Ind. Manag. Persp. 2024, 14(3), 189-211; doi: 10.48308/JIMP.14.3.189

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Integration and Development of Fuzzy QFD for Evaluation and Selection of Biofuel Development Strategies

Elham Mohseni*
Dariush Mohammadi Zanjirani**

Extended Abstract

Introduction: In order to achieve sustainable development goals and reduce dependence on fossil fuels, biofuels are considered a sustainable and environmentally friendly alternative. The biofuels industry can increase energy security by diversifying energy sources and reducing reliance on fossil fuel imports. However, evaluating and selecting the best solutions for its development requires the use of appropriate methodologies.

Metods: This research is practical in nature and can be considered descriptive-survey research, as it focuses on identifying and ranking the challenges, strategies, and solutions for the development of biofuels. In this article, the integration and development of the quality function deployment (QFD) method are used to evaluate and select biofuel development strategies. Based on this approach, after reviewing the theoretical framework and collecting expert opinions through the fuzzy Delphi method, the challenges, strategies, and operational solutions for biofuel development were identified. Then, using a two-stage fuzzy QFD, the importance of strategies against challenges and the weight of solutions against strategies were assessed. In the final stage, by integrating and developing QFD with the TOPSIS method, the ranking of biofuel development solutions was conducted.

Result and Discussion: A systematic review of the theoretical framework identified the most important challenges and obstacles to the sustainable development of biofuels, which were categorized into four dimensions: economic, technical, environmental, and socio-political. The 20 challenges extracted from the theoretical framework were screened using the fuzzy Delphi method and reduced to 13 challenges after aggregating expert opinions. In the next step, the experts selected the best and worst challenges and compared the importance of other challenges to them. After aggregating the opinions and formulating the non-linear mathematical model, the challenges' weights were calculated using Lingo software. Based on the results of the Best-Worst Method (BWM), "unstable supply of raw materials and energy" and "lack of cost-effective innovations and technologies" were identified as the most and least important challenges, respectively.

Received: Mar. 20, 2024; Revised: May. 27, 2024; Accepted: Jul. 28, 2024; Published Online: Sep. 21, 2024.

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

Ind. Manag. Persp. 2024, 14(3), 189-211; doi: 10.48308/JIMP.14.3.189

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

In the first phase of the QFD method, the strategies for addressing these challenges were weighted. According to the experts, the strategies of "research and development of programs to improve the biofuel production process" and "research and development of new and advanced technologies for biofuel production" were identified as the most important strategies. In the final phase of QFD, 10 executive solutions for biofuel development were evaluated and ranked against the prioritized strategies. The three top-ranked solutions were: establishing and enhancing standards, supporting sustainable producers, and protecting biodiversity.

Conclusions: Biofuels will play a crucial role in the future, but their production faces certain challenges. The unstable supply of raw materials and energy is one of the most significant challenges identified in this study. The implementation solutions proposed in this study can contribute effectively to biofuel production. In general, promoting environmental sustainability involves actions such as increasing the use of renewable resources, reducing reliance on non-renewable resources, promoting biofuels, improving energy efficiency, and managing waste and industrial effluents effectively.

Keywords: Renewable resources; Sustainable energy; Fossil fuels; Biofuels; Fuzzy QFD.

How to Cite: Mohseni, Elham; Mohammadi Zanjirani, Dariush (2024). Integration and Development of Fuzzy QFD for Evaluation and Selection of Biofuel Development Strategies. *Ind. Manag. Persp.*, 14(3), 189-211 *(In Persian)*.

Copyright: © 2024 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/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۴، شماره ۳، صص ۱۸۹– ۲۱۱، doi: 10.48308/JIMP.14.3.189

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

تلفیق و توسعه QFD فازی در ارزیابی و انتخاب راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی

الهام محسنی*

داریوش محمدی زنجیرانی**

چکیده

مقدمه و هدف: در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار و نیز کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، سوخت‌های زیستی به‌عنوان جایگزینی پایدار و طرف‌دار محیط‌زیست مطرح هستند. صنعت سوخت‌های زیستی می‌تواند با تنوع‌بخشی به منابع انرژی، امنیت انرژی را افزایش داده و وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد؛ اما ارزیابی و انتخاب بهترین راهکارهای توسعه آن، نیازمند به‌کارگیری روش‌های مناسبی است.

روش‌ها: این پژوهش از نظر هدف، کاربردی است و به دلیل اینکه به شناسایی و رتبه‌بندی چالش‌ها، راهبردها و راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی می‌پردازد، می‌توان آن را پژوهش توصیفی ـ پیمایشی محسوب کرد. در این مقاله، از توسعه و تلفیق روش گسترش کارکرد کیفیت، برای ارزیابی و انتخاب راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی استفاده شده است. بر همین مبنا، با مرور چارچوب نظری و بررسی نظرات خبرگان طی روش دلفی فازی، چالش‌ها و راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی و نیز راهکارهای اجرایی آن شناسایی شدند. سپس، با استفاده از یک QFD فازی و دومرحله‌ای، درجه اهمیت استراتژی‌ها در مقابل چالش‌ها و وزن راهکارها در مقابل استراتژی‌ها ارزیابی شد و در مرحله آخر با تلفیق و توسعه QFD با روش تاپسیس، به رتبه‌بندی راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی پرداخته شد.

یافته‌ها: با بررسی سیستماتیک چارچوب نظری، مهم‌ترین چالش‌ها و موانع توسعه پایدار سوخت‌های زیستی شناسایی و در ۴ بعد چالش‌های اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی طبقه‌بندی شدند. ۲۰ چالش استخراج شده از چارچوب نظری با استفاده از روش دلفی فازی و تجمیع نظر کارشناسان، غربالگری و به ۱۳ چالش تقلیل داده شد. در مرحله بعد، خبرگان پژوهش، بهترین و بدترین چالش را انتخاب و اهمیت سایر چالش‌ها را با آنها مقایسه نمودند. پس از تجمیع نظرات و فرموله نمودن معادله ریاضی غیرخطی و حل آن توسط نرم‌افزار لینگو، وزن چالش‌ها محاسبه شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳.

* 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

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۴، شماره ۳، صص ۱۸۹– ۲۱۱، doi: 10.48308/JIMP.14.3.189

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

بر مبنای وزن‌های حاصل از اجرای روش بهترین-بدترین (BWM)، "تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی" و نیز "فقدان نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های به‌صرفه" به ترتیب مهم‌ترین و کم اهمیت‌ترین چالش‌های شناسایی شده بودند. استراتژی‌های مقابله با چالش‌های توسعه سوخت‌های زیستی در فاز اول روش گسترش کارکرد کیفیت، تعیین وزن گردیدند. بر این اساس و طبق نظر خبرگان پژوهش، راهبردهای "تحقیق و توسعه برنامه‌های بهبود فرایند تولید سوخت‌های زیستی" و "تحقیق و توسعه فناوری‌های جدید و پیشرفته برای تولید سوخت‌های زیستی" به‌عنوان مهم‌ترین استراتژی توسعه سوخت‌های زیستی شناخته شدند. در مرحله پایانی و در فاز دوم QFD، ۱۰ راهکار اجرایی توسعه سوخت‌های زیستی، در مقابل راهبردهای اولویت‌بندی شده، مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفتند و سه راهکار اصلی دارای اولویت عبارت بودند از: ایجاد و ارتقای استانداردها، حمایت از تولیدکنندگان پایدار و حفاظت از تنوع زیستی.

نتیجه‌گیری: سوخت‌های زیستی نقش مهمی در آینده ایفا می‌کنند، اما در تولید این انرژی‌های تجدیدپذیر چالش‌هایی هم وجود دارد. تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی از مهم‌ترین چالش‌های یافت شده در این مطالعه است. راهکارهای اجرایی این مطالعه نیز نقش مؤثری در تولید سوخت‌های زیستی ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، ارتقای پایداری زیست‌محیطی شامل اقداماتی است که به افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر، کاهش استفاده از منابع غیرقابل‌تجدید، ارتقا استفاده از سوخت‌های زیستی، بهبود کارایی انرژی و مدیریت مؤثر پسماند و پساب‌های صنعتی متمرکز می‌شود.

کلیدواژه‌ها: منابع تجدیدپذیر ؛ انرژی پایدار؛ سوخت‌های فسیلی؛ سوخت‌های زیستی؛ گسترش کارکرد کیفیت فازی.

استناددهی: محسنی، الهام؛ محمدی زنجیرانی، داریوش (۱۴۰۳). تلفیق و توسعه QFD فازی در ارزیابی و انتخاب راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۳)، ۱۸۹– ۲۱۱.

Copyright: © 2024 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/).

۱. مقدمه

با گذشت زمان و در نتیجه افزایش جمعیت جهان، نیاز به منابع انرژی نیز افزایش یافته است. بشر در طول تاریخ از منابع مختلفی همچون هیزم، زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و انرژی هسته‌ای برای تأمین این نیاز استفاده کرده است. اما، استفاده از این منابع، مشکلاتی همانند کاهش ذخایر، آلودگی هوا و گرمایش جهانی را به دنبال داشته است [۱۳]. در سال۲۰۲۴، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی به بالاترین حد خود در تاریخ بشر رسیده است و این امر، ضرورت گذار به منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر را بیش از پیش آشکار کرده است. سوخت‌های فسیلی منابعی محدود و غیرقابل تجدید هستند و استفاده از آن‌ها منجر به آلودگی هوا، گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی می‌شود، لذا جایگزینی منابع متعارف انرژی با منابع تجدیدپذیر، به عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر مطرح می‌باشد. در میان منابع تجدیدپذیر، زیست‌توده به عنوان یک منبع پاک و پایدار، از پتانسیل قابل توجهی در راستای ارتقای امنیت انرژی برخوردار است [۴۳]. سوخت‌های زیستی همچنین به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، نقشی کلیدی در توسعه پایدار ایفا می‌کنند. این نوع سوخت‌ها از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان، جانوران و ضایعات کشاورزی تولید می‌شوند و مزایای متعددی از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش امنیت انرژی و توسعه اقتصادی را به همراه دارند [۴۲]. با این وجود، توسعه و کاربرد گسترده این نوع سوخت‌ها با چالش‌ها و موانع متعددی روبرو است [۶۹].

صنعت سوخت‌های زیستی می‌تواند با تنوع‌بخشی به منابع انرژی، امنیت انرژی را افزایش داده و وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد [۳۵]. این صنعت می‌تواند فرصت‌های شغلی جدیدی ایجاد کرده و به توسعه اقتصادی، به ویژه در مناطق روستایی کمک کند [۱]. سوخت‌های زیستی همچنین در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، آلایندگی‌های زیست‌محیطی کمتری دارند و می‌توانند به کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط زیست کمک کنند. از طرف دیگر، صنعت سوخت‌های زیستی می‌تواند از ضایعات کشاورزی و جنگلی به‌عنوان مواد اولیه استفاده کند و به کاهش ضایعات و حفظ منابع طبیعی کمک کند [۳۷].

با توجه به مزایای متعدد زیست‌توده، توسعه و کاربرد این منبع انرژی پاک و پایدار، نقشی اساسی در دستیابی به توسعه پایدار و ارتقای امنیت انرژی در جهان ایفا خواهد کرد [۶۳].

در ایران نیز پژوهش‌های زیادی درخصوص مزایا و چالش‌های سوخت‌های زیستی انجام گرفته است. علاوه بر آن، فعالیت‌های تولید تجاری و نیمه‌تجاری نیز به میزان محدودی انجام شده است. با این حال، توسعه و به‌کارگیری آن‌ها در کشورمان با چالش‌هایی روبرو است. شکست سیستمی در توسعه فناوری انرژی تجدیدپذیر در کشورهای توسعه یافته جدی و در ایران به عنوان یک کشور صادرکننده نفت خام بسیار جدی‌تر است. تأخیر طولانی در اجرای سیاست‌های حمایتی و کمبود منابع مالی مورد نیاز برای اجرای سیاست‌های بخش انرژی، مشکل رایج است. تحلیل نظام نوآوری فناورانه رویکردی است که برای بررسی عوامل موثر بر شکل‌گیری، رشد و توسعه فناوری در یک کشور به کار می‌رود. با استفاده از این رویکرد می‌توان موانع و شکست‌های موجود در نظام نوآوری فناورانه سوخت‌های زیستی در ایران را شناسایی کرد [۵۵].

آنچه مسلم است ، کاهش وابستگی روزافزون به منابع فسیلی، جلوگیری از پیامدهای ناگوار آن و یافتن راهکارهای جایگزین برای تأمین انرژی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه، به بررسی و اولویت‌بندی راهکارهای توسعه و کاربرد سوخت‌های زیستی با استفاده از روش QFD[1] فازی پرداخته شده است. در الگوی پیشنهادی اهدافی همچون شناسایی موانع و چالش‌های صنعت سوخت‌های زیستی، شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای رفع موانع و نیز ارزیابی و رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی دنبال شده است. جهت تحقق این اهداف، از تلفیق و توسعه QFD فازی با تکنیک تاپسیس[2]، بهره‌برداری‌شده است. نوآوری مطالعه حاضر در کاربرد رویکرد تلفیقی QFD فازی برای اولویت‌بندی راهکارهای توسعه و کاربرد سوخت‌های زیستی و نیز کاربرد شاخص‌های جامع و دقیق، آن را به ابزاری کارآمد برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و مدیران در مسیر گذار به انرژی پایدار تبدیل کرده است.

این مقاله در پنج بخش ساماندهی شده است. بخش اول، به بررسی اهمیت موضوع و چالش‌های پیش روی توسعه و کاربرد سوخت‌های زیستی اختصاص‌یافته است. در بخش دوم، روش QFD فازی معرفی و مزایای استفاده از آن در اولویت‌بندی راهبردها و راهکارها تشریح

1. Quality Function Deployment
2. Topsis

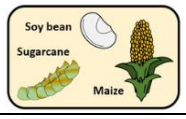
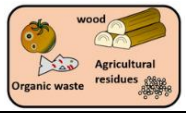
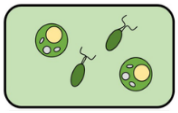
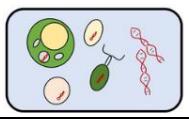
شده است. در بخش سوم به چارچوب نظری و مدل پیشنهادی برای اولویت‌بندی راهکارهای توسعه و کاربرد سوخت‌های زیستی پرداخته شده است. در بخش چهارم، نتایج تحلیلی مطالعه، ارائه و تفسیر می‌گردد و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی در مسیر گذار به انرژی پایدار مطرح خواهد شد.

۲. مبانی نظری و مرور ادبیات

سوخت زیستی که از بیوانرژی یا انرژی زیستی حاصل می‌شود، نوعی منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر است که از طریق فتوسنتز در گیاهان ذخیره می‌شود و هزاران سال است که انسان از آن استفاده می‌کند. این سوخت در سه قالب جامد، مایع و گاز قابل استفاده بوده و از مواد آلی موجود در بدن موجودات زنده به دست می‌آید. گیاهان به‌عنوان منبع اصلی بیوماس[1]، تجدیدپذیری این سوخت را تضمین می‌کنند [۲۵]، [۵۹] و [۶۸]. تاریخچه سوخت‌های زیستی به دوران بین دو جنگ جهانی بازمی‌گردد که نفت و بنزین محدود بود و گازیفایرها[2] برای تولید گاز قابل احتراق از مواد جامد قابل احتراق مانند چوب و زغال‌سنگ استفاده می‌شدند و موتورهای انفجاری و دیگ‌های بخار را تغذیه می‌کردند [۸۶]. مصرف زیست‌توده‌ها که انرژی خورشیدی را از طریق فتوسنتز ذخیره می‌کنند، منجر به افزایش دی‌اکسیدکربن در اتمسفر نمی‌شود. این منابع شامل گیاهانی با مقادیر زیادی قند، نشاسته و روغن هستند [۲۶].

تولید سوخت‌های زیستی به‌عنوان یک مسئله مهم در حوزه انرژی و محیط‌زیست مطرح است. این سوخت‌ها از فرایندهای بیولوژیکی با استفاده از منابعی چون کشاورزی و هضم بی‌هوازی تولید شده و به‌عنوان جایگزینی پایدار برای سوخت‌های فسیلی محدود شناخته می‌شوند. سوخت‌های زیستی اولیه برای تولید گرما و برق و سوخت‌های زیستی ثانویه برای مصارف صنعتی و حمل‌ونقل استفاده می‌شوند [۲۲]. نسل‌های مختلف سوخت‌های زیستی در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

شکل ۱. نسل‌های مختلف سوخت‌های زیستی

	**نسل اول**	از مواد غذایی یا زراعی تولید می‌شود. شامل شکر، نشاسته و محصولات روغنی یا چربی‌های حیوانی است. اتانول و گازهای زیستی مانند متان از این دسته هستند [۲۲].
	**نسل دوم**	از منابع غیرغذایی مانند پسماندهای کشاورزی یا جلبک‌ها تولید می‌شود. این سوخت‌ها از طریق فرایندهای شیمیایی یا بیولوژیکی تولید می‌شوند. بیوگاز از پسماندهای کشاورزی یا دامی نمونه‌ای از آن است [۵۱].
	**نسل سوم**	مبتنی بر مواد روغنی از میکروارگانیسم‌ها مانند جلبک‌ها، مخمرها، باکتری‌ها و پروتیست‌ها هستند. آنها از طریق پردازش میکروبیولوژیکی بقایای کشاورزی، شهری و صنعتی تولید می‌شوند و راه‌حلی پایدار برای تولید سوخت زیستی ارائه می‌دهند [۵۱] و [۶۴].
	**نسل چهارم**	با تمرکز بر تبدیل روغن‌های نباتی و گازوئیل زیستی به بنزین، از گیاهان مهندسی‌شده یا زیست‌توده با عملکرد انرژی بیشتر تشکیل شده و مزایای قابل‌توجهی دارند [۱۸].

چالش‌های سوخت‌های زیستی و راه‌های تقابل با آن. سوخت‌های زیستی علی‌رغم مزایای بالقوه زیست محیطی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به منابع خارجی با چالش‌هایی همراه هستند که توسعه پایدار آنها را تحت الشعاع قرار می‌دهد [۶]. با بررسی منابع معتبر علمی و گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی می‌توان چالش‌های مرتبط با توسعه و کاربرد گسترده سوخت‌های زیستی را استخراج کرد [۱۲]. یکی از این چالش‌ها، رقابت بر سر منابع زمین است که می‌تواند منجر به جنگل‌زدایی، کاهش تنوع زیستی و تخریب خاک شود. این امر می‌تواند امنیت غذایی را به خطر انداخته و قیمت مواد غذایی را افزایش دهد [۲۴] و [۷۶]. چالش دیگر، پایداری و بهره‌وری پایین

1. Biomass
2. Gasifier

نسل‌های اولیه این سوخت‌ها است. به این معنی که انرژی مورد نیاز برای رشد، برداشت و فرآوری مواد اولیه می‌تواند بیش از انرژی خروجی سوخت نهایی باشد [۴۵].

علاوه بر این، نسل‌های اولیه سوخت‌های زیستی می‌توانند اثرات زیست‌محیطی منفی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب داشته باشند. همچنین هزینه تولید این نوع سوخت‌ها در حال حاضر نسبت به سوخت‌های فسیلی بالاتر است [۴۵].

در حال حاضر، هزینه تولید سوخت‌های زیستی نسبت به سوخت‌های فسیلی بالاتر است. این امر می‌تواند مانع از پذیرش گسترده آنها شود. همچنین نیاز به توسعه زیرساخت‌ها و فناوری‌های مناسب برای تولید و توزیع این سوخت‌ها در ابعاد بزرگ از دیگر موانع دستیابی به آنهاست [۸۶].

با وجود چالش‌های متعدد در توسعه و کاربرد سوخت‌های زیستی، راهبردهای مختلفی برای افزایش پایداری و کارایی آنها وجود دارد. این راهبردها شامل توسعه نسل‌های جدید با بازدهی بالاتر، اثرات زیست‌محیطی کمتر و هزینه تولید پایین‌تر از طریق اصلاح ژنتیکی گیاهان و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید است [۴۰] و [۵۶].

استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار، مانند کشاورزی زیستی و حفاظتی، برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و حفظ منابع طبیعی نیز ضروری است. برنامه‌ریزی دقیق کاربری اراضی برای جلوگیری از جنگل‌زدایی و حفظ تنوع زیستی، حمایت‌های دولتی از طریق یارانه‌ها و قوانین حمایتی، و ارتقای آگاهی عمومی از دیگر راهبردهای مهم هستند [۵۲] و [۵].

غلبه بر این چالش‌ها نیازمند تلاش مشترک دولت‌ها، بخش خصوصی، جامعه علمی و مردم است تا سوخت‌های زیستی به منبعی پایدار و قابل اعتماد برای تأمین انرژی تبدیل شوند [۶۵]، [۱۶] و [۷۴].

پیشینه پژوهش.

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه چالش‌های مرتبط با صنعت سوخت‌های زیستی انجام شده است. این تحقیقات شامل بررسی‌هایی است درباره برخی از سوخت‌های زیستی مانند اتانول و متانول که به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای استفاده در موتورها مطرح می‌شوند [۷]. مطالعاتی نیز در زمینه انواع روش‌های تولید سوخت‌های زیستی انجام شده است [۱۰]. مقالاتی به مزایا و معایب استفاده از سوخت‌های زیستی اشاره داشته‌اند [۲۲]. علاوه بر این، تحقیقاتی در خصوص سوخت سبز که نوعی از سوخت‌های زیستی است و از مواد گیاهی، میکروبی و حیوانی تولید می‌شود، انجام گرفته است [۶۱]. همچنین، تحقیقات بسیاری در زمینه بیوتکنولوژی انجام شده و یا در حال انجام است [۱۹].

آلویس و همکاران[1] (۲۰۲۴)، با استفاده از روش تصمیم‌گیری پرامتی[2]، مدلی را برای بازیابی زیست‌توده مازاد زراعی جنگل‌کاری در کشور پرتغال، پیشنهاد کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد مدیریت جنگلداری، سیاستگذاری و حمایت‌های دولتی و فناوری مورد نیاز برای بازیابی زیست‌توده بسیار ضروری است [۴]. رانسیکاربام و پیتاکاسو[3] (۲۰۲۴)، با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مدلی را جهت ارتقای عملکرد مؤثر زنجیره تامین زیست‌توده چوب ارائه داده‌اند که این مدل معیارهایی را برای جایگزینی جنبه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، ارزیابی می‌کند [۶۷]. جیائو و همکاران[4] (۲۰۲۴) نیز به طور سیستماتیک، ریزجلبک‌ها و نحوه استفاده از آنها در تولید سوخت‌های زیستی مانند بیودیزل، هیدروژن و بیواتانول را مورد مطالعه قرار دادند [۳۸]. دوسادی و راماراج[5] (۲۰۲۳)، مدیریت یکپارچه‌ای از زباله‌های آلی و بیولوژیکی برای تولید سوخت‌های زیستی سازگار با محیط زیست با قابلیت زنده ماندن طولانی مدت را پیشنهاد داده و به ارزیابی کارایی و پیامدهای زیست محیطی تبدیل زباله‌های کشاورزی به سوخت زیستی و جنبه‌های اقتصادی و پایدار استفاده از زباله‌های آلی برای تولید سوخت زیستی پرداختند [۲۷].

تولایی و همکاران (۲۰۲۲) نیز چالش‌های سوخت‌های زیستی را بررسی کرده و اذعان کرده‌اند تولید نسل دوم اتانول زیستی، به‌دلیل عدم‌رقابت با غذای انسانی و قابلیت صنعتی‌شدن بیشتر، نسبت به نسل سوم و چهارم، بیشتر مورد توجه است و نتیجه گرفتند که بررسی دقیق فرآیند تولید اتانول زیستی نسل دوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۷۷]. صفرزاده و شاد استانجین (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای تأثیر

1. Alves et al
2. PROMETHEE
3. Ransikarbum & Pitakas
4. Jiao et al.
5. Dussadee & Ramaraj

مصرف انرژی برق‌آبی بر محیط زیست ایران را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که استفاده از این نوع انرژی می‌تواند منجر به کاهش ردپای کربن و انتشار گاز دی‌اکسید کربن شود. همچنین، این انرژی در کوتاه‌مدت تأثیر مثبتی بر ردپای اکولوژیکی می‌گذارد [۷۰].

بیضاوی و همکاران (۲۰۱۸)، مطالعه‌ای درخصوص الزام تولید سوخت‌های زیستی انجام داده‌اند و تولید این نوع از سوخت‌ها را به روش مهندسی ژنتیک و بیوتکنولوژی بررسی کرده‌اند [۱۱]. لیانگ و همکاران[1] (۲۰۱۶)، محرک‌های سوخته‌ای زیستی را با استفاده از روش دیمتل[2] شناسایی کردند. مهم‌ترین عوامل شناسایی شده عبارت بودند از: دسترسی محلی، رقابت پذیری و درجه حمایت دولتی [۵۰]. آدامز و همکاران[3] (۲۰۱۱) ، از طریق مرور سیستماتیک ادبیات، عوامل و موانع مرتبط با پروژه‌های انرژی زیستی را شناسایی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عوامل اقتصادی به عنوان اصلی‌ترین محرک‌ها و موانع مطرح هستند. از جمله محرک‌های شناسایی شده می‌توان به کاهش انتشار کربن و کاهش وابستگی به سوخت‌های سنتی اشاره کرد [۲]. در مطالعه حاضر، علاوه بر شناسایی چالش‌ها و راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی، به اولویت‌بندی راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی نیز پرداخته شده است. در همین راستا، توسعه مبانی ریاضی مدل تلفیقی QFD و تاپسیس در فضای فازی و نیز بکارگیری روش دومرحله‌ای گسترش کارکرد کیفیت در اولویت‌بندی راهکارها نسبت به مطالعات قبلی بدیع می باشد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه باهدف بررسی چالش‌ها و راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی و ارائه راهکارهای مناسب آن، انجام‌گرفته است. برای گردآوری داده‌ها از ترکیبی از روش‌های کیفی و کمی استفاده شده است. داده‌های اصلی پژوهش با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، مصاحبه‌های عمیق و ساختاریافته، پرسش‌نامه و نیز دید گاه‌سنجی خبرگان، جمع‌آوری شده است. همچنین از تکنیک‌های QFD فازی، روش بهترین–بدترین (BWM) و تاپسیس جهت به‌دست‌آوردن ارزش‌های کمی و رتبه‌بندی مؤلفه‌ها استفاده شده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از آمار مربوط به تعداد مقالات، مجلات و پایگاه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این مقاله را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. جزئیات مقالات، مجلات و پایگاه‌های اطلاعاتی

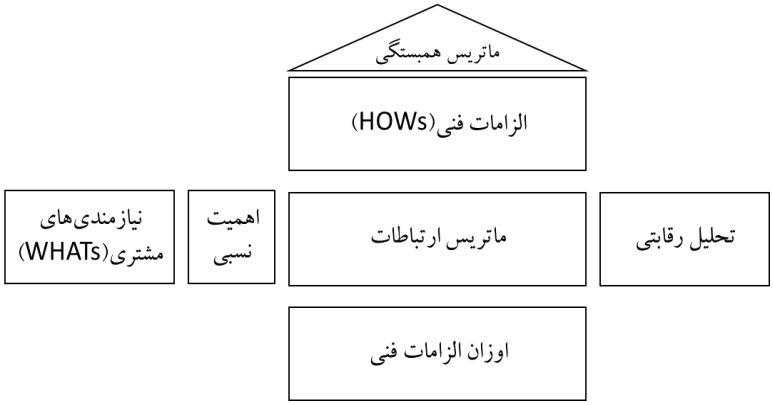
ردیف	پایگاه اطلاعات	تعداد مقالات	تعداد مجلات
۱	Emerald	۱۵ مقاله	۱۰ مجله
۲	Elsevier	۲۵ مقاله	۱۰مجله
۳	Springer	۱۳ مقاله	۵ مجله
۴	MDPI	۹ مقاله	۹ مجله
۵	Cambridge University Press	۵ مقاله	۳ مجله
۶	Science Publishing Group	۴ مقاله	۲ مجله
۷	Web of Science	۲ مقاله	۱ مجله
۸	Scopus	۲ مقاله	۲ مجله

رویکرد QFD فازی. گسترش عملکرد کیفیت (QFD) ابزاری قدرتمند برای برنامه‌ریزی و طراحی محصول است که به‌منظور تبدیل نیازهای مشتریان به مشخصات فنی و عملیاتی محصول و فرایند به کار می‌رود. این روش در سال‌های اخیر توجه خاص محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده و در زمینه‌های مختلف به کار رفته است [۱۵]. QFD فازی با استفاده از منطق فازی، ابهام و عدم قطعیت موجود در نظرات و اطلاعات را در نظر گرفته و به این ترتیب، به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کارآمدتر کمک می‌کند [۶۶]. QFD فازی در دهه ۱۹۹۰ توسط محققان مختلف توسعه داده شد و به‌کارگیری آن در حوزه‌های مختلف از جمله انرژی رواج پیدا کرد [۳۲]. برخی از این

1. Liang et al.
2. DEMATE
3. Adams et al.

مطالعات عبارتند از : انتخاب و اولویت‌بندی علمی منابع انرژی تجدیدپذیر [۴۸]. طراحی سیستم‌های انرژی بهینه [۴۸]، توسعه پایدار انرژی [۸۴] و ارزیابی و بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی [۴۸].

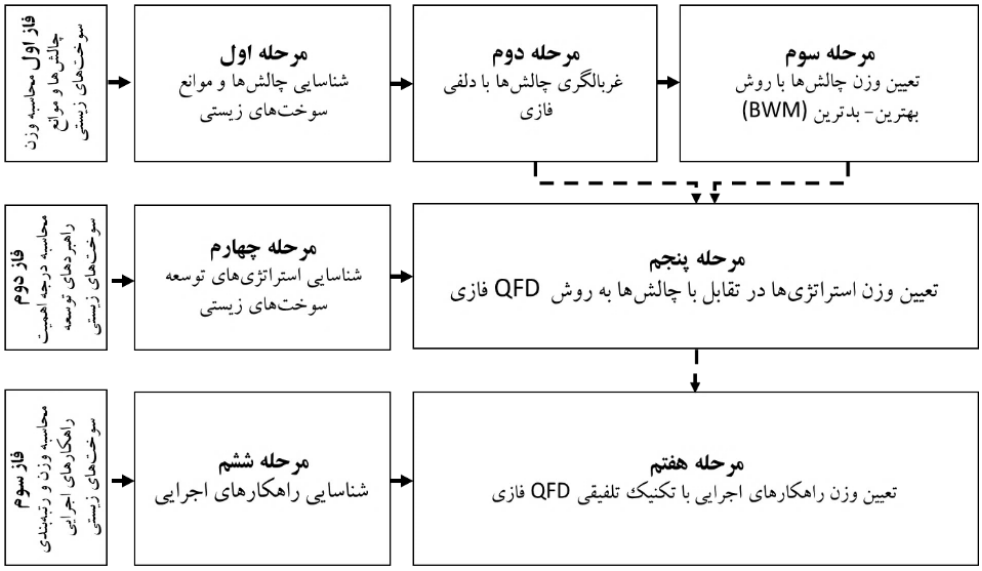
برای تشکیل جدول QFD از ماتریس خانه کیفیت[1] استفاده می‌شود. ماتریس ارتباطات با مقایسه نیازها و خواسته‌های مشتریان یا چراها (WHATs) و الزامات فنی یا چگونه‌ها (HOWs) شکل می‌گیرد. در قدم بعدی پس از تعیین وزن چراها، نمرات همبستگی میان چراها و چگونه‌ها تعیین می‌شود و سپس می‌توان وزن چگونه‌ها را به دست آورد. شکل (۲) نمونه‌ای از ماتریس خانه کیفیت را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمونه‌ای از ماتریس خانه کیفیت

جامعه آماری این پژوهش شامل ۷ نفر از متخصصان و صاحب‌نظران حوزه سوخت‌های زیستی و انرژی است که از بین اساتید دانشگاه در رشته‌های مهندسی شیمی، بیوتکنولوژی، کشاورزی، اقتصاد و سیاستگذاری با تخصص در زمینه سوخت‌های زیستی و انرژی انتخاب شده‌اند. مراحل انجام این مطالعه دارای ۳ فاز اصلی و ۸ مرحله است که فرآیند و مدل مفهومی پژوهش در شکل (۳) نمایش داده شده است.

1. HOQ



شکل ۳. مدل مفهومی پژوهش مدل مفهومی و مراحل اجرای پژوهش

فاز اول، محاسبه وزن چالش‌ها (موانع) سوخت‌های زیستی

مرحله اول، شناسایی چالش‌های سوخت‌های زیستی که از طریق مرور سیستماتیک چارچوب نظری و طبق نظر اوکولی و شابرام[1] (۲۰۱۵)، شامل مراحلی همچون برنامه‌ریزی، انتخاب و استخراج مضامین بود. برای این منظور، ابتدا عبارات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق، مانند «سوخت‌های زیستی»، «چالش‌های توسعه پایدار»، «موانع اقتصادی»، موانع زیست‌محیطی و «سیاست‌های حمایتی» در پایگاه‌های علمی معتبر مانند Google Scholar، PubMed و ScienceDirect جستجو می‌شوند. سپس، با بررسی و تحلیل منابع جمع‌آوری شده، مهم‌ترین چالش‌ها و موانع توسعه پایدار سوخت‌های زیستی شناسایی و طبقه‌بندی خواهند شد.

مرحله دوم، غربالگری چالش‌ها با دلفی فازی. دلفی فازی، روشی برای دستیابی به توافق از دیدگاه خبرگان مبتنی بر اصول محاسبات منطق فازی و سیستم استنتاج فازی است. در این روش کوشش می‌شود با استفاده از اعداد فازی و محاسبات فازی دیدگاه خبرگان بهتر بازنمایی شود. در این مطالعه اقدامات زیر جهت پالایش چالش‌ها به روش دلفی فازی انجام شد:

۱- تدوین پرسش‌نامه فازی جمع‌آوری نظر خبرگان طوریکه درجه اهمیت هر معیار با طیف لیکرت ۵ نقطه‌ای مشخص شد.

۲- تبدیل امتیازدهی خبرگان از عبارات کلامی به اعداد فازی مثلثی که در جدول (۲) قابل مشاهده است:

جدول ۲. مقیاس تبدیل عبارات کلامی به اعداد فازی

متغیرکلامی	مخفف عبارات	مقدار فازی
خیلی زیاد	VH	(۰.۸،۰.۹،۱)
زیاد	H	(۰.۵،۰.۷،۰.۹)
متوسط	M	(۰.۴،۰.۵،۰.۷)
پایین	L	(۰.۱،۰.۳،۰.۵)
خیلی پایین	VL	(۰.۰،۰.۱،۰.۲)

۳- تجمیع نظر خبرگان و دی‌فازی درجات اهمیت طبق رابطه‌های (۱) و (۲):

رابطه (۱)

$$F_{AVE}=\frac{\sum l}{n},\frac{\sum m}{n},\frac{\sum lu}{n}$$

1. Okoli & Schabram

رابطه (۲)
$$if\ \tilde{F} = (L, M, U)\ Then\ F = \frac{\mathrm{L} + \mathrm{M} + \mathrm{u}}{3}$$

۴- پس از غیرفازی‌سازی مقادیر برای غربالگری، یک آستانه باید محاسبه شود. این آستانه معمولا ۰.۷ است که ممکن است متفاوت هم باشد [۲۳]. در این مطالعه شاخص‌هایی که مقداری کمتر از آستانه داشتند، حذف و روش دلفی برای مرحله بعدی تکرار گردید. تکرار مراحل دلفی تا جایی که دیگر شاخصی حذف یا اضافه نگردید، ادامه پیدا کرد.

مرحله سوم، تعیین وزن چالش‌ها با روش بهترین - بدترین (BWM). روش بهترین-بدترین از جدیدترین و کاراترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که به‌منظور وزن‌دهی عوامل و معیارهای تصمیم‌گیری به کار می‌رود و برای اولین‌بار در سال ۲۰۱۵ معرفی شده است. در روش بهترین-بدترین، ابتدا بهترین و بدترین شاخص‌ها توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود و سپس مقایسه زوجی بین هرکدام از این دو شاخص، که بهترین و بدترین هستند، با دیگر شاخص‌ها صورت می‌گیرد. آنگاه مسئله به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌شود و وزن شاخص‌ها به‌صورتی به دست آید که تفاوت‌های مطلق اوزان حداقل شود. در این مطالعه جهت وزن‌دهی به چالش‌های سوخت‌های زیستی از این روش طبق مراحل زیر استفاده شده است:

۱- تعیین بهترین و بدترین معیارها و مقایسه هرکدام با دیگر معیارها توسط خبرگان با استفاده از مقیاس ساعتی و به شرح زیر:

نماد a_{Bj} ارجحیت بهترین معیار بر معیار j را نشان می‌دهد. بدیهی است که $a_{BB}=1$ خواهد بود.

$A_B=\{a_{B1},a_{B2},a_{B3},\ldots,a_{Bn}\}$

نماد a_{jW} ارجحیت معیار j را بر بدترین معیار نشان می‌دهد. بدیهی است که $a_{WW}=1$ خواهد بود.

$A_W=\{a_{1W},a_{2W},a_{3W},\ldots,a_{nW}\}^T$

۲- تعیین بردار بهینه وزن‌ها $\{W_1^*, W_2^*, W_3^*, \ldots, W_n^*\}$ ، وزن مطلوب برای معیارها جایی است‌که برای هر جفت $\frac{W_B}{W_J}$ و $\frac{W_J}{W_W}$ روابط به‌صورت $a_{Bj} = \frac{W_B}{W_J}$ و $a_{jW} = \frac{W_J}{W_W}$ باشد.

برای برآوردن این شرایط باید راه‌حلی پیدا شود که در آن حداکثر اختلاف مطلق بین $\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right|$ و $\left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right|$ برای همه j ها به حداقل برسد. باتوجه‌به غیر منفی بودن$(W_j \geq 0)$ و شرایط مجموع وزن‌ها $\sum W_j = 1$، مسئله زیر مطرح می‌شود:

$$min\ max_j\{\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right|, \left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right|\}$$
$$st.$$
$$\sum W_j = 1$$
$$W_j \geq 0 forall j$$

مسئله بالا را می‌توان به مسئله زیر تبدیل کرد:

رابطه (۳)
$$\min \varepsilon$$
$$st.$$
$$\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right| \leq \varepsilon forall j$$
$$\left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right| \leq \varepsilon forall j$$
$$\sum W_j = 1$$
$$W_j \geq 0 forall j$$

با حل مسئله بالا وزن‌های بهینه $\{W_1^*, W_2^*, W_3^*, \ldots\ldots, W_n^*\}$ و ε^* به دست می‌آید.

۳- نگارش مدل ریاضی (برنامه‌ریزی غیرخطی) طبق رابطه (۳) و حل آن توسط نرم‌افزار لینگو[1] یا اکسل[2]

1-Lingo
2-Solver

فاز دوم، محاسبه درجه اهمیت راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی

مرحله چهارم، شناسایی استراتژی‌های توسعه سوخت‌های زیستی که تمامی مراحل مربوط به استخراج آنها مطابق با الگوی استخراج و پالایش چالش‌ها انجام‌گرفته است.

مرحله پنجم: تعیین وزن استراتژی‌ها در تقابل با چالش‌ها با QFD فازی

۱- تدوین پرسش‌نامه ماتریس خانه کیفیت طور یکه چالش‌ها به‌عنوان WHATsها و استراتژی‌ها به‌عنوان HOWsها (مطابق با شکل (۱)) در ماتریس خانه کیفیت درج شده و این پرسشنامه در اختیار خبرگان قرار گرفت تا میزان اهمیت آنها در طیف لیکرت ۵ نقطه با متغیرهای زبانی فازی سنجیده شود.

۲- تشکیل ماتریس خانه کیفیت فازی با تجمیع نظر خبرگان و تبدیل عبارات‌کلامی به اعداد فازی مثلثی طبق جدول (۱)، اگر($s_{ijt} = (a_{ijt},$ b_{ijt}, c_{ijt} به نحوی که $i = 1, ..., k$ و $j=1,\ldots,m$ و $t=1,\ldots,n$ رتبه‌ای باشد که هر کارشناس به معیارها اختصاص دهد، جهت تجمیع نظر آنها از رابطه‌های زیراستفاده می شود که منظور از n تعداد کارشناسان است.

رابطه (۴)
$$a_{ij} = \frac{1}{n}\sum a_{ijt} \qquad b_{ij} = \frac{1}{n}\sum b_{ijt} \qquad c_{ij} = \frac{1}{n}\sum c_{ijt}$$

رابطه (۵)
$$s_{ij} = \frac{1}{n} \times (s_{ij1} + s_{ij2} + \cdots + s_{ijn})$$

رابطه (۶)
$$s_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$$

۳- تعیین وزن استراتژی‌های سوخت‌های زیستی با استفاده از رابطه زیر:

رابطه (۷)
$$ws_j = \frac{1}{k} \times [(s_{j1} \times wc_1) + (s_{j2} \times wc_1) + \cdots + (sjn \times wc_k))$$

تعداد معیارها=k

فاز سوم، محاسبه وزن و رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی سوخت‌های زیستی

مرحله ششم، شناسایی راهکارهای اجرایی. در این مرحله نیز شناسایی و استخراج راهکارهای سوخت‌های زیستی مطابق با روش شناسایی و استخراج چالش‌ها و استراتژی‌ها انجام شده است.

مرحله هفتم، رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی توسعه سوخت‌های زیستی با تکنیک تلفیقی QFD فازی

۱- تدوین پرسش‌نامه ماتریس خانه کیفیت جهت جمع‌آوری نظر خبرگان در خصوص میزان اهمیت استراتژی‌ها در تقابل با راهکارهای اجرایی. در این ماتریس استراتژی‌ها که همان WHATs هستند در مقابل راهکارهای اجرایی که HOWs هستند در طیف لیکرت ۵ نقطه‌ای فازی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- تشکیل ماتریس خانه کیفیت فازی با تبدیل عبارات کلامی به اعداد فازی مثلثی طبق جدول (۱) و تجمیع نظر خبرگان که از روابط (۸) تا (۱۰) حاصل می‌شود.

رابطه (۸)
$$a_{ij} = \frac{1}{n}\sum a_{ijt} \qquad b_{ij} = \frac{1}{n}\sum b_{ijt} \qquad c_{ij} = \frac{1}{n}\sum c_{ijt}$$

رابطه (۹)
$$m_{ij} = \frac{1}{n} \times (a_{ij1} + b_{ij2} + \cdots + c_{ijn})$$

رابطه (۱۰)
$$m_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$$

۳- تعیین امتیاز راهکارهای اجرایی با استفاده از رابطه زیر:

رابطه (۱۱)
$$wm_j = \frac{1}{k} \times [(m_{j1} \times ws_1) + (m_{j2} \times ws_1) + \cdots + (rm_{jk} \times ws_k))$$

$$Wm_j = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$$

تعداد معیارها=k

۴- به‌دست‌آوردن راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی و اندازه فاصله راه‌کارها طبق روابط زیر:

$$S^{+} = max\ \{Wm_j\} \qquad S^{-} = max\ \{Wm_j\}$$

رابطه (۱۲)

$$d_m^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(m_{j-}s^+)^2}$$

رابطه (۱۳)

$$d_m^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(m_{j-}s^-)^2}$$

۵- تعیین ضریب نزدیکی نسبی که از رابطه زیر به دست می‌آید:

رابطه (۱۴)

$$CC_m = \frac{d_m^-}{d_m^+ + d_m^-}$$

٤. یافته‌ها

این بخش به تشریح یافته‌های حاصل از اجرای سه مرحله اصلی تحقیق می‌پردازد که برای دستیابی به اهداف مطالعه انجام شده‌اند.

فاز اول: شناسایی و تعیین وزن چالش‌های توسعه سوخت‌های زیستی. به‌منظور شناسایی چالش‌های توسعه پایدار سوخت‌های زیستی، از روش بررسی سیستماتیک چارچوب نظری استفاده شد. برای این منظور، ابتدا عبارات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق، مانند «سوخت‌های زیستی»، «چالش‌های توسعه پایدار»، «موانع اقتصادی»، « موانع زیست‌محیطی» و «سیاست‌های حمایتی» در پایگاه‌های علمی معتبر مانند Google Scholar، PubMed و ScienceDirect جستجو شدند. سپس، با بررسی و تحلیل منابع جمع‌آوری شده، مهم‌ترین چالش‌ها و موانع توسعه پایدار سوخت‌های زیستی شناسایی و طبقه‌بندی شدند. چالش‌های استخراج شده در ۵ بعد مطابق جدول (۳) دسته‌بندی گردید.

جدول ۳. شناسایی و دسته‌بندی اولیه موانع و چالش‌های سوخت‌های زیستی

نماد چالش‌ها	چالش‌ها و موانع سوخت‌های زیستی	ابعاد چالش‌ها	منابع
چالش‌های اقتصادی	افزایش رقابت برای زمین کشاورزی	C1	[۶]، [۲۴]،[۷۶]
	قیمت رقابتی با سوخت‌های فسیلی	C2	[۳۰]، [۵۳]، [۵۷]، [۷۸]
	مشکلات مالی و سرمایه‌گذاری	C3	[۴۶]، [۶۳]
	تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی	C4	[۱۷]، [۳۴]، [۴۷]
	کمبود سرمایه‌گذاران	C5	[۶۵]، [۸۰]
	هزینه‌های بالای حمل‌ونقل	C6	[۸۶]
	مشکلات مرتبط با کشت و دسترسی به منابع زیستی	C7	[۳۹]
چالش‌های فنی	پیچیدگی فرایندها و هزینه بالای تولید	C8	[۷۵]
	فقدان نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های به‌صرفه	C9	[۵۲]
	نیاز به تکنولوژی و دانش پیشرفته	C10	[۳۹]
	جمع‌آوری و پالایش مواد اولیه	C11	[۷۵]
	کمبود امکانات ذخیره‌سازی مؤثر	C12	[۶۵]، [۸۰]
چالش‌های زیرساختی	احتیاجات زیرساختی	C13	[۶۵]، [۸۰]
چالش‌های زیست‌محیطی	گازهای گلخانه‌ای	C14	[۱۲]، [۴۵]، [۸۵]
	اثرات منفی بر جانوران و محیط‌زیست	C15	[۱۲]، [۴۵]، [۸۵]
	مشکلات مرتبط با تأمین آب و انرژی	C16	[۳۶]، [۴۸]
	دفع فرایندهای جانبی و اثرات شیمیایی آن	C17	[۴۸]، [۵۸]
چالش‌های اجتماعی و سیاسی	تغییرات سیاسی و اجتماعی	C18	[۳]، [۵۴]
	فقدان سیاست‌های حمایتی برای توسعه زنجیره تامین پایدار سوخت‌های زیستی	C19	[۲۰]، [۴۴]
	عدم دانش و اطلاعات در مورد فناوری‌های زیستی و چشم‌اندازهای انرژی زیستی	C20	[۱۴]، [۳۰]،[۲۸]

چالش‌های اولیه با استفاده از روش دلفی فازی و تجمیع نظر کارشناسان، غربالگری و سپس دی‌فازی گردید. جدول (۴) چالش‌های نهایی توسعه سوخت‌های زیستی را نمایش می‌دهد.

جدول ۴. چالش‌ها و موانع نهایی توسعه سوخت‌های زیستی

ابعاد چالش‌ها	چالش‌ها و موانع	نماد چالش‌ها
چالش‌های اقتصادی	افزایش رقابت برای زمین کشاورزی	C1
چالش‌های فنی	قیمت رقابتی با سوخت‌های فسیلی	C2
	مشکلات مالی و سرمایه‌گذاری	C3
	تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی	C4
	پیچیدگی فرایندها و هزینه بالای تولید	C5
	فقدان نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های به‌صرفه	C6
	نیاز به تکنولوژی و دانش پیشرفته	C7
چالش‌های زیست‌محیطی	گازهای گلخانه‌ای	C8
	اثرات منفی بر جانوران و محیط‌زیست	C9
چالش‌های اجتماعی و سیاسی	مشکلات مرتبط با تأمین آب و انرژی	C10
	تغییرات سیاسی و اجتماعی	C11
	فقدان سیاست‌های حمایتی برای توسعه زنجیره تامین پایدار سوخت‌های زیستی	C12
	عدم دانش و اطلاعات در مورد فناوری‌های زیستی و چشم‌اندازهای انرژی زیستی	C13

در مرحله بعدی و جهت تعیین وزن چالش‌ها، از روش BWM استفاده شد. در این مرحله کارشناسان بهترین و بدترین شاخص را انتخاب و اهمیت سایر شاخص‌ها را با آنها مشخص نموده‌اند. پس از تجمیع نظر کارشناسان و فرموله نمودن معادله ریاضی غیرخطی و حل آن توسط نرم‌افزار لینگو، وزن چالش‌ها و موانع مطابق جدول (۵) محاسبه گردید.

جدول ۵. درجه اهمیت چالش‌های توسعه سوخت‌های زیستی با روش BWM

چالش‌ها و موانع سوخت‌های زیستی	وزن
تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی	۰/۲۸۲
فقدان نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های به‌صرفه	۰/۰۱۸
عدم دانش و اطلاعات در مورد فناوری‌های زیستی و چشم‌اندازهای انرژی زیستی	۰/۰۶۶
نیاز به تکنولوژی و دانش پیشرفته	۰/۰۴۴
پیچیدگی فرایندها و هزینه بالای تولید	۰/۰۵۰
مشکلات مالی و سرمایه‌گذاری	۰/۰۵۰
افزایش رقابت برای زمین کشاورزی	۰/۰۵۰
قیمت رقابتی با سوخت‌های فسیلی	۰/۰۸۰
مشکلات مرتبط با تأمین آب و انرژی	۰/۰۵۷
فقدان سیاست‌های حمایتی برای توسعه زنجیره تامین پایدار سوخت‌های زیستی	۰/۰۶۶
اثرات منفی بر جانوران و محیط‌زیست آبزیان، سیستم هوایی محلی، ریزاب و گرده‌ها در نزدیکی گیاهان و جانوران	۰/۱۰۰
گازهای گلخانه‌ای	۰/۰۵۷
تغییرات سیاسی و اجتماعی	۰/۰۸۰

فاز دوم: شناسایی و تعیین وزن راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی. این بخش از تحقیق شامل دو مرحله است. در مرحله اول، استراتژی‌های مقابله با چالش‌های توسعه سوخت‌های زیستی استخراج و با دلفی فازی پالایش شد که در جدول (۶) مشاهده می‌شود.

جدول ۶. استراتژی‌ها (راهبردهای) توسعه سوخت‌های زیستی

استراتژی‌ها	نماد استراتژی‌ها	منابع
توسعه استانداردهای مؤثر زنجیره تأمین زیست‌توده توسط دولت	S1	[۲۰]، [۳۳]
وضع قوانین و مقررات سخت‌گیرانه برای پیشگیری و مبارزه با فعالیت‌های محیطی فاسد	S2	[۲۱]
تدوین سیاست‌ها/طرح‌ها و دستورالعمل‌های ارتقای صنعت سوخت زیستی بر مبنای تعادل در سه رکن پایدار	S3	[۵۵]
حمایت از کارآفرینان صنعت سوخت زیستی(مشوق کافی و معافیت مالیاتی)	S4	[۷۳]، [۷۴]
توسعه مدل‌های مشارکت عمومی خصوصی برای تقویت سرمایه‌گذاری در سوخت‌های زیستی	S5	[۶۵]
آموزش و افزایش آگاهی عمومی در مورد اثرات زیست‌محیطی صنعت سوخت زیستی	S6	[۱۶]
تخصیص یارانه برای تولیدکنندگان سوخت زیستی	S7	[۴۰]
حذف تخصیص یارانه به سوخت‌های فسیلی	S8	[۵۶]
تحقیق و توسعه فناوری‌های جدید و پیشرفته برای تولید سوخت‌های زیستی	S9	[۵۲]
ایجاد و توسعه زیرساخت‌های تولید و توزیع سوخت‌های زیستی	S10	[۵]
ایجاد اقتصاد انرژی زیستی و توسعه بازارهای جدید سوخت‌های زیستی	S11	[۷۹]
مدیریت پسماند (نوع خاصی از پسماندهای آلی که می توانند برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده شوند)	S12	[۸]
تحقیق و توسعه برنامه‌های بهبود فرایند تولید سوخت‌های زیستی	S13	[۹]، [۵۲]

در مرحله دوم، طبق متدولوژی گفته شده، ماتریس خانه کیفیت فازی تشکیل شد که نتایج کاربرد آن در جدول (۷) و وزن دی‌فازی و نرمال شده راهبردها در جدول (۸) نمایش داده شده است.

جدول ۷. درجه اهمیت استراتژی‌ها

استراتژی‌ها	چالش‌ها	نظر کارشناسان					درجه اهمیت استراتژی‌ها	استراتژی‌ها	چالش‌ها	نظر کارشناسان					درجه همیت استراتژی‌ها
		D1	D2	D3	D4	D5				D1	D2	D3	D4	D5	
S1	C1	M	M	M	M	M	(۰/۸، ۰/۶، ۰/۴)	S2	C1	H	H	H	H	H	(۰/۸، ۰/۶، ۰/۴)
	C2	M	M	M	M	M			C2	L	L	L	L	L	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C۱۲	H	H	H	H	H			C12	H	H	H	H	H	
	C13	M	M	M	M	M			C13	H	H	H	H	H	
S3	C1	H	H	H	H	H	(۰/۹، ۰/۷، ۰/۵)	S4	C1	M	M	M	M	M	(۰/۸، ۰/۶، ۰/۴)
	C2	H	H	H	H	H			C2	H	H	H	H	H	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C۱۲	H	H	H	H	H			C12	H	H	H	H	H	
	C13	H	H	H	H	H			C13	M	M	M	M	M	
S5	C1	M	M	M	M	M		S6	C1	M	M	M	M	M	(۰/۸، ۰/۶، ۰/۴)
	C2	H	H	H	H	H			C2	M	M	M	M	M	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C12	M	M	M	M	M			C12	M	M	M	M	M	
	C13	M	M	M	M	M			C13	H	H	H	H	H	
S7	C1	H	H	H	H	H	(۰/۷، ۰/۵، ۰/۳)	S8	C1	H	H	H	H	H	(۰/۸، ۰/۶، ۰/۴)
	C2	H	H	H	H	H			C2	H	H	H	H	H	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C12	M	M	M	M	M			C12	L	L	L	L	L	

استراتژی‌ها	چالش‌ها	نظر کارشناسان					درجه اهمیت استراتژی‌ها	استراتژی‌ها	چالش‌ها	نظر کارشناسان					درجه همیت استراتژی‌ها
		D1	D2	D3	D4	D5				D1	D2	D3	D4	D5	
	C13	M	M	M	M	M			C13	M	M	M	M	M	
S9	C1	M	M	M	M	M	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)	S10	C1	M	M	M	M	M	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)
	C2	H	H	H	H	H			C2	H	H	H	H	H	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C12	H	H	H	H	H			C12	H	H	H	H	H	
	C13	H	H	H	H	H			C13	M	M	M	M	M	
S11	C1	M	M	M	M	M	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)	S12	C1	M	M	M	M	M	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)
	C2	H	H	H	H	H			C2	M	M	M	M	M	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	C12	H	H	H	H	H			C12	M	M	M	M	M	
	C13	H	H	H	H	H			C13	M	M	M	M	M	
S13	C1	M	M	M	M	M	(۰/۵ ،۰/۷ ،۰/۹)								
	C2	H	H	H	H	H									
	…	…	…	…	…	…									
	C12	H	H	H	H	H									
	C13	H	H	H	H	H									

جدول ۸. درجه اهمیت استراتژی‌ها

استراتژی‌ها	وزن دی‌فازی و نرمال شده	استراتژی‌ها	وزن دی‌فازی و نرمال شده	استراتژی‌ها	وزن دی‌فازی و نرمال شده
S1	۰/۰۷۵	S6	۰/۰۶۰	S11	۰/۶۰۶
S2	۰/۰۸۰	S7	۰/۰۷۵	S12	۰/۵۹۴
S3	۰/۰۸۸	S8	۰/۰۷۴	S13	۰/۶۸۰
S4	۰/۰۷۶	S9	۰/۶۲۶		
S5	۰/۰۷۵	S10	۰/۶۰۴		

فاز سوم: محاسبه وزن و رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی توسعه سوخت‌های زیستی. این بخش از تحقیق نیز دارای دو مرحله است. در مرحله نخست، با روشی که در متدولوژی اشاره شد، راهکارهای اجرایی در ۸ بعد و ۱۰ مولفه شناسایی و نهایی شدند که در جدول (۹) مشاهده می‌شود.

جدول ۹. راهکارهای اجرایی توسعه سوخت‌های زیستی

ابعاد	راهکارهای اجرایی	نماد	منابع
توسعه زنجیره تأمین پایدار	ایجاد و ارتقای استانداردها	M1	[۶۵]
	حمایت از تولیدکنندگان پایدار	M2	[۶۵]
ارتقای پایداری زیست‌محیطی	حفاظت از تنوع زیستی	M3	[۵]، [۶۵]
تقویت پایداری اقتصادی	خرید تضمینی سوخت‌های زیستی	M4	[۶۵]
توسعه سرمایه‌گذاری و نوآوری	جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی	M5	[۷۳-۷۴]
	تقویت نوآوری	M6	[۴۱]
توسعه زیرساخت	ایجاد و توسعه زیرساخت‌های تولید	M7	[۶۵]
افزایش آگاهی عمومی	آموزش و ترویج	M8	[۱۶]
توسعه بازار	تحلیل و بررسی بازار	M9	[۱۶]، [۷۱]
همکاری بین‌المللی	اشتراک دانش و تجربه	M10	[۳۱]

در مرحله دوم پس از ادغام نظر خبرگان در ماتریس خانه کیفیت فازی، وزن راهکارهای اجرایی با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه‌های (۱۲) تا (۱۴) رتبه‌بندی گردید که در جداول (۱۰) و (۱۱) نمایش‌داده‌شده است.

جدول ۱۰. وزن راهکارهای اجرایی

راهکارهای اجرایی	استراتژی‌ها	نظر کارشناسان					درجه اهمیت راهکارها	راهکارهای اجرایی	استراتژی‌ها	نظر کارشناسان					درجه اهمیت راهکارها
		D1	D2	D3	D4	D5				D1	D2	D3	D4	D5	
M1	H1	H	VH	H	VH	H	(۰/۷ ،۰/۸ ،۰/۹)	M2	H1	H	VH	H	VH	H	(۰/۷ ،۰/۸ ،۰/۹)
	H2	VH	VH	VH	VH	VH			H2	VH	VH	VH	VH	VH	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	H12	H	VH	VH	VH	VH			H12	VH	VH	VH	VH	VH	
	H13	H	H	VH	H	VH			H13	VH	H	VH	H	VH	
M3	H1	H	M	H	M	H	(۰/۶ ،۰/۷ ،۰/۹)	M4	H1	H	M	H	M	H	(۰/۵ ،۰/۶ ،۰/۹)
	H2	M	H	M	H	M			H2	M	L	M	L	M	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	H12	VH	VH	VH	VH	VH			H12	H	H	H	H	H	
	H13	H	H	H	H	VH			H13	H	H	H	H	H	
M5	H1	M	L	M	L	M	(۰/۵ ،۰/۶ ،۰/۷)	M6	H1	M	M	M	L	H	(۰/۵ ،۰/۶ ،۰/۸)
	H2								H2	M	M	M	L	M	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	H12	M	M	M	M	M			H12	M	M	M	M	M	
	H13	VH	VH	VH	VH	VH			H13	VH	VH	VH	VH	VH	
M7	H1	M	L	M	L	M	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)	M8	H1	H	H	H	H	H	(۰/۴ ،۰/۵ ،۰/۷)
	H2	M	L	M	L	M			H2	M	L	M	L	M	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	H12	H	H	H	H	H			H12	M	M	M	M	M	
	H13	H	H	H	H	H			H13	M	M	M	M	M	
M9	H1	H	M	H	M	H	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۹)	M10	H1	H	M	H	M	H	(۰/۴ ،۰/۶ ،۰/۸)
	H2	M	L	M	L	M			H2	H	M	H	M	H	
	…	…	…	…	…	…			…	…	…	…	…	…	
	H12	M	M	M	M	M			H12	H	H	H	H	H	
	H13	M	H	H	H	H			H13	H	H	H	H	H	

جدول ۱۱. رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی

رتبه	ضریب نزدیکی	d^-	d^+	راهکارهای اجرایی
۱	۰/۷۶۷	۰/۷۴۱	۰/۲۲۵	M1
۲	۰/۷۶۲	۰/۷۷۴	۰/۲۴۱	M2
۳	۰/۷۳۰	۰/۵۸۸	۰/۲۱۷	M3
۴	۰/۶۱۸	۰/۴۷۱	۰/۲۹۱	M4
۶	۰/۵۵۶	۰/۳۹۳	۰/۳۱۴	M5
۵	۰/۶۱۶	۰/۴۲۶	۰/۲۷۲	M6

راهکارهای اجرایی	d^+	d^-	ضریب نزدیکی	رتبه
M7	۰/۳۵۰	۰/۴۱۱	۰/۵۴۰	۷
M8	۰/۳۸۳	۰/۳۵۸	۰/۴۸۳	۱۰
M9	۰.۳۵۷	۰.۳۹۶	۰.۵۲۶	۸
M10	۰.۳۶۵	۰.۳۹۲	۰.۵۱۸	۹

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر، باتوجه‌به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و کاهش منابع انرژی تجدیدناپذیر، توسعه سوخت‌های زیستی به‌عنوان راهکاری پایدار جهت تأمین انرژی مطرح شده است. استفاده از انرژی فسیلی، علاوه بر داشتن نقاط ضعف، به‌طور قابل‌توجهی برای محیط‌زیست خطرناک است؛ اما استفاده از سوخت‌های زیستی که به‌عنوان نمونه‌های بسیار مطلوبی از انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شوند، می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین بسیار مناسب برای سوخت‌های فسیلی عمل کند و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد [۶].

در این مطالعه، روشی تلفیقی برای ارزیابی و انتخاب راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی در مسیر گذار به انرژی پایدار ارائه شد. تلفیق QFD فازی و تکنیک TOPSIS ، ابزاری جامع برای تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کارآمدتر را به وجود می‌آورد. با استفاده از منطق فازی، ابهامات و عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی و انتخاب راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی به طور مؤثر لحاظ می‌شود. این روش به‌گونه‌ای طراحی شده است که می‌توان از آن در شرایط مختلف و باتوجه به نیازهای خاص هر پروژه استفاده کرد. همچنین، روش پیشنهادی قادر است معیارهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی را در فرایند تصمیم‌گیری لحاظ کند.

مطالعه حاضر به سه هدف عمده پرداخته است. هدف اول، شناسایی و پالایش چالش‌ها و راهبردهای توسعه سوخت‌های زیستی بود که منجر به استخراج چالش‌ها و راهبردهای حیاتی در ابعاد مربوط به پایداری گردید. مهم‌ترین چالش‌های یافت شده این مطالعه تأمین ناپایدار مواد اولیه، اثرات زیست‌محیطی و ملاحظات اقتصادی و اجتماعی است، که می‌توان با توسعه منابع پایدار، بهبود کارایی تولید، اعمال سیاست‌های حمایتی و افزایش آگاهی عمومی بر آنها غلبه کرد. یافته‌های این مطالعه با یافته‌های سایر مطالعات در این زمینه همسو است. رانسیکاربام و پیتاکاسو، آلویس و همکاران نیز، چالش‌های مربوط به پایداری را از مهمترین موانع دستیابی به سوخت‌های زیستی برشمردند.

هدف دوم، رابطه متقابل بین استراتژی‌ها و چالش‌ها با تکنیک QFD فازی مدل‌سازی شد و جزئیاتی در مورد شدت روابط بین موانع شناسایی شده و راهبردها ارائه داد. همچنین راهبردهایی معرفی شد که کمتر مورد توجه کارشناسان بودند: تدوین سیاست‌ها/طرح‌ها و دستورالعمل‌های ارتقای صنعت سوخت زیستی بر مبنای تعادل در سه رکن پایدار، وضع قوانین و مقررات سخت‌گیرانه برای پیشگیری و مبارزه با فعالیت‌های محیطی فاسد و توسعه استانداردهای مؤثر زنجیره تأمین زیست‌توده توسط دولت از این دسته بودند. لیانگ و همکاران نیز در پژوهش خود بر لزوم حمایت‌های مختلف دولت و ارائه سیاست‌های مدون استفاده از سوخت‌های زیستی، تأکید داشته‌اند که با راهبردهای استخراج شده در این مقاله همخوانی دارد.

هدف سوم، راهکارهای اجرایی در تقابل با استراتژی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس رتبه‌بندی شدند. ایجاد و ارتقای استانداردها، حمایت از تولیدکنندگان پایدار و حفاظت از تنوع زیستی از مهم‌ترین راهکارهایی هستند که جهت توسعه پایدار سوخت‌های زیستی باید به اجرا گذاشته شوند. صفرزاده و شاد استانجین نیز در پژوهش خود تدوین مقررات و استانداردهای لازم را برای استفاده از سوخت‌های تجدید پذیر لازم و ضروری دانسته‌اند. این راهکار ارائه شده آنها با راهکارهای اجرایی اولویت‌بندی شده این مقاله همسو است.

بدون شک، سوخت‌های زیستی نقش مهمی در آینده ایفا می‌کنند، زیرا جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی در استفاده فعلی است [۸۶]. اما در تولید این انرژی‌های تجدیدپذیر چالش‌هایی هم وجود دارد. تأمین ناپایدار مواد اولیه و انرژی از مهمترین چالش‌های یافت شده در این مطالعه است. برای تولید سوخت زیستی در مقیاسی بزرگ، باید مقادیر زیادی از مواد خام به عنوان سوخت انرژی کاشته شود. این امر به ایجاد فرصت‌های شغلی برای روستاها و جوامع روستایی کمک می کند. اما همین امر موجب رقابت برای زمین کشاورزی و چالش جذب سرمایه‌گذار می‌شود که هردو از دیگر موانع تولید است که در این مقاله شناسایی شده‌اند.

تعیین سیاست‌ها و طرح‌های مناسب برای ارتقای صنعت سوخت زیستی بسیار حیاتی است. این اقدام شامل تعادل در ابعاد پایداری می‌شود. وضع قوانین و مقررات سخت‌گیرانه برای پیشگیری و مبارزه با فعالیت‌های محیطی فاسد نیز ضروری است و باعث حفظ محیط‌زیست، کاهش آلودگی، و تضمین انسجام زنجیره تأمین سوخت زیستی می‌شود. همچنین، توسعه استانداردهای زنجیره تأمین توسط دولت منجر به بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان زنجیره تأمین، افزایش رقابت‌پذیری، و حفظ محیط‌زیست می‌گردد.

راهکارهای اجرایی این مطالعه نقش مؤثری در تولید سوخت‌های زیستی ایفا می‌کنند. ارتقای پایداری زیست‌محیطی شامل اقداماتی است که به افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر، کاهش استفاده از منابع غیرقابل‌تجدید، ارتقا استفاده از سوخت‌های زیستی، بهبود کارایی انرژی و مدیریت مؤثر پسماند و پساب‌های صنعتی متمرکز می‌شود. بازنگری در فرایندها، کاهش هدررفت منابع مالی، افزایش بهره‌وری و کیفیت محصولات، ایجاد مدل‌های کسب‌وکار پایدار و حمایت از کسب‌وکارهای کوچک و محلی به تقویت پایداری اقتصادی در زنجیره تأمین کمک می‌کند. این مطالعه و تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تولید سوخت‌های زیستی می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش آلودگی هوا و افزایش پایداری اقتصادی منطقه‌ای و جهانی کمک کند؛ اما چالش‌هایی نیز در تولید وجود دارند که ضروری است مدیریت یکپارچه، برطرف‌سازی آنها را با درنظرگرفتن اهمیت نیازهای انسان به‌منظور پیشرفت در اجرای سوخت زیستی، هوشمندانه برنامه‌ریزی کند.

از محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به کمبود داده‌های دقیق و کامل مرتبط با توسعه سوخت‌های زیستی و انرژی پایدار اشاره کرد که تحلیل QFD فازی را با محدودیت‌هایی مواجه کرد و از دقت ارزیابی راهکارها و تصمیم‌گیری‌های مؤثر کاست. محدودیت‌ها و چالش‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه پایدار، تطابق کامل مدل QFD فازی را با شرایط موجود مختل کرده و انتخاب بهترین راهکارهای توسعه سوخت‌های زیستی را محدود می‌سازد. همچنین، نوآوری و پیشرفت‌های فناوری در زمینه توسعه سوخت‌های زیستی می‌تواند منجر به تغییر در نیازها و اولویت‌های مربوط به این سوخت‌ها شود، بنابراین مدل QFD فازی باید قادر به تطبیق با این تغییرات باشد. به محققان آتی پیشنهاد می‌شود تأثیر تکنولوژی‌های نوین در تولید و استفاده از سوخت‌های زیستی برای حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار را مورد بررسی قرار دهند و بر استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند ریزجلبک‌ها را به‌عنوان منبع سوخت زیستی تمرکز کنند.

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 شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

منابع

1. Abbasi, Abounouri, Abbas Ali, & Mohammadi Zadeh. (2011). Economic evaluation of bioethanol production from molasses wastes.*Financial Economics,16(5), 161-194.* (in persian)
2. Adams, P., Hammond, G., McManus, M., & Mezzullo, W. (2011). Barriers to and drivers for UK bioenergy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(2).
3. Alhajj Ali, S., Tallou, A., Vivaldi, G. A., Camposeo, S., Ferrara, G., & Sanesi ,G. (2024). Revitalization Potential of Marginal Areas for Sustainable Rural Development in the Puglia Region, Southern Italy: Part I: A Review. *Agronomy*, *14*(3).
4. Alves, A. S., Nunes, L. J., Matias, J., Espadinha-Cruz, P., & Godina, R. (2024). An integrated PROMETHEE II-Roadmap model: Application to the recovery of residual agroforestry biomass in Portugal. *Journal of Cleaner Production.*
5. Ambaye, T. G., Vaccari, M., Bonilla-Petriciolet, A., Prasad, S., van Hullebusch, E. D., & Rtimi, S.(2021).Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*.
6. Antle, J. M. (1999). The new economics of agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*,(5).
7. Arapatsakos, C. (2013). Biofuels Ethanol and Methanol in OTTO Engines. *Liquid, Gaseous and Solid Biofuels-Conversion Techniques* .

8. 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. Awogbemi, O., & Von Kallon, D. V. (2024). Recent advances in the application of nanomaterials for improved biodiesel, biogas, biohydrogen, and bioethanol production. *Fuel*.
10. Bartocci, P., Tschentscher, R., Yan, Y., Yang, H., Bidini, G., & Fantozzi, F. (2020). Biofuels: Types and Process Overview. *Biofuel Production Technologies: Critical Analysis for Sustainability*.
11. Beizavi, F., Zarei, A., Abdolkarimi, R., Rezaei, G. J., & Keyarash. (2018). Challenges and prospects for the use of biofuels and their environmental impacts. *Iranian Journal of Plant & Biotechnology*, *13(2), 5-14. [*(in persian)
12. Bessou, C., Ferchaud, F., Gabrielle, B., & Mary, B. (2011). Biofuels, greenhouse gases and climate change. *Sustainable Agriculture Volume.*
13. Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2011). Greener energy: Issues and challenges for Pakistan—Biomass energy prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,15(6).
14. Bonaiuto, M., Mosca, O., Milani, A., Ariccio, S., Dessì, F., & Fornara, F. (2024). Beliefs about technological and contextual features drive biofuels' social acceptance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
15. Bottani, E., & Rizzi, A. (2006). A fuzzy TOPSIS methodology to support outsourcing of logistics services. *Supply chain management: An international journal, 11(4).*
16. Cacciatore ,M. A., Scheufele, D. A., Binder, A. R., & Shaw, B. R. (2012). Public attitudes toward biofuels: Effects of knowledge, political partisanship, and media use. *Politics and the Life Sciences*.
17. Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù ,L., & Sims, R. (2019). The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. *Sustainability*,*11(1).*
18. Callegari, A., Bolognesi, S., Cecconet, D., & Capodaglio, A. G. (2020). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *50(4).*
19. Cornelissen, M., Małyska, A., Nanda, A. K., Lankhorst, R. K., Parry, M. A., Saltenis, V. R., Pribil, M ,.Nacry, P., Inzé, D., & Baekelandt, A. (2021). Biotechnology for tomorrow's world: scenarios to guide directions for future innovation. *Trends in biotechnology*.
20. Correa, D. F., Beyer, H. L., Fargione, J. E., Hill, J. D., Possingham, H. P ,.Thomas-Hall, S. R., & Schenk, P. M. (2019). Towards the implementation of sustainable biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
21. Daneshmandi, M., Sahebi, H., & Ashayeri, J. (2022). The incorporated environmental policies and regulations into bioenergy supply chain management: A literature review. *Science of The Total Environment*.
22. Datta, A., Hossain, A., & Roy, S. (2019). An overview on biofuels and their advantages and disadvantages .
23. Davoudi, Azadeh, Houshmand, Mahmoud, & Sadat, M. (2018). Investigating policies to support the unemployed in Iran using fuzzy Delphi methods and fuzzy hierarchical analysis. *Journal of Economic Research and Policies, 26(87), 249-308.* (in persian)
24. Defrancesco, E ,.Gatto, P., Runge, F., & Trestini, S. (2008). Factors affecting farmers' participation in agri-environmental measures: A Northern Italian perspective. *Journal of agricultural economics*.
25. DEMİRBAŞ, A. (2005). Bioethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass. *Energy sources*.
26. Duca, D., & Toscano, G. (2022). Biomass energy resources: feedstock quality and bioenergy sustainability.
27. Dussadee, N., & Ramaraj, R. Integrated management of organic agricultural waste enhancing soil quality, mitigating climate change and advancing biofuel production .
28. Farokh, M. (2023). Designing a sustainable closed-loop supply chain model with carbon taxation and technology selection in the battery industry. *Industrial Management Perspective*, 13(4), 46-84. (in persian)
29. Feng, Y., Shoaib, M., Akram, R., Alnafrah, I., Ai, F., & Irfan, M. (2024). Assessing and prioritizing biogas energy barriers: A sustainable roadmap for energy security. *Renewable Energy*.
30. Finnegan, J. J .(2023) .Changing prices in a changing climate: Electoral competition and fossil fuel taxation. *Comparative Political Studies*, *56*(*8*).
31. Fulquet, G., & Pelfini, A. (2015). Brazil as a new international cooperation actor in sub-Saharan Africa: Biofuels at the crossroads between sustainable development and natural resource exploitation. *Energy Research & Social Science*.
32. Fung, R., Tang, J., Tu, Y., & Wang, D. (2002). Product design resources optimization using a non-linear fuzzy quality function deployment model. *International Journal of Production Research*.

33. Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Smith, N. R., Calvo, E. Z. R., Mejía-Argueta, C., & Mosallanezhad, B. (2024). An in-depth metaheuristic approach to design a sustainable closed-loop agri-food supply chain network. *Applied Soft Computing*.
34. Giller, K. E., Delaune, T., Silva, J. V., Descheemaeker, K., van de Ven, G., Schut, A. G., van Wijk, M., Hammond, J., Hochman, Z., & Taulya, G. (2021). The future of farming: Who will produce our food? *Food Security*.
35. Haghighi, & Babapour. (2018). Using renewable energy sources as an effective way to reduce environmental pollution. *Journal of Renewable Energies and New, 5(1), 41-51.* (in persian)
36. Heidari, J., Mamarian, A., & Bozorgi Amiri, A. (2019). Coordination of environmental quality decisions and product performance quality in two-tier green supply chain. *Industrial Management Perspective*, *9(1), 87-114.* (in persian)
37. Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*.
38. Jiao, H., Tsigkou, K., Elsamahy ,T., Pispas, K., Sun, J., Manthos, G., Schagerl, M., Sventzouri, E., Al-Tohamy, R., & Kornaros, M. (2024). Recent advances in sustainable hydrogen production from microalgae: Mechanisms, challenges, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety* .
39. Joshi, O., Chapagain, B., Kharel, G., Poudyal, N. C., Murray, B. D., & Mehmood, S. R. (2022). Benefits and challenges of online instruction in agriculture and natural resource education. *Interactive Learning Environments*.
40. Kazemi, A., Mehregan, M., & Shakouri Ganjavi, H. (2011). Presenting a multi-objective linear programming model for optimal allocation of Iran's energy resources. *Industrial Management Perspective*, 1(3), 43-65. (in persian)
41. Kessler, J., & Sperling, D. (2016). Tracking US biofuel innovation through patents. *Energy policy*.
42. Kiehbadroudinezhad, M., Merabet, A., Ghenai, C., Abo-Khalil, A. G., & Salameh, T. (2023). The role of biofuels for sustainable MicrogridsF: A path towards carbon neutrality and the green economy. *Heliyon* .
43. Kiwjaroun, C., Tubtimdee, C., & Piumsomboon, P. (2009). LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods. *Journal of Cleaner Production*.
44. Krishankumar, R., Ramanujam, N., Zavadskas, E. K., Ravichandran, K. S., & Gandomi, A. H. (2024). Ranking barriers impeding sustainability adoption in clean energy supply chains: A hybrid framework with Fermatean fuzzy data. *IEEE Transactions on Engineering Management* .
45. Kumar, A. (2020). Climate change: challenges to reduce global warming and role of biofuels. *Climate Change, Photosynthesis and Advanced Biofuels: The Role of Biotechnology in the Production of Value-added Plant Bio-products*.
46. Leng, C., Wei, S.-Y., Al-Abyadh, M. H. A., Halteh, K., Bauetdinov, M., Le, L. T., & Alzoubi, H. M. (2024). An empirical assessment of the effect of natural resources and financial technologies on sustainable development in resource abundant developing countries: Evidence using MMQR estimation. *Resources Policy*.
47. Lezoche, M., Hernandez, J. E., Díaz, M. d. M. E. A., Panetto, H., & Kacprzyk, J. (2020). Agri-food 4: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in industry*.
48. Li, H., Wang, W., Fan, L., Li, Q., & Chen, X. (2020). A novel hybrid MCDM model for machine tool selection using fuzzy DEMATEL, entropy weighting and later defuzzification VIKOR. *Applied Soft Computing*. .
49. Li, S. (2024). Reviewing Air Pollutants Generated during the Pyrolysis of Solid Waste for Biofuel and Biochar Production: Toward Cleaner Production Practices. *Sustainability*.
50. Liang, H., Ren ,J., Gao, Z., Gao, S., Luo, X., Dong, L., & Scipioni, A. (2016). Identification of critical success factors for sustainable development of biofuel industry in China based on grey decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL). *Journal of Cleaner Production* ..
51. Magnalardo, m. (2022). Ingegneria metabolica del lievito rosso oleaginoso rhodotorula toruloides per la sovraespressione di geni carotenogenici .
52. Mahardhani, A. J. (2023). The Role of Public Policy in Fostering Technological Innovation and Sustainability. *Journal of Contemporary Administration and Management (ADMAN)*.
53. Mahdavi, P., Martinez-Alvarez, C. B., & Ross, M. L. (2022). Why do governments tax or subsidize fossil fuels? *The Journal of Politics*, *84*(4).
54. Mintz-Habib, N. (2013). Malaysian biofuels industry experience: a socio-political analysis of the commercial environment. *Energy policy*.
55. Miremadi, T., & Rahimi Rad, Z. (2016). Identifying System Failures in the Analysis of the Biofuel Technology Innovation System in Iran. Journal of Science, Technology and Policy, 27(0).
56. pen_sparkMueller, S. A., Anderson, J. E., & Wallington, T. J. (2011). Impact of biofuel production and other supply and demand factors on food price increases in ۲۰۰۸. *Biomass and Bioenergy*, *35*(*5*).
57. Naef, A. (2024). The impossible love of fossil fuel companies for carbon taxes. *Ecological Economics*.

58. Navina, B. K., Velmurugan, N. K., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Palanivelu, J., Thamarai, P., Vickram, A., Saravanan, A., & Shakoor, A. (2024). Fungal bioremediation approaches for the removal of toxic pollutants: Mechanistic understanding for biorefinery applications. *Chemosphere*.
59. Nordin, I., Elofsson, K., & Jansson, T. (2022). Optimal localisation of agricultural biofuel production facilities and feedstock: a Swedish case study. *European Review of Agricultural Economics* ..
60. Okoli, C., & Schabram, K. (2015). A guide to conducting a systematic literature review of information systems research .
61. Othman, M. F., Adam, A., Najafi, G., & Mamat, R. (2017). Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
62. 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*.
63. Peloza, J. (2009). The challenge of measuring financial impacts from investments in corporate social performance. *Journal of management*.
64. Picazo-Espinosa, R., González-López, J., & Manzanera, M. (2011). Bioresources for third-generation biofuels. *Biofuel's engineering process technology*.
65. 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*.
66. Raeoufian, Azar, Adel, & Hosseini, Kh. (2020). Application of linear physical programming in optimizing the expansion of fuzzy quality performance. *Journal of Research in Operations and Its Applications, 17(1), 1-23.*(in persian)
67. Ransikarbum, K., & Pitakaso, R. (2024). Multi-objective optimization design of sustainable biofuel network with integrated fuzzy analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*.
68. Rezvan, A. (1391). A review of the most important bioenergy sources and their environmental benefits. The First National Conference on Environmental Protection and Plannin.(in persian)
69. Riyadi, T. W., Spraggon, M., Herawan, S., Idris, M., Paristiawan, P., Putra, N., Silambarasan, R., & Veza, I. (2023). Biodiesel for HCCI engine: Prospects and challenges of sustainability biodiesel for energy transition. *Results in Engineering*.
70. Safarzadeh, Estantajin, Sh., & Ansieh. (2021). The effect of hydroelectric energy consumption on carbon dioxide emissions, ecological footprint, and carbon footprint in Iran. *Iranian Journal of Energy Economics, 10(40), 39-61.*(in persian)
71. Saravanan, A. P., Mathimani, T., Deviram, G., Rajendran, K., & Pugazhendhi, A. (2018). Biofuel policy in India: a review of policy barriers in sustainable marketing of biofuel. *Journal of Cleaner Production* .
72. Sharmila, V. G., Shanmugavel, S. P., & Banu, J. R. (2024). A review on emerging technologies and machine learning approaches for sustainable production of biofuel from biomass waste. *Biomass and Bioenergy*.
73. Sheehan, J. J. (2009). Biofuels and the conundrum of sustainability. *Current opinion in biotechnology*.
74. Solomon, B. D. (2010). Biofuels and sustainability. *Annals of the New York Academy of Sciences*. .
75. Song, X., Feih, S., Zhai, W., Sun, C.-N., Li, F., Maiti ,R., Wei, J., Yang, Y., Oancea, V., & Brandt, L. R. (2020). Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components. *Materials & design*.
76. Thompson, B., Leduc, G., Manevska-Tasevska, G., Toma, L., & Hansson, H. (2024). Farmers' adoption of ecological practices: A systematic literature map. *Journal of agricultural economics*.
77. Toulaii, Harirchi, Sharareh, Far, A., & Taherzadeh. (2022). Lignocellulosic biomass: renewable resources for bioethanol production. *Microbial Biology, 11(43), 71-95.*(in persian)
78. Van Beers, C., & Strand, J. (2013). Political determinants of fossil fuel pricing .*World Bank Policy Research Working Paper* .
79. Vigneswaran, V., Gowd, S. C., Ganeshan, P., Kumar, D., & Rajendran, K. (2024). The influence of policies in commercializing biofuels and bioproducts from woody biomass. In *Sustainable Biorefining of Woody Biomass to Biofuels and Biochemicals* .
80. Wang, S., Sun, L., & Iqbal, S. (2022). Green financing role on renewable energy dependence and energy transition in E ۷economies. *Renewable Energy*. .
81. Wassie, S. B. (2020). Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. *Environmental systems research*.
82. Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., & Batista, L. (2020). A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry ۴٫۰technologies' enablers. *Computers in industry*.

83. Yadav, P. K., Sachan, R., & Dwivedi, D. K. (2024). Ecological Consequences: Understanding the effects of agricultural pollution on ecosystem, wildlife, and biodiversity. *A Comprehensive Exploration of Soil, Water, and Air Pollution in Agriculture* .
84. Yang, Q., Chen, Z.-S., Zhu, J.-H., Martínez, L., Pedrycz, W., & Skibniewski, M. J. (2024). Concept Design Evaluation of Sustainable Product–Service Systems: A QFD–TOPSIS Integrated Framework with Basic Uncertain Linguistic Information. *Group Decision and Negotiation* .
85. Yu, Z., Zhang, F., Gao, C., Mangi, E., & Ali, C. (2024). The potential for bioenergy generated on marginal land to offset agricultural greenhouse gas emissions in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
86. Zentou, H., Rosli, N. S., Wen, C. H., Abdul Azeez, K., & Gomes, C. (2019). The viability of biofuels in developing countries: Successes, failures, and challenges. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*.
87. Zhao, X., Ke, Y., Zuo, J., Xiong, W., & Wu, P. (2020). Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production* .