



Improving Performance and Reducing Emissions of a Diesel Engine Using a Hybrid Tri-Fuel: Diesel, Bioethanol, and Iron Oxide (Fe_3O_4) Nanoparticles, An Experimental Study

Abbas Taghipour¹ | Behzad Azizimehr²

1. Corresponding Author, Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran. E-mail: ab.taghipoor@iau.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Applied Industries, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. Email : b.azizimehr@iau.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 22, 2025

Revised: Dec. 13, 2025

Accepted: Dec. 23, 2025

Published: Spring, 2026

Keywords:

**Iron Oxide Nanoparticles,
Bioethanol,
Diesel Engine,
Engine Performance,
Pollutant Emissions.**

This study investigates the simultaneous effect of bioethanol and iron oxide nanoparticles as fuel additives to diesel on the performance parameters and emission of a diesel engine. This ternary combination experimentally demonstrates the mechanism for improving combustion and simultaneously reducing key pollutants. The fuel blends consisted of diesel, bioethanol (0 to 12% volume), and iron oxide nanoparticles (5-15 ppm). Experiments were conducted in the speed range of 1800 to 2600 rpm, and performance parameters (torque, power, specific fuel consumption) as well as emissions of carbon monoxide, carbon dioxide, unburned hydrocarbons, and nitrogen oxides were measured. The results indicate an improvement in engine performance parameters due to better combustion, resulting from increased oxygen availability. Specifically, the power increase of the B12D88 fuel blend containing 15 ppm of nanoparticles compared to pure diesel fuel is 48%. Although the increase in bioethanol, due to its lower calorific value, led to a torque reduction of up to 8.8%, the presence of nanoparticles as a catalyst decreased the SFC by 22.1%, contrary to theoretical predictions. This ternary combination resulted in a reduction of CO by up to 3% and CO₂ by up to 12.5%, while it did not have a significant effect on unburned hydrocarbons and nitrogen oxides. Based on the results, adding nanoparticles to diesel-bioethanol blends is an effective strategy for improving engine performance and reducing carbon monoxide emissions. Although its effect on nitrogen oxides is less significant, an optimal balance between performance and emissions can be achieved by optimizing the bioethanol ratio.

Cite this article: Taghipour, A., Azizimehr, B., (2026) Improving Performance and Reducing Emissions of a Diesel Engine Using a Hybrid Tri-Fuel: Diesel, Bioethanol, and Iron Oxide (Fe_3O_4) Nanoparticles, An Experimental Study, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (1), 1-36. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.404789.665625>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.404789.665625>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Fossil fuels continue to serve as the primary source of energy for engines and heat engines. However, the combustion of these fuels results in the emission of substantial quantities of pollutants, including nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and carbon dioxide (CO₂), which significantly contribute to air pollution and climate change. Bioethanol, as one of the most important renewable biofuels, is primarily produced through the fermentation of sugar and starch-based feedstocks. Its primary application is as a fuel or additive in internal combustion engines and fuel cells. In pursuit of enhancing the performance and reducing the emissions of these engines, nanotechnology has introduced novel and effective solutions through its capability to design and engineer materials at the atomic scale. Owing to their unique properties, such as an exceptionally high specific surface area and catalytic activity, nanoparticles can significantly enhance fuel efficiency and the combustion process. This study experimentally investigates the impact of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on the performance and emissions of a diesel engine operating with a diesel-ethanol blended base fuel. The innovation of this research lies in the simultaneous use of an oxygenate (ethanol) and a cost-effective nanocatalyst (iron oxide) to achieve more complete and cleaner combustion. This approach, in contrast to previous studies, focuses on providing a more practical and economical solution for the industry.

Method

This study investigated the effects of fuel blends comprising diesel, bioethanol, and iron oxide nanoparticles on engine torque, power, brake-specific fuel consumption (BSFC), and exhaust emissions. The relevant data were measured using various fuel compositions on a single-cylinder, four-stroke engine (Model CT159). Prior to data collection, a comprehensive literature review was conducted, relevant standards were adhered to, diesel was blended with bioethanol according to specified percentages, and an appropriate experimental protocol was designed for data measurement. The independent variables in this study included various fuel blends of bioethanol (0-12%), diesel (88-100%), nanoparticles at concentrations of 5-15 ppm, and the engine speed parameter (ranging from 1800 to 2600 rpm). After setting the desired values of the independent parameters (inputs), such as engine speed and the different blends of diesel, bioethanol, and nanoparticles, tests were performed on the engine. The effects of these independent variables on the dependent variables—namely, engine torque, engine power, brake-specific fuel consumption (BSFC), and engine emissions—were then investigated.

Result

The primary objective of this section is to present models for predicting engine performance indicators—including power, torque, brake-specific fuel consumption (BSFC), and exhaust emissions (CO, HC, CO₂, and NO_x). To determine suitable mathematical models for predicting engine performance parameters—including power, torque, specific fuel consumption, and emissions—a comparative analysis was conducted among several candidate models.

Conclusions

The results indicated that the addition of bioethanol and nanoparticles increased the oxygen content and improved combustion quality, leading to enhanced output power and reduced brake-specific fuel consumption (BSFC). However, a decrease in torque was observed at high speeds, which is attributable to the reduced volumetric efficiency and lower calorific value of bioethanol. On the other hand, the presence of nanoparticles facilitated more complete combustion, resulting in a significant reduction of carbon monoxide (CO) emissions. In contrast, no significant impact on nitrogen oxides (NO_x) emissions was noted. The behavior of NO_x emissions was complex, exhibiting a nonlinear trend with increasing engine speed and bioethanol percentage. In conclusion, integrating the findings of this study with previous research, it can be inferred that while the sole use of bioethanol may reduce certain performance parameters such as torque, its concurrent application with iron oxide nanoparticles as a catalyst can serve as an effective strategy for achieving an optimal balance between performance enhancement and emissions reduction in diesel engines.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the author.

Ethical considerations

It has no ethical considerations.

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest

بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از یک سوخت سه‌گانه هیبریدی: دیزل، بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)، یک مطالعه تجربی

عباس تقی پور^۱ ✉ | بهزاد عزیزی مهر^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

رایانامه: ab.taghipoor@iau.ac.ir

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک و صنایع کاربردی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه:

b.azizimehr@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش به بررسی همزمان تأثیر بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان مواد افزودنی به سوخت دیزل بر پارامترهای عملکردی و میزان آلاینده‌های موتور دیزل می‌پردازد. این ترکیب سه‌گانه، مکانیزم بهبود احتراق و کاهش همزمان آلاینده‌های کلیدی را به‌طور تجربی نمایان می‌سازد. مخلوط‌های سوخت متشکل از دیزل، بیواتانول (۰ تا ۱۲٪ حجمی) و نانوذرات اکسید آهن (۵-۱۵ PPM) می‌باشد. آزمایش‌ها در محدوده سرعت ۱۸۰۰ تا ۲۶۰۰ دور بر دقیقه انجام و پارامترهای عملکردی (گشتاور، توان، مصرف سوخت ویژه ترمزی) و آلاینده‌های منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن اندازه‌گیری شد. نتایج بهبود پارامترهای عملکردی موتور به دلیل احتراق بهتر، ناشی از تأمین اکسیژن بیشتر را به دنبال دارد. به‌گونه‌ای که افزایش توان ترکیب سوخت B12D88 حاوی ۱۵ PPM از نانوذرات اکسید آهن نسبت به سوخت دیزل خالص، ۱۷/۴۸٪ می‌باشد. اگرچه افزایش بیواتانول به دلیل ارزش حرارتی پایین‌تر، کاهش گشتاور تا ۸/۸٪ را در پی داشت، اما حضور نانوذرات به‌عنوان کاتالیست، مصرف سوخت ویژه را علی‌رغم پیش‌بینی‌های نظری تا ۲۲/۱٪ کاهش داد. از جنبه آلاینده‌گی، این ترکیب سه‌گانه موجب کاهش منوکسید کربن تا ۳۳/۲٪ و کاهش دی‌اکسید کربن تا ۱۲/۵٪ شد، درحالی‌که تأثیر معناداری بر هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن نداشتند. به‌طور کلی نتایج به وضوح نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات اکسید آهن به مخلوط‌های دیزل-بیواتانول، یک راهبرد مؤثر برای بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده منوکسید کربن است. اگرچه تأثیر آن بر اکسیدهای نیتروژن کم اهمیت‌تر است، اما می‌توان با بهینه‌سازی نسبت بیواتانول، به یک ترکیب بهینه از نظر عملکرد و آلاینده‌گی دست یافت.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

نانوذرات اکسید آهن،

بیواتانول،

موتور دیزل،

عملکرد موتور،

انتشار آلاینده‌ها

استناد: تقی پور، عباس، عزیزی مهر، بهزاد، (۱۴۰۵) بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از یک سوخت سه‌گانه هیبریدی: دیزل، بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)، یک مطالعه تجربی، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۷ (۱)، ۳۶-۱۷.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.404789.665625>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.404789.665625>

مقدمه

بهره‌برداری گسترده از سوخت‌های فسیلی در موتورهای احتراق داخلی، علاوه بر تشدید بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن و آلاینده‌های خطرناکی چون اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق، وابستگی امنیت انرژی به منابع پایان پذیر را افزایش داده است. این چالش‌ها، همراه با الزامات سختگیرانه‌تر استانداردهای آلاینده‌ها، محرک اصلی جست‌وجو برای سوخت‌های جایگزین‌های پایدار و کم‌کربن شده‌اند. در این راستا، سوخت‌های زیستی نسل اول و دوم (مانند بیودیزل و بیواتانول) به‌عنوان راه‌حلی امیدوارکننده و تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که می‌توانند ضمن کاهش انتشار کربن و بهبود مشخصه‌های احتراق (به‌ویژه با محتوای اکسیژن ذاتی)، در چارچوب زیرساخت‌های موجود مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، برخی چالش‌های عملکردی این سوخت‌ها (مانند کاهش ارزش حرارتی یا افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن در برخی موارد)، لزوم توسعه راهبردهای تکمیلی نوآورانه مانند استفاده از نانوافزودنی‌های کاتالیزوری را برای بهینه‌سازی همزمان عملکرد و آلاینده‌ها، بیش از پیش ضروری ساخته است (Zhang *et al.*, 2024). کاربرد سوخت‌های زیستی، علاوه بر کاهش وابستگی به منابع فسیلی، مزایای گسترده‌ای را به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به تجدیدپذیری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه منطقه‌ای، تقویت پایه‌های کشاورزی و اجتماعی، و افزایش امنیت تأمین انرژی اشاره کرد (Mahapatra *et al.*, 2021). بیواتانول به عنوان یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر، عمدتاً از طریق تخمیر مواد اولیه قندی و نشاسته‌ای تولید می‌شود و کاربرد اصلی آن به عنوان سوخت یا افزودنی در موتورهای احتراق داخلی و پیل‌های سوختی است (Kazmi *et al.*, 2025).

از سوی دیگر، موتورهای احتراق تراکمی (دیزل) به دلیل راندمان بالا و دوام قابل توجه، نقش انکارناپذیری در بخش‌های حیاتی از جمله کشاورزی، حمل و نقل سنگین، صنعت و تولید برق ایفا می‌کنند (Towaju *et al.*, 2019). در راستای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌ها، این موتورها، فناوری نانو با قابلیت طراحی و مهندسی مواد در مقیاس اتمی، راهکارهای نوین و مؤثری ارائه کرده است. نانوذرات با دارا بودن خواص منحصر به فردی مانند سطح ویژه بسیار بالا و فعالیت کاتالیستی، می‌توانند کارایی سوخت و فرآیند احتراق را ارتقا دهند. به‌کارگیری نانوذرات به‌عنوان کاتالیزور در محیط احتراق الکل-دیزل، احتراق ناقص ناشی از بیواتانول را جبران و راندمان احتراق را از طریق مکانیزم‌های کاتالیزوری و انتقال حرارت بهبود می‌بخشد. این ویژگی‌ها، که معمولاً منجر به کاهش مصرف انرژی، افزایش دوام و بهبود خواص می‌شوند، علاقه‌مندی فزاینده‌ای را برای تلفیق نانوذرات با سوخت‌های پایه زیستی مانند بیواتانول به وجود آورده است (Kegi *et al.*, 2021). در سال‌های اخیر، استفاده همزمان از سوخت‌های زیستی و نانوافزودنی‌ها به عنوان یک راهبرد امیدبخش برای حل معضل آلاینده‌ها و بهبود بازده موتورهای دیزل مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته است. در این بخش، به بررسی مطالعات تجربی شاخص در این حوزه پرداخته می‌شود. السیسی و همکاران در سال ۲۰۱۶، پژوهشی با عنوان بررسی تأثیر نانوذرات آلومینا (Al_2O_3) و نانولوله‌های کربنی (MWCNT) روی عملکرد و آلاینده‌های یک موتور دیزل با سوخت دیزل-بیودیزل انجام دادند. نتایج نشان داد، هر دو نانوافزودنی منجر به بهبود احتراق می‌شوند. مخلوط حاوی MWCNTs بیشترین کاهش را در مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC) (حدود ۲۵٪) و آلاینده دوده (حدود ۴۰٪) نشان داد. با این حال، در برخی شرایط، افزایش جزئی در انتشار NO_x مشاهده شد (EL-*Seesy et al.*, 2016). السیسی و همکاران پژوهشی با عنوان ارزیابی تجربی عملکرد، ویژگی‌های احتراق و آلاینده‌های موتور دیزل با مخلوط سوخت‌های حاوی نانوذرات انجام دادند. این پژوهش به بررسی استفاده از بیودیزل به عنوان جایگزینی برای سوخت دیزل متعارف می‌پردازد و با افزودن نانو آلومینا (Al_2O_3) با غلظت ۲۵PPm، ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌های موتور را مورد مطالعه قرار می‌دهد. نتایج نشان داد، افزودن نانو آلومینا به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، راندمان احتراق و عملکرد موتور را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. انتشار آلاینده‌های مونوکسید کربن، هیدروکربن‌ها و اکسیدهای نیتروژن در مخلوط‌های حاوی نانو آلومینا به میزان چشمگیری کاهش یافت (Al-Kheraif *et al.*, 2021). کاری و همکاران در سال ۲۰۲۴ پژوهشی با عنوان بررسی تجربی پارامترهای عملکردی و آلاینده‌های موتور دیزل تغذیه‌شده با بیودیزل و نانوذرات اکسید کروم انجام دادند. مقدار نانوذرات اکسید کروم در سطوح ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و مقادیر برابر سورفکتانت به نانوذرات اضافه گردید. آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف نسبت تراکم و بار موتور انجام شد. پارامترهای ورودی شامل بار موتور (۱۲،۹۶،۳ کیلوگرم‌نیرو)، نمونه‌های سوخت و نسبت‌های تراکم (۱/۱۶/۵، ۱/۱۷/۵ و ۱/۱۸/۵) (۱) بوده و پارامترهای خروجی شامل بازده حرارتی ترمزی (BTE)، مصرف سوخت ویژه، مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته،

اکسیدهای نیتروژن و دود بودند. نتایج نشان دادند، نمونه سوخت حاوی ۲۰٪ بیودیزل به همراه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید کروم و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر سورفکتانت، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، منجر به بهبود قابل توجه ۱۶/۵۸ درصدی در بازده حرارتی و کاهش ۰/۵۸ درصدی در مصرف سوخت ویژه شد. همچنین در نسبت تراکم ۱۸/۵:۱ و در بار کامل، این نمونه سوخت منجر به کاهش ۳۱/۸۵٪ غلظت مونوکسیدکربن، ۲۲/۲۳٪ غلظت هیدروکربن‌های نسوخته، ۶/۱۶٪ غلظت اکسیدهای نیتروژن و ۶۲/۶۱٪ دود گردید (Kari et al., 2024).

در پژوهشی با عنوان بررسی تجربی عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی با استفاده از مخلوط‌های بیودیزل، الکل و افزودنی‌های نانوذرات، به این نتیجه رسیدند که بیودیزل حاصل از روغن پسماند آشپزی دارای ویژگی‌های مشابهی با دیزل هستند. بازده حرارتی ترمزی هنگام استفاده از نانوذرات در مقایسه با دیزل خالص افزایش می‌یابد. سوخت شامل (۸۹٪ دیزل، ۱۰٪ بیودیزل و ۱٪ پروپانول) در مقایسه با سایر سوخت‌های آزمایش شده، بالاترین بازده حرارتی، کمترین مصرف سوخت ویژه و کمترین مصرف انرژی را دارد (Pradhana & Singh, 2020). رامش و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر نانوذره آلومینا را به‌عنوان یک ماده افزودنی به همراه سوخت بیودیزل بر روی پارامترهای عملکردی، احتراق و آلاینده‌های موتور دیزل بررسی نمودند. بیودیزل مورد استفاده در این پژوهش از ضایعات و پسماند مرغ به روش ترانس استریفیکاسیون تهیه شده بود. ترکیب سوخت شامل B20 به همراه ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر آلومینا و سوخت پایه دیزل خالص و موتور مورد استفاده تک سیلندر چهارزمانه بود. نتایج این پژوهش نشان داد، برای سوخت B20 در مقایسه با سوخت دیزل آلاینده HC و CO کاهش و NOx کمی افزایش یافت. کاربرد افزودنی نانوذرات آلومینا، سبب بهبود عملکرد مکانیکی موتور دیزل و همچنین سبب کاهش میزان آلاینده‌های هیدروکربن‌های سوخته و منو اکسید کربن در گازهای خروجی آگزوز می‌شود. علت آن تأثیر نانو ذرات به‌عنوان یک کاتالیست در فرآیند احتراق است به‌خصوص در مقایسه با ترکیب بیودیزل - دیزل (Ramesh et al., 2016). پژوهشگران در تحقیقی در سال ۲۰۱۶ تأثیر نانوذرات اکسید سدیم به‌عنوان ماده افزودنی را بر روی عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل با استفاده از ترکیب سوخت بیودیزل و دیزل بررسی کردند. ترکیب سوخت شامل ۲۰٪ بیودیزل و ۸۰٪ دیزل بود. موتور مورد آزمایش نیز تک سیلندر، تزریق مستقیم و هوا خنک بود. نتایج آزمایش نشان داد مصرف سوخت ویژه و بازده حرارتی ترمزی با اضافه نمودن نانو ذرات در مقایسه با سوخت دیزل خالص افزایش داشت. اما میزان آلاینده‌های NOx، HC و CO به‌طور قابل توجهی در مقایسه با سوخت دیزل خالص کاهش یافت (Sathya moorthi et al., 2016).

همان‌طور که از پیشینه پژوهش مشهود است، تعداد کمتری از مطالعات به‌طور همزمان به ترکیب اتانول (به‌عنوان یک اکسیژن‌ساز) و یک نانوذره (به‌عنوان کاتالیست و بهبوددهنده احتراق) در یک سوخت پایه دیزل پرداخته‌اند. این مقوله می‌تواند موضوع پژوهش نوینی باشد. پژوهش بر روی نانوذراتی مانند اکسید آهن (Fe_3O_4) که مقرون‌به‌صرفه‌تر و در دسترس‌تر هستند، از جنبه اقتصادی نیز حائز اهمیت است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌ها طراحی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی تجربی یک سوخت ترکیبی و چندمنظوره است که سه استراتژی مکمل را به‌طور همزمان برای حل چالش‌های موتورهای دیزل امروزی به کار می‌گیرد: جانشینی بخشی از سوخت فسیلی با بیواتانول (به‌عنوان یک سوخت زیستی اکسیژن‌دار، تجدیدپذیر و کم‌کربن) برای کاهش وابستگی به نفت و بهبود احتراق.

به‌کارگیری نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان یک کاتالیزور، که به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا و خواص کاتالیزوری ذاتی، می‌تواند مراحل اکسیداسیون ذرات کربن (دوده) و تجزیه ترکیبات نسوخته را در محفظه احتراق تسریع کند. ایجاد هم‌افزایی بین این دو عامل برای غلبه بر محدودیت‌های هریک به تنهایی. بدین ترتیب که نانوذرات، کاهش ارزش حرارتی و تأخیر در اشتعال بالقوه ناشی از بیواتانول را جبران می‌کنند و در عین حال، حضور اکسیژن داخلی بیواتانول، اثربخشی کاتالیزوری نانوذرات را برای اکسیداسیون کامل تقویت می‌نماید. دستاورد نوآورانه این ترکیب، دستیابی همزمان به اهدافی مثل بهبود پارامترهای عملکردی همراه با کاهش توأم آلاینده‌های کلیدی است که در تضاد معمول با یکدیگر تلقی می‌شوند.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، اثر ترکیب سوخت‌های دیزل، بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن بر گشتاور، توان، مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده‌های خروجی آگزوز موتور مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوطه با استفاده از ترکیبات مختلف سوخت و بر روی موتور تک‌سیلندر چهارزمانه مدل CT159 اندازه‌گیری شد. مشخصات فنی این موتور در جدول ۱ ارائه شده است. این پژوهش در قالب بخش‌های زیر سازماندهی شده است:

بخش پیش از جمع آوری داده‌ها :

این مرحله شامل مطالعه پیشینه تحقیقات، رعایت استانداردهای مرتبط، اختلاط سوخت دیزل با بیواتانول بر اساس درصدهای تعیین شده و طراحی مناسب پروتکل آزمایش برای اندازه‌گیری داده‌ها بود. در این پژوهش از مخلوط‌های سوخت با سطوح مختلفی استفاده شد. سوخت دیزل مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع گازوییل استاندارد معمول (شماره ۲) بود که از پمپ بنزین‌های محلی تأمین گردید. بیواتانول مصرفی با درجه خلوص ۹۹/۸٪ از شرکت کیمیا الکل زنجان که از ملاس چغندر قند تولید می‌شود، تهیه شد. نانوذرات انتخابی در این پژوهش، نانوذرات کروی شکل اکسید آهن با حداکثر قطر ۲۰-۳۰ نانومتر و خلوص ۹۸٪ می‌باشد. مشخصات فنی این نانوذرات در جدول ۲، ارائه شده است.

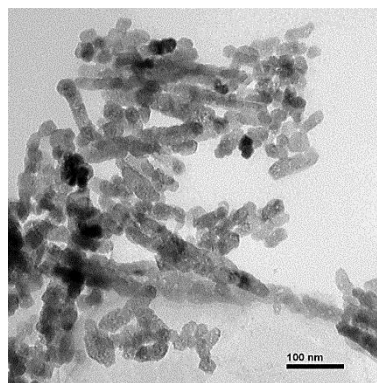
جدول ۱. مشخصات فنی موتور CT159

مدل	Hatz 1B20-6
کارخانه سازنده	شرکت گونت آلمان
تعداد سیلندر	۱
کو رس سیلندر	۶۲ mm
قطر سیلندر	۶۹mm
توان خروجی	approx. 1.5 kW
نسبت تراکم	21: 1
نوع سیستم خنک کاری	هوا خنک
نوع سیستم سوخت‌رسانی	تزریق مستقیم

جدول ۲. مشخصات فنی نانوذره‌ی اکسید آهن

مشخصات فنی	اکسید آهن (Fe ₃ O ₄)
اندازه قطر (نانومتر)	۲۰-۳۰
سطح ویژه (m ² /gr)	۴۰-۶۰
شکل هندسی پودر	کروی
رنگ	قهوه ای تیره
چگالی (gr/cm ³)	۰/۸۴

شکل ۱ تصویر TEM نانوذرات اکسید آهن مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. که دارای قطر میانگین ۲۰-۳۰ نانومتر می‌باشد.



شکل ۱. تصویر TEM نانوذره‌ی اکسید آهن

تهیه مخلوط نانو سوخت، اولین مرحله کلیدی در مطالعات آزمایشگاهی استفاده از نانوذرات در کاربردهای مختلف است. در پژوهش حاضر برای تهیه مخلوط‌های نانو سوخت، ابتدا میزان مشخصی از نانوذرات در ترازوی دیجیتالی وزن (دقت تا چهار رقم اعشار) و سپس داخل مخلوط سوخت‌های دیزل و بیواتانول، به‌عنوان سیال پایه ریخته می‌شود. پراکندگی و پایداری نانوذرات در سیال پایه اهمیت زیادی دارد، دستیابی به یک نانوسیال پایدار و مناسب بزرگ‌ترین چالش است. جهت دستیابی به یک نانوسیال پایدار و پراکنده کردن نانوذرات

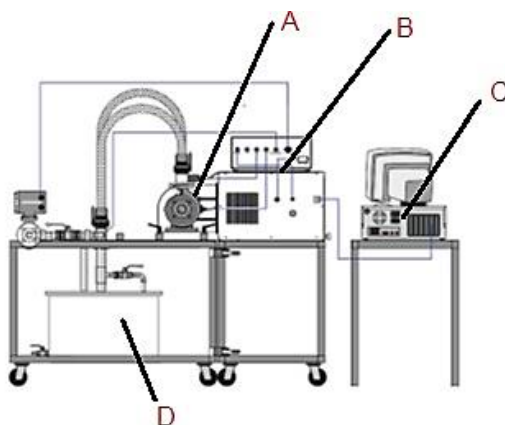
درون سیال پایه از حمام اولتراسونیک^۱ استفاده می‌شود. در روش مافوق صوت، زمان یک عامل مهم است که هنگام تهیه‌ی یک سوسپانسیون پایدار باید در نظر گرفته شود. مواد افزودنی نانو سوخت، تنها در صورت انجام اولتراسونیک در مدت‌زمان بهینه، بهترین پایداری پراکندگی را از خود نشان می‌دهند. در یک بررسی مشخص شده است که پایداری پراکندگی نانوذرات PTEF با ۶۰ دقیقه اولتراسونیک بهترین نتیجه را خواهد داشت. در این حالت سوسپانسیون به مدت ۱۵ روز پایدار خواهد ماند (Zhao et al., 2021)؛ بنابراین نمونه‌ها برای مدت‌زمان ۶۰ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفتند. یکی از موارد استفاده از این حمام پخش ذرات داخل محلول و در نتیجه یکنواخت شدن محلول مورد نظر می‌باشد. این امواج می‌توانند پیوندهای بین تکه‌های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شوند. حمام اولتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش، ساخت کشور دانمارک، شرکت Struers مدل Melason 120 T می‌باشد که دارای ظرفیت حدود ۳/۳۶ لیتر، توان ۱۲۵ وات و قابلیت ایجاد نوسان ۵۰ الی ۶۰ هرتز در مایعات با قابلیت کنترل زمان می‌باشد. برای توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. برای بررسی پایداری استاتیکی نانو سوخت‌های تهیه شده، هر کدام از مخلوط‌ها به صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور همه‌ی نمونه‌های ساخته شده، درون ظروف شیشه‌ای کاملاً شفاف ریخته شد و برای مدت‌زمان ۱۵ روز در یک محیط کاملاً ساکن نگهداری شدند و روند تغییرات ایجاد شده در آن‌ها به صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن نانوذرات به مخلوط سوخت، هیچ‌گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نمی‌کند و هیچ‌گونه رسوب و تغییر فازی مشاهده نشد که بیانگر پایداری بسیار خوب این نانوسوخت‌ها می‌باشد.

مرحله جمع‌آوری داده‌ها:

برای بررسی اثر ترکیب‌های مختلف سوخت دیزل، نانوذرات اکسید آهن و بیواتانول بر عملکرد موتور دیزل، از سامانه آزمایشگاهی CT159 ساخت آلمان استفاده شد. این سامانه از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

بخش CT159 برای نصب موتور دیزل تک‌سیلندر چهارزمانه (مدل CT151) و واحد کنترل دینامومتر (مدل HM365) برای کنترل سرعت موتور سامانه رایانه‌ای برای ثبت و ذخیره‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده

در شکل ۲، شماتیک کامل تجهیزات آزمایشگاهی ارائه شده است. این شماتیک به‌طور خلاصه شامل موتور دیزل تک سیلندر (CT151)، دینامومتر (HM365) برای اعمال بار و کنترل دور موتور، واحد کنترل و اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی (مانند گشتاور، مصرف سوخت و توان)، و نیز رایانه برای ثبت و پردازش همزمان داده‌ها می‌باشد. شکل ۳، نمای واقعی و فیزیکی سامانه CT159 را در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد. در این تصویر، بخش‌های اصلی شامل بدنه و پایه موتور، اتصالات دینامومتر، تابلوی کنترل الکترونیکی و صفحه‌نمایش پارامترها، و همچنین محل نصب مخازن سوخت و تجهیزات جانبی قابل مشاهده است. این تصویر درک بهتری از نحوه استقرار و یکپارچگی سامانه اندازه‌گیری در آزمایشگاه ارائه می‌کند.



شکل ۲. شماتیکی از تجهیزات استفاده شده در پژوهش
A: موتور دیزل تک‌سیلندر B: دینامومتر و واحد کنترل C: سامانه رایانه‌ای D: مخزن سوخت



شکل ۳. مجموعه‌ی مورد نظر شامل موتور و دینامومتر

متغیرهای مستقل در این پژوهش شامل مخلوط‌های مختلف سوخت بیواتانول $(-۱۲-۰)$ ، دیزل $(۱۰۰-۸۸)$ ، ذرات نانو بین $PPm(۱۵-۵)$ و پارامتر سرعت موتور (از ۱۸۰۰ تا ۲۶۰۰ rpm) می‌باشد. پس از تنظیم مقادیر موردنظر پارامترهای مستقل (ورودی‌ها) روی موتور موردنظر آزمایش گردید و تأثیر این متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته، یعنی میزان گشتاور موتور، توان موتور، مصرف سوخت ویژه و آلایندگی‌های موتور بررسی شد. برای اعمال بار به موتور از دینامومتر مدل HM365 ساخت شرکت گونت آلمان استفاده گردید. سوخت‌های تهیه‌شده در مخزن مربوط به دستگاه ریخته شد و برای هر آزمایش به مدت ۵ دقیقه موتور در دور آرام کار کرد. همچنین قبل از انجام هر آزمایش سیستم سوخت‌رسانی و فیلترها تمیز و هواگیری شد. برای اعمال بار به موتور توسط دینامومتر، موتور زیر بار قرار گرفت. سپس با استفاده از پیچ تنظیم، دور موتور تغییر داده شد. تنظیم دور موتور با دقت ± 5 rpm می‌باشد. دستگاه آلایندگی پنج گاز ساخت شرکت Motor Scan ایتالیا که برای اندازه‌گیری آلایندگی‌های موتور استفاده شد در شکل ۴، نشان داده شده است. مجموعه از طریق کابل رابط به سیستم کامپیوتر متصل و توسط نرم‌افزار مربوطه کلیه‌ی اطلاعات پس از پایدار شدن دور موتور ثبت شد. آزمایش‌ها در حالت ایستگاهی با اعمال تیمارهای مختلف بر روی موتور تک سیلندر چهارزمانه انجام گردید. در این پژوهش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه‌ی ۸ و طرح مرکب مخلوط برای تحلیل نتایج استفاده شد. برای اینکه محاسبات دست‌نخورده باقی بمانند طرح در یک فرمت کد شده تنظیم شد. کد ۱- به‌عنوان پایین‌ترین تراز و کد ۰+ به‌عنوان بالاترین تراز هر فاکتور می‌باشد. در مخلوط‌های سوخت عدد ۰ به‌عنوان کمترین تمرکز و عدد ۱ به‌عنوان بیشترین تمرکز می‌باشد. با استفاده از آنالیز رگرسیون گام‌به‌گام تحلیل بر روی متغیرهای وابسته انجام شد و به‌منظور ارزیابی صحت مدل‌های برازش داده‌شده، آزمون ضعیف برازش^۳، ضریب تغییرات (CV)^۴، مقادیر R^2 (adj) تعیین شدند.



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری آلایندگی‌های موتور

1. Design – Expert (version8)
2. Step - Wise
3. Lack of Fit
4. Coefficient of variation
5. R Square
6. R Square (adj)

نتایج و بحث

هدف اصلی این بخش، ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی موتور شامل توان، گشتاور، مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده‌های خروجی (CO, HC, CO₂ و NOx) بر اساس متغیرهای زیر است:

سرعت موتور در محدوده ۱۸۰۰ تا ۲۶۰۰ دور بر دقیقه

ترکیبات مختلف سوخت شامل:

درصد دیزل در محدوده ۸۸ تا ۱۰۰٪

درصد بیواتانول در محدوده ۰ تا ۱۲٪

ذرات نانو در محدوده ۵ تا ۱۵ قسمت در میلیون (PPm)

انتخاب مدل برای پارامترهای عملکردی

پس از اجرای طرح آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، برای هر متغیر وابسته (پارامتر عملکردی یا آلاینده)، چندین ساختار مدل رگرسیونی (شامل مدل‌های خطی، درجه دو، درجه سه و مدل‌های مبتنی بر میانگین برای بخش‌های MIX و PROCESS) با استفاده از روش گام‌به‌گام و در نرم‌افزار Design-Expert مورد آزمون قرار گرفتند. مدل نهایی برای هر پارامتر بر اساس تلفیق سه معیار زیر و به ترتیب اولویت انتخاب شد:

۱- معیار اصلی: معناداری آماری و مقدار R²(adj) بالاتر: مدلی ترجیح داده شد که علاوه بر معناداری کلی (p-value < 0.05)، مقدار R²(adj) بیشتری را ارائه می‌داد. این معیار به دلیل در نظر گرفتن تعداد جمله‌های مدل و جلوگیری از پیچیدگی بی‌جهت، اولویت اول بود.

۲- معیار تأییدی: آزمون ضعف برازش (Lack-of-Fit): تمامی مدل‌های نهایی گزارش شده در جدول ۳، فاقد ضعف برازش معنادار (p-value > 0.05) بودند که نشان‌دهنده کیفیت مدل در توصیف داده‌هاست.

۳- معیار کمکی: ضریب تغییرات (CV%) پایین‌تر: مدل‌هایی که CV% کمتری داشتند، به عنوان مدل‌هایی با دقت و تکرارپذیری بالاتر در نظر گرفته شدند.

برای تعیین مدل‌های ریاضی مناسب، جهت پیش‌بینی پارامترهای عملکردی موتور، مقایسه‌ای بین چندین مدل پیشنهادی، انجام شد. جدول ۳، مقایسه آماری معیارهای کلیدی برای انتخاب این مدل‌ها را ارائه می‌دهد. نتایج مندرج در جدول ۳، نشان می‌دهد که مدل‌های نهایی انتخاب شده برای پارامترهای عملکردی، به دلیل دارا بودن خطای استاندارد کم و مقدار R² بالا، به عنوان بهترین مدل‌ها شناسایی شده‌اند.

جدول ۳. مقایسه‌ی آمارهای مفید جهت انتخاب مدل‌ها

پارامترهای عملکردی و آلاینده‌ها	درصد ضریب تغییرات (CV%)	R ² (adj)	R ²	منبع	
				PROCESS	MIX
توان	۳/۳۳	۰/۸۴	۰/۸۸	خطی	درجه‌دو
گشتاور	۳/۶۹	۰/۸۹	۰/۸۳	خطی	درجه‌سه
مصرف سوخت ویژه	۳۷/۹۱	۰/۳۴	۰/۳۹	میانگین	درجه‌دو
آلاینده CO	۲۸/۵۸	۰/۸۶	۰/۷۵	خطی	میانگین
آلاینده CO ₂	۲۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۸۳	خطی	درجه سه
آلاینده HC	۱۹/۸۱	۰/۴۶	۰/۵	میانگین	درجه‌دو
آلاینده NOx	۱۲/۴۱	۰/۸۳	۰/۷۶	میانگین	درجه‌دو

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه شده برای توان

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مدل انتخاب شده برای توان با شرط (Prob>F) برای مدل، ۰/۰۰۰۱ < در سطح معنی‌داری ۱٪، مدل ترکیبی Quadratic × Linear (درجه دو خطی) به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. معادله‌ی (۱) بهترین معادله برای تعیین مقادیر توان می‌باشد. زیرا در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر (مثلاً خطی-خطی) دارای R²(adj) بالاتر (۰/۸۴) و CV% پایین‌تر (۳/۳۳٪) می‌باشد. ساختار درجه-دو برای بخش MIX به دلیل وجود یک نقطه بهینه در پاسخ به تغییرات ترکیب سوخت است.

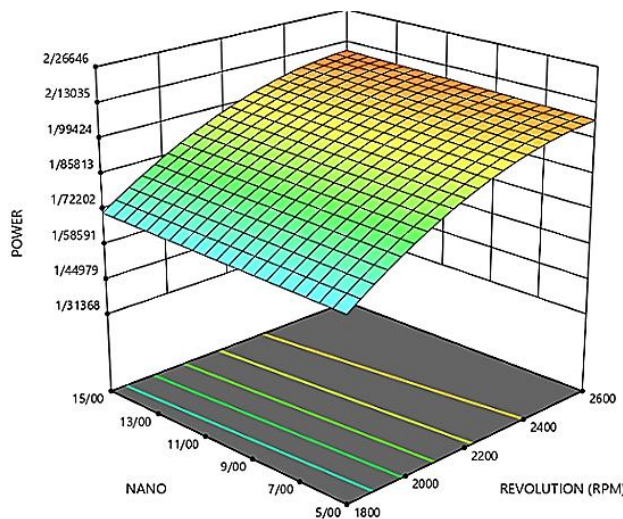
$$P=1.92+0.1X+0.13N-0.053Z+0.13XN+0.14XZ-0.02N^2-0.13XN^2$$

رابطه (۱)

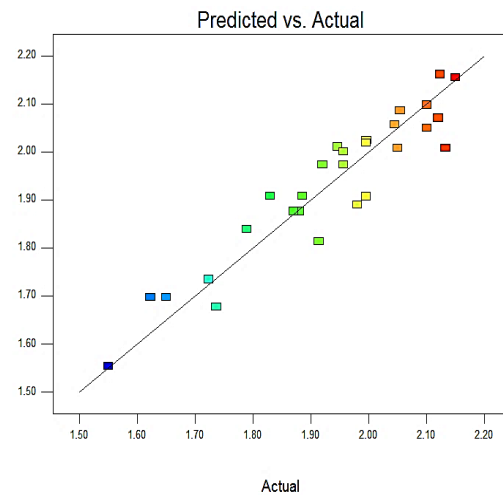
در این رابطه:

P : توان، X : بیواتانول، Y : سوخت دیزل، Z : نانو و N : سرعت دورانی موتور می‌باشد.

مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده (شکل ۵)، تطابق نزدیک بین این دو مجموعه داده را نشان می‌دهد که حاکی از همبستگی بسیار خوب بین نتایج تجربی و مقادیر حاصل از مدل‌سازی آماری است. نمودار شکل (۶) رابطه رگرسیونی بین غلظت نانوذرات و سرعت موتور با توان خروجی موتور را نمایش می‌دهد. تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که در ۹۶/۴۲٪ از موارد، خطای مدل کمتر از ± 0.1 کیلووات است. بنابراین معادله ۱، ارائه شده از نظر دقت در تخمین داده‌های توان موتور، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است.



شکل ۶: مدل ارائه شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با توان موتور



شکل ۵: مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده توان

نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین مقدار توان خروجی مربوط به سوخت E12D88 حاوی ۱۵PPm نانوذره آهن در سرعت ۲۲۸۴ دور بر دقیقه بوده است، در حالی که کمترین توان مربوط به سوخت E11.4D88.6 حاوی ۵PPm نانوذره آهن در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه ثبت شد. مطابق با انتظار، در تمامی ترکیبات سوخت مورد بررسی، با کاهش سرعت موتور و افزایش بار، روند کاهش در میزان توان مشاهده گردید. همچنین، با افزایش درصد بیواتانول و غلظت نانوذرات در ترکیب سوخت، به دلیل تأمین اکسیژن بیشتر در محفظه احتراق، فرآیند احتراق به صورت کامل‌تری انجام شده و در نتیجه توان تولیدی موتور افزایش یافت. به عبارتی، نتایج به وضوح نشان می‌دهد که افزودن بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن به سوخت دیزل، تأثیر مثبت و قابل توجهی بر توان خروجی موتور داشته است. بیواتانول یک حامل اکسیژن است. حضور نانوذرات اکسید آهن نیز به طور بالقوه می‌تواند به عنوان کاتالیزور، آزادسازی اکسیژن را در فرآیند احتراق تسهیل کند. این اکسیژن اضافی منجر به احتراق کامل‌تر سوخت و آزادسازی انرژی بیشتر می‌شود. از طرفی نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا، می‌توانند به عنوان مراکز ترمزی برای تشکیل مخلوط سوخت-هوا عمل کرده و راندمان احتراق را افزایش دهند (Mehregan & Moghiman, 2018) و (Can et al., 2004). این یافته‌ها، با نتایج بسیاری از مطالعات معتبر در این حوزه همخوانی و هم‌پوشانی قابل توجهی دارد. نتایج پژوهشی که توسط دی پورس و همکاران انجام شد، نشان داد که افزودن بیواتانول به دیزل (تا ۲۰٪ حجمی) به دلیل اثر غنی‌سازی اکسیژن، منجر به احتراق کامل‌تر و در نتیجه افزایش توان و گشتاور خروجی موتور می‌شود (De Pours et al., 2017). عالم و سروانان در پژوهش خود به بررسی اثر نانوذرات اکسید سرب بر سوخت دیزل-بیودیزل پرداختند. آنها گزارش کردند که نانوذرات به دلیل نقش کاتالیستی و انرژی ترمزی، زمان تاخیر در احتراق را کوتاه کرده و نرخ آزادسازی انرژی را افزایش می‌دهند و در نهایت منجر به افزایش توان می‌شود. اگرچه نانوذرات مورد استفاده متفاوت است، اما مکانیسم کلی تأثیر نانوافزودنی‌ها، یعنی تأمین اکسیژن و بهبود احتراق با این مطالعه همسو است (Aalam & Saravanan, 2015). همچنین در مطالعه‌ای که

توسط آلهگن و همکاران انجام شد، به بررسی ترکیب نانوذرات اکسید آلومینیوم با سوخت دیزل-اتانول پرداختند، آن‌ها گزارش کردند که ترکیب یک سوخت اکسیژنه (مانند اتانول) با یک نانو کاتالیست، اثر هم‌افزایی دارد. این ترکیب نه تنها احتراق را بهبود می‌بخشد، بلکه تا حدی اثرات منفی پایین بودن ارزش حرارتی اتانول (مانند کاهش احتمالی توان در برخی شرایط) را جبران می‌کند و در نهایت عملکرد کلی موتور را ارتقا می‌دهد. این نتیجه به طور مستقیم، از یافته این پژوهش درباره بهترین عملکرد مربوط به مخلوط حاوی بالاترین درصد اتانول و نانوذره حمایت می‌کند (Alehegn et al. 2025).

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه شده برای گشتاور

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مدل انتخاب شده جهت گشتاور مدل cubic linear (درجه سه خطی) با معنی داری مدل در سطح ۱٪ را تأیید کرد. با توجه به تحلیل واریانس انجام گرفته مدل ترکیبی درجه سه خطی به دلایل زیر به عنوان بهترین مدل انتخاب شد: دارای بالاترین توان تبیین تعدیل شده ($R^2(\text{adj}) = 0.89$) که نشان از برازش عالی دارد. فاقد ضعف برازش، که اعتبار آماری مدل را تضمین می‌کند. دارای پایین ترین خطای نسبی ($CV\% = 3.69\%$) که نشان دهنده دقت عملیاتی بالا است. معادله ۲ بهترین معادله برای تعیین مقادیر گشتاور می‌باشد.

$$T = 8.36Y + 8.54X - 0.17XY - 0.91NY - 0.15ZY - 0.4XN + 0.33XZ - 0.55XYZ$$

رابطه ۲)

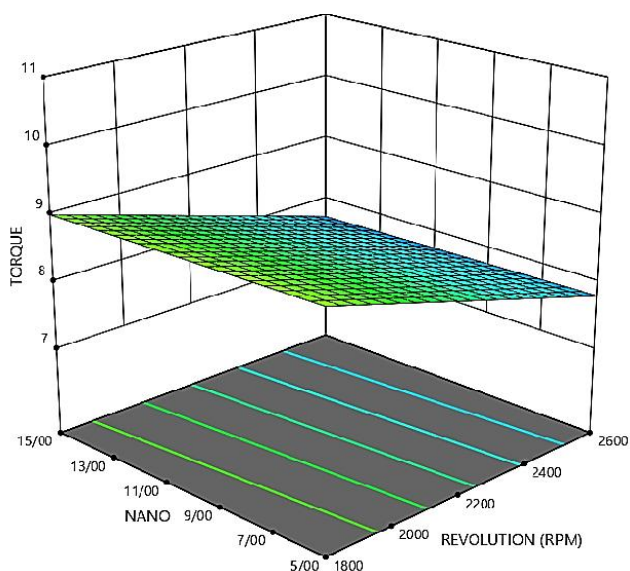
در این رابطه:

T: گشتاور، X: بیواتانول، Y: سوخت دیزل، Z: نانوذرات و N: سرعت دورانی موتور می‌باشد.

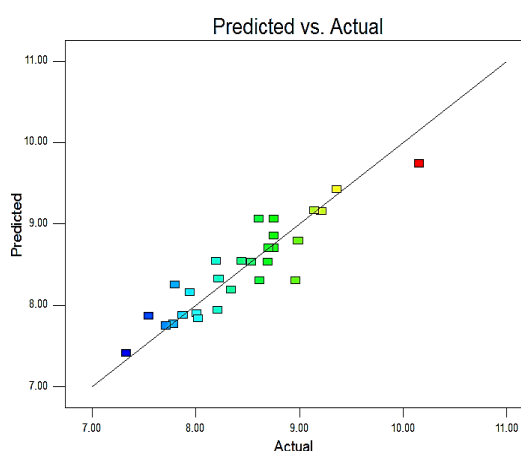
مقایسه‌ی مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده تطابق نزدیک این اعداد را نشان می‌دهد (شکل ۷). نمودار شکل ۸ رابطه‌ی رگرسیونی بین میزان ذرات نانو و سرعت موتور را با گشتاور نشان می‌دهد. بررسی نمودار مورد نظر نشان می‌دهد که در ۹۶/۴۲٪ از موارد، خطای مدل کمتر از ۵،± نیوتن متر می‌باشد. بنابراین معادله ارائه شده ۲، از نظر دقت در تخمین داده‌های گشتاور از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. با افزایش سرعت موتور، تقریباً برای تمامی ترکیبات سوخت، کاهش گشتاور مشاهده شد. این پدیده عمدتاً ناشی از عدم پر شدن کامل سیلندر در مرحله تنفس است. در سرعت‌های بالا، زمان تنفس کاهش یافته و در نتیجه سیلندر به صورت بهینه پر نمی‌شود. این امر منجر به کاهش فشار تراکم و فشار احتراق، افزایش نیروهای اینرسی در بخش‌های متحرک موتور و در نهایت کاهش گشتاور واقعی می‌گردد. چون کاهش بازدهی حجمی در سرعت‌های بالا باعث می‌شود جرم واقعی مخلوط هوا-سوخت وارد شده به سیلندر در هر چرخه (شارژ تازه) کاهش یابد. از آنجایی که انرژی شیمیایی قابل تبدیل به کار در هر چرخه مستقیماً به جرم سوخت حاضر در این شارژ بستگی دارد، کاهش جرم شارژ به معنای کاهش انرژی حرارتی آزاد شده در احتراق و در نتیجه کاهش کار و گشتاور تولیدی در آن چرخه است. همچنین، افزایش تلفات اصطکاکی و پمپاژ در سرعت‌های بالا، سهم بیشتری از انرژی تولیدی را هدر می‌دهد. این دو عامل در کنار هم، کاهش گشتاور را در دورهای بالا توجیه می‌کنند. این که مدل درجه سه خطی، برازش خوبی داشته، نشان می‌دهد این رابطه غیرخطی است و در سرعت‌های بسیار بالا، نرخ کاهش گشتاور تشدید می‌شود. نتایج تأثیر ترکیب سوخت بر گشتاور تولیدی نشان داد، با افزایش درصد اتانول در ترکیب سوخت، گشتاور کاهش و با افزایش نسبت دیزل در ترکیب سوخت، به دلیل ارزش حرارتی بالاتر مخلوط‌های غنی، موجب افزایش گشتاور می‌شود. در مقابل، افزایش بیواتانول منجر به ورود سوخت رقیق‌تر به محفظه احتراق شده و ارزش حرارتی پایین‌تر اتانول، به این معنی است که در هر چرخه، انرژی کمتری از سوختن یک حجم معین، آزاد می‌شود. این امر مستقیماً بر روی فشار اعمال شده به پیستون و در نهایت گشتاور تأثیر منفی می‌گذارد. بر خلاف پیش‌بینی اولیه، افزایش غلظت نانوذرات در ترکیبات سوخت نه تنها موجب افزایش گشتاور نشد، بلکه کاهش ناچیزی را در مقادیر گشتاور به همراه داشت. اگرچه نانوذرات اکسید آهن می‌توانند با بهبود احتراق، راندمان احتراق را افزایش دهند، اما این بهبود به تنهایی نمی‌تواند بر کاهش بنیادین جرم هوای ورودی در سرعت‌های بالا (مشکل پر شدن سیلندر) غلبه کند. به عبارت دیگر، حتی اگر احتراق ۱۰۰٪ کامل رخ دهد، اگر هوای کافی در سیلندر نباشد، گشتاور افزایش نخواهد یافت.

این یافته با نتایج پژوهش‌های دیگران مطابقت دارد. عالم و سراوانان (Aalam & Saravanan. 2015) و جاموا و همکاران در پژوهش خود به وضوح تأکید می‌کنند که در موتورهای دیزل، گشتاور حداکثر در سرعت‌های میانی رخ داده و با افزایش سرعت به دلیل کاهش

راندمان حجمی و افزایش تلفات، کاهش می‌یابد (Jamuwa et al. 2016). نتایج نشان می‌دهد که محدودیت‌های مکانیکی موتور (مانند راندمان حجمی) می‌توانند اثرات مثبت افزودنی‌های شیمیایی (مانند نانوذرات) را تحت الشعاع قرار دهند این یافته، نکته‌ای کلیدی و حائز اهمیت در مطالعات تجربی است که لازم است در گزارش‌های پژوهشی مورد تأکید قرار گیرد. این مشاهده به وضوح نشان می‌دهد که بهینه‌سازی عملکرد موتورهای احتراق داخلی، همواره مستلزم ایجاد یک توازن بین پارامترهای مختلف عملکردی و آلاینده‌ها است. راهکارهای تک‌بعدی نظیر افزودن یک ماده کاتالیستی، با وجود بهبود احتمالی در یک شاخص (مانند کاهش یک آلاینده خاص)، قادر به نقض یا غلبه بر اصول بنیادین ترمودینامیک، مکانیک سیالات و سینتیک احتراق حاکم بر سیستم نیستند. هرگونه تغییر در ترکیب سوخت یا پارامترهای عملیاتی، پیامدهای بهم‌پیوسته‌ای دارد که تنها از طریق یک تحلیل سیستمی چندمعیاره قابل ارزیابی و مدیریت است.



شکل ۸: مدل ارائه‌شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با گشتاور موتور



شکل ۷: مقایسه مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده گشتاور

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه‌شده برای مصرف سوخت ویژه

جزئیات آماری لازم برای تجزیه و تحلیل مدل انتخاب‌شده جهت مصرف سوخت ویژه با معنی‌داری مدل در سطح ۱٪، مدل $Quadratic \times Mean$ (درجه دو میانگین) را تأیید کرد. اگرچه $R^2(adj)$ مدل انتخاب‌شده (میانگین-میانگین) عدد ۰/۳۴ است، اما این مدل در مقایسه با سایر ساختارهای آزمون‌شده برای این پارامتر، تنها مدلی بود که آزمون ضعف برازش آن معنادار نبود و در عین حال $CV\%$ قابل قبولی داشت. این نشان می‌دهد رابطه این پارامتر با متغیرهای مستقل خطی ساده نیست و مدل‌های پیچیده‌تر نیز بهبود چشمگیری ایجاد نکرده‌اند. با توجه به تحلیل واریانس انجام‌گرفته مدل ترکیبی خطی میانگین به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد و معادله‌ی ۳، بهترین معادلات برای تعیین مقادیر مصرف سوخت ویژه می‌باشند.

$$BSFC = 782.046Y + 470.58X - 845.21XY$$

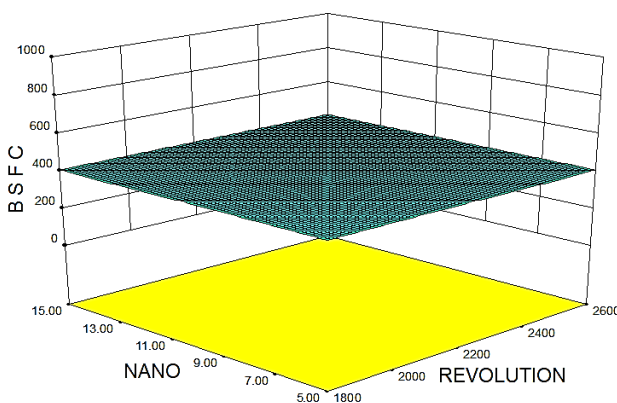
رابطه ۳)

در این رابطه:

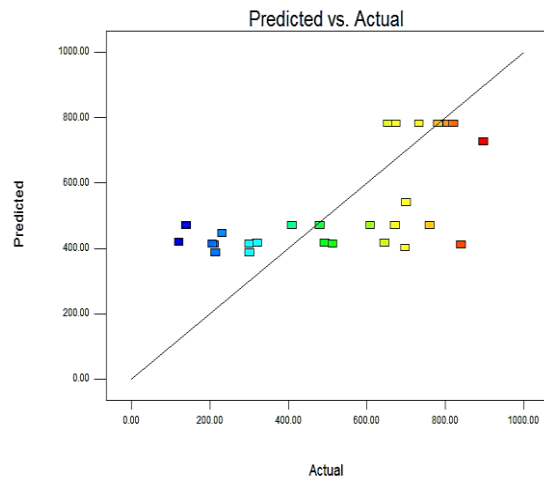
BSFC: مصرف سوخت ویژه، X: بیواتانول و Y: سوخت دیزل می‌باشد.

مقایسه مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده، نشان‌دهنده عدم تطابق قابل ملاحظه بین این دو مجموعه می‌باشد (شکل ۹). این نتیجه حاکی از آن است که همبستگی معناداری بین یافته‌های تجربی و مقادیر حاصل از مدل‌سازی آماری وجود ندارد. بر خلاف انتظار اولیه که بر اساس آن پیش‌بینی می‌شد، افزایش غلظت نانوذرات به دلیل بهبود ظرفیت انرژی سوخت، منجر به کاهش مصرف سوخت ویژه شود، اما نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش نانوذرات در مخلوط‌های سوخت تأثیر معناداری بر مصرف سوخت ویژه ندارد. عدم تطابق بین داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط مدل درجه-دو میانگین نشان می‌دهد که مدل آماری قادر به ثبت پیچیدگی‌های پدیده فیزیکی حاکم بر مصرف سوخت در این سیستم نیست. این امر می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های غیرخطی و پیچیده بین متغیرها (نانوذرات، اتانول، سرعت موتور) باشد که توسط یک مدل ساده درجه-دو قابل بیان نیست. نمودار شکل ۱۰، رابطه‌ی

رگرسیون بین میزان ذرات نانو و سرعت موتور را با مصرف سوخت ویژه نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: مدل ارائه‌شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با مصرف سوخت ویژه



شکل ۹: مقایسه مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده مصرف سوخت ویژه

با توجه به ارزش حرارتی پایین‌تر اتانول در مقایسه با دیزل، انتظار می‌رفت که با استفاده از مخلوط‌های دیزل-اتانول، حجم بیشتری سوخت وارد محفظه احتراق شده و در نتیجه نرخ مصرف سوخت افزایش یابد. با این حال، نتایج این پژوهش برخلاف پیش‌بینی اولیه نشان داد که با افزایش درصد اتانول، مصرف سوخت ویژه کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد حضور نانوذرات آهن به عنوان کاتالیست در کنار بیواتانول، نقش تعیین‌کننده‌ای در این رفتار غیرمنتظره داشته است. این نانوذرات با تسهیل و بهبود فرآیند احتراق، کارایی احتراق را تا حدی افزایش داده است که اثر منفی ارزش حرارتی پایین‌تر اتانول جبران شده و در نهایت منجر به کاهش مصرف سوخت ویژه گردیده است. این یافته مبنی بر بی‌تأثیری نانوذرات بر مصرف سوخت ویژه با برخی پژوهش‌ها همخوانی دارد. مکانیزم احتمالی به‌خاطر تعادل بین اثرات متضاد است. از یک سو، نانوذرات با عمل کاتالیستی می‌توانند راندمان احتراق را افزایش و مصرف سوخت ویژه را کاهش دهند. از سوی دیگر، افزودن آنها می‌تواند چگالی و احتمالاً ویسکوزیته سوخت را تغییر دهد که ممکن است بر کیفیت پاشش و آمیزش سوخت تأثیر منفی بگذارد (Khalife et al., 2017). به نظر می‌رسد در این پژوهش، این دو اثر یکدیگر را خنثی کرده‌اند که منجر به عدم تغییر معنادار در مصرف سوخت ویژه شده است. ممکن است یک اثر هم‌افزایی بین اتانول و نانوذرات وجود داشته باشد. اتانول با اکسیژن بالا و فراریت بالا، اختلاط بهتری ایجاد می‌کند و نانوذرات این مزیت را با کاتالیز کردن احتراق تقویت می‌کنند. این بهبود کلی در راندمان احتراق می‌تواند ناشی از چگالی انرژی پایین‌تر ذاتی اتانول نسبت به بنزین باشد که با افزایش قابل توجه راندمان احتراق ناشی از حضور اکسیژن و کاتالیز نانوذرات جبران شده و در نهایت منجر به کاهش مصرف سوخت ویژه می‌شود. به عبارت ساده، موتور برای تولید همان توان، به سوخت "کمتر اما با احتراق کارآمدتر" نیاز دارد. نکته قابل توجه این است که، برخلاف انتظار، تغییرات سرعت موتور نیز تأثیر معناداری بر مصرف سوخت ویژه نداشت. تکرار آزمایش‌ها نیز نتایج مشابهی را به همراه داشت که بر پایایی داده‌ها صحت می‌گذارد. مطالعاتی وجود دارند که کاهش مصرف سوخت ویژه را با افزودن اتانول در حضور کاتالیست یا در شرایط بهینه گزارش کرده‌اند. به‌عنوان مثال، نور و همکاران در پژوهشی با تمرکز بر بهبود احتراق نشان دادند که استفاده از افزودنی‌های کاتالیستی همراه با سوخت‌های اکسیژنه می‌تواند راندمان احتراق را تا حدی بهبود بخشد (Nour et al., 2019).

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه‌شده برای منوکسیدکربن (CO)

با توجه به تحلیل واریانس انجام‌گرفته مدل ترکیبی $Mean \times Linear$ (میانگین خطی) به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. زیرا در عین حفظ سادگی نسبی، به طور همزمان سه ویژگی مطلوب زیر را داشت:

بالاترین توان تبیین تعدیل‌شده $(R^2(adj) = 0.86)$

عدم وجود ضعف برازش معنادار در مدل

دقت قابل قبول پیش‌بینی با CV٪ نسبتاً پایین (در مقایسه با سایر مدل‌های پیشنهادی این پارامتر)

معادله‌ی ۴، بهترین معادله برای تعیین مقادیر منوکسیدکربن می‌باشد.

رابطه ۴)

$$CO=0.063-0.023Z-0.038N^3$$

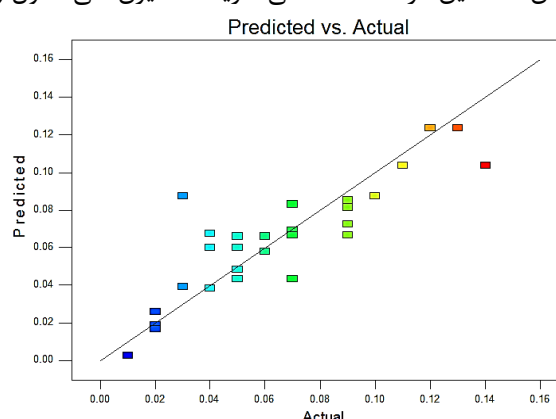
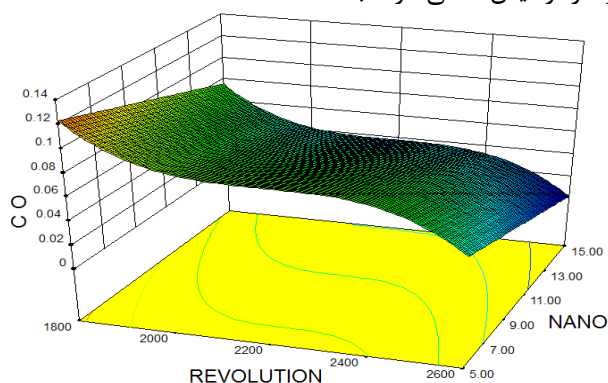
در این رابطه:

CO : منوکسید کربن، Z : نانو و N : سرعت دورانی موتور می‌باشد.

مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، تطابق نزدیک بین این دو مجموعه داده را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). بر اساس داده‌های تجربی، نمودار شکل (۱۲) رابطه رگرسیونی بین غلظت نانوذرات و سرعت موتور با میزان انتشار منوکسید کربن را نمایش می‌دهد. تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که در ۹۲/۹٪ از موارد، خطای مدل کمتر از $\pm 0,04$ واحد است. بنابراین معادله ارائه شده ۴، از نظر دقت در تخمین داده‌های منوکسید کربن از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین میزان منوکسید کربن، مربوط به سوخت E5.9D94.1 حاوی ۹/۳PPm نانوذره آهن در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه و کمترین میزان منوکسید کربن، مربوط به سوخت E6D94 حاوی ۱۴/۷۵ PPM نانوذره آهن در سرعت ۲۶۰۰ دور بر دقیقه است. الگوی مشاهده شده نشان می‌دهد، در تمامی ترکیبات سوخت، با افزایش سرعت موتور و کاهش بار، میزان انتشار منوکسید کربن کاهش می‌یابد. تأثیر افزودنی‌ها نیز نشان داد، مطابق با پیش‌بینی، افزایش غلظت نانوذرات به دلیل بهبود احتراق از طریق تأمین اکسیژن بیشتر، منجر به کاهش قابل توجه منوکسید کربن می‌شود. البته بر خلاف انتظار، تغییرات درصد اتانول تأثیر معناداری بر میزان منوکسید کربن نداشت.

در خصوص اثر سرعت موتور، این یافته کاملاً منطبق بر اصول مهندسی موتور و مورد تایید گسترده تحقیقات است. در سرعت‌های بالاتر و بار کمتر، نسبت هوا به سوخت (Lambda) افزایش می‌یابد. هوای اضافی (مازاد بر مقدار مورد نیاز برای احتراق استوکیومتری) تضمین می‌کند که اتم‌های کربن سوخت، فرصت و اکسیژن کافی برای اکسید شدن کامل به CO_2 را پیدا می‌کنند و از تشکیل CO ناقص جلوگیری می‌شود. پژوهش کومار و همکاران در سال ۲۰۱۷، به وضوح رابطه معکوس بین بار موتور و انتشار CO را در یک موتور دیزل نشان داد. آن‌ها تأیید کردند که در بارهای جزئی، مخلوط سوخت رقیق‌تر است و در نتیجه احتراق کامل‌تری رخ داده و CO کمتری تولید می‌شود (Kumar et al., 2017). نانوذرات اکسید آهن (Fe_2O_3 یا Fe_3O_4) نیز به عنوان یک منبع اکسیژن اضافی عمل می‌کنند که در دماهای بالا در محیط احتراق آزاد می‌شود. این اکسیژن اضافی، اکسیداسیون CO به CO_2 را تسهیل و تسریع می‌کند. به عبارت دیگر، نانوذرات نه تنها به احتراق کامل سوخت کمک می‌کنند، بلکه محصول ناقص احتراق (CO) را نیز به محصول نهایی (CO_2) تبدیل می‌نمایند. این یافته با نتایج پژوهش باشا مطابقت دارد. مطالعه باشا در سال ۲۰۲۲، به طور مشخص به نقش نانوذرات اکسید آهن در کاهش CO پرداخته است. این پژوهش نشان داد که نانوذرات با عمل کردن به عنوان "کاتالیزور اکسیداسیون" و تسریع شکستن مولکول‌های هیدروکربنی، به طور قابل توجهی باعث کاهش انتشار CO می‌شوند (Basha et al., 2022). در مورد بی‌تأثیری غلظت اتانول در این یافته، که مهم‌ترین بخش نتایج این پژوهش است، با بسیاری از پیش‌بینی‌ها در تضاد است. انتظار می‌رفت به دو دلیل با افزایش اتانول، CO کاهش یابد، یکی به دلیل محتوای اکسیژن اتانول، اتانول حاوی ۳۵٪ اکسیژن است که به احتراق کامل کمک می‌کند و دیگری به دلیل کاهش کربن در مخلوط است؛ چون اتانول زنجیره کربن کوتاه‌تری (C_2) نسبت به دیزل ($C_{12}-C_{20}$) دارد. اما نتیجه برعکس شد. برای توجیه احتمالی این رفتار غیرمنتظره می‌توان به دو اثر زیر اشاره نمود:

اثر خنک‌کنندگی تبخیر: اتانول گرمای تبخیر بالایی دارد. این امر می‌تواند باعث سرد شدن موضعی مخلوط سوخت-هوا در سیلندر شود که به نوبه خود می‌تواند سرعت واکنش‌های اکسیداسیون را در مرزهای شعله کاهش داده و منجر به تشکیل CO بیشتری شود. ممکن است این اثر خنک‌کنندگی، مزیت اکسیژن‌دهی اتانول را در آزمایش خنثی کرده باشد.



شکل ۱۲: مدل ارائه شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با منوکسید کربن

شکل ۱۱: مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده منوکسید کربن

تأثیر بر روی فرآیند اتمیزاسیون و اختلاط: تغییر در خواص فیزیکی مخلوط (مانند ویسکوزیته و کشش سطحی) با افزودن اتانول، می‌تواند بر روی کیفیت پاشش و تشکیل قطرات ریز تأثیر بگذارد. اگر این تأثیر منفی باشد، می‌تواند منجر به تشکیل نواحی غنی از سوخت در محفظه احتراق شود که در آنجا اکسیژن کافی برای اکسیداسیون کامل CO وجود ندارد (Sun et al. 2022).

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه شده برای دی‌اکسیدکربن (CO₂)

با توجه به تحلیل واریانس انجام گرفته مدل ترکیبی cubic × Linear (درجه سه خطی) به دلایل زیر، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد: بهترین تعادل بین قدرت تبیین و پیچیدگی را ارائه می‌دهد. (R²(adj) = 0.81). کفایت آماری کامل دارد (ضعف برازش معنادار ندارد).

در بین مدل‌های رقیب، دارای پایین‌ترین خطای نسبی (CV% = 20.95%) است.

معادله (۵) بهترین معادله برای تعیین مقادیر دی‌اکسیدکربن می‌باشد.

$$\text{CO}_2 = 4.85Y + 4.82X + 5.78XY + 0.63YZ + 0.95XZ - 9.42YXZ \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه:

CO₂: دی‌اکسید کربن، X: بیواتانول، Y: سوخت دیزل و Z: نانو می‌باشد.

مقایسه‌ی مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده تطابق نزدیکی این اعداد را نشان داد (شکل ۱۳). با توجه به نمودار شکل ۱۴، رابطه‌ی رگرسیونی بین ذرات نانو و سرعت موتور را با دی‌اکسیدکربن نشان می‌دهد. بررسی این نمودار مشخص می‌کند که در ۹۰٪ نقاط خطای مدل کمتر از ۱± می‌باشد. بنابراین معادله‌ی ارائه شده ۵، از لحاظ دقت در تخمین داده‌های دی‌اکسیدکربن مطلوب می‌باشد. نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین میزان دی‌اکسیدکربن مربوط به سوخت E4D96 حاوی ۵PPm نانوذره آهن در سرعت ۲۰۵۲ دور بر دقیقه بوده است، در حالی که کمترین میزان این آلاینده مربوط به سوخت E12D88 حاوی ۱۱VPPm نانوذره آهن در سرعت ۲۶۰۰ دور بر دقیقه ثبت شد. بر اساس الگوهای مشاهده شده:

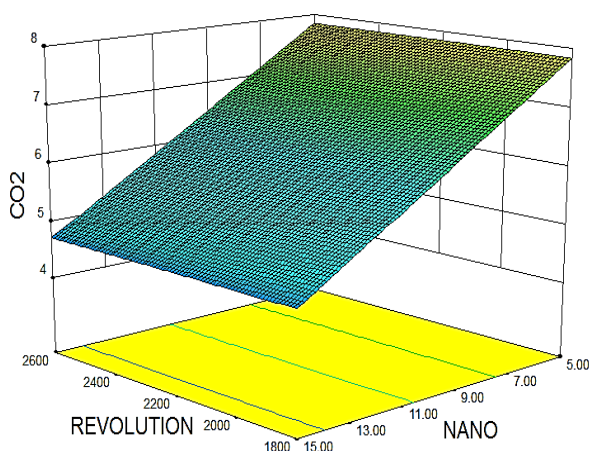
در تمامی ترکیبات سوخت، با افزایش سرعت موتور و کاهش بار، تغییرات میزان دی‌اکسیدکربن ناچیز بود (شکل ۹).

با افزایش درصد بیواتانول تا حدود ۶٪، میزان دی‌اکسیدکربن افزایش یافت.

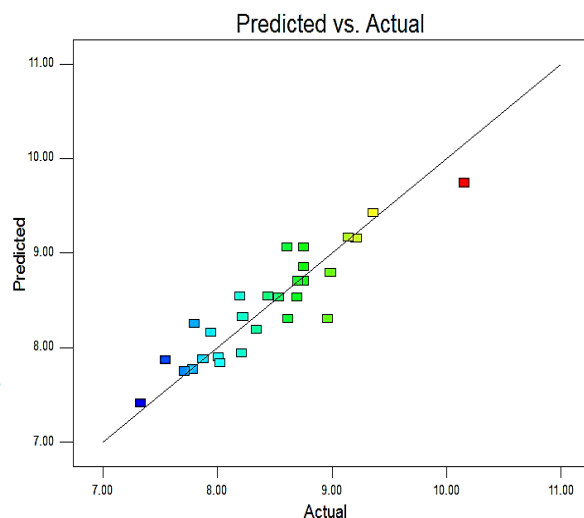
با افزایش بیشتر اتانول به بیش از ۶٪، میزان دی‌اکسیدکربن خروجی کاهش نشان داد.

افزایش غلظت نانوذرات نیز منجر به کاهش میزان آلاینده دی‌اکسیدکربن شد.

افزایش اولیه دی‌اکسیدکربن با افزودن اتانول تا ۴٪ می‌تواند ناشی بهبود احتراق باشد که باعث اکسیداسیون کامل تر کربن به CO₂ می‌شود. با این حال، در درصدهای بالاتر اتانول، احتمالاً کاهش ارزش حرارتی و تغییرات در دینامیک احتراق منجر به کاهش تولید دی‌اکسیدکربن شده است و نقش کاتالیستی نانوذرات آهن نیز در تسهیل اکسیداسیون کامل و کاهش انتشار CO₂ مؤثر بوده است.



شکل ۱۴: مدل ارائه شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با دی‌اکسیدکربن



شکل ۱۳: مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده دی-اکسیدکربن

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه شده برای هیدروکربن های نسوخته (HC)

با توجه به تحلیل واریانس انجام گرفته مدل ترکیبی $Quadratic \times Mean$ (درجه دو میانگین) به عنوان بهترین مدل انتخاب شد چون معناداری آماری قوی تری داشت، با داده ها برازش بهتری را نشان داد (با R^2 تعدیل شده بالا و CV% پایین)، فاقد ضعف برازش بود، یعنی خطای سیستماتیک ناشناخته ای باقی نگذاشت و قابلیت پیش بینی خوبی برای داده های جدید داشت. معادله ی ۶، بهترین معادله برای تعیین مقادیر هیدروکربن های نسوخته می باشد.

$$HC = 14.84Y + 21.99X - 15.80XY$$

رابطه ۶)

در این رابطه:

HC: هیدروکربن نسوخته، X: بیواتانول و Y: سوخت دیزل می باشد.

مقایسه ی مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش بینی شده عدم تطابق نزدیکی این اعداد را نشان داد (شکل ۱۵). این امر نشان دهنده ی عدم همبستگی بین نتایج به دست آمده با روش تجربی و مقادیر پیش بینی شده با روش آماری است. پیش بینی می شد با افزایش میزان نانو به دلیل افزایش ظرفیت انرژی سوخت، هیدروکربن نسوخته کاهش یابد. ولی تغییر معنی داری مشاهده نشد. نمودار شکل ۱۶، رابطه رگرسیونی بین ذرات نانو و سرعت موتور را با هیدروکربن های نسوخته نشان می دهد. این یافته، یعنی عدم تغییر معنادار هیدروکربن های نسوخته با افزایش نانوذرات اکسید آهن، بر خلاف پیش بینی اولیه، می تواند به دلایل زیر باشد:

مکانیسم غالب کاتالیستی در فاز گاز: نانوذرات اکسید آهن به عنوان یک کاتالیست اکسیداسیون عمل می کنند. اما اثر

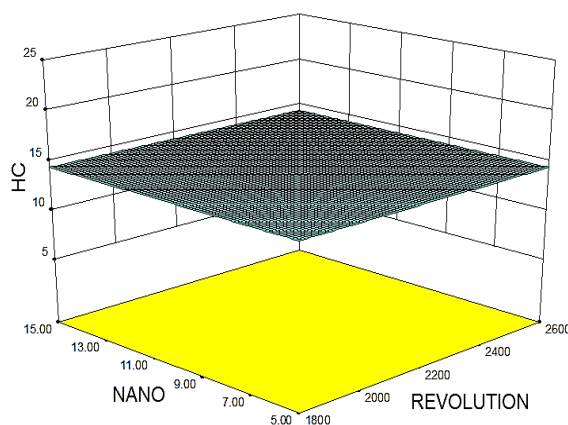
کاتالیستی آن ها معمولاً در اکسید کردن ذرات کربن (دوده) و مونوکسید کربن (CO) مشهودتر است. مکانیسم کاهش هیدروکربن های نسوخته پیچیده تر است و به طور مستقیم با کیفیت اختلاط و فرآیند احتراق اولیه مرتبط است. ممکن است نانوذرات در دوز استفاده شده (۵-۱۵ PPM) نتوانسته اند تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی شکستن مولکول های هیدروکربنی سنگین تر و نسوخته داشته باشند.

میزان ناکافی افزودنی: با وجود اینکه نانوذرات در مقادیر کم بسیار مؤثر هستند، ممکن است محدوده (۵-۱۵ PPM) برای ایجاد

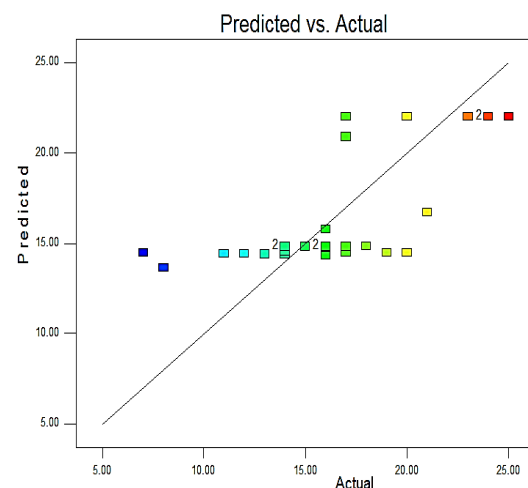
یک تغییر کاتالیستی معنادار در اکسیداسیون هیدروکربن های نسوخته کافی نبوده باشد. برخی مطالعات برای مشاهده اثرات آشکار بر روی آلاینده ها، از مقادیر بالاتر حتی تا ۱۰۰ PPM استفاده کرده اند.

تعادل بین اثرات مثبت و منفی: از یک سو، نانوذرات با افزایش سطح ویژه و تسریع واکنش های احتراق، می توانند هیدروکربن های

نسوخته را کاهش دهند. از سوی دیگر، حضور آن ها می تواند به طور جزئی بر روی فرآیند تبخیر و اختلاط سوخت تأثیر بگذارد. ممکن است در این آزمایش، این اثرات متقابل یکدیگر را خنثی کرده باشند (Prabhu Kishore et al. 2022).



شکل ۱۶: مدل ارائه شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با هیدروکربن های نسوخته



شکل ۱۵: مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش بینی شده هیدروکربن های نسوخته

همچنین یافته های این پژوهش نشان داد میزان هیدروکربن های نسوخته حاصل از سوخت E12D88 که حاوی ۹/۱ PPM نانوذره آهن است در سرعت ۲۱۴۸ rpm بالاترین است و کمترین هیدروکربن های نسوخته نیز مربوط به سوخت E6D94 حاوی ۱۴/۷۵ PPM نانوذره آهن در سرعت ۲۶۰۰ rpm می باشد. در همه ی ترکیبات مختلف سوخت با افزایش دور موتور و کاهش بار، میزان تغییرات

هیدروکربن‌های نسوخته ناچیز بود. در دوره‌های بالا، زمان کمتری برای تکمیل احتراق وجود دارد و در بارهای کم، دمای متوسط سیلندر پایین‌تر است. این عوامل به طور ذاتی تمایل به افزایش هیدروکربن‌های نسوخته دارند. اگر اثر کاتالیستی نانوذرات ضعیف باشد، ممکن است در برابر این عوامل غالب (دور بالا و بار کم)، نتوانند تغییر محسوسی ایجاد کنند.

با افزایش درصد بیواتانول، میزان هیدروکربن‌های نسوخته افزایش یافت. این مشاهده کاملاً منطقی و با تئوری سازگار است. بیواتانول در مقایسه با دیزل، گرانی بسیار کم‌تر و فشار بخار بالاتری دارد. این موضوع می‌تواند منجر به تشکیل قطرات ریزتر اما با نفوذ کمتر در محفظه احتراق شود. اگرچه ریزقطره‌ها سریع‌تر تبخیر می‌شوند، اما ممکن است نتوانند به خوبی با هوای فشرده مخلوط شوند و در مناطق غنی یا بیش از حد رقیق محفظه احتراق قرار گیرند که احتراق ناقص را به دنبال دارد. همچنین بیواتانول گرمای نهان تبخیر بسیار بالاتری (حدود ۸۴۰ kJ/kg) نسبت به دیزل (حدود ۲۵۰ kJ/kg) دارد. این امر باعث خنک‌کاری شدید مخلوط سوخت-هوا در سیلندر می‌شود. کاهش دمای سیلندر، به ویژه در نزدیکی دیواره‌ها، می‌تواند منجر به خاموش شدن شعله و افزایش هیدروکربن‌های نسوخته شود. از طرفی بیواتانول عدد ستان پایینی دارد که به معنای تمایل کمتر به احتراق خودبخودی است. این موضوع به ویژه در فازهای شروع احتراق و در دوره‌های پایین موتور که دمای محفظه احتراق کمتر است، می‌تواند باعث افزایش هیدروکربن‌های نسوخته شود.

تجزیه و تحلیل آماری مدل ارائه شده برای اکسیدهای نیتروژن (NO_x)

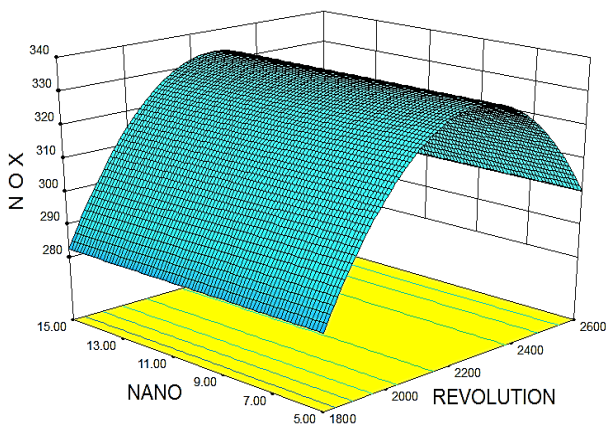
با توجه به تحلیل واریانس انجام گرفته مدل ترکیبی Mean × Quadratic (درجه دو میانگین) به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. چون دارای بالاترین توان تبیین تعدیل شده بالا ($R^2(\text{adj}) = 0.83$) است که نشان از برازش عالی دارد و همچنین خطای نسبی پایین (CV% = 12.41%) که نشان دهنده دقت عملیاتی بالا است. معادله‌ی (۷) بهترین معادله برای تعیین مقادیر اکسیدهای نیتروژن می‌باشد.

$$\text{NO}_x = +412.05Y + 489.07X - 469.93XY - 19.00YN - 114.35XN + 303.27YXN - 82.80XN^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

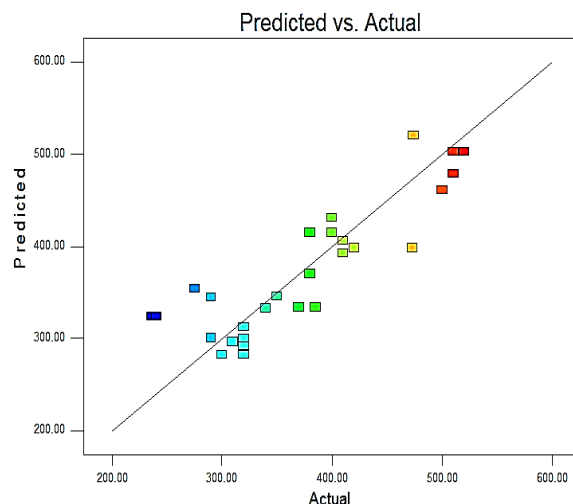
در این رابطه:

NO_x: اکسیدهای نیتروژن، X: بیواتانول، Y: سوخت دیزل و N: سرعت دورانی موتور می‌باشد.

مقایسه‌ی مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده، تطابق نزدیکی این اعداد را نشان داد (شکل ۱۷). نمودار شکل ۱۸، رابطه رگرسیونی بین ذرات نانو و سرعت موتور را با NO_x نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: مدل ارائه شده بین ذرات نانو و سرعت موتور با NO_x



شکل ۱۷: مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده NO_x

تشکیل NO_x عمدتاً به سه عامل دمای احتراق (در دماهای بالاتر از ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان تشکیل آن به طور نمایی افزایش می‌یابد)، مدت زمان ماندن گازها در دماهای بالا (به گونه‌ای که هرچه زمان بیشتری برای واکنش‌های زنجیره‌ای نیتروژن و اکسیژن در دمای بالا وجود داشته باشد، NO_x بیشتری تشکیل می‌شود) و غلظت اکسیژن (وجود اکسیژن مازاد، تشکیل NO_x را تسهیل می‌کند) بستگی دارد. در این پژوهش، در همه‌ی ترکیبات مختلف سوخت، با افزایش دور موتور و کاهش بار، میزان NO_x زیاد و سپس کاهش یافت. دلیل این رفتار منحنی شکل، تغییر در دو پارامتر کلیدی است:

مرحله افزایش (با افزایش دور موتور از ۱۸۰۰ به یک نقطه بهینه):

با افزایش دور موتور، سرعت جریان هوا و سوخت افزایش می‌یابد که منجر به آشفته‌گی بیشتر در سیلندر می‌شود. آشفته‌گی بالاتر، اختلاط سوخت و هوا را بهبود می‌بخشد و در نتیجه احتراقی سریع‌تر و کامل‌تر رخ می‌دهد. این احتراق کارآمد و سریع، منجر به ایجاد دمای حداکثر سیلندر بالاتر می‌شود که عامل اصلی افزایش تشکیل NOx است.

مرحله کاهش (با افزایش دور موتور از نقطه بهینه به سمت ۲۶۰۰ دور بر دقیقه):

در دوره‌های بسیار بالا، زمان موجود برای احتراق به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. اگرچه احتراق سریع است، اما کل فرآیند در یک بازه زمانی بسیار کوتاه‌تر اتفاق می‌افتد. این امر باعث می‌شود، گازهای داغ، فرصت کمتری برای ماندن در دماهای بالا داشته باشند. در نتیجه، متوسط دمای مؤثر برای تشکیل NOx کاهش یافته و با وجود احتمال دمای حداکثر بالا، خروجی NOx شروع به کاهش می‌کند. علاوه بر این، کاهش بار نیز به کاهش دمای کلی چرخه کمک می‌کند.

مطابق نتایج به دست آمده، در ابتدا با افزایش درصد بیواتانول در مخلوط سوخت، میزان NOx کاهش و با افزایش بیشتر اتانول، میزان NOx افزایش یافت، در مرحله کاهش اولیه، می‌توان علت را در اثر خاصیت خنک‌کاری بیواتانول جستجو کرد، چون این اثر غالب می‌شود. همانطور که پیشتر اشاره شد، بیواتانول دارای گرمای نهان تبخیر بالا است. تبخیر آن مقدار زیادی انرژی از محیط اطراف (هوای فشرده و دیواره‌های سیلندر) جذب می‌کند. این امر منجر به کاهش قابل توجه دمای شارژ هوای داخل سیلندر، به ویژه در انتهای مرحله تراکم می‌شود. این موضوع سبب کاهش دمای حداکثر احتراق شده و در نهایت منجر به کاهش تشکیل NOx می‌شود. با افزایش بیشتر درصد اتانول، اثرات دیگری از خود نشان می‌دهد. بیواتانول یک سوخت اکسیژنه است. در درصدهای بالاتر، میزان اکسیژن موجود در مخلوط سوخت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این اکسیژن اضافی باعث احتراق کامل‌تر و سریع‌تر می‌شود. از طرفی اگرچه سرعت شعله اتانول بالا است، اما در مخلوط با دیزل، ممکن است باعث بهبود کیفیت احتراق در مراحل بعدی شود و دمای مؤثر را افزایش دهد. همچنین اتانول انرژی کمتری در واحد حجم دارد. برای حفظ توان خروجی ثابت (مثلاً در یک سرعت مشخص)، ممکن است نیاز به تزریق سوخت بیشتری باشد (یا موتور به طور طبیعی برای جبران، کمی متفاوت عمل کند). این می‌تواند مرزهای منطقه احتراق را تغییر دهد. در این مرحله، اثر کاهش دما توسط خنک‌کاری ممکن است توسط اثر افزایش دما ناشی از احتراق کامل‌تر و سریع‌تر (به دلیل اکسیژن اضافی) خنثی یا شکست داده شود. در نتیجه دمای حداکثر احتراق، مجدداً افزایش یافته و مقدار NOx بیشتر می‌شود. افزایش میزان نانوذرات نیز تأثیر معنی‌داری بر روی NOx نداشته است. این یافته نیز با مکانیسم تشکیل NOx سازگار است؛ نانوذرات اکسید آهن با دو مکانیسم متضاد بر NOx تأثیر می‌گذارند:

افزایش بالقوه NOx: آنها با عمل به عنوان کاتالیست و تسریع واکنش‌های احتراق، می‌توانند منجر به افزایش نرخ رهایش حرارت و در نتیجه افزایش دمای حداکثر سیلندر شوند که این امر NOx را افزایش می‌دهد.

کاهش بالقوه NOx: با تسریع اکسیداسیون، دوده و هیدروکربن‌های نسوخته، می‌توانند احتراق را در مراحل پایانی کارآمدتر کرده و از ایجاد مناطق داغ موضعی جلوگیری کنند. همچنین، با کاتالیز کردن احتراق در مراحل اولیه، ممکن است دوره تأخیر در اشتعال را کوتاه کرده و در نتیجه افزایش شدید و ناگهانی دما را که باعث تشکیل NOx می‌شود، بکاهند (Su et al., 2023).

به نظر می‌رسد در این پژوهش، این دو اثر متضاد (افزایش دما از طریق تسریع احتراق و کاهش دما از طریق کارایی بهتر) تقریباً یکدیگر را خنثی کرده‌اند. از آنجایی که NOx بسیار به دما حساس است، اگر تعادل برقرار شود، تغییر معناداری مشاهده نخواهد شد. این موضوع همچنین می‌تواند نشان دهد که اثر کاتالیستی نانوذرات در دوز استفاده شده (۵-۱۵ PPm) به اندازه‌ای قوی نبوده که بر تعادل حساس عوامل مؤثر بر دما غلبه کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر ترکیب سوخت دیزل، بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن بر عملکرد و آلایندگی موتور بررسی شد. با توجه به یافته‌های این مطالعه تجربی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده همزمان از بیواتانول و نانوذرات اکسید آهن به عنوان افزودنی‌های سوخت دیزل، تأثیرات قابل توجه و گاه غیرمنتظره‌ای بر عملکرد و آلایندگی موتور دارد. افزودن این ترکیبات منجر به بهبود احتراق ناشی از تأمین اکسیژن بیشتر و با ترکیب سوخت حاوی ۱۵ PPm از نانوذرات اکسید آهن، توان خروجی موتور نسبت به سوخت دیزل خالص، ۱۷/۴۸٪ افزایش یافت. اگرچه افزایش بیواتانول به دلیل ارزش حرارتی پایین‌تر، کاهش گشتاور تا ۸/۸٪ را در پی داشت، اما حضور نانوذرات به‌عنوان

کاتالیست، کاهش مصرف سوخت ویژه را تا ۲۲/۱٪ علی‌رغم پیش‌بینی‌های نظری ممکن ساخت. از جنبه آلایندگی، نانوذرات به‌طور مشخصی موجب کاهش CO تا ۳۳/۳٪ و CO₂ تا ۱۲/۵٪ شدند، درحالی‌که تأثیر معناداری بر HC و NOx نداشتند. افزایش بیواتانول نیز اگرچه در مقادیر کم منجر به کاهش NOx گردید، اما در درصدهای بالاتر باعث افزایش HC و تغییرات غیرخطی در CO₂ شد. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری ترکیب بهینه‌ای از سوخت‌های زیستی و نانوافزودنی‌ها می‌تواند راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد موتورهای دیزل و کاهش همزمان بخشی از آلاینده‌های کلیدی باشد.

REFERENCES

- Aalam, C. S., & Saravanan, C. G. (2015). Effects of nano metal oxide blended Mahua biodiesel on CRDI diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 8, DOI:10.1016/j.asej.2015.09.013
- Alehegn, Y.L., Zeleke, D.Z., Hailegorgis, S.M., Alehegn, Y.L. (2025). Effect of Al₂O₃ nano-particle on the performance and emission characteristics of millettia ferruginea (Berbera) biodiesel blend fuel on single cylinder compression ignition engine. *Next Energy*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100344>
- Al-Kheraif, A.A., Syed, A., Elgorban, M. A., Divakar, D.D., Shanmuganathan, R., Brindhadevi, K. (2021). Experimental assessment of performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by combined non-edible blends with nanoparticles. *Fuel*, 295, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120590>
- Basha, J. S. , Al Balushi, M., Soudagar, M.E.M., Safaei, M.S., Mujtaba, M. A., Yunus Khan, T. M., Hossain, N., Elfasakhany, A. (2022). Applications of Nano-Additives in Internal Combustion Engines: A Critical Review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147: 9383–9403
- Can, Ö., Çelikten, İ., Usta, N. (2004). Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures. *Energy Conversion and Management*, 45: 2429-2440. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.024>
- E Poures, M. V., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Kumar, B. R., & Saravanan, C. G. (2017). 1-Hexanol as a sustainable biofuel in DI diesel engines and its effect on combustion and emissions under the influence of injection timing and exhaust gas recirculation (EGR). *Applied Thermal Engineering*, 113: 1505-1513. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.164
- EL-Seesy, A.I., Abdel-Rahman, A.K., Bady, M., Ookawara, S. (2016). The Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes Additives into Non-Edible Biodiesel-Diesel Fuel Blend on Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy Procedia* 100: 166 – 172.
- Jamuwa, D. K., Sharma, D., Soni, S. L. (2016). Experimental investigation of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with diesel–biodiesel–ethanol blends. *Energy Conversion and Management*, 115: 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.055>
- Kazmi, A., Sultana, T., Ali, A., Nijabat, A., Li, G. (2025). Innovations in bioethanol production: A comprehensive review of feedstock generations and technology advances. *Energy Strategy Reviews*, 57, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101634>
- Kari, J., Vanthala, V.S.P., Sagari, J. (2024). Performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with *Mesua ferrea* biodiesel with chromium oxide (Cr₂O₃) nanoparticles: Experimental approach and response surface methodology. *International Journal of Thermofluids*, 22, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100637>
- Kegl, T., Kovac, A.K. Kralj., Breda Kegl, B., Kegl, M. (2021). Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 83, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100897>
- Khalife, E., Tabatabaei, M., Demirbas, A., & Aghbashlo, M. (2017). Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 59: 32-78.
- Kumar, Sh., Dinesha, P., Bran, I. (2017). Influence of nanoparticles on the performance and emission characteristics of a biodiesel fuelled engine: An experimental analysis. *Energy*, 140: 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.079>
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., Kumar Sachan, P. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036>
- Mehregan, M., Moghiman, M. (2018). Effects of nano-additives on pollutants emission and engine performance in a urea-SCR equipped diesel engine fueled with blended-biodiesel. *Fuel*, 222 : 402-406. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.172>
- Nour, M., Attia, A.M.A., Nada, S.A.(2019). Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 185: 313-329. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.105>
- Prabhu Kishore, N., Gugulothu, S. K. (2022). Effect of Iron Oxide Nanoparticles Blended Concentration on Performance, Combustion and Emission Characteristics of CRDI Diesel Engine running on Mahua Methyl Ester Biodiesel, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 103:167–180.

- Pradhan, J.P., & Singh, B. (2020). Experimental investigation on performance of a CI Engine using waste cooking oil biodiesel blends with alcohol and Nanoparticle additives as fuel. *Materials Today*, 24: 1332–1339.
- Ramesh, D K., Dhananjaya Kumar, J L., Hemanth Kumar, S G., Namith, V., Parashuram, B.J., Sharath, S.(2016). Study on effects of Alumina nanoparticles as additive with Poultry litter biodiesel on Performance, Combustion and Emission characteristic of Diesel engine. *Materials Today*, 5: 1114-1120. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.190>
- Sathyamoorthi, R., Puviyarasan, M., Bhuvanesh kumar, B., Breslin Joshua, D.(2016). EFFECT OF CeO₂ NANO ADDITIVE ON PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE FUELLED BY NEEM OIL-BIODIESEL. *International Journal of Chemical Sciences*, 14: 473-484.
- Su, X., Chen, H., Gao, N., Ding, M., Wang, X., Xu, H., Zhang, P. (2023). Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/cyclohexanol blend fuels under different exhaust gas recirculation ratios and injection timings, *Fuel*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125986>
- Sun, J., Wang, Q., Wang, W., Wang, K. (2018). Study on the synergism of steam reforming and photocatalysis for the degradation of Toluene as a tar model compound under microwave-metal discharges. *Energy*, 155: 815-823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.045>
- Towoju, O. A., Jekayinfa, S. O. (2019). Compression Ignition Engine Performance as a Function of the Fuel Properties. *JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES*, 6: G1-G5. 10.21272/jes.2019.6(1).g1
- Zhang, Zh., Hu, J., Zhang, D., Jia, G., Zhang, B., Wang, S., Zhong, W., Zhao, Zi., Zhang, J. (2024). Overview of the impact of oxygenated biofuel additives on soot emissions in laboratory scale, *Fuel Processing Technology*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108046>
- Zhao, J., Huang, Y., He, Y., & Shi, Y.(2021). Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 9: 891-917.