of government subsidies on a cellulosic biofuel sector with diverse risk preferences toward feedstock uncertainty. *Energy Policy*, *146*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111737

Zahraee, S. M., Shiwakoti, N., & Stasinopoulos, P. (2022). Agricultural biomass supply chain resilience: COVID-19 outbreak vs. sustainability compliance, technological change, uncertainties, and policies. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100049

Zarrinpoor, N., & Khani, A. (2023). A biofuel supply chain design considering sustainability, uncertainty, and international suppliers and markets. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(15). https://doi.org/10.1007/s13399-022-02804-7