Life Cycle Assessment and Technical-Economic-Environmental Feasibility Study of Biodiesel Production from Jatropha for Use in Light Vehicles in Iran

ABSTRACT

This study aimed to comprehensively evaluate the potential for producing and using biodiesel extracted from Jatropha plants in Iran's light-duty transport sector. To achieve this goal, an integrated multi-criteria framework was developed, covering technical, economic, environmental (direct emissions), and full life cycle assessment (LCA) dimensions. The technical modeling of the fuel production process was performed using Aspen HYSYS software, economic analysis was conducted using the Total Revenue Requirement (TRR) method with Monte Carlo simulation, and the life cycle assessment was carried out using the IMPACT 2002+ method in SimaPro software. The most prominent findings indicated that although the jatropha biodiesel vehicle holds a relative environmental advantage with a global warming potential of 32.69 grams of CO_2 equivalent per kilometer, it faces two major challenges. First, its high economic cost is reflected in a levelized cost of $0.88 per kilometer traveled (50% higher than gasoline) and a production cost of $1 per liter of biodiesel fuel. Second, the significant emission of nitrogen oxides at 0.721 grams per kilometer traveled poses a concern for air quality. Additionally, substantial land use (15.14 square meters per kilometer) was identified as a key challenge within its life cycle. Consequently, this technology is not competitive as a widespread substitute under current conditions in Iran. However, with smart policymaking and a focus on specific complementary applications (such as fixed-route public transport fleets or agricultural machinery in remote areas), it could play a role in diversifying the country's energy mix and reducing net carbon emissions.

Keywords: *Jatropha biofuel, multi-objective assessment, life cycle assessment (LCA), transportation style*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The global transition towards sustainable energy has intensified the search for viable alternatives to fossil fuels in the transport sector. In Iran, this pursuit is further driven by the dual objectives of enhancing energy security and reducing environmental impact. Biodiesel derived from non-edible feedstocks like Jatropha presents a promising avenue, particularly given Iran's potential for cultivating this resilient plant on marginal lands. However, a comprehensive assessment of its viability requires moving beyond isolated technical or economic analyses. This study, therefore, develops and applies an integrated multi-criteria framework to holistically evaluate the potential of Jatropha-based biodiesel for light-duty transport in Iran, simultaneously examining technical performance, economic feasibility, direct environmental emissions, and full life-cycle impacts to provide a robust foundation for strategic decision-making.

Method

This research employed an integrated assessment framework that combined technical process simulation, economic modeling, and environmental life cycle analysis. The technical performance of the biodiesel production process from Jatropha oil was rigorously modeled using Aspen HYSYS software to determine energy and utility requirements. Economic viability was assessed using the Total Revenue Requirement (TRR) method, with key financial uncertainties, such as inflation rates, addressed through Monte Carlo simulation. Finally, the comprehensive environmental footprint was evaluated via a cradle-to-grave Life Cycle Assessment (LCA) conducted in SimaPro software using the IMPACT 2002+ methodology, encompassing all stages from agricultural cultivation to vehicle end-of-life.

Results

The multi-criteria analysis revealed a nuanced picture of Jatropha biodiesel's potential in Iran. From an environmental perspective, the fuel showed a relative advantage in climate impact, with a life-cycle global warming potential of 32.69 g CO_2-eq/km, approximately 9% lower than that of conventional gasoline. However, this benefit was countered by significant challenges: economically, the levelized cost of travel was calculated at $0.88 per kilometer, 50% higher than gasoline, primarily due to a high production cost of $1 per liter of fuel. Environmentally, the vehicle emitted 0.721 g/km of nitrogen oxides (NOx), a level posing concerns

for local air quality, while the LCA also identified substantial land use (15.14 m²/km) as a critical resource consumption issue.

Conclusions

In conclusion, while Jatropha biodiesel demonstrates a measurable advantage in reducing net greenhouse gas emissions within the Iranian context, its current economic non-competitiveness and notable NOx emissions preclude its viability as a widespread, direct substitute for conventional fuels in the light-duty vehicle segment. The findings suggest that its strategic value lies instead in targeted, complementary applications, such as in public transport fleets on fixed routes or agricultural machinery in remote areas, where energy diversification is paramount. For such niches to be realized, concerted policy support, focused research and development to lower production costs and mitigate NOx emissions, and careful planning for cultivation on marginal lands are essential prerequisites for integrating this biofuel into a sustainable national energy portfolio.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the author(s) did’nt used any tools or services provided by AI.

Author Contributions

Conceptualization, A.M., R.A. and A.H; methodology, A.M. and R.A.; software, A.M.; validation, R.A. and A.H; formal analysis, A.M., R.A. and A.H; investigation, A.M.; resources, A.M.; data curation, A.M.; writing—original draft preparation, A.M.; writing—review and editing, KA.M., R.A. and A.H; visualization, A.M.; supervision, R.A.; project administration, R.A. and A.H; funding acquisition, R.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest

زیر استاری نشده

امکان‌سنجی فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات تولید بیودیزل از جاتروفا برای کاربرد در خودروهای سبک در ایران

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی جامع پتانسیل تولید و مصرف سوخت بیودیزل استخراج شده از گیاه جاتروفا در بخش حمل‌ونقل سبک ایران انجام شد. برای نیل به این هدف، یک چارچوب چندمعیاره یکپارچه توسعه داده شد که ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی (آلاینده‌های مستقیم) و ارزیابی چرخه حیات کامل را پوشش می‌دهد. مدل‌سازی فنی فرآیند تولید سوخت در نرم‌افزار Aspen HYSYS، تحلیل اقتصادی با روش TRR و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، و ارزیابی چرخه حیات با روش IMPACT 2002+ در نرم‌افزار SimaPro انجام پذیرفت. شاخص‌ترین یافته‌ها نشان داد که اگرچه خودروی بیودیزلی جاتروفا از لحاظ زیست‌محیطی دارای مزیت نسبی است با پتانسیل گرمایش جهانی ۳۲/۶۹ گرم معادل CO_2، اما با دو چالش عمده مواجه می‌باشد. نخست، هزینه اقتصادی بالا به‌صورت هزینه تمام‌شده ۰/۸۸ دلار بر هر کیلومتر پیمایش (۵۰ درصد بیشتر از بنزینی) و هزینه تولید ۱ دلار بر لیتر سوخت بیودیزل است. دوم، انتشار قابل توجه اکسیدهای نیتروژن به میزان ۰/۷۲۱ گرم بر هر کیلومتر پیمایش خودرو کیلومتر یک نگرانی برای کیفیت هواست. همچنین، مصرف قابل توجه زمین (۱۵,۱۴ مترمربع بر کیلومتر) به عنوان یک چالش کلیدی در چرخه حیات شناسایی شد. در نتیجه، این فناوری در شرایط فعلی ایران به‌عنوان یک جایگزین فراگیر رقابت‌پذیر نیست، اما می‌تواند با سیاست‌گذاری هوشمند و تمرکز بر کاربردهای مکمل و خاص (مانند ناوگان حمل‌ونقل عمومی ثابت یا ماشین‌آلات کشاورزی در مناطق دورافتاده)، سهمی در تنوع‌بخشی به سبد انرژی و کاهش انتشار خالص کربن کشور ایفا کند.

کلیدواژه‌ها

سوخت زیستی جاتروفا، ارزیابی چندهدفه، ارزیابی چرخه حیات (LCA)، حمل‌ونقل سبک

ویراستاری نشده

مقدمه

استفاده از سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل، به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب برگشت‌ناپذیر محیط زیست در نظر گرفته شده است که تأثیرات منفی بر سلامت انسان دارد (Zhang et al., 2022). مطالعات نشان می‌دهد که حدود ۱۴ درصد از گازهای گلخانه‌ای آزاد شده در جو از بخش حمل و نقل است که ۹۵ درصد آن از سوزاندن سوخت‌های فسیلی از جمله بنزین و گازوئیل، ناشی می‌شود (Charabi et al., 2020).

داده‌های فعلی وابستگی شدید بخش حمل و نقل به سوخت‌های فسیلی را نشان می‌دهد که چالش‌های عمده‌ای از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، نوسانات قیمت نفت و نگرانی‌ها درباره امنیت انرژی را خصوصا برای کشوری مانند ایران به دنبال خواهد داشت. روندی که پیش‌بینی می‌گردد تقاضای سوخت در بخش حمل و نقل تا سال ۲۰۴۰، ۴۰ درصد افزایش خواهد یافت و در نتیجه سهم حمل و نقل در تولید گازهای گلخانه‌ای بیش از پیش خواهد بود (IEA, 2018). بنابراین، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها ضروری است، بلکه نیاز مبرمی برای حفظ تقاضای انرژی آینده نیز می‌باشد (Attari et al., 2022; Guerrero et al., 2021).

طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA)[1] تا سال ۲۰۳۰، ۱۰ درصد از انرژی مورد استفاده در بخش حمل و نقل از سوخت‌های زیستی مایع، که شامل بیودیزل و هر دو نوع اتانول معمولی و پیشرفته است، تأمین خواهد شد (Kober et al., 2020). در سال‌های اخیر، بیودیزل به دلیل فرآیند تولید آسان و خواص سوختی برتر خود اعم از سمیت کم و توانایی بالای تجزیه توسط فرآیندهای طبیعی، ، به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای جایگزینی دیزل فعلی، مورد توجه ویژه قرار گرفته است (Xu et al., 2017). بیودیزل از مخلوطی از استرهای آلکیل مشتق شده از اسیدهای چرب آزاد تشکیل شده است و در مقایسه با سوخت‌های نفتی، احتراق بیودیزل منجر به کاهش بیش از ۹۰ درصدی کل هیدروکربن‌های نسوخته و کاهش ۷۵ تا ۹۰ درصدی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای می‌شود (Gebremariam, 2023). نکته مهم آن است که استفاده از بیودیزل در وسایل نقلیه در بخش حمل و نقل قادر است تا به ترتیب منجر به کاهش ۷۸، ۴۶,۷ و ۶۶,۷ درصدی انتشار خالص دی اکسید کربن، مونوکسید کربن و ذرات معلق می‌گردد (Chutia & Phukan, 2024) که می‌تواند به طور مؤثر اثر گرمایش جهانی را کاهش دهد (Kazemi Shariat Panahi et al., 2019). علاوه بر این، مزایای دیگری نیز از جمله بازده انرژی بالاتر، سازگاری با موتور، راندمان احتراق بالاتر، عدد اکتان بالاتر، گوگرد کمتر، تجدیدپذیری آن و زیست‌تخریب‌پذیری کم‌تر را می‌توان برای بیودیزل برشمرد (Jeswani et al., 2020).

متأسفانه در ایران به دلیل غنای ذخایر فسیلی و عدم توجه کافی به مسائل محیط زیستی، سهم تولید بیودیزل در کشور صفر است (Shadidi et al., 2022). این در حالی است که کشورهایی مانند اندونزی و ایالات متحده آمریکا به ترتیب با تولید ۷۹۰۰ و ۶۵۰۰ میلیون لیتر بیودیزل در سال ۲۰۱۹، گام‌های بلندی در این زمینه برداشته‌اند (Klymchuk et al., 2020). برای کشور ایران که با چالش‌های متعددی از جمله آلودگی هوای کلان‌شهرها، کاهش منابع آبی و وابستگی به درآمدهای نفتی مواجه است، توسعه سوخت‌های زیستی تولیدشده از گیاهان کم‌توقع مانند جاتروفا می‌تواند به عنوان یک راهبرد ملی مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهمترین محدودیت‌ها برای گسترش بیشتر بیودیزل در ایران، دسترسی به خوراک آن در ایران است. برخلاف کارخانه‌های بیواتانول، کارخانه‌های تولید بیودیزل اغلب در مقیاس کوچک هستند که خوراک آنها در درجه اول به روغن پخت و پز یا چربی حیوانی متکی است. با این وجود، قیمت چنین خوراک‌هایی برای تولید بیودیزل اقتصادی نیست، زیرا برای صنایع خوراک دام و سایر فرآوری‌های شیمیایی نیز مورد تقاضا هستند (Zhao, 2015). علاوه بر این، فقدان یارانه‌های شناخته شده برای ترویج تولید و استفاده از بیودیزل منجر به تضعیف ظرفیت کامل تولید بیودیزل می‌شود. برای جلوگیری از رقابت غذایی، منابع روغنی غیرخوراکی توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند، از جمله جاتروفا، کنگر وحشی، پنجنگ، کنجد وحشی، کرچک، حنا و حنظل (Alsultan et al., 2021). یکی از موانع اصلی توسعه بیودیزل در ایران، دسترسی به خوراک اقتصادی است. برای غلبه بر این چالش، جاتروفا به عنوان گزینه‌ای امیدبخش مطرح می‌شود.

ویرایش اولیه

[1] International Renewable Energy Agency

این گیاه با قابلیت کشت در اراضی فقیر و غیرقابل کشت محصولات غذایی و به دلیل غیرخوراکی بودن، با چالش رقابت غذایی مواجه نیست (Okonkwo & Okwu, 2024). تولید بذر سالانه این گیاه تا ۰٫۸ کیلوگرم در متر مربع است و محتوای روغن دانه‌های آن حدود ۳۸ تا ۴۱ درصد وزنی و محتوای روغن هسته آن بین ۴۹ تا ۶۲ درصد وزنی است (Arockiasamy et al., 2021) و گیاه مناسبی برای کشت در ایران می‌تواند باشد.

در اواخر دهه ۱۹۷۰، تحقیق و توسعه روغن جاتروفا به عنوان ماده اولیه برای تولید بیودیزل آغاز شد (Yang et al., 2012). به طور گسترده ثابت شده است که جاتروفا یک ماده اولیه بسیار امیدوارکننده برای تولید بیودیزل است. علاوه بر انتخاب روغن‌های اولیه مناسب‌تر، روند غالب در تحقیقات بیودیزل همچنان سنتز کاتالیزورهای نوآورانه و کارآمد است (Aderibigbe et al., 2020; Laskar et al., 2021; Yusuff et al., 2024).

با این حال، توسعه صنعت تولید بیودیزل از جاتروفا مستلزم ارزیابی جامع و همه‌جانبه از جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. مطالعات پیشین عمدتاً بر روی یک یا دو بعد از این فرآیند متمرکز بوده‌اند و شکاف پژوهشی در زمینه انجام یک تحلیل یکپارچه که شامل مدلسازی دقیق فرآیند، تحلیل اقتصادی با روش‌های نوین و نیز ارزیابی چرخه حیات باشد، به وضوح احساس می‌شود. همچنین مطالعات کمی وجود دارد که از مدل‌سازی نرم‌افزاری برای طراحی، بهینه‌سازی و نظارت بر فرآیندهای تولید بیودیزل استفاده کرده‌اند (Singh et al., 2021). ارزیابی چرخه حیات (LCA) ابزاری سیستماتیک است که تأثیر زیست‌محیطی یک فرآیند، محصول یا فعالیت را از "گهواره تا گور" ارزیابی می‌کند. از سالهای گذشته تا به امروز، LCA به طور کامل توسعه یافته و در سناریوها و موارد مختلف اعمال می‌شود.

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع و یکپارچه زنجیره تولید و مصرف بیودیزل حاصل از گیاه جاتروفا در ایران با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تخصصی و روش‌های نوین تحلیلی انجام شده است. در این راستا، فرآیند تولید بیودیزل از روغن گیاه جاتروفا به روش ترانس استریفیکاسیون در نرم‌افزار اسپن هایسیس[1]مدل‌سازی و داده‌های فنی و عملیاتی فرآیند استخراج گردید. سپس تحلیل اقتصادی فرآیند با استفاده از روش نیازهای درآمدی سالانه (TRR[2]) در محیط نرم‌افزار متلب[3]انجام و شاخص‌های کلیدی اقتصادی از جمله هزینه تمام‌شده هر لیتر بیودیزل و هزینه پیمایش هر کیلومتر برای خودروی حمل و نقل سبک محاسبه شد. در بخش زیست‌محیطی، گازهای آلاینده خروجی از اگزوز خودرو و همچنین آلاینده‌های خروجی از پالایشگاه تولید بیودیزل تولیدی از جاتروفا مورد سنجش قرار گرفت. همچنین ارزیابی چرخه حیات تولید و مصرف این سوخت از مرحله کشت گیاه تا مصرف در خودرو با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو[4]و بانک اطلاعاتی جامع داخل نرم‌افزار انجام پذیرفت. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده با شرایط خودروهای بنزینی و تولید بنزین از خوراک نفت در پالایشگاه مقایسه شد تا بتوان با نگاه جامع‌تری در خصوص تغییر سوخت و حمل و نقل آینده خودروهای سبک کشور قضاوت نمود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه یک چارچوب تحلیلی جدید و چندهدفه برای انجام یک ارزیابی جامع پایداری از فناوری خودروهای سبک بیودیزلی و فرآیند تولید بیودیزل از گیاه جاتروفا را توسعه می‌دهد. این ارزیابی به طور خاص برای ایران در نظر گرفته شده است و محدودیت‌های اقتصادی منحصر به فرد و پتانسیل تولید سوخت زیستی محلی آن را در نظر می‌گیرد. مدل مفهومی که در شکل ۱ نشان داده شده است، چهار مؤلفه تحلیلی متمایز را ادغام می‌کند: (۱) مدلسازی فنی (۲) مدل اقتصادی، (۳) ارزیابی جامع تأثیر انتشار مستقیم و (۴) ارزیابی جامع چرخه حیات

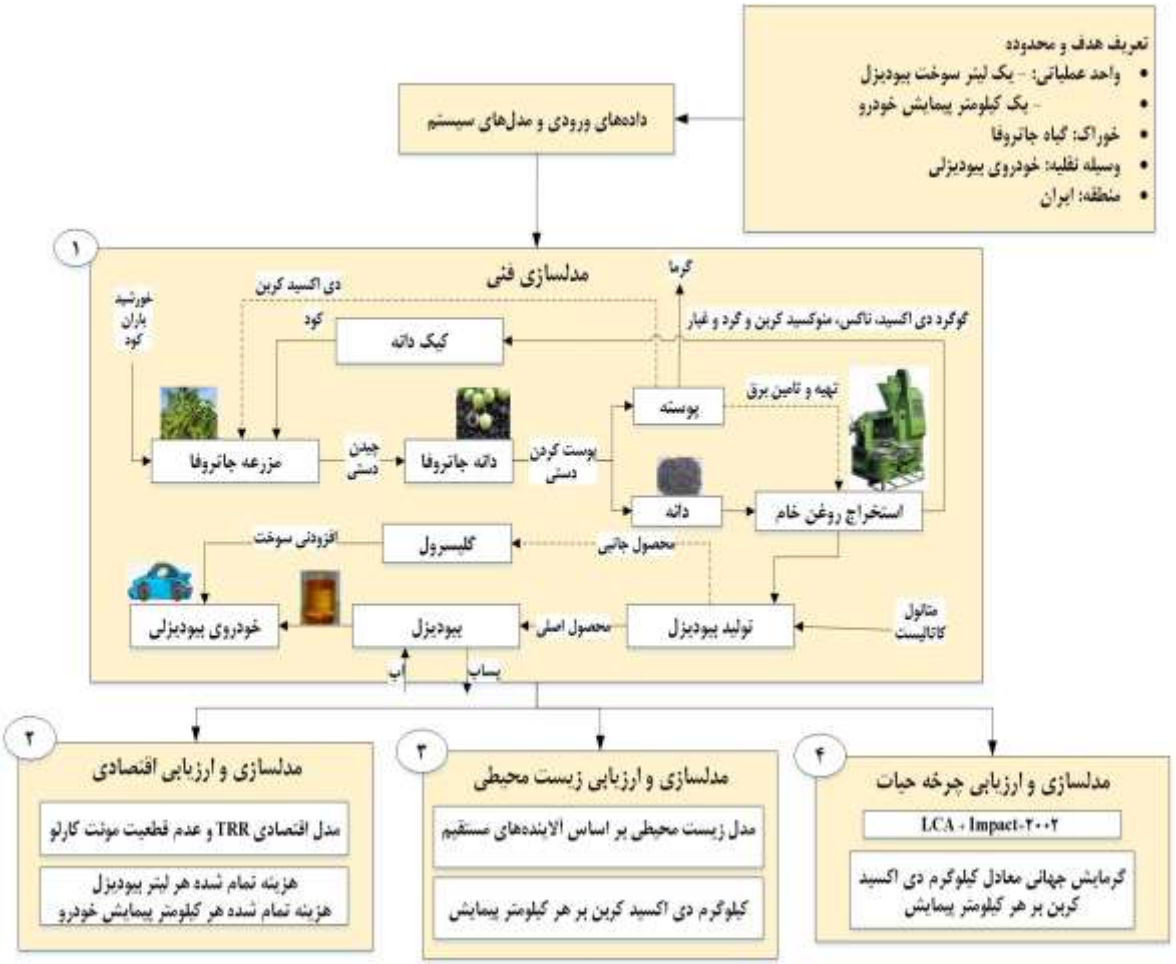
مدل‌سازی فنی و ترمودینامیکی برای پالایشگاه تولید بیودیزل از کارخانه جاتروفا در نرم‌افزار AspenHysis انجام شد. پس از انجام مدل‌سازی فنی، مدل‌سازی اقتصادی با کدنویسی در نرم‌افزار Matlab انجام شد. در مدل‌سازی اقتصادی، از روش TRR و الزامات درآمد

ویرایش نشده

---

[1] Aspen HYSYS
[2] Total Revenue Riquirement
[3] MATLAB
[4] SimaPro

سالانه برای محاسبه قیمت هر لیتر بیودیزل تولیدی در ایران و هزینه هر کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی بر اساس شرایط ایران استفاده شد و برای حذف عدم قطعیت مهم‌ترین پارامتر اقتصادی که نرخ تورم بود، از روش مونت کارلو استفاده شد.



شکل ۱. مدل مفهومی و جایگاه ارزیابی‌های مختلف فنی، اقتصادی، زیست محیطی و ارزیابی چرخه حیات در مطالعه حاضر

مدل‌سازی فنی

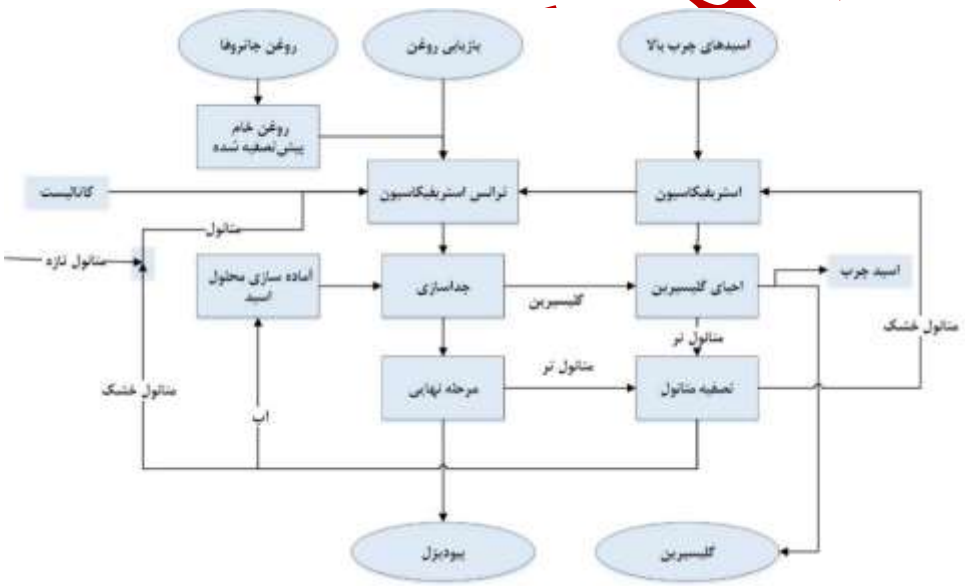
صنعتی‌ترین و رایج‌ترین شیوه برای تولید بیودیزل از گیاه جاتروفا روش ترانس‌استریفیکاسیون[1] است (Kumar et al., 2025). در این شیوه با استفاده از کاتالیزور مناسب تری‌گلیسریدها (روغن) با زنجیره ۱۴ تا ۲۰ کربنی با الکل‌های کوتاه زنجیر واکنش داده و بیودیزل به عنوان فرآورده اصلی و گلیسیرین به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌گردند. ماده اصلی تشکیل‌دهنده‌ی روغن‌ها، انواع اسیدهای چرب و گلیسرول هستند، در حالی که در آن‌ها مقدار کمی مواد دیگر شامل اسیدهای چرب آزاد، فسفولیپیدها، استرول‌ها، آب و ترکیبات معطر و ناخالص نیز وجود دارد.

الکل‌های مناسب برای انجام این واکنش شامل متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول می‌باشند که با توجه به شرایط کشور ایران در تولید متانول و دسترسی مناسب به متانول از پتروشیمی‌هایی داخلی اعم از پتروشیمی زاگرس (تولید متانول از گاز طبیعی است و ایران یکی از غنی‌ترین کشورها در ذخایر گاز طبیعی است)، از این الکل برای تولید بیودیزل در تحلیل‌ها استفاده شد. همچنین متانول به دلیل ارزانی و خواص فیزیکی و شیمیایی بهتر نسبت به اتانول، بهترین الکل برای انجام این واکنش نیز محسوب می‌شود.

فرایند تولید بیودیزل از چند بخش اصلی مطابق شکل ۲، تشکیل شده که عبارت است از:

[1] Transesterification

- پیش‌تصفیه روغن جاتروفا: روغن خام جاتروفا ممکن است حاوی اسیدهای چرب آزاد[1]، رطوبت و ناخالصی‌های جامد باشد. اگر درصد اسیدهای چرب آزاد بالا باشد (بالای ۲ درصد)، ابتدا استریفیکاسیون اسیدی با متانول انجام می‌شود تا اسیدهای چرب آزاد کاهش یابد. رطوبت‌زدایی و فیلتراسیون برای حذف ناخالصی‌ها نیز در این مرحله انجام می‌شود.
- آماده‌سازی واکنش‌گرها: متانول با کاتالیزور قلیایی (معمولاً NaOH یا KOH) مخلوط می‌شود تا متوکسید سدیم/پتاسیم تشکیل شود. نسبت مولی متانول به روغن معمولاً ۶:۱ تا ۹:۱ است.
- واکنش ترانس‌استریفیکاسیون: مخلوط متانول–کاتالیزور به روغن اضافه و در راکتور هم‌زده می‌شود[2].
- جداسازی فازها: پس از اتمام واکنش، مخلوط به مخزن جداسازی منتقل می‌شود که فاز فوقانی آن بیودیزل خام (متیل‌استر) و فاز تحتانی آن گلیسرول خام (حاوی متانول اضافی، کاتالیزور و صابون) است.
- تصفیه بیودیزل: ابتدا شستشو با آب به منظور حذف باقی‌مانده کاتالیزور، صابون و متانول انجام شده و سپس فرآیند خشک کردن با حرارت ملایم یا تحت خلأ برای حذف رطوبت انجام می‌شود. در برخی موارد، تقطیر برای بهبود کیفیت بیودیزل انجام می‌شود.
- بازیابی متانول و تصفیه گلیسرول: متانول از فاز گلیسرول با تقطیر بازیابی و مجدداً در فرآیند استفاده می‌شود. گلیسرول خام پس از خنثی‌سازی و تصفیه، به عنوان محصول جانبی قابلیت فروش و یا استفاده دارد.



شکل ۲. فرآیند تولید بیودیزل از روغن گیاه جاتروفا در مدلسازی فنی (Okullo & Noah, 2017)

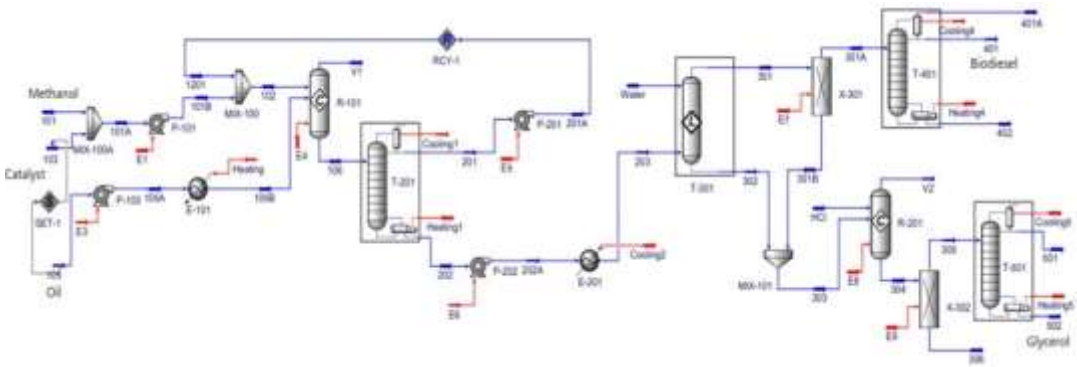
در این مطالعه، فرآیند تولید بیودیزل از روغن جاتروفا به روش ترانس‌استریفیکاسیون با استفاده از نرم‌افزار اسپن هایسیس[3] و بر اساس داده‌های ترمودینامیکی استاندارد کتابخانه‌ای شبیه‌سازی شد. جزئیات فلوشیت فرآیند شامل تجهیزات اصلی و شرایط عملیاتی در شکل ۳ نشان داده شده است.

---

[1] Free Fatty Acids (FFA)

[2] شرایط: دمای ۶۰–۶۵ درجه سانتی‌گراد، اتمسفر نرمال، زمان ۱–۲ ساعت.

[3] Hysys



شکل ۳. شبیه‌سازی فرآیند واحد تولید بیودیزل از روغن گیاه جاتروفا در نرم‌افزار هایسیس (منبع: یافته‌های تحقیق)

برای انتخاب بهترین معادلات حاکم برای حل ترمودینامیک روابط موجود در شبیه‌سازی از مدل NRTL[1] استفاده شد. به دلیل این که فرآیند مذکور غالباً دارای فاز مایع و بیشتر ترکیبات هیدروکربنی است و در عین حال دارای مواد قطبی مانند متانول و آب است، مطلوب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی فنی مدل NRTL است. ضمن آن که به خاطر وجود مواد هیدروکربنی زیاد در واحد، برای حالت گازی از مدل Peng Robinson استفاده شد. برای آنکه بتوان تحلیل در شرایط میانگین را به دست آورد، ظرفیت واحد را ۱۶۰۰۰۰ تن بر سال و مطابق با میانگین واحدهای تولید بیودیزل در جهان در نظر گرفته شد اما در نهایت نتایج بر اساس تولید یک لیتر بیودیزل تبدیل و در بخش نتایج آورده شده‌است. در این بخش برخی پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی فنی در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱. مقادیر مهم استفاده شده در مدل‌سازی فنی مطالعه پیش رو

مؤلفه سیستم	پارامتر	مقدار (واحد)
خودروی بیودیزلی	میانگین مصرف سوخت خودروی بیودیزلی در ایران	۷ (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر)
سوخت بیودیزل	ارزش حرارتی سوخت بیودیزلی تولیدی از روغن جاتروفا	۳۳ (مگاژول بر کیلوگرم)
کشت جاتروفا	فاکتور محتوای روغن	۳۰ (درصد)
استخراج روغن	راندمان استخراج مکانیکی	۸۵ (درصد)
جاتروفا	جرم روغن بازیابی‌شده (Mseed)	۰/۲۵۵ (کیلوگرم روغن به ازای هر کیلوگرم بذر)
جاتروفا	عملکرد بذر جاتروفا (Yseed)	۲۵۰۰ (کیلوگرم در هکتار)
فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون	راندمان فرآیند تولید بیودیزل	۹۸ (درصد)
بیودیزل تولیدی	چگالی	۰/۸۸ (کیلوگرم بر لیتر)

همچنین مشخصات خودروی بیودیزلی مورد مطالعه بر اساس شرایط میانگین مطابق جدول ۲ می‌باشد و تحلیل‌های بعدی اعم از تحلیل ارزیابی چرخه حیات منطبق با مشخصات خودروی انتخابی و تعریف آن در نرم‌افزار سیماپرو انجام شد.

جدول ۲. مشخصات خودروی بیودیزلی میان رده مورد مطالعه در پژوهش حاضر (در شرایط میانگین کشور ایران)

پارامتر	مشخصات
نوع موتور	دیزلی اصلاح شده با قابلیت استفاده از بیودیزل
مخزن و سیستم سوخت‌رسانی	مقاوم‌سازی لوله‌ها و واشرها در برابر خوردگی ناشی از بیودیزل (بیودیزل خاصیت حلالیت بالاتری دارد). نصب فیلترهای قوی‌تر برای جلوگیری از رسوبات
استارت در هوای سرد	نیاز به سیستم پیش‌گرمایش (بیودیزل خالص در دمای پایین غلیظ می‌شود)
توان موتور	تا ۱۲۰ اسب بخار
شتاب	۰–۱۰۰ کیلومتربرساعت: ۱۲ تا ۲۰ ثانیه * معمولاً عملکرد ضعیفتر نسبت به خودروهای بنزینی همکلاس
وزن و ابعاد	۱٬۲۰۰ تا ۱٬۵۰۰ کیلوگرم (مشابه خودروهای دیزلی سبک موجود در ایران مانند پژو ۴۰۵ دیزل)

[1] Non-random two-liquid model

ویرایش اولیه

با در نظر گرفتن پارامترهای مورد نظر به عنوان ورودی‌های مدلسازی فنی، پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل اقتصادی، زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات به عنوان خروجی‌های مدل فنی استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

مدل‌سازی اقتصادی

در این بخش هدف محاسبه هزینه تمام شده هر لیتر بیودیزل تولید شده از جاتروفا و هزینه هر کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی در شرایط کشور ایران است. برای تحلیل اقتصادی از روش درآمد نهایی سیستم (روش TRR) استفاده شده‌است (Mohtaram et al., 2023). این روش تمام هزینه‌های پروژه که شامل میزان بازگشت سرمایه نیز می‌باشد را محاسبه می‌کند. در این روش براساس فرضیات اقتصادی و محاسبه قیمت خرید تجهیزات و سوخت، در آمد نهایی مورد نیاز به صورت سال به سال محاسبه می‌شود. سرانجام تمام هزینه‌ها شامل هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری، هزینه‌ی سوخت درطول دوره کارکرد سیستم به صورت سالانه همسطح‌سازی می‌شوند. در واقع هزینه نهایی مد نظر، مشمول کل هزینه‌های سیستم در یک سال، اعم از هزینه حاصل از فروش محصول و هزینه کارکرد سیستم می‌باشد. این هزینه ها شامل دو بخش هزینه اعمال شده و مخارج است. هزینه اعمال شده شامل بازگشت سرمایه کل (TCR)، هزینه بازگشت سرمایه (ROI) و هزینه های دیگر شامل مالیات و غیره می باشد. مخارج شامل هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد. مجموع هزینه اعمال شده و مخارج، کل عایدی سیستم در یک سال را تشکیل می‌دهند. تحلیل اقتصادی یک سیستم ترمودینامیکی شامل عوامل گوناگونی می باشد که در مطالعه پیش‌رو به عواملی مورد استفاده قرار گرفته‌اند پرداخته شد و از توضیح سایر عوامل چشم پوشی شده‌است. بر اساس مدل اقتصادی TRR فرض بر این است که قیمت تجهیزات در پایان عمر کارکرد سیستم به صفر می رسند. با این فرض سرمایه بازیافتی سالانه از رابطهٔ ۱) محاسبه شد:

$$BD_j = \frac{PEC_{tot}}{BL} \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۱)

که

BD_j هزینه استهلاک سیستم و PEC_{tot} هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است و BL تعداد سال های کارکرد سیستم می‌باشد که در این مطالعه هم برای واحد تولید بیودیزل و هم برای خودروهای بیودیزلی ۱۵ سال در نظر گرفته شده است.

میزان بازگشت سرمایه بیانگر میزان سرمایه‌گذاری محاسبه نشده است. این هزینه که به صورت سالانه می‌باشد، در واقع سود سرمایه‌گذاری اولیه سیستم می‌باشد که به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه افزوده می‌شود. به منظور محاسبه بازگشت سرمایه ابتدا بالانس سرمایه در هر سال محاسبه می‌شود. بالانس هزینه در ابتدای سال اول (BBY_1) برابر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است.

$$BBY_1 = PEC_{tot}$$ رابطهٔ ۲)

بالانس هزینه در ابتدای هر سال از کم کردن هزینه سال قبل از میزان استهلاک سالانه محاسبه می‌شود.

$$BBY_j = BBY_{j-1} - BD_j \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۳)

میزان بازگشت سرمایه‌گذاری سالانه از رابطهٔ ۴) محاسبه می شود:

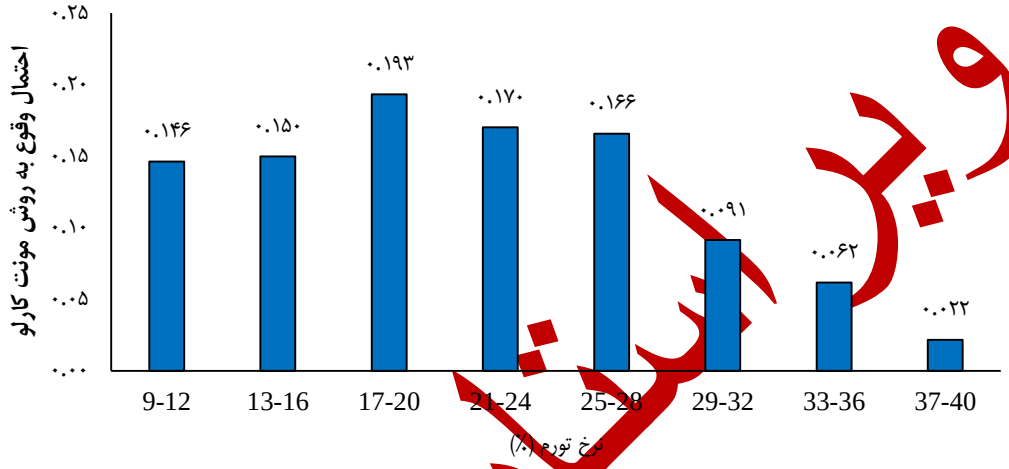
$$ROI_j = BBY_{j-1} \times i_{eff} \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۴)

که i_{eff} نرخ تورم است که در مطالعه حاضر با توجه اینکه در کشور ایران نرخ تورم سالانه بسیار متغیر بوده و نمی‌توان نرخ مشخصی را برای آن پیش‌بینی کرد. با توجه به عدم قطعیت برخی پارامترهای اقتصادی اعم از نرخ بهره، نرخ تورم، قیمت سوخت (که تنوع قابل توجهی بر حسب نوع فناوری دارد)، پیش‌بینی و انتخاب مقادیر قطعی برای این پارامترها به منظور ارائه یک مدل دقیق، امری ضروری است. برای حل این موضوع از روش مونت کارلو (Zhang, 2021) استفاده شده است.

روش مونت کارلو یک روش محاسباتی است که برای محاسبه نتایج به نمونه‌های تصادفی تولید شده بر حسب یک تابع توزیع اکتفا می‌کند. برای پیش‌بینی مقدار یک پارامتر باید ابتدا تولید نمونه‌های تصادفی به تعداد کافی انجام شود. تولید نمونه‌های تصادفی معمولا بر حسب توابع توزیع انجام می‌گیرد. سپس باید شرایط نمونه‌های تصادفی مورد بررسی قرار گرفته تا احتمال وقوع هر یک از نمونه‌های

ویرایشگاری نشده

تصادفی محاسبه گردد. در پایان بر حسب اینکه احتمال وقوع کدام مقدار بیشتر است، مقدار پارامتر مورد نظر پیش بینی می‌گردد. در مطالعه پیش رو تولید اعداد تصادفی بر اساس روش معکوس تابع توزیع تجمعی انجام شده است. این تابع وابسته به مقادیر میانگین، واریانس و انحراف معیار مقادیر تحقق یافته پارامتر مورد بررسی است و بر اساس آن اعداد تصادفی تولید کرده و احتمال پیش بینی وقوع یکی از مقادیر را انجام می‌دهد. در بین پارامترهای اقتصادی، نرخ تورم در ایران در سالیان مختلف با تغییرات محسوسی همراه بوده است. بنابراین با روش مونت کارلو و بر اساس معکوس تابع توزیع تجمعی و اطلاعات سالیان گذشته، عدم قطعیت این پارامترها بررسی و مقدار نهایی آن تعیین شده است. شکل ۴ احتمال وقوع هر یک از نرخ‌های تورم به صورت میانگین در سال‌های آتی بر اساس نرخ تورم در سالیان گذشته را بر حسب روش مونت کارلو پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۴. احتمال وقوع مقادیر مختلف تورم به کمک روش مونت کارلو و بر اساس داده‌های ۲۰ سال اخیر تورم ایران (منبع: یافته‌های تحقیق)

همانطور که ملاحظه می‌شود، احتمال وقوع یک رقم بر حسب ارقام دوره‌های قبل بیشتر است و در این پژوهش نرخ تورم که بیشترین احتمال وقوع از نظر روش مونت کارلو را داشته به عنوان مقدار نهایی فرض شده است. بنابراین میانگین نرخ تورم ۲۰ درصد برای تحلیل ۱۵ سال بر حسب روش مونت کارلو فرض مناسب است. هزینه سوخت و انرژی در سال اول کارکرد (FC_0) همان قیمت‌های مرتبط با سال پایه است و هزینه سوخت در سال j ام (FC_j) کارکرد از رابطهٔ ۵) محاسبه می‌شود:

$$FC_j = FC_0 \times (1 + r_{FC})^j \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۵)

r_{FC} تورم افزایش قیمت سوخت می باشد که در این تحقیق برابر نرخ تورم در نظر گرفته شده است. هزینه تعمیرات معمولا به صورت کسری از هزینه خرید تجهیزات در نظر گرفته می‌شود.

هزینه تعمیر و نگهداری در سال اول (OMC_0) همان هزینه‌های سال پایه است و هزینه تعمیر و نگهداری در سال j ام (OMC_j) کارکرد سیستم از رابطهٔ ۶) محاسبه می شود:

$$OMC_j = OMC_0 \times (1 + r_{OMC})^j \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۶)

r_{OMC}، نرخ سود مربوط به افزایش هزینه تعمیر و نگهداری می باشد که برابر نرخ تورم در نظر گرفته می‌شود.

کل عایدی سالانه در سال j ام کارکرد (TRR_j) از مجموع هزینه بازیافتی، بازگشت سرمایه، هزینه سوخت، و هزینه تعمیر و نگهداری در سال j ام بدست می آید.

$$TRR_j = BD_j + ROI_j + FC_j + OMC_j \qquad j=1,2,\dots,BL$$ رابطهٔ ۷)

مقایسه تاثیر هزینه‌های مختلف در سیستم به وسیله مقایسه هزینه سالانه عوامل مختلفی مانند هزینه سوخت، هزینه تعمیر و نگهداری، و هزینه خرید تجهیزات، صورت می‌گیرد. کل عایدی سالانه در طول سال‌های مختلف با افزایش سال‌های کارکرد سیستم در حال افزایش است. بنابراین نیاز به همسطح سازی این هزینه می‌باشد. کل عایدی سالانه همسطح شده از رابطهٔ ۸) محاسبه می‌شود:

ویرایشاری شده

رابطهٔ ۸)
$$TRR_L = \frac{i_{eff}\times(1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n-1} \times \sum_1^n \frac{TRR_j}{(1+i_{eff})^j} \qquad j=1,2,\ldots,BL$$

هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری نیز به صورت سالانه در حال افزایش است. هزینه همسطح شده سوخت و تعمیر و نگهداری، از رابطهٔ ۹) به دست می‌آید:

رابطهٔ ۹)
$$\begin{cases} FC_L = FC_0 \times \frac{k_{FC}\times(1-k_{FC}^n)}{(1-k_{FC})} \times \frac{i_{eff}\times(1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n-1} \quad . \qquad k_{FC} = \frac{1+r_{FC}}{1+i_{eff}} \\ OMC_L = OMC_0 \times \frac{k_{OMC}\times(1-k_{OMC}^n)}{(1-k_{OMC})} \times \frac{i_{eff}\times(1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n-1} \quad . \quad k_{OMC} = \frac{1+r_{OMC}}{1+i_{eff}} \end{cases}$$

k_{FC} و k_{OMC} نرخ سالانه افزایش هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری است. در نهایت هزینه اعمال شده یکسان سالانه از رابطهٔ ۱۰) محاسبه می شود:

رابطهٔ ۱۰)
$$CC_L = TRR_L - FC_L - OMC_L$$

در واقع این هزینه بهای تمام شده یک لیتر بیودیزل تولیدی و بهای تمام شده یک کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی، با در نظر گرفتن زمان کارکرد ۱۵ ساله برای واحد تولید بیودیزل و خودروهای بیودیزلی و با در نظر گرفتن میانگین پیمایش ۱۶۰۰۰ کیلومتر بر سال (Jonidi Jafari & Arfaeinia, 2016) برای هر خودروی بیودیزلی است.

پارامترهای اقتصادی ذکر شده اعم از هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیر و نگهداری برای پالایشگاه تولید بیودیزل و خودروهای بیودیزلی، هزینه سوخت و انرژی و نرخ تنزیل و تورم همگی مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳. پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در مدلسازی TRR سیستم مورد مطالعه

پارامتر	مقدار (واحد)
میانگین قیمت خودروی بیودیزلی سبک (Rout et al., 2022)	۳۲۵۰۰ (دلار)
میانگین هزینه بهره‌برداری خودروهای بیودیزلی (Rout et al., 2022)	۱۱۵۰ (دلار بر سال)
مصرف سوخت به ازای هر صد کیلومتر پیمایش (Rout et al., 2022)	۷ (لیتر)
میانگین هزینه سرمایه‌گذاری پالایشگاه تولید بیودیزل از روغن جاتروفا (Gerveni et al., 2023)	۱/۲۵ (دلار بر لیتر)
میانگین هزینه بهره‌برداری ثابت پالایشگاه تولید بیودیزل از روغن جاتروفا (Gerveni et al., 2023)	۰/۰۵۳ (دلار بر لیتر بر سال)
میانگین هزینه بهره‌برداری متغیر پالایشگاه تولید بیودیزل از روغن جاتروفا (Gerveni et al., 2023)	۰/۰۶۶ (دلار بر لیتر بر سال)

با در نظر گرفتن تمام موارد فوق و استفاده از مدل اقتصادی در نهایت بهای تمام شده هر لیتر بیودیزل تولیدی از روغن گیاه جاتروفا و هزینه هر کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی سبک در جاده‌های ایران محاسبه می‌گردد.

مدل‌سازی زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات

پس از مدل‌سازی اقتصادی، مرحله بعدی مدل‌سازی زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات در زنجیره تولید و مصرف بیودیزل از گیاه جاتروفا است. ارزیابی چرخه حیات (LCA) یک رویکرد تحلیلی سیستماتیک با مفهوم گهواره تا گور (Cradle-to-Grave) برای ارزیابی آثار زیست‌محیطی یک محصول، فرآیند یا فعالیت در تمام مراحل چرخه زندگی آن است. این رویکرد با جمع‌آوری مواد خام از طبیعت (گهواره) آغاز شده و مراحل فرآوری، تولید، توزیع، مصرف و در نهایت مدیریت پسماند (اعم از بازیافت، استفاده مجدد یا دفن) را در بر می‌گیرد (Krishna & Manickam, 2017). ارزیابی چرخه حیات امکان تخمین اثرات زیست محیطی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخه حیات محصول را مهیا می‌کند. چرخه حیات مفهومی مجزا از تولید آلایندگی زیست‌محیطی ناشی از اگزوزهای خودروها، صنایع و فناوری‌ها است. چرخه حیات یک محصول با استخراج مواد خام آغازشده و با مراحل تولید، حمل‌ونقل و مصرف ادامه و با مرحله مدیریت پسماند و نابودی نهایی پایان می‌یابد. هر مرحله از چرخه حیات همراه با انتشار آلاینده‌ها به محیط و مصرف منابع و مواد همراه است (Krishna & Manickam, 2017). مرز LCA شامل شش مرحله است: (۱) استخراج و فرآوری خوراک؛ (۲) تولید؛ (۳) حمل و نقل و توزیع؛ (۴) استفاده،

ویرایش نشده

استفاده مجدد و نگهداری؛ (۵) بازیافت؛ و (۶) دفع (Hellweg et al., 2023). بنابراین، LCA به شناسایی مهمترین تأثیرات و فعالیت‌های چرخه حیات که نیاز به بهبود دارند، کمک می‌کند.

در این راستا تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تمام مراحل چرخه حیات محصولات و خدمات باید به‌طور دقیق مشخص شوند که این امر نیازمند بررسی ارزیابی چرخه حیات است. نتیجه این ارزیابی، بهینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی یک محصول، یک فناوری یا یک شرکت یا واحد صنعتی می‌باشد. برای ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی زنجیره تولید بیودیزل از گیاه جاتروفا و خودروی بیودیزلی در شرایط ایران، از روش استاندارد ارزیابی چرخه حیات (LCA) مطابق با استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ۱۴۰۴۴ (Hauschild et al., 2018; Life Cycle Assesment Theory 2022) استفاده شد. این ارزیابی با هدف تحلیل اثرات خودروی سبک دیزلی اصلاح‌شده برای استفاده از سوخت بیودیزل تولیدشده از گیاه جاتروفا طراحی شده و کلیه مراحل زنجیره تأمین این فناوری را پوشش می‌دهد.

در ادامه به صورت مختصر تعیین هدف و دامنه، فهرست نویسی یا سیاهه ارزیابی اثرات و تفسیر نتایج آورده شده است.

هدف، واحد کارکرد و مرز سیستم

هدف: هدف اصلی، کمی‌سازی اثرات زیست‌محیطی چرخه حیات کامل خودروی بیودیزلی با منشأ کشت جاتروفا در ایران است. این تحلیل، شناسایی مراحل بحرانی (نظیر کشت گیاه یا تبدیل سوخت) و ارائه بینشی مبتنی بر شواهد برای سیاست‌گذاری در حوزه سوخت‌های زیستی پایدار را ممکن می‌سازد.

واحد کارکرد: معیار پایه برای تمام محاسبات پیمایش یک کیلومتر توسط یک خودروی میان‌رده بیودیزلی در شرایط متوسط عملیاتی جاده‌های ایران تعریف شد.

مرز سیستم: مرز سیستم این ارزیابی از نوع "از گهواره تا گور" است و چهار مرحله اصلی زیر را دربرمی‌گیرد:

۱- تولید سوخت (کشت و فرآوری): این مرحله کلیدی شامل کلیه فعالیت‌های کشاورزی برای تولید خوراک اولیه است: آماده‌سازی زمین، آبیاری، کاشت، داشت و برداشت گیاه جاتروفا مرحله بعد، فرآیندهای تبدیلی در پالایشگاه تولید بیودیزل است که شامل حمل‌ونقل دانه، استخراج روغن، و انجام واکنش ترانس‌استریفیکاسیون برای تولید بیودیزل خام و تصفیه آن می‌شود.

۲- ساخت خودرو و قطعات: شامل استخراج مواد اولیه، تولید و مونتاژ کلیه قطعات خودروی دیزلی سبک (با در نظر گرفتن اصلاحات خاص برای سازگاری با بیودیزل، نظیر قطعات مقاوم در برابر خوردگی) است.

۳- فاز بهره‌برداری: شامل مصرف بیودیزل در طول عمر عملیاتی خودرو (با فرض پیمایش سالانه ۱۶ هزار کیلومتر و پیمایش کل ۲۴۰ هزار کیلومتر در ۱۵ سال) و انتشار مستقیم اگزوز است.

۴- پایان عمر: شامل جمع‌آوری، بازیافت و دفع خودرو و ضایعات آن است.

جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل موجودی

تدوین سیاههٔ موجودی نهاده‌ها و ستانده‌های این سیستم ترکیبی، متکی بر داده‌های خاص این تحقیق و پایگاه‌های معتبر بین‌المللی بود:

- داده‌های اولیه و منطقه‌ای: داده‌های فنی مربوط به عملکرد کشت جاتروفا در شرایط آب‌وهوایی ایران (بازدهی در هکتار، نیاز آبی، مصرف نهاده‌های کشاورزی) از مقالات معتبر داخلی و بانک اطلاعاتی نرم افزار سیماپرو و مدل‌سازی فنی و استخراج داده‌های انرژی از نرم‌افزار هایسیس استخراج شد. پارامترهای فرآیند تولید بیودیزل (بازده واکنش، مصرف انرژی و مواد شیمیایی کمکی) نیز از طریق مدل‌سازی فرآیندی در نرم‌افزار Aspen HYSYS و تطبیق با شرایط پالایشگاه‌های داخلی برآورد گردید.
- داده‌های ثانویه و پایگاه‌های داده: داده‌های مربوط به انتشارهای زیست‌محیطی فرآیندهای صنعتی پشتیبان (مانند تولید الکتریسیته و مواد شیمیایی)، ساخت خودرو و حمل‌ونقل، از پایگاه‌های داده جامع درون‌نرم‌افزار تخصصی اخذ شد.

ویراستاری شده

ارزیابی اثرات چرخه حیات

در این مرحله، داده‌های موجودی به شاخص‌های کمی اثرات زیست‌محیطی تبدیل شدند. از روش ارزیابی IMPACT 2002+ در نرم‌افزار SimaPro برای این محاسبات استفاده شد. دلیل انتخاب روش IMPACT 2002+، ارائه چارچوبی ترکیبی (combined midpoint/damage approach) در این روش است که امکان تحلیل نتایج هم در سطح طبقات میانی (مانند سمیت انسانی) و هم در سطح طبقات پایانی (آسیب‌های نهایی به سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و منابع) را فراهم می‌کند. با توجه به ماهیت سیستم مورد تحلیل، تمرکز اصلی بر دسته‌های اثر زیر بود:

- گرمایش جهانی(GWP) : با در نظر گرفتن جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفر توسط گیاه در مرحله کشت (جریان منفی کربن) و انتشار آن در مراحل سوختن سوخت و فرآیند تولید.
- اسیدی شدن زمین و آب :عمدتاً متأثر از انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx) و گوگرد (SOx).
- اکتروفیکاسیون: مرتبط با رواناب کودهای نیتروژنه و فسفره مصرفی در مرحله کشت.
- تصرف زمین: به دلیل استفاده مستقیم از زمین برای کشت جاتروفا، این شاخص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تفسیر و تحلیل حساسیت

نتایج با تأکید بر شناسایی مراحل دارای بیشترین سهم در هر یک از صدمات و پیامدهای زیست‌محیطی در فاز بهره‌برداری یا مصرف انرژی در کل فرآیند زنجیره پیمایش خودروی بیودیزلی تفسیر شد .عدم قطعیت بر اساس ماتریس پدیگری اطلاعات پس‌زمینه نرم افزار سیماپرو ۱/۱۲ در نظر گرفته شد. تحلیل حساسیت اثرات و پیامدهای زیست‌محیطی بر اساس اطلاعات سیاهه ورودی به نرم‌افزار و روش مونت کارلو که در نرم‌افزار موجود بود نشان داد که در گروه آسیب سلامت انسان، عدم‌قطعیت ۱۲+ درصد و ۸– درصدی، در گروه آسیب اکوسیستم، عدم‌قطعیت ۱۲+ درصد و ۱۳– درصدی، در گروه آسیب تغییرات اقلیمی عدم‌قطعیت‌های ۱۸+ درصد و ۱۶– درصد و در گروه آسیب منابع عدم قطعیت عدم‌قطعیت ۲۹+ درصد و ۱۸– درصدی می‌باشد.

خروجی نهایی این بخش، شاخص گرمایش جهانی خالص و دیگر اثرات کلیدی به ازای هر کیلومتر پیمایش است.

نتایج و بحث

هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک ارزیابی چندمعیاره دقیق از تولید سوخت بیودیزل از گیاه جاتروفا و خودروهای بیودیزلی با سوخت تولیدشده از گیاه جاتروفا در شرایط خاص کشور ایران بود. با تمرکز بر چارچوب جغرافیایی ایران و در نظر گرفتن کل زنجیره تأمین سوخت، نتایج این پژوهش تصویری روشن از مزایا، چالش‌ها و جایگاه این فناوری در بخش حمل‌ونقل سبک ارائه می‌دهد.

ارزیابی فنی

با مدل‌سازی فنی واحد تولید بیودیزل از روغن گیاه جاتروفا در نرم‌افزار اسپن هایسیس مهمترین نتایج این بخش شامل مصرف انرژی و یوتیلیتی به ازای تولید هر لیتر بیودیزل استخراج و مطابق جدول ۴ گزارش شده‌است.

ویرایش نشده

[1] Global Wa

جدول ۴. میزان مصرف انرژی و یوتیلیتی به ازای تولید هر لیتر بیودیزل از گیاه جاتروفا بر اساس مدل‌سازی در نرم افزار اسپن هایسیس

مصرف انرژی	مقدار	محدوده معتبر در مطالعات مشابه	تفسیر و مقایسه
روغن داغ	۷ (گرم بر لیتر تولید بیودیزل)	متغیر، وابسته به بازده راکتور و بازیافت حرارت	مقدار منطقی. نشان‌دهنده طراحی نسبتاً بهینه راکتور ترانس‌استریفیکاسیون و سیستم بازیافت حرارت است. در مطالعاتی که بازیافت حرارتی ندارند، این مقدار می‌تواند تا ۳–۲ برابر بیشتر باشد.
بخار با فشار متوسط	۲/۲ (گرم بر لیتر تولید بیودیزل)		
بخار با فشار کم	۰/۰۱ (گرم بر لیتر تولید بیودیزل)		
آب سرد	۳۲/۱۸ (گرم بر لیتر تولید بیودیزل)	معمولاً بین ۲۰ تا ۵۰ گرم/لیتر برای کندانسورها و خنک‌کن‌ها	در محدوده متعارف. مقدار مصرف مستقیماً به بازدهی مبدل‌های حرارتی و دمای عملیاتی انتخاب‌شده در مدل وابسته است.
برق مصرفی	۰/۱۲ (کیلووات–ساعت بر لیتر تولید بیودیزل)	معمولاً ناچیز برای فرآیند پایه، اما برای خردکن و پمپاژ قابل توجه است	شامل تمام مراحل: خردایش دانه، پرس و استخراج روغن، همزن‌های راکتور، سیستم‌های جداسازی و پمپاژ.

استخراج میزان مواد مصرفی و نتایج این بخش به تحلیل دقیق اقتصادی (خصوصا برای هزینه تمام شده هر لیتر بیودیزل تولیدی و هر کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی)، زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات کمک شایانی می‌کند.

ارزیابی اقتصادی

بر اساس مدل‌سازی اقتصادی انجام‌شده با روش TRR و در نظر گرفتن نرخ تنزیل و تورم خاص ایران، هزینه نهایی هرلیتر بیودیزل تولیدی از گیاه جاتروفا ۱ دلار و هزینه هر کیلومتر پیمایش برای خودروی بیودیزلی ۰/۸۸ دلار محاسبه شد. از آنجا که هزینه تمام شده هر لیتر بنزین در ایران تقریبا ۰/۱۳ دلار است، بهای تمام شده هر لیتر سوخت بیودیزل بیش از هفت برابر هزینه تمام شده هر لیتر بنزین است و هزینه هر کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزل در ایران با شرایط مشابه هر کیلومتر پیمایش خودروهای بنزینی نشان می‌دهد که هزینه اقتصادی پیمایش با خودروهای بیودیزلی نیز ۵۰ درصد بیشتر از خودروی بنزینی (۰/۵۸ دلار بر کیلومتر) است. تحلیل حساسیت با روش مونت‌کارلو نیز نشان داد که این رتبه‌بندی اقتصادی در برابر عدم قطعیت پارامترهایی مانند نرخ تورم پایدار است. علت اصلی این هزینه بالا را می‌توان به فرآیند نسبتاً پیچیده و پرهزینه تولید بیودیزل از گیاه جاتروفا نسبت داد که شامل مراحل کشت، برداشت، استخراج روغن و فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون است. با این حال، مطالعات نشان می‌دهند که ایران پتانسیل قابل توجهی برای کشت جاتروفا در زمین‌های حاشیه‌ای و نیمه‌خشک دارد که می‌تواند هزینه تولید خوراک اولیه را کاهش دهد.

ارزیابی زیست‌محیطی و چرخه حیات (LCA)

برای درک جامع‌تر تأثیرات زیست‌محیطی، ارزیابی چرخه حیات کامل خودروی بیودیزلی از مرحله کشت جاتروفا تا پایان عمر خودرو، با روش IMPACT 2002+ در نرم‌افزار SimaPro انجام شد. در مدلسازی LCA مطالعه حاضر برای زنجیره تولید و مصرف بیودیزل جاتروفا چهار فرآیند مهم تعریف شده است:

- فرآیند ۱: کشت جاتروفا (Jatropha Cultivation) بر اساس واحد عملکردی و خروجی کیلوگرم دانه جاتروفا
- فرآیند ۲: استخراج روغن از دانه جاتروفا (Oil Extraction) بر اساس واحد عملکردی و خروجی کیلوگرم روغن خام جاتروفا
- فرآیند ۳: تولید بیودیزل(Transesterification) بر اساس واحد عملکردی و خروجی کیلوگرم بیودیزل
- فرآیند ۴: خودروی دیزلی با قبلیت سوختن بیودیزل بر اساس واحد عملکردی و خروجی کیلومتر پیمایش

با در نظر گرفتن چهار فرآیند اصلی و استفاده از بانک اطلاعاتی و داده‌های پس‌زمینه نرم‌افزار سیماپرو و جدول سیاهه به عنوان اطلاعات ورودی و خروجی نرم‌افزار مدلسازی ارزیابی چرخه حیات انجام شد. اطلاعات سیاهه که در جدول ۵ آورده شده است برگرفته از تحلیل فنی

ویرایشی

انجام شده در نرم‌افزار هایسیس (داده‌های ورودی انرژی) و تحلیل زیست محیطی (داده‌های آلاینده‌های خروجی به جو) و داده‌های مقالات علمی در این زمینه (داده‌های تبدیل دانه جاتروفا به روغن بیودیزل و روغن بیودیزل به بیودیزل و تبدیل سوخت به پیمایش خودرو) است:

جدول ۵. سیاهه اطلاعات ورودی به نرم‌افزار سیماپرو

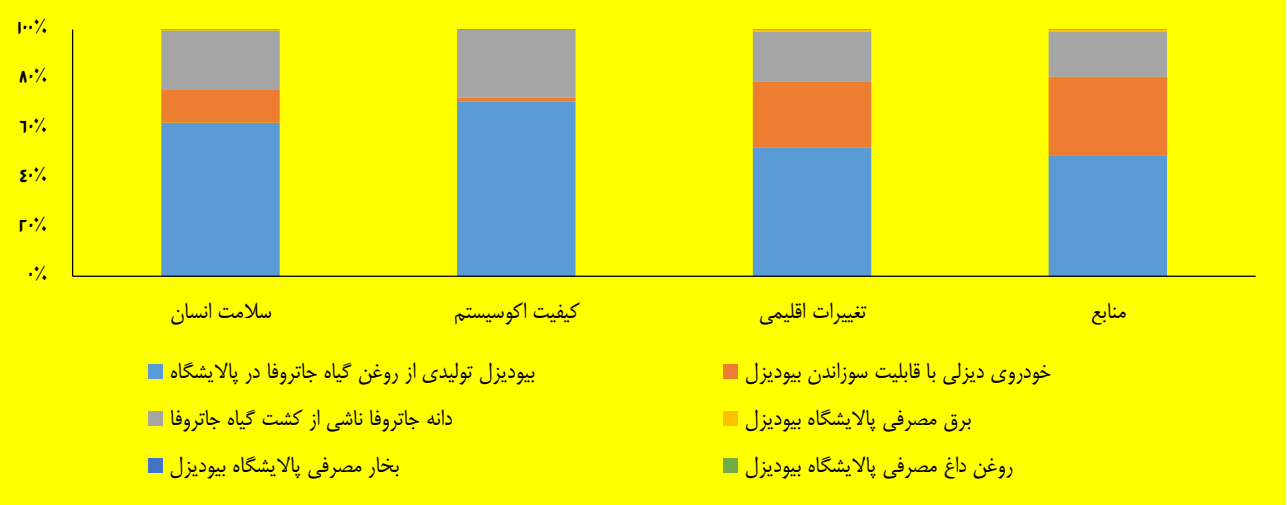
اطلاعات ورودی	مقدار سالانه	مقدار به ازای هر کیلومتر پیمایش	توضیحات
بیودیزل تولیدی از روغن گیاه جاتروفا در پالایشگاه	۹۸۵/۶ کیلوگرم	۰/۰۶۲	– به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی ۷ لیتر بیودیزل جاتروفا سوزانده می‌شود. – چگالی سوخت بیودیزلی جاتروفا ۰/۸۸۶ کیلوگرم بر لیتر است.
دانه جاتروفا ناشی از کشت گیاه جاتروفا	۲۵۰۰ کیلوگرم	۰/۱۵۶ کیلوگرم	– به طور متوسط از هر ۲/۵ کیلوگرم دانه جاتروفا ۲/۲۳ لیتر بیودیزل قابل استحصال است.
خودروی دیزلی با قابلیت سوزاندن بیودیزل	۱۶۰۰۰ هزار کیلومتر پیمایش	۱ کیلومتر پیمایش	– انتخاب خودروی میان‌رده دیزلی با قابلیت سوزاندن بیودیزل جزو فرضیات مقاله در مورد کشور ایران بوده است.
روغن داغ	۷/۸۴ کیلوگرم ۳۱۳ مگاژول	۰/۴۹ گرم ۲۰ کیلوژول	– با مدلسازی فنی واحد تولید بیودیزل در نرم‌افزار هایسیس مقدار روغن داغ مصرفی ۷ گرم بر هر لیتر بیودیزل تولیدی برآورد گردید. – ظرفیت گرمای ویژه روغن داغ ۴۰ مگاژول بر کیلوگرم است.
بخار با فشار متوسط و کم	۲۵۷۶ گرم	۱۶ گرم	– با مدلسازی فنی واحد تولید بیودیزل در نرم‌افزار هایسیس مقدار بخار فشار متوسط و کم مجموعا ۲/۳ گرم بر هر لیتر بیودیزل تولیدی برآورد گردید. – چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.
آب سرد	۳۶ لیتر	۰/۰۲۲۵ لیتر	– با مدلسازی فنی واحد تولید بیودیزل در نرم‌افزار هایسیس مقدار آب سرد مصرفی ۳۲/۱۸ گرم بر هر لیتر بیودیزل تولیدی برآورد گردید. – چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.
برق مصرفی	۱۳۳٫۵ کیلووات–ساعت	۰/۰۰۸۳ کیلووات–ساعت	– با مدلسازی فنی واحد تولید بیودیزل در نرم‌افزار هایسیس مقدار برق مصرفی ۰/۱۲ کیلووات–ساعت بر هر لیتر بیودیزل تولیدی برآورد گردید.
دی اکسید کربن (CO_2)	۴۰۳۲ کیلوگرم	۲۵۲ گرم	– تمام آلایندگی‌ها از تحلیل زیست‌محیطی محاسبه شده و شامل آلاینده‌هایی است که ناشی از سوختن مستقیم سوخت در خودرو و یا واحد تولید سوخت (پالایشگاه تولید بیودیزل) به جو وارد می‌شود. مبنای محاسبات بر اساس منابع معتبر در این زمینه است (Obligado et al., 2017; Shahir et al., 2015).
مونواکسید کربن (CO)	۱/۹۶ کیلوگرم	۰/۱۲۲۵ گرم	
اکسیدهای نیتروژن (NOx)	۱۱/۵۳۶ کیلوگرم	۰/۷۲۱ گرم	
اکسیدهای گوگرد (SOx)	۰/۳۳۶ کیلوگرم	۰/۰۲۱ گرم	

صدمات زیست محیطی هر کیلومتر پیمایش خودروهای بیودیزلی در ایران برای تمامی زنجیره به صورت کلی، به تفکیک گروه‌های آسیب مطابق جدول ۶ می‌باشد. سهم هر یک از بخش‌های تولید در دسته‌بندی آسیب‌ها مطابق شکل ۵ است.

جدول ۶: صدمات زیست‌محیطی به ازای تولید یک کیلومتر پیمایش خودروی بیودیزلی بر اساس مدل چرخه حیات

دسته‌بندی آسیب	واحد	مجموع
سلامت انسان	DALY	$۱/۰۸\times۱۰^{-۷}$
کیفیت اکوسیستم	$PDF*m^{2}*yr$	۰/۳۹
تغییرات اقلیمی	gr CO_2 eq	۷۰/۴۴
منابع	kJ primary	۷۰۳/۲

ویراستاری نشده



شکل ۵. سهم هریک از بخش‌های تولید در صدمات زیست‌محیطی چرخه حیات خودروی بیودیزلی

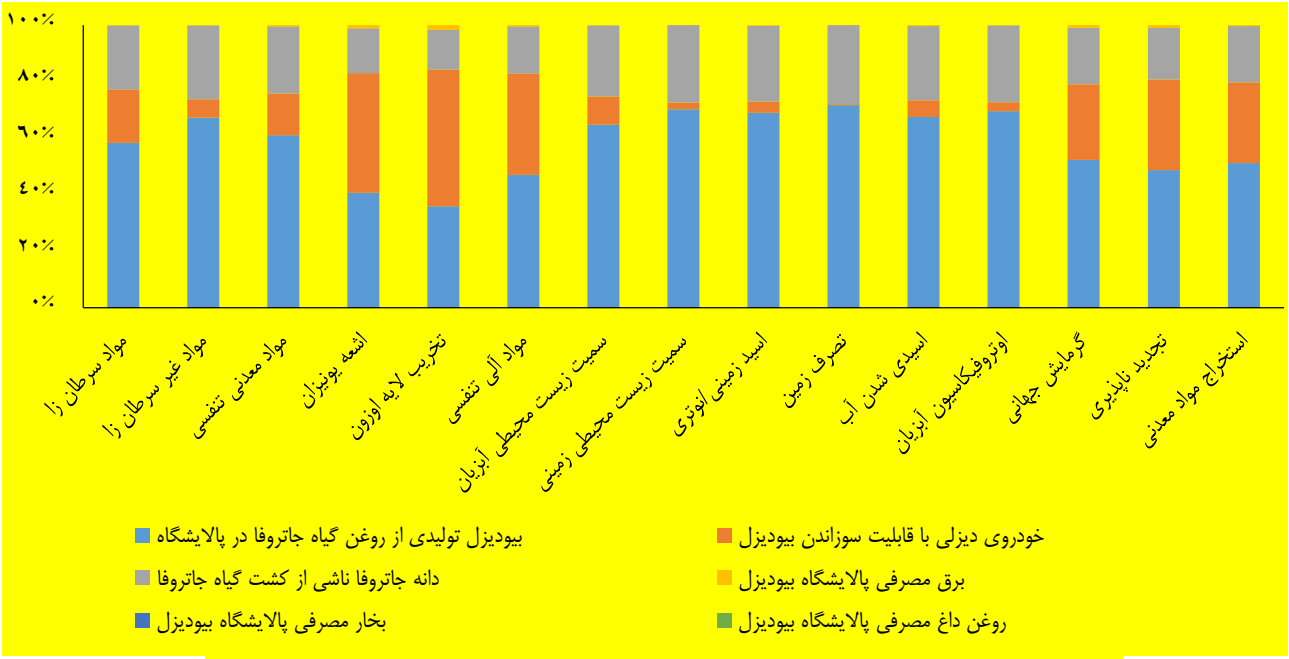
مطابق نتایج، مهترین بخش تولید در صدمات زیست‌محیطی و پیامدهای زیست‌محیطی مرتبط با فرآیند تولید بیودیزل از روغن جاتروفا در پالایشگاه است که در سلامت انسان سهم ۶۰ درصدی، کیفیت اکوسیستم سهم ۷۰ درصدی، گرمایش جهانی سهم ۴۰ درصدی و در منابع سهم ۵۰ درصدی دارد.

پیامدهای زیست محیطی زنجیره پیمایش خودروی بیودیزلی به صورت کلی به تفکیک گروه‌های اثر مطابق به ازای هر کیلومتر پیمایش در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. پیامدهای زیست محیطی ارزیابی چرخه حیات به کمک مدلسازی زنجیره پیمایش خودروی بیودیزلی در نرم افزار Sima Pro بر مبنای هرکیلومتر پیمایش

تاثیرات	واحد	مقدار
مواد سرطان زا	gr C_2H_3Cl eq	۱/۴۵
مواد غیر سرطان زا	gr C_2H_3Cl eq	۷/۵
مواد معدنی تنفسی	gr $PM_{2.5}$ eq	۰/۱۲
اشعه یونیزان	gr C^{-14} eq	۲۵۷/۴۱
تخریب لایه اوزون	gr CFC_{-11} eq	تقریبا صفر
مواد آلی تنفسی	gr C_2H_4 eq	۰/۰۲
سمیت زیست محیطی آبزیان	grTEG water	۲۰۲۱۶
سمیت زیست محیطی زمینی	gr TEG soil	۳۷۸۱۷
اسید زمینی/نوتری	gr SO_2 eq	۸/۳۷
تصرف زمین	$m_2$org.arable	۱۴۸/۲۱
اسیدی شدن آب	gr SO_2 eq	۱/۱۷
اوتروفیکاسیون آبزیان	gr PO_4 P-lim	۰/۰۶
گرمایش جهانی	gr CO_2 eq	۷۰/۴۴
تجدید ناپذیری	kJ primary	۷۰۱/۱۴
استخراج مواد معدنی	kJ surplus	۲/۰۷

هر یک از فرآیندهای زنجیره تولید و مصرف بیودیزل جاتروفا مسئول بخشی از پیامد هر یک از گروه‌های اثر می‌باشند، سهم هر عامل در شکل ۶ مشخص شده است.



شکل ۶. سهم هریک از بخش‌های تولید در پیامدهای زیست‌محیطی چرخه حیات خودروی بیودیزلی (منبع: یافته‌های تحقیق)

همچنین مهم‌ترین نتیجه ارزیابی چرخه حیات، مربوط به تغییرات اقلیمی و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) معادل۷۰,۴۴ گرم دی‌اکسیدکربن به ازای هر کیلومتر است. این مقدار، کمتر از خودروی دیزلی می‌باشد. این برتری نسبی در GWP عمدتاً ناشی از چرخه بسته کربن زیستی (جذب در زمان رشد و انتشار در زمان احتراق) است. مطالعات مشابه بین‌المللی نیز نشان داده‌اند که بیودیزل جاتروفا می‌تواند حدود ۲۵ درصد عملکرد بهتری از لحاظ گازهای گلخانه‌ای نسبت به دیزل فسیلی داشته باشد (Najafi et al., 2021). همچنین، یک مطالعه تطبیقی نشان داد که پتانسیل گرمایش جهانی بیودیزل جاتروفا در مقایسه با بیودیزل کلزا حدود ۲۸ درصد کمتر است (Shrees et al., 2025).

با این حال، ارزیابی چرخه حیات یک چالش عمده را نیز آشکار می‌کند. مصرف و تصرف قابل توجه زمین (۱۵,۱۴ مترمربع به ازای هر کیلومتر). این عدد به دلیل نیاز به زمین برای کشت گیاه جاتروفا است و نشان‌دهنده یک مبادله (Trade-off) مهم بین کاهش انتشار کربن و مصرف منابع زمین است. خوشبختانه، یکی از مزایای کلیدی گیاه جاتروفا، قابلیت کشت در زمین‌های حاشیه‌ای، کم‌بازده و نیمه‌خشک است که با کشت محصولات غذایی رقابت نمی‌کند. بنابراین، با برنامه‌ریزی صحیح مکانیابی می‌توان از این چالش کاست.

برای اعتبار سنجی نتایج حاصل شده، از منابع معتبر اعم از مطالعه صورت گرفته در مرکز تحقیقات بین‌المللی حمل‌ونقل پاک ICCT (2021) و گزارش آژانس محیط زیست اروپا (EEA 2020) استفاده گردید. در این منابع، ردپای کل کربن و گرمایش جهانی در ارزیابی چرخه حیات در خودروهای بیودیزلی با فرض پیمایش ۱۵۰۰۰۰ کیلومتر در طول عمر کاری آنها، ۱۰ الی ۳۰ تن معادل دی اکسید کربن برآورد شده است. در تحقیق پیش رو فرض بر ۱۵ سال کارکرد خودرو و سالیانه ۱۶۰۰۰ کیلومتر پیمایش به صورت میانگین بود که پیمایش ۲۴۰۰۰۰ کیلومتر در طول عمر خودروها را شامل شد. جدول ۸ مقایسه مدلسازی پژوهش حاضر و برآورد منابع معتبر به ازای هر کیلومتر پیمایش رانشان می‌دهد.

جدول ۸. اعتبارسنجی مدل ارزیابی چرخه حیات در این پژوهش با میانگین داده از منابع معتبر (Chatti & Majeed, 2022; Klymenko, 2020)

ردپای کربن کل از منابع معتبر با فرض ۱۵۰ هزار کیلومتر پیمایش (تن معادل دی اکسید کربن)	رد پای کربن در این پژوهش به ازای ۲۴۰ هزار کیلومتر پیمایش (تن معادل دی اکسید کربن)	رد پای کربن در این پژوهش با فرض پیمایش ۱۵۰ هزار کیلومتر (تن معادل دی اکسید کربن)	درصد خطا (٪)
۱۰ الی ۳۰	۱۶,۹	۲۷,۰۵	در بازه

پذیرفته شده

با ادغام تمام مدلهای مورد بررسی فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات، در پایان این بخش مهمترین نتایج مطابق جدول ۹ است.

جدول ۹. جمع‌بندی نتایج مدل‌های چندمعیاره فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ارزیابی چرخه حیات زنجیره تولید و مصرف بیودیزل از گیاه جاترفا در ایران

شاخص ارزیابی	واحد	مقدار
هزینه پیمایش	دلار بر کیلومتر	۰/۸۸
هزینه تولید سوخت	دلار بر لیتر	۱
انتشار کل مستقیم	گرم بر کیلومتر	۲۵۲/۹
پتانسیل گرمایش جهانی(GWP)	گرم معادل CO_2 بر کیلومتر	۷۰/۴۴
تصرف زمین	مترمربع بر کیلومتر	۱۵/۱۴
انتشارNOx	گرم بر کیلومتر	۰/۷۲۱

نتایج این مطالعه چندبعدی نشان می‌دهد که توسعه خودروهای بیودیزلی با سوخت جاتروفا در ایران، اگرچه در کوتاه‌مدت از جهت اقتصادی رقابت‌پذیری کمتری نسبت به گزینه‌های مرسوم دارد، اما از لحاظ زیست‌محیطی و به‌ویژه در کاهش خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای (با در نظر گرفتن چرخه کربن زیستی) دارای مزیت است. با این حال، میزان بالای انتشار NOx نیازمند توجه ویژه و تحقیق در جهت کاهش آن از طریق فناوری‌های پیشرفته موتور یا سیستم‌های تصفیه پساب است.

برای توسعه پایدار این فناوری در ایران، سیاست‌گذاری یکپارچه ضروری است. این سیاست‌ها می‌تواند شامل حمایت از تحقیقات برای کاهش هزینه‌های تولید بیودیزل، تدوین استانداردهای کیفیت سوخت، تعیین مناطق مناسب برای کشت جاتروفا بدون رقابت با منابع غذایی، و در نظر گرفتن مزایای جانبی مانند ایجاد اشتغال در مناطق محروم و جلوگیری از فرسایش خاک در زمین‌های حاشیه‌ای باشد. در نهایت، خودروی بیودیزلی جاتروفا نه به عنوان یک جایگزین فراگیر، بلکه به عنوان یک گزینه مکمل در سبد سوخت حمل‌ونقل کشور، به‌ویژه در ناوگان حمل‌ونقل عمومی بین‌شهری یا کشاورزی که دسترسی به شارژ برق مشکل است، می‌تواند نقش ایفا کند. موفقیت آن منوط به سرمایه‌گذاری بلندمدت، تحقیق و توسعه فناوری بومی، و حمایت‌های هدفمند دولت در راستای امنیت انرژی و کاهش آلایندگی است.

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، ارزیابی جامع تولید و استفاده از سوخت بیودیزل مشتق‌شده از گیاه جاتروفا در بخش حمل‌ونقل سبک ایران، با در نظر گرفتن ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و چرخه حیات بود. یافته‌های این مطالعه، تصویری واقع‌بینانه از مزایا و چالش‌های این فناوری ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که توسعه آن یک راه‌حل ساده یا سریع نیست، بلکه یک گزینه راهبردی پیچیده است که موفقیت آن منوط به مدیریت هوشمندانه مبادلات (Trade-offs) ذاتی آن می‌باشد.

مهم‌ترین یافته مثبت این تحقیق، برتری زیست‌محیطی بیودیزل جاتروفا در مقیاس چرخه حیات کامل بود. با پتانسیل گرمایش جهانی ۷۰/۴۴ گرم به ازای هر کیلومتر، این سوخت عملکردی بهتر از نمونه دیزلی از خود نشان داد. این مزیت که عمدتاً ناشی از چرخه بسته کربن زیستی است، با نتایج مطالعات مراجع بین‌المللی همسویی دارد و آن را به یک گزینه جذاب برای کمک به کاهش انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای ایران تبدیل می‌کند. با این حال، این مزیت اقلیمی با یک مانع اقتصادی بزرگ روبرو است. هزینه تولید هر لیتر سوخت بیودیزل (۱ دلار) و در نتیجه هزینه هر کیلومتر پیمایش (۰/۸۸ دلار)، هزینه بسیار بالایی در کشوری با قوانین مبتنی بر یارانه‌های حامل‌های انرژی است و در آن انرژی به کم‌ترین بها به مصرف کننده عرضه می‌گردد. این شکاف قیمتی عمدتاً ناشی از فرآیند تولید چندمرحله‌ای و پر هزینه است و رقابت‌پذیری بازار خودروهای سواری را در کوتاه‌مدت و بدون حمایت‌های هدفمند، دشوار می‌سازد.

در مقابل، ارزیابی زیست‌محیطی نتایجی دوگانه را آشکار کرد. از یک سو، با در نظر گرفتن چرخه کامل کربن، این سیستم به دلیل منشأ زیستی (بیوژنیک) سوخت، دارای مزیت اقلیمی است. همچنین، انتشار ناچیز اکسیدهای گوگرد به دلیل عدم وجود سولفور در سوخت، نقطه قوت مثبت دیگری است. اما از سوی دیگر، میزان انتشار بسیار بالای اکسیدهای نیتروژن (۰/۷۲۱ گرم بر کیلومتر) یک نگرانی جدی برای

ویراستاری نشده

کیفیت هوا به شمار می‌آید. افزون بر این، ارزیابی چرخه حیات، مصرف قابل توجه منابع زمین (۱۵/۱۴ مترمربع به ازای هر کیلومتر) را به عنوان یک چالش ساختاری دیگر شناسایی کرد که هرچند با کشت هدفمند در زمین‌های حاشیه‌ای قابل مدیریت است، اما بر حساسیت برنامه‌ریزی مکانی تأکید دارد.

در جمع‌بندی نهایی و با تلفیق یافته‌های حاصل از تحلیل‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، می‌توان استنباط کرد که تجاری‌سازی بیودیزل مشتق از جاتروفا در ایران مستلزم ترسیم و پیاده‌سازی یک نقشه راه بلندمدت و راهبردی است. اگرچه این فناوری در افق کوتاه‌مدت به دلیل هزینه‌های تولید بالا و چالش انتشار اکسیدهای نیتروژن، گزینه‌ای مطلوب برای جایگزینی گسترده در ناوگان سواری شخصی به شمار نمی‌رود، اما پتانسیل کاربرد به‌عنوان یک راهکار مکمل در بخش‌های خاصی که برقی‌سازی با دشواری مواجه است را دارا می‌باشد. ناوگان حمل‌ونقل عمومی ثابت (مانند اتوبوس‌های بین‌شهری)، ماشین‌آلات کشاورزی و تأمین انرژی ژنراتورها در مناطق دورافتاده و خارج از شبکه سراسری از جمله این کاربردهای هدفمند هستند. تحقق موفقیت‌آمیز حتی در این مقیاس محدود، نیازمند اتخاذ مجموعه‌ای از سیاست‌های هماهنگ و مکمل است: تخصیص سرمایه‌گذاری هدفمند در تحقیق و توسعه به‌منظور کاهش هزینه تمام‌شده تولید و کنترل آلایندگی اکسیدهای نیتروژن؛ تدوین استانداردهای ملی برای کیفیت سوخت بیودیزل و تعریف مناطق ویژه کشت جاتروفا در اراضی کم‌بازده و نامرغوب؛ و طراحی مشوق‌های اقتصادی هوشمندانه که مزیت زیست‌محیطی خنثی‌سازی کربن را در معادلات هزینه–فایده این سوخت وارد نماید. اتخاذ چنین رویکرد جامع و آینده‌نگرانه‌ای می‌تواند زمینه‌ساز بهره‌برداری از ظرفیت‌های این فناوری در جهت ارتقای امنیت انرژی کشور و تحقق اهداف ملی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده(گان) از هیچ یک از ابزار/خدمت استفاده نکردند.

منابع

Aderibigbe, F. A., Mustapha, S. I., Adewoye, T. L., Mohammed, I. A., Gbadegesin, A. B., Niyi, F. E.,…Saka, H. B. (2020). Qualitative role of heterogeneous catalysts in biodiesel production from Jatropha curcas oil. *Biofuel Research Journal*, *7*(2), 1159-116 .۹

Alsultan, A. G., Asikin-Mijan, N., Ibrahim, Z., Yunus, R., Razali, S. Z., Mansir, N.,…Taufiq-Yap, Y. H. (2021). A short review on catalyst, feedstock, modernised process, current state and challenges on biodiesel production. *Catalysts*, *11*(11), 1261.

Arockiasamy, S., Kumpatla, J., Hadole, S., Yepuri, V., Patil, M., Shrivastava, V.,…Varshney, A. (2021). Breeding and biotechnological efforts in Jatropha curcas L. for sustainable yields. *Oil Crop Science*, *6*(4), 180-191.

Attari, A., Abbaszadeh-Mayvan, A. & ,Taghizadeh-Alisaraei, A. (2022). Process optimization of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste cooking oil using waste chicken eggshell-derived CaO as a green heterogeneous catalyst. *Biomass Bioenergy*, *158*, 106357.

Charabi, Y., Al Nasiri, N., Al Awadhi, T., Choudri, B., & Al Bimani, A. (2020). GHG emissions from the transport sector in Oman: Trends and potential decarbonization pathways. *Energy Strategy Reviews*, *32*, 100548.

Chatti, W., & Majeed, M. T. (2022). Investigating the links between ICTs, passenger transportation, and environmental sustainability. *Environmental Science Pollution Research*, *29*(18), 26564-26574.

ویراستاری نشده

Chutia, G. P., & Phukan, K. (2024). Biomass derived heterogeneous catalysts used for sustainable biodiesel production: a systematic review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *41*(1), 23-48.

Gebremariam, S. N. (2023). Biodiesel as a transport fuel, advantages and disadvantages. *Biofuels, Bioproducts Biorefining*, *17*(5), 1445-1456.

Gerveni, M., Hubbs, T., & Irwin, S .(۲۰۲۳) .The Biodiesel Profitability Squeeze. *farmdoc daily*, *13*(85).

Guerrero, N. B. C., Martínez, W. O. H., Civit, B., & Perez, M. D. (2021). Energy performance of perovskite solar cell fabrication in Argentina. A life cycle assessment approach. *Solar Energy*, *230*, 645-653.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment*. Springer.

Hellweg, S., Benetto, E., Huijbregts, M. A., Verones, F., & Wood, R. (2023). Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis. *Nature Reviews Earth Environmental Energy Economic Research*, *4*(7), 471-486.

IEA, C. (2018). Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry. International Energy Agency (IEA), Cement Sustainability Initiative (CSI). In.

Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society a*, *476*(2243), 20200351.

Jonidi Jafari, A., & Arfaeinia, H. (2016). The share of different vehicles in air pollutant emission in Tehran, using 2013 traffic information. *Caspian Journal of Health Research*, *2*(2), 28-36.

Kazemi Shariat Panahi, H., Dehhaghi, M., Kinder, J. E., & Ezeji, T. C. (2019). A review on green liquid fuels for the transportation sector: a prospect of microbial solutions to climate change. *Biofuel Research Journal*, *6*(3), 995-1024.

Klymchuk, O., Khodakivska, O., Kovalov, B., Brusina, A., Benetyte, R., & Momotenko, I. (2020). World trends in bioethanol and biodiesel production in the context of sustainable energy development. *International Journal of Global Environmental Issues*, *19*(1-3), 90-108.

Klymenko, O. (2020). Results of Research of the Reduced Emissions of Pollutants by Road Vehicles of Various Environmental Classes 'Euro'As the Basis of Environmental Hazard Labeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1*(10), 103.

Kober, T., Schiffer, H.-W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, *31*, 100523.

Krishna, I. M., & Manickam, V. (2017). *Environmental management: science and engineering for industry*. Butterworth-Heinemann.

Kumar, D., Pratap, S., Gupta, N., Tyagi, P., Kumar, P., Prajapati, R. K.,…Ayanie, A. G. (2025). Transesterification-derived biodiesel: a comprehensive assessment of feedstock diversity, engine performance, and pathways to sustainable transportation. *Discover Sustainability*.

Laskar, I. B., Changmai, B., Gupta, R., Shi, D., Jenkinson, K. J., Wheatley, A. E., & Rokhum, S. L. (2021) .A mesoporous polysulfonic acid-formaldehyde polymeric catalyst for biodiesel production from Jatropha curcas oil. *Renewable Energy*, *173*, 415-421.

Life Cycle Assesment Theory (2022). http://www.abpsoil.com/. http://www.abpsoil.com/15-water-treatment

Mohtaram, S., Aryanfar, Y., Ghazy, A., Wu, W., Kaaniche, K., & Alcaraz, J. L. G. (2023). An innovative approach for utilizing waste heat of a triple-pressure cogeneration combined cycle power plant by employing TRR method and thermodynamic analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, *49*, 103198.

Najafi, F., Sedaghat, A., Mostafaeipour, A., & Issakhov, A. (2021). Location assessment for producing biodiesel fuel from Jatropha Curcas in Iran. *Energy*, *236*, 121446.

Obligado, A., Demafelis, R., Matanguihan, A .E., Villancio, V., Magadia Jr, R., & Manaig, L. M. (2017). Carbon emission inventory of a commercial-scale Jatropha (Jatropha curcas L.) biodiesel processing plant. *Journal of Environmental Science Management science*(1).

Okonkwo, C. P., & Okwu, M. O. (.(٢٠٢٤*Feedstocks for Sustainable Biodiesel Production: Characterization, Selection, and Optimization*. John Wiley & Sons.

Okullo, A., & Noah, T. (2017). Process simulation of biodiesel production from jatropha curcas seed oil. *American Journal of Chemical Engineering*, *5*(4), 56-63.

Rout, C., Li, H., Dupont, V., & Wadud, Z. (2022). A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel. *Heliyon*, *8*(12).

Shadidi, B., Najafi, G & ,.Zolfigol, M. A. (2022). A review of the existing potentials in biodiesel production in Iran. *Sustainability*, *14*(6), 3284.

Shahir, V., Jawahar, C., & Suresh, P. (2015). Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions—a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, *45*, 686-697.

Shrees, S., Masood, A., Shrestha, Y., & Garima, G. (2025). Life cycle assessment of Jatropha and rapeseed biodiesels: Cradle to grave. *Biomass Bioenergy*, *199*, 107895.

Singh, A., Sinha, S., Choudhary, A. K., Sharma, D., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2021). An experimental investigation of emission performance of heterogenous catalyst jatropha biodiesel using RSM. *Case Studies in Thermal Engineering*, *25*, 100876.

Xu, H., Yin, B., Liu, S., & Jia, H. (2017). Performance optimization of diesel engine fueled with diesel–jatropha curcas biodiesel blend using response surface methodology. *Journal of Mechanical Science Technology*, *31*(8), 4051-4059.

Yang, C.-Y., Fang, Z., Li, B., & Long, Y.-f. (20 .(١٢Review and prospects of Jatropha biodiesel industry in China. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 2178-2190.

Yusuff, A. S., Kumar, M., Obe, B. O., & Mudashiru, L. O. (2024). RETRACTED ARTICLE: Calcium Oxide Supported on Coal Fly Ash (CaO/CFA) as an Efficient Catalyst for Biodiesel Production from Jatropha curcas Oil. *Topics in Catalysis*, *67*(19), 1404-1404.

Zhang, J. (2021). Modern Monte Carlo methods for efficient uncertainty quantification and propagation: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, *13*(5), e1539.

Zhang, Y., Duan, L., & Esmaeili, H. (2022). A review on biodiesel production using various heterogeneous nanocatalysts: Operation mechanisms and performances. *Biomass Bioenergy*, *158*, 106356.

Zhao, J. (2 .(٠١٥Development of China's biofuel industry and policy making in comparison with international practices. *Science Bulletin*, *60*(11), 1049-1054.