

Research Paper

Performance and Emission Investigation of a Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine with Different Mixtures of Diesel, Biodiesel, Bioethanol, and Ammonia Fuels

Abolfazl Ziaadini¹, Sajad Rostami^{2*}, Bahram Hossinzade Samani³, and Mostafa Kiani Deh Kiani⁴

¹PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

²Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³Prof., Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁴Assoc. Prof., Biosystem Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Article information

Extended Abstract

Received: 2025/03/02

Accepted: 2025/07/09

Keywords:

Diesel engine
Diesel
Ammonia
Bioethanol
Biodiesel
Pollutant.

*Corresponding author:
rostami.sajad@yahoo.com

ORCID: 
0000-0002-0375-0558



Introduction

Energy is a fundamental need of modern society, traditionally supplied by fossil fuels such as diesel. However, the non-renewable nature of fossil resources and their environmental impacts, including greenhouse gas emissions and particulate matter, necessitate the development of sustainable alternatives. Biofuels, such as biodiesel and bioethanol, have been widely investigated as renewable and oxygenated fuel sources. Biodiesel improves combustion and reduces CO and HC emissions, but suffers from high viscosity and poor low-temperature properties. In contrast, bioethanol enhances cold flow properties and fuel stability, making their blends with diesel more attractive. Ammonia has recently emerged as a promising carbon-free fuel due to its high hydrogen content, storability, and potential to reduce CO₂ emissions significantly. Despite challenges such as toxicity, slow combustion, and increased NO_x emissions, ammonia can be used in dual- or multi-fuel strategies to optimize performance and emissions. Several studies have demonstrated that blending biodiesel, bioethanol, and ammonia with diesel can improve combustion efficiency, lower particulate and CO₂ emissions, and reduce dependence on fossil fuels. Additives such as TiO₂ nanoparticles further enhance combustion and catalytic activity, contributing to lower fuel consumption and pollutant formation.

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15129.743>

Nevertheless, most prior research has focused on binary or ternary blends, while limited work has explored quaternary mixtures of diesel, biodiesel, bioethanol, and ammonia in compression ignition engines. In this context, this study applies response surface methodology (RSM) to evaluate and optimize the combined effects of these fuels on engine performance and emissions, addressing both energy security and environmental sustainability.

Method

Tests were conducted on a single-cylinder, naturally aspirated Mitsubishi NM45 diesel engine (operating at 3000 rpm, water-cooled, with direct injection). The fuels included commercial diesel, biodiesel from sunflower oil via transesterification, bioethanol, and liquefied ammonia synthesized by the Haber process. Blends of diesel (40–100%), biodiesel (0–40%), bioethanol (0–20%), and ammonia (0–20%) were examined at engine loads of 25, 50, and 75%. The engine was coupled to a hydraulic dynamometer for torque and power measurement, while a digital tachometer controlled speed.

A Testo 330 gas analyzer measured exhaust emissions, and ammonia flow was regulated by a Krohne DK 800 R flowmeter. Data acquisition was performed through a PLC-based monitoring unit (Atech/Delta 10SXR). Before each test, the system was flushed with the target fuel, and measurements were taken under steady-state conditions. Each experiment was repeated three times. Response surface methodology (RSM) with a mixture design was employed to model and optimize performance and emissions.

Results

The statistical analysis of variance (ANOVA) demonstrated that the combined effects of fuel type, engine load, and ammonia addition significantly influenced emissions of CO, NO_x, and HC. Most interactions among diesel, biodiesel, bioethanol, ammonia, and engine load were significant at the 1% or 5% levels, confirming the strong dependence of emissions on both fuel composition and operating conditions. The regression models developed for each pollutant exhibited excellent predictive performance, with R^2 values of 0.9961 for CO, 0.9959 for NO_x, and 0.9635 for HC, indicating close agreement between predicted and experimental data. Lack-of-fit was not significant, further supporting the adequacy of the models.

For CO emissions, the lowest level (146 ppm) was observed at 25% load when the engine operated on a mixture of 40% diesel, 40% biodiesel, 20% bioethanol, and 20% ammonia in the intake air. In contrast, the highest CO level (423 ppm) was recorded with pure diesel and no ammonia. The reduction of CO by up to 65% under blended fuel conditions was attributed to the oxygenated nature of biodiesel and bioethanol, as well as the carbon-free structure of ammonia, which collectively promoted more complete combustion. At higher loads (75%), CO emissions further decreased, reaching a minimum of 86 ppm under conditions of high ammonia and low diesel fractions, due to improved combustion completeness.

In the case of NO_x, emissions increased with higher shares of biodiesel, bioethanol, and ammonia. The maximum value (233 ppm) occurred at a 75% load with a blend of 40% diesel, 40% biodiesel, 20% bioethanol, and 20% ammonia. These increases were attributed to higher combustion temperatures, oxygen availability, and the nitrogen content of ammonia. Load was the most dominant factor, as increasing the load from 25% to 75% resulted in a 49% increase in NO_x.

For HC emissions, the lowest concentration (50 ppm) was achieved with a mixture of 40% diesel, 40% biodiesel, 20% bioethanol, and 20% ammonia at a 75% load. Oxygenated fuels enhanced combustion efficiency and reduced HC emissions by 50–60% compared with pure diesel. However, load variations also played a key role, with higher loads significantly reducing HC due to improved combustion conditions.

Regarding engine performance, the maximum torque (14.34 Nm) and power (3.3 kW) were observed at a 75% load with an 80% diesel, 20% biodiesel, and 20% ammonia blend. While replacing diesel with renewable fuels reduced performance by ~23%, ammonia addition slightly improved it (~5%). These findings highlight that optimized fuel blends can reduce emissions without significantly compromising performance.

Conclusions

This study investigated the effects of diesel, biodiesel, bioethanol, and ammonia blends on the performance and emissions of a single-cylinder diesel engine. Using Response Surface Methodology (RSM), the influence of fuel composition and engine load was optimized and analyzed. Results showed that the blend of 40% diesel, 40% biodiesel, 20% bioethanol, and 20% ammonia achieved the lowest HC (50 ppm) at 75% load and reduced CO emissions by 65% at 25% load compared with pure diesel. However, this blend produced the highest NO_x (233 ppm), while pure diesel at 25% load yielded the lowest (98 ppm). Replacing diesel with biofuels decreased power by approximately 23%, although the addition of ammonia improved performance by nearly 5%. The maximum power (3.3 kW) and torque (14.3 N·m) were achieved with a 80% diesel, 20% biodiesel, and 20% ammonia blend at 75% load. Higher loads increased NO_x but reduced HC and CO, indicating more complete combustion.

Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the Research Council of Shahrekord University for financially supporting this study under grant number 96GRN31M1007.

Author Contributions

Abolfazl Ziaadini: Methodology
Sajjad Rostami: Supervisor
Bahram Hossinzade Samani: Validation
Mostafa Kiani: Validation

Data Availability Statement

"Not applicable"

Ethical Considerations

This section states **ethical approval details** (e.g., Ethics Committee, ethical code) and confirms adherence to ethical standards, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper

Funding Statement

This work was supported by Research Council of Shahrekord University under grant number 96GRN31M1007.

How to cite this paper:

Ziaadini, A., Rostami, S., Hossinzade Samani, B., and Kiani Deh Kiani, M. (2025). Performance and Emission Investigation of a Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine with Different Mixtures of Diesel, Biodiesel, Bioethanol, and Ammonia Fuels. Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 36: 1-19.
<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15129.743>



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by [Shahrekord University](#). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)



بررسی عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل تک سیلندر پاشش مستقیم با مخلوط‌های مختلف سوخت‌های دیزل، بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک

ابوالفضل ضیاءالدینی^۱، سجاد رستمی^{۲*}، بهرام حسین زاده سامانی^۳ و مصطفی کیانی ده کیانی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳- استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۴- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

سوخت‌های فسیلی مانند گازوئیل همواره نقش کلیدی در تولید انرژی ایفا کرده‌اند. با توجه به تجدیدناپذیر بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلایندگی ناشی از احتراق آن‌ها، مشکلات زیست‌محیطی متعددی ایجاد شده است. از این‌رو، استفاده از منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر، ایمن و مقرون‌به‌صرفه که بتوانند نیازهای انرژی جهان را تأمین کنند، از اهمیت حیاتی برخوردار است. تحقیقات نشان داده‌اند که سوخت‌های تجدیدپذیر به‌تنهایی برای استفاده در موتورهای دیزل مناسب نیستند؛ از این‌رو، ترکیب چندین سوخت مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به‌طور هم‌زمان تأثیر مخلوط چهارگانه سوخت (دیزل، بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک) بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل تک‌سیلندر پاشش مستقیم بررسی و از روش سطح پاسخ (RSM) به عنوان یک روش آماری پیشرفته برای بهینه‌سازی عامل‌های سوخت و عملیات موتور استفاده شد. نتایج نشان داد که مخلوط بهینه شامل ۴۰٪ دیزل، ۲۰٪ بیودیزل، ۲۰٪ بیواتانول و ۲۰٪ آمونیاک، توانست مقدار CO و HC را به ترتیب تا ۶۵٪ و ۶۰٪ کاهش دهد، هرچند انتشار NOx به میزان ۲۱٪ افزایش یافت. همچنین، عملکرد موتور با کاهش سهم دیزل در مخلوط سوخت از ۱۰۰٪ به ۴۰٪، ۲۳٪ کاهش یافت، اما اضافه کردن آمونیاک تا حدودی این کاهش را جبران کرد. این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت استفاده از ترکیب‌های مختلف سوخت‌های جایگزین برای استفاده در موتورهای درونسوز است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

واژه‌های کلیدی:

موتور دیزل

دیزل

آمونیاک

بیواتانول

بیودیزل

آلایند

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

rostami.sajad@yahoo.com

ORCID: 

.....۰۰۰۲-۰۳۷۵-۰۵۵۸



مقدمه

انرژی یکی از نیازهای اساسی زندگی مدرن است و سوخت‌های فسیلی مانند گازوئیل به‌طور گسترده در تولید انرژی، به‌ویژه در موتورهای دیزل، استفاده شده‌اند. با این حال، منابع فسیلی تجدیدنپذیر هستند و احتراق آن‌ها آلاینده‌هایی مانند گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق تولید می‌کند که به مشکلات زیست‌محیطی جدی منجر شده است (Ritchie et al., 2020). از این‌رو، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، غیرآلاینده، ایمن، مقرون‌به‌صرفه و قابل‌دسترس برای تأمین نیازهای جهانی انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سوخت‌های زیستی مانند بیودیزل و بیواتانول به‌عنوان جایگزین‌های مناسب برای سوخت‌های دیزل و بنزین شناخته شده‌اند. بیودیزل به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر، به دلیل وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی خود، احتراق کامل‌تری را فراهم کرده و انتشار آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌های نسوخته (HC) و مونوکسید کربن (CO) را کاهش می‌دهد (Rivera et al., 2018). به‌طور مشابه، بیواتانول، به دلیل تجدیدپذیری و محتوای اکسیژن بالا (حدود ۳۵٪)، احتراق را بهبود بخشیده و آلاینده‌گی را کاهش می‌دهد (Zentou et al., 2017). با این حال، بیودیزل چالش‌هایی مانند لزجت بالا و ژله‌ای شدن در دماهای پایین را دارد که می‌تواند عملکرد سیستم سوخت‌رسانی را مختل کند (Asghari et al., 2022). بیواتانول، با نقطه انجماد پایین، می‌تواند با مخلوط شدن با بیودیزل و دیزل، نقطه ابری شدن و ریزش سوخت را بهبود بخشد و پایداری مخلوط را افزایش دهد (Shahir et al., 2014).

آمونیاک به‌عنوان یک سوخت بدون کربن، گزینه دیگری برای کاهش آلاینده‌گی است. این ترکیب هیدروژنی، با چگالی انرژی بالا و قابلیت ذخیره‌سازی به‌صورت مایع یا گاز، یکی از مواد شیمیایی پرکاربرد در جهان است (Dimitriou & Javadi, 2020). با وجود سمی بودن و بوی تند، آمونیاک می‌تواند در ترکیب با سوخت‌های دیگر، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. تحقیقات نشان داده‌اند که سوخت‌های پاک به‌تنهایی کم‌تر برای احتراق در موتورهای دیزل مناسب هستند؛ بنابراین، ترکیب همگن دو یا چند سوخت، مانند بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک با دیزل، به دلیل بهبود احتراق و کاهش آلاینده‌گی، مورد

توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. این ترکیبات اکسیژن‌دار و دوستدار محیط‌زیست، با تنظیم خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت، می‌توانند عملکرد موتورهای دیزل را بهینه کرده و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند.

در این راستا پژوهش‌های زیادی انجام شده است، (Shahir, et al (2014) امکان سنجی، ارزیابی خواص و سازگاری ترکیب گازوئیل، بیودیزل و بیواتانول را به عنوان سوخت موتور CI مورد بررسی قرار دادند. از مشکلات عمده استفاده از این ترکیب، اختلاط ناپذیر بودن بیواتانول در گازوئیل و ناپایداری در دمای پایین است. نتایج نشان داد، حداکثر ۲۵ درصد بیودیزل و ۵ درصد اتانول یا بیواتانول را می‌توان به طور مؤثر به سوخت دیزل اضافه کرد. افزودن بیودیزل به این ترکیب به بازایی خواص سوخت به مقادیر استاندارد کمک کرد و بنابراین می‌توان از این ترکیب به طور مؤثر در موتورهای دیزلی موجود استفاده کرد. استفاده از ترکیب سوخت ۲۵٪ بیودیزل و ۵٪ بیواتانول مصرف دیزل را بین ۲۵ تا ۳۰٪ کاهش داد، که نشان‌دهنده یقینیت این مخلوط برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است.

(Pirzad, Moeini et al. (2015) کاربرد مخلوط اتانول و گازوئیل با افزودنی به عنوان سوخت موتور دیزل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای تهیه مخلوط اتانول و گازوئیل و همچنین یبه دلیل دو حالتی شدن این مخلوط از مواد افزودنی سازگار با محیط زیست استفاده کردند. در این تحقیق اتانول و گازوئیل به نسبت ۱۰ به ۹۰ مخلوط شد. نتایج آنان نشان داد که دوده ۳۶/۶ درصد و توان موتور ۷/۵ درصد کاهش خواهد یافت.

در تحقیقی (Janakiraman, Lakshmanan et al. (2021) رویکرد پیشرفته سوخت سه گانه (بیودیزل، بیواتانول و دیزل) با نانو افزودنی‌های نانو دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) جهت کاهش مصرف سوخت فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها، غلظت-های متنوع نانو افزودنی‌های TiO₂ را با مخلوط‌های سه سوخت (۷۰٪ دیزل + ۲۰٪ بیودیزل + ۱۰٪ بیواتانول) ترکیب کردند و بر روی یک موتور دیزل آزمایش کردند. نتایج آنان نشان داد که در مقایسه با کل مخلوط‌های سوخت، مخلوط (۲۰٪ بیودیزل + ۱۰٪ بیواتانول + ۷۰٪ سوخت دیزل + TiO₂ 65ppm) بهترین ترکیب سوخت

(90 ppm) N_2O نیز گزارش شد، که یک گاز گلخانه‌ای قوی است و اثر کاهش CO_2 را تا حدی خنثی می‌کند. این مطالعه تأکید کرد که برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، حداقل ۳۵/۹٪ جایگزینی دیزل با آمونیاک لازم است.

Wu, Zhang *et al.* (2023) ارزیابی دقیقی از مناسب بودن آمونیاک در موتور دیزل و چگونگی تأثیر آن بر خواص اولیه موتور دیزل را بررسی کردند. آنها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های آزمایشی مانند، B20، B20N، B20A5 و B20A10 را در شرایط مختلف بارگذاری موتور انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن آمونیاک در موتور دیزل باعث کاهش بازده توان ترمزی موتور شده است. با افزایش نسبت آمونیاک افت شدیدی در بازده توان ترمزی وجود داشت که در بارهای مختلف گزارش شده است. با این وجود، بیودیزل مخلوط با نانوذرات به دلیل افزایش عدد ستان و ارزش حرارتی، حداکثر بازده حرارتی را ایجاد کرده است. در مقابل، مصرف سوخت ویژه ترمزی B10A و B20A نسبت به سایر ترکیبات کاهش یافته است. با افزایش غلظت آمونیاک، فشار سیلندر و نرخ انتشار گرما بالاتر بوده و همچنین انتشار NO_x به دلیل دمای سیلندر بالاتر بیش‌تر بوده است. با این حال، انتشار دی اکسیدکربن، مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته برای همه موارد در مقایسه با دیزل کاهش داشته است.

بررسی‌ها نشان داد استفاده همزمان تأثیر مخلوط چهارگانه سوخت (دیزل، بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک) بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل تک‌سیلندر کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است، مطالعات قبلی بیش‌تر بر ترکیب‌های دوگانه یا سه‌گانه تمرکز داشته‌اند، مانند دیزل و بیودیزل. در این تحقیق از آمونیاک به عنوان سوخت بدون کربن در کنار دیزل، بیودیزل و بیواتانول استفاده شده است. از روش سطح پاسخ (RSM) به دلیل توانایی در بررسی همزمان تأثیر چندین متغیر (مانند ترکیب سوخت‌ها و بار موتور) بر پاسخ‌ها (مانند عملکرد و آلایندگی) و مدل‌سازی روابط غیرخطی بین آن‌ها برای بهینه‌سازی عامل‌های سوخت و عملیات موتور استفاده شده است.

خواهد بود. این ترکیب به دلیل کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC) و افزایش فشار سیلندر (۲۶٪ درصد بالاتر) و کاهش نرخ انتشار گرما (۰/۱٪ درصد پایین‌تر) نسبت به دیزل خالص، به‌عنوان بهترین ترکیب شناسایی شد. کاهش HC و CO به دلیل احتراق کامل‌تر ناشی از اکسیژن‌دار بودن سوخت‌های زیستی و کاتالیزوری نانوذرات TiO_2 بود. همچنین، کاهش مصرف سوخت فسیلی (دیزل) تا ۳۰٪ نشان‌دهنده کارایی بالای این ترکیب است.

Scharl and Sattelmayer (2022) مناسب بودن گاز آمونیاک را در مقایسه با متانول، اتانول و متان برای عملیات احتراق تراکمی دوگانه‌سوز با تزریق پابلوت دیزل مقایسه کردند. در میان سوخت‌های گازی آزمایش‌شده، محققان به این نتیجه رسیدند که آمونیاک به دلیل انتشار نسبتاً زیاد آمونیاک نسوخته نسبت به سایر گازها عملکرد نامناسب‌تری داشته است. موتور دیزلی با سوخت آمونیاک بیش‌تر افزایش قابل‌توجه‌ای را در تأخیر احتراق به دلیل سرعت کند احتراق آمونیاک، و بهبود توان خروجی را نشان داد. گاز آمونیاک همچنین انتشار دود موتور را بهبود بخشید، اما منجر به تشکیل NO_x بالاتری شد.

در تحقیقی Nadimi, Przybyła *et al.* (2023) نشان دادند آمونیاک (NH_3) به‌عنوان یک سوخت بدون کربن، یقابلیت بالایی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی مانند دیزل دارد. در این مطالعه، توانایی یتأمین ۸۴/۲٪ انرژی مورد نیاز موتور توسط آمونیاک نشان‌دهنده قابلیت بالای این سوخت در کاهش وابستگی به دیزل است. دلیل این امر، چگالی انرژی قابل‌قبول آمونیاک (حدود ۱۸/۶ MJ/kg) و امکان تزریق آن به‌صورت مایع یا گاز در موتورهای دوگانه‌سوز است. با این حال، چگالی انرژی کم‌تر آمونیاک نسبت به دیزل (۴۲/۷ MJ/kg) باعث می‌شود که برای یتأمین انرژی مشابه، حجم بیش‌تری از آمونیاک موردنیاز باشد. این تحقیق نشان داد آمونیاک به‌طور قابل‌توجهی انتشار CO_2 ، CO و ذرات معلق (PM) را کاهش می‌دهد، زیرا فاقد کربن است و محصولات احتراق آن عمدتاً نیتروژن (N_2) و آب (H_2O) هستند. با این حال، افزایش انتشار NO_x و آمونیاک نسوخته (۱۴۸۰۰ ppm) یک چالش بود. NO_x به دلیل دمای بالای احتراق و حضور نیتروژن در آمونیاک افزایش می‌یابد. همچنین، احتراق ناقص آمونیاک در برخی شرایط منجر به انتشار آمونیاک نسوخته می‌شود، که خود یک آلاینده سمی است. تولید

مواد و روش‌ها

موتور

در این تحقیق از یک موتور میتسوبیشی (Mitsubishi) تنفس طبیعی، با مشخصات جدول ۱ جهت انجام آزمایشات استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات موتور مورد استفاده

ویژگی	مقدار	واحد
حداکثر توان در دور ۲۵۰۰ rpm	۲/۳	kW
حداکثر دور	۳۰۰۰	rpm
تعداد سیلندر	۱	-
مدل	NM45	
سامانه خنک‌کاری	آب خنک	
نوع پاشش سوخت	پاشش مستقیم	

سوخت‌های مورد استفاده

در این آزمایش از گازوئیل شماره ۲ عرضه شده در جایگاه-های سوخت شهری با مشخصات جدول ۲ و همچنین از آمونیاک مایع تولید شده به روش فرآیند هابر (Haber process) با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ استفاده گردید.

جدول ۲ مشخصات سوخت دیزل

ویژگی	استاندارد آزمون	سوخت گازوئیل	واحد
نقطه اشتعال	ASTM D-93	۵۰-۶۰	°C
گرانروی سینماتیکی	ASTM D-445	۱/۴	mm ² /s
چگالی	ASTM D-4052	۰/۸۱۸	g/cm ³
ارزش حرارتی پایین	ASTM D-240	۴۲/۵۷	mJ/kg
جرم مولکولی	-	۲۰۹	g/mol
درصد جرمی کربن	-	۸۶/۵	%
درصد جرمی هیدروکربن	-	۱۳/۵	%

سوخت بیودیزل مورد استفاده در آزمایشگاه بیودیزل دانشگاه شهرکرد و به روش استریفیکاسیون از روغن

آفتاب‌گردان تولید گردیده است. مشخصات این سوخت در جدول ۴ آورده شده است. همچنین خصوصیات سوخت بیواتانول استفاده شده نیز در جدول ۵ آمده است.

جدول ۳- مشخصات سوخت آمونیاک

ویژگی	مقدار	واحد
دمای ذخیره‌سازی	۲۵	°C
چگالی	۶۰۲/۸	kg/m ³
ارزش حرارتی پایین	۱۸/۸	mJ/kg
جرم مولکولی	۱۷/۰۳	g/mol
نقطه اشتعال	۱۳۲	°C
درصد جرمی کربن	۰	%
درصد جرمی هیدروژن	۱۷/۸	%

جدول ۴- مشخصات سوخت بیودیزل

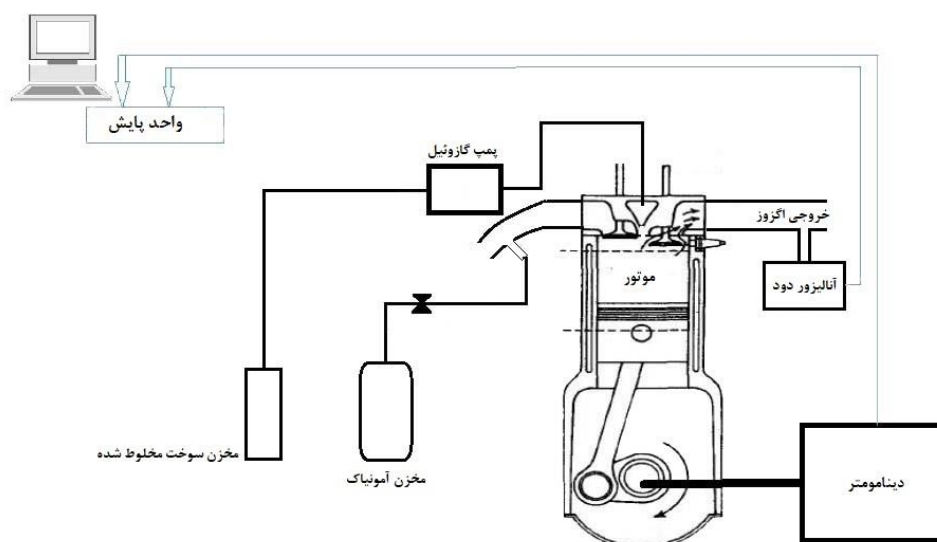
ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۰/۸۸	g/cm ³
ارزش حرارتی پایین	۳۷/۵	mJ/kg
جرم مولکولی	۲۹۶	g/mol
نقطه اشتعال	>۱۱۳	°C
گرانروی	۰/۸۶۵	mm ² /s

روش انجام آزمایشات

در شکل ۱، طرح‌واره‌ای از سامانه استفاده شده در آزمایش-ها نشان داده شده است. در این تحقیق از تجهیزاتی از قبیل دینامومتر هیدرولیکی جهت اندازه‌گیری توان موتور، دورسنج با مشخصات جدول ۶ برای تنظیم دور موتور، دستگاه آلاینده سنج (Gas analyzer) مدل Test 330 جهت اندازه‌گیری میزان آلاینده‌گی و واحد پایش جهت خواندن و ثبت عامل‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد.

جدول ۵ خصوصیات سوخت بیواتانول

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۰/۷۹	g/cm ³
ارزش حرارتی پایین	۲۶/۷	mJ/kg
جرم مولکولی	۴۶/۰۷	g/mol
نقطه اشتعال	۱۳	°C
گرانروی	۱/۲	mm ² /s



شکل ۱- طرح‌واره سامانه آزمون

قرار گرفته، این فرایند برای بقیه نمونه‌ای مورد نظر در آزمون تکرار و کلیه عمل‌های عملکردی و آلاینده‌گی ثبت شد. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار مطابق آنچه که توضیح داده شده بود، انجام گردیدند.

سامانه پایش

از یک سامانه پایش شامل PLC تولید شرکت Atech یا دلتا، مدل 10SXR با نرم افزار WPLSoft 2.51 با رابط RS-485 برای دریافت، محاسبه و ثبت اطلاعات مذکور استفاده گردید. در این سامانه، برای اندازه‌گیری گشتاور موتور از یک پمپ دنده‌ای هیدرولیک، یک شیر هیدرولیکی پایش فشار صفر تا ۱۰۰ بار برای اعمال بار به موتور و یک نیروسنج با مشخصات درج شده در جدول ۵ که به اهرم نصب شده بر روی پوسته پمپ متصل بود، استفاده گردید.

جدول ۶ مشخصات حسگرها

حسگر	مشخصات	دقت
نیروسنج L6D-C3	رنج ۰ تا ۲۰ کیلوگرم	با دقت ۱۰ گرم
دورسنج	۱۰۲۴ پالس بر دور	۱ دور بر دقیقه
جریان‌سنج آنالوگ	۰ تا ۴۰ لیتر بر ساعت	۰/۲ لیتر بر ساعت

تجزیه و تحلیل آماری

مدل‌سازی آزمایش

در این تحقیق جهت بیشینه کردن بازده مصرف انرژی از روش سطح پاسخ استفاده شد. روش سطح پاسخ

آزمون‌ها با هدف مقایسه‌ی متغیرهای عملکردی و آلاینده‌های خروجی از اگزوز، ناشی از احتراق آمونیاک، بیودیزل، گازوئیل و بیواتانول در موتور دیزل با نسبت‌های مختلف انجام گرفت. عامل‌های مستقل در این آزمون‌ها، بار موتور و نوع سوخت است.

قبل از شروع آزمون، موتور با گازوئیل معمولی به مدت ۱۰ دقیقه کار می‌کرد تا اینکه موتور کامل گرم شود و آماده آزمون گردد. سپس موتور خاموش و پیچ تخلیه پمپ انژکتور جهت تخلیه کامل سوخت در مدار سوخت رسانی باز شد. پس از تخلیه کامل سوخت قبلی، موتور با نمونه سوخت جدید راه‌اندازی شد.

دبی آمونیاک با یک پایش‌کننده و جریان‌سنج (مدل Krohne DK 800 R ساخت کشور هلند) در مقادیر مختلف تنظیم و در مجرای ورودی با هوا مخلوط گردید. پس از چند دقیقه از شروع به کار آن، فشار دینامومتر در مقدار مورد نظر تنظیم و پس از گذشت ۵ دقیقه از شروع به کار مجدد موتور با نمونه سوخت مورد نظر، کلیه عامل‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور ثبت گردید.

دستگاه آلاینده سنج در خروجی اگزوز قرار داده شده و میزان آلاینده‌ها در طول آزمون در دوره‌ها و بارهای مختلف بر روی نمایش‌گر نشان داده می‌شد و بعد از چند ثانیه که مقدار آلاینده‌ها ثابت شدند، مقدار آن‌ها ثبت گردید. در پایان هر آزمون، حسگر آلاینده‌سنج از مسیر دود خارج و تمیز می‌شد تا دوده قرار گرفته بر روی آن باعث کاهش دقت اندازه‌گیری نشود. پس از اتمام آزمایش و ثبت داده‌های مربوط به هر نمونه سوخت که مورد آزمایش

نتایج و بحث

تحلیل آماری انتشار آلاینده‌ها

در جدول ۸ نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تأثیر متقابل نوع سوخت، بار موتور و همچنین استفاده از آمونیاک بر آلاینده‌گی‌های CO, Nox و HC گزارش شده است. در این جدول ارزیابی مدل تأثیر متغیرهای مستقل بر انتشار یکربن منوکسید (CO) را نشان می‌دهد. برهم‌کنش گازوئیل × آمونیاک، گازوئیل × بار موتور، آمونیاک × بار موتور، گازوئیل × آمونیاک × بار موتور در سطح ۱ درصد و سایر برهم‌کنش عوامل در سطوح ۵ و ۱۰ درصد به جز برهم‌کنش بیودیزل × بیواتانول × بار موتور معنی‌دار هستند. در تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر انتشار اکسیدهای نیتروژن (Nox) برهم‌کنش گازوئیل × بیودیزل × آمونیاک، بیودیزل × بیواتانول × آمونیاک، بیودیزل × گازوئیل × بیواتانول × آمونیاک × بار موتور و اثر گازوئیل × بیودیزل × آمونیاک × بار موتور در سطح ۵ درصد و سایر برهم‌کنش متغیرها در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

در تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر انتشار هیدروکربن (HC) برهم‌کنش بیودیزل × بیواتانول × آمونیاک × بار موتور و اثر گازوئیل × بیودیزل × آمونیاک × بار موتور در سطح ۵ درصد و برهم‌کنش سایر متغیرها در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

شکل ۲ مطابقت داده‌های پیش‌بینی شده از مدل نرم‌افزاری برای انتشار گاز CO با داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. که به این معنی است داده‌های پیش‌بینی شده با مدل از اعتبار خوبی برخوردار و به داده‌های واقعی خیلی نزدیک هستند.

جدول ۸ همچنین نشان می‌دهد در تجزیه واریانس مدل‌ها در تمام آلاینده‌گی‌ها عدم برازش (Lack of fit) می‌معنی‌دار نیست که نشان دهنده دقت کافی مدل برای ارزیابی تأثیر عواملی مستقل بر آلاینده‌گی است.

ضریب تبیین (R^2) برای آلاینده‌گی‌های CO, Nox و HC به ترتیب ۰/۹۹۶۱، ۰/۹۹۵۹ و ۰/۹۶۳۵ محاسبه شده که نشان دهنده تناسب بسیار خوب مدل با نتایج تجربی است.

مجموعه‌ای از فن‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطوح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف بهینه کردن پاسخ مورد نظر است.

استفاده از روش سطح پاسخ برای مشخص کردن روابط بین پاسخ و متغیرهای مستقل در یک پروژه شامل سه مرحله است:

۱- تعیین متغیرهای مستقل سطوح مورد آزمایش و نوع طرح آزمایش

۲- پیش‌بینی و تحقق صحت معادله‌ی مدل

۳- به دست آوردن نمودار منحنی‌های هم پاسخ و نقشه‌ی خطی پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل و نیز تعیین نقاط بهینه به منظور به دست آوردن مقدار بهینه از حل رابطه رگرسیون (۱) استفاده می‌شود.

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_{ij} + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن:

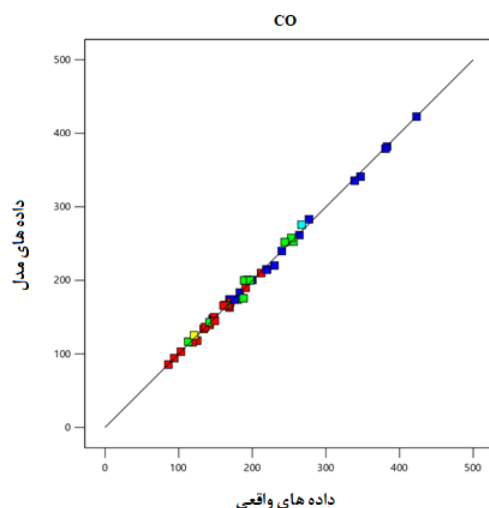
$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ ضرایب ثابت، X_i و X_{ij} متغیرهای مستقل

در فرآیند و ε خطای تصادفی است.

با توجه به شرایط و دامنه تغییرات متغیرهای مستقل انتخابی از روش Mixture Design برای انتخاب سطوح و تحلیل استفاده گردید. سطوح انتخابی متغیرهای مستقل مطابق جدول ۷ است.

جدول ۷- سطوح متغیرهای مستقل آزمایش

متغیرهای مستقل	سطوح علامت گذاری		
	۱	۰	-۱
سطوح متغیرهای ترکیب کننده			
گازوئیل %	۱۰۰	۷۰	۴۰
بیودیزل %	۴۰	۲۰	۰
بیواتانول %	۲۰	۱۰	۰
سایر عوامل			
بار موتور %	۷۵	۵۰	۲۵
آمونیاک %	۰	۱۰	۲۰



شکل ۲- مطابقت داده‌های واقعی و داده‌های مدل CO

جدول ۸- نتایج مدل تأثیر گازوئیل (A)، بیودیزل (B)، بیواتانول (C)، آمونیاک (D) و بار موتور (E) بر آلاینده‌ها

HC		Nox		CO		متغیر وابسته
ضریب	میانگین	ضریب	میانگین	ضریب	میانگین	منبع تغییر
معناداری	مربعات	معناداری	مربعات	معناداری	مربعات	
<۰/۰۰۰۱**	۹۰۲۰/۴۹	<۰/۰۰۰۱**	۲۶۱۱/۵۶	<۰/۰۰۰۱**	۲۱۱۰۷/۹۶	مدل
<۰/۰۰۰۱**	۱۷۳۴۲/۴۹	<۰/۰۰۰۱**	۶۶۴۴/۳۴	<۰/۰۰۰۱**	۵۱۹۸۱/۰۸	ترکیب خطی
<۰/۰۰۰۱**	۱۸۲۳/۳۹	<۰/۰۰۰۱**	۳۵۱/۱۷	۰/۰۰۱۶	۳۸۱/۹۵	AB
۰/۰۰۰۲	۱۴۳۵/۴۶	<۰/۰۰۰۱**	۴۰۴/۳۶	<۰/۰۰۰۱**	۹۱۹۰/۷۶	AD
<۰/۰۰۰۱**	۱۶۲۳۶/۱۷	<۰/۰۰۰۱**	۱۹۶۰/۱۷	<۰/۰۰۰۱**	۵۷۶۰۵/۲۴	AE
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۲۲۶/۳۷	۰/۰۵۲۱	۱۳۰/۹۴	BD
<۰/۰۰۰۱**	۹۳۹۹/۲۷	<۰/۰۰۰۱**	۱۲۳/۶۱	۰/۲۹۱۵	۳۷/۰۶	BE
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۵۰۶/۸۹	<۰/۰۰۰۱**	۱۳۱۷/۰۶	CE
-	-	۰/۰۰۲۳	۶۴/۳۵	-	-	ABD
۰/۰۰۰۲	۱۳۸۱/۹۹	<۰/۰۰۰۱**	۱۸۱/۸۹	۰/۰۹۵	۹۵/۲۸	ABE
-	-	-	-	<۰/۰۰۰۱**	۱۲۰۴/۴۱	ADE
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۱۵۲/۳۴	-	-	ACE
-	-	۰/۰۴۴۹	۲۵/۳۴	۰/۰۲۷۱	۱۷۲/۵۹	BCD
-	-	-	-	۰/۱۲۸۷*	۷۸/۳۴	BCE
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۱۳۲/۴۸	-	-	BDE
۰/۰۷۱۲	۲۸۶/۸	۰/۰۷۱۲	۲۸۶/۸	۰/۰۷۱۲	۲۸۶/۸	ABC
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۲۱۶/۲۱	-	-	BE ^۲
۰/۰۳۱۱	۲۹/۵۹	۰/۰۳۱۱	۲۹/۵۹	۰/۰۸۱۶	۱۰۴/۰۵	BCDE
۰/۰۳۱۵	۴۱۵/۴۳	۰/۰۳۱۵	۴۱۵/۴۳	-	-	ABCE
-	-	<۰/۰۰۰۱**	۶۰۹/۸۷	-	-	BCE ^۲
۰/۰۹۶۲*	۹۱/۶۵	۰/۹۵۸۸*	۴/۴۸	۰/۱۷۲۴*	۳۵/۳۳	عدم برازش
-	۲۸/۳۳	-	۱۲/۳	-	۱۵	خطای خالص
-	۹۰۲۰/۴۹	-	-	-	-	کل

* عدم معنی‌داری

** در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار

انتشار آلاینده CO

پس از تحلیل داده‌ها، معادله‌های ۲ و ۳ به ترتیب بر اساس عواملی علامت‌گذاری شده و عواملی واقعی به دست آمدند. در معادله ۲، تأثیر عواملی مختلف از طریق ضرایب آن‌ها مشخص شده است، به طوری که عواملی A، B و C به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را دارند. در معادله ۳، ضریب تغییرات به دست آمده معادل ۲/۸۵ نشان‌دهنده تطابق بسیار مناسب داده‌های تجربی با مدل است. همچنین، ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۹۶۱ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل رگرسیونی قادر است تغییرات متغیرهای وابسته را به خوبی از طریق متغیرهای مستقل پیش‌بینی کند.

$$\begin{aligned} CO = & 284/6166 \times A + 33/0116 \times B + 23/6288 \\ & \times C - 43/0935 \times AB - 31/7407 \times AD - \\ & 94/5628 \times AE - 07/8073 \times BD - 09/5199 \times \\ & BE - 54/2608 \times CE - 37/8111 \times ABE + \\ & 11/8216 \times ADE - 36/3142 \times BCD - 50/2741 \times \\ & BCE + 20/4991 \times BCDE \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} CO = & 529/126 \times A - 122/46 \times B + \\ & 34/1665 \times C + 9/3574 \times AB - 05/384 \times AD \\ & - 4/2554 \times AE + 494/057 \times BC + 2/291 \times \\ & BD + 3/8828 \times BE + 3/6923 \times CD - 07/804 \\ & \times CE - 4/2012 \times ABE + 04/37 \times ADE - \\ & 21/4557 \times BCD - 7/8637 \times BCE - 03/315 \\ & \times BDE - 03/315 \times CDE + 02/278 \times BCDE \end{aligned} \quad (3)$$

تأثیر شکل ۳-الف تأثیر سوخت‌های مختلف در ۲۵ درصد بار موتور را نشان می‌دهد.

کم‌ترین میزان انتشار مونوکسید کربن (CO) برابر با ۱۴۶ ppm و در بار موتور ۲۵٪ مشاهده شد، زمانی که سوخت مایع متشکل از ۴۰٪ دیزل، ۴۰٪ بیودیزل و ۲۰٪ بیواتانول بود و ۲۰٪ آمونیاک به هوای ورودی موتور اضافه شده بود. در مقابل، بیش‌ترین انتشار CO برابر با ۴۲۳ ppm و با سوخت ۱۰۰٪ دیزل و بدون حضور آمونیاک ثبت شد. در بار ۲۵٪، استفاده از این ترکیب سوخت منجر به کاهش حدود ۶۵٪ در انتشار CO نسبت به دیزل خالص گردید. این کاهش به دلیل اکسیژن‌دار بودن بیودیزل و بیواتانول و بدون کربن بودن آمونیاک است که احتراق کامل‌تری را حتی در بار کم فراهم می‌کند (Wu et al., 2023). شکل ۳-ب نشان‌دهنده تأثیر ترکیب‌های مختلف سوخت بر انتشار CO در بار ۷۵٪ است، که در آن نیز

کاهش قابل‌توجه CO با افزایش نسبت سوخت‌های زیستی و آمونیاک مشاهده شد.

در بار ۷۵ درصد موتور حداقل انتشار CO نیز در ترکیبی که کم‌ترین مقدار دیزل را داشت مشاهده شد. هم-چنین کم‌ترین مقدار انتشار ۸۶ ppm در تمام بارها و نسبت‌های سوخت مربوط به زمانی بود که بیش‌ترین بار، بیش‌ترین مقدار آمونیاک و کم‌ترین مقدار دیزل در سوخت مایع بود. این به این علت است که با افزایش بار موتور احتراق کامل‌تر می‌شود و در نتیجه‌ی احتراق کامل‌تر، انتشار CO کاهش محسوسی خواهد داشت (Young et al., 2023).

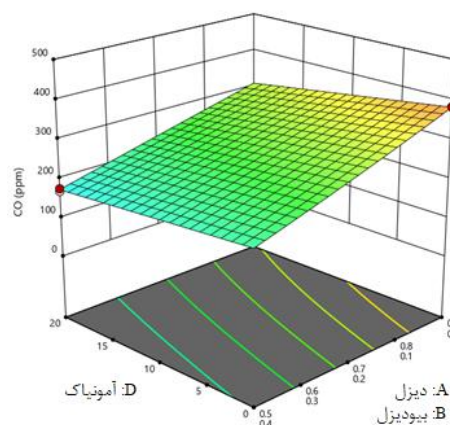
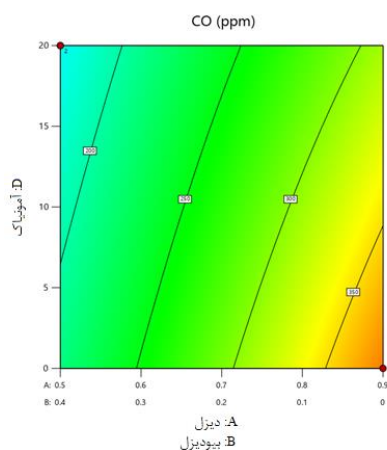
$$\begin{aligned} NOx = & +80/1 \times A + 170/79 \times B + 145/71 \times \\ & C - 77/63 \times AB + 0/65 \times AD + 0/7 \times AE + 3/30 \\ & \times BD - 1/87 \times BE + 0/27 \times CE - 7/24 \times ABD \\ & + 5/77 \times ABE + 5/24 \times BCD + 1/07 \times ABE \\ & - 0/032 \times BE^2 - 0/24 \times BCDE + 0/12 \times \\ & BCE^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} NOx = & +121/2 \times A + 173/19 \times B + 172/49 \times \\ & C + 47/86 \times AB + 7/27 \times AD + 17/47 \times AE \\ & + 23/14 \times BD + 17/89 \times BE + 73/84 \times CE \\ & - 30/01 \times ABD - 23/61 \times BCD - 70/92 \times ACE \\ & - 16/76 \times BCDE + 99/33 \times BCE^2 \end{aligned} \quad (4)$$

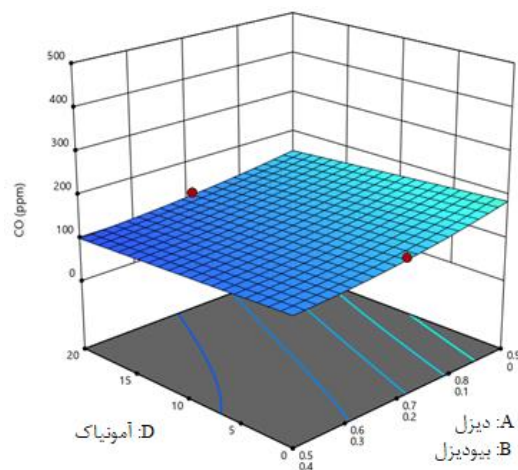
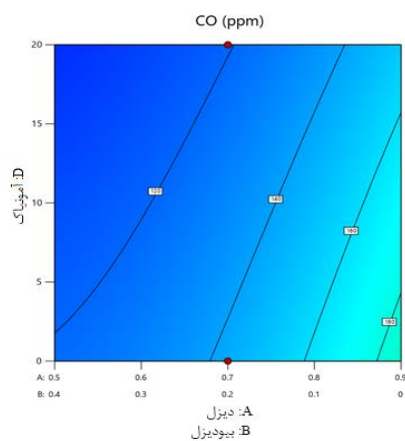
انتشار آلاینده NOx

از خروجی‌های آگروز ارتباط انتشار NOx با متغیرهای مستقل پس از تحلیل به ترتیب معادله‌های علامت‌گذاری شده (۳) و واقعی (۴) حاصل شد.

در تحلیل داده‌ها، معادلات بالا براساس عواملی علامت‌گذاری شده (۴) و عواملی واقعی (۵) به دست آمدند. در معادله ۴ ضرایب هر عامل مقدار اثرگذاری یا اثر برهم کنش یک یا چند عامل بر آلاینده‌گی NOx را مشخص می-کند، که در اینجا عواملی A، B و C به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را نشان می‌دهند. ضریب تغییرات در معادله (۵)، ۱/۵۸ به دست آمد که تطبیق بسیار مناسب نتایج تجربی با مدل را نشان می‌دهد. ضریب تبیین (R^2) به مقدار ۰/۹۹۵۹ نشان‌دهنده این است متغیرهای وابسته به خوبی توسط متغیرهای مستقل با این مدل قابل پیش‌بینی است و مدل رگرسیونی به طور کامل داده‌ها را برازش می‌کند.

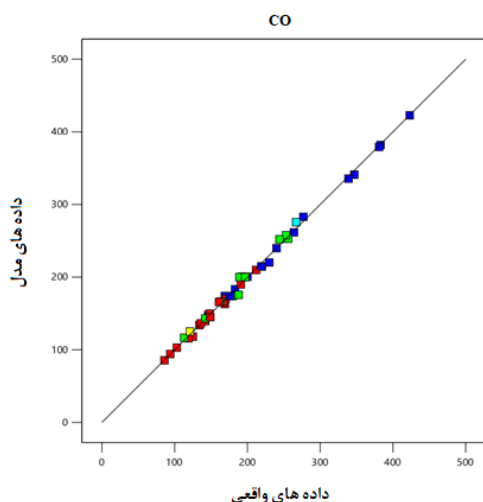


(الف)



(ب)

شکل ۳- تأثیر سوخت‌های مختلف بر انتشار CO (الف) بار موتور ۷۵ درصد (ب) بار موتور ۲۵ درصد



شکل ۴- مطابقت داده‌های واقعی در برابر مدل NOx

در شکل ۴ مطابقت داده‌های پیش‌بینی شده از مدل نرم‌افزاری برای انتشار گاز NOx با داده‌های واقعی نشان داده شده است. که به این معنی است داده‌های پیش‌بینی شده با مدل از اعتبار خوبی برخوردار هستند. بیودیزل در نسبت‌های بالاتر باعث افزایش لزجت مخلوط می‌شود که با حضور بیواتانول قابل پوشش است. اما از طرفی افزایش نسبت بیودیزل و بیواتانول به دلیل وجود اکسیژن در زنجیره مولکولی آن‌ها و افزایش دمای احتراق انتشار NOx را افزایش خواهند داد (Zoldy, 2011).

انتشار آلاینده HC

معادله‌های علامت‌گذاری شده (۶) و واقعی (۷) پس از تحلیل داده‌های آلاینده HC جهت پیش‌بینی تأثیر عامل-های مختلف بر این آلاینده استخراج شدند.

در معادله ۵ با توجه به ضرایب هر عامل برهم کنش ABC, ABCE و عامل A به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را داشتند که نشان دهنده تأثیر زیاد استفاده از ترکیب سوخت‌های دیزل، بیودیزل و بیواتانول در کنار بار اعمال شده بر روی موتور بر آلاینده HC است. این امر می‌تواند به دلیل وجود (۱۰-۱۲ درصد) اکسیژن در ساختار شیمیایی بیودیزل و بیواتانول باشد که منجر به احتراق کامل‌تر و کاهش HC نسبت به زمان استفاده از سوخت دیزل می‌شود. همچنین وجود بیواتانول به دلیل گرمای نهان تبخیر بالا و تغییرات بار اعمال شده بر احتراق موتور می‌تواند بر آلاینده HC تأثیر بگذارد.

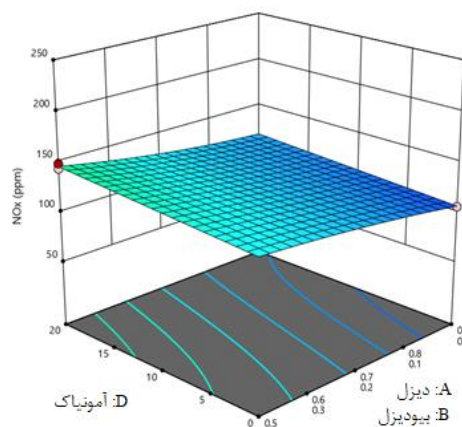
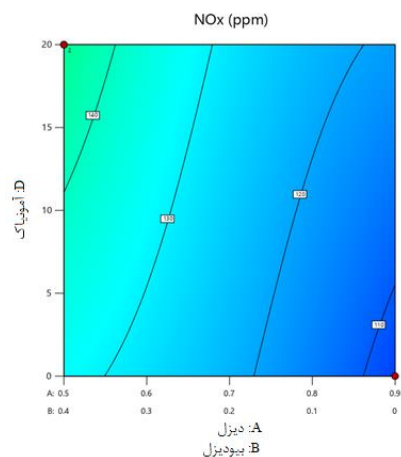
$$\begin{aligned} HC = & +269/02 \times A + 482/35 \times B - \\ & 101/36 \times C - 785/81 \times AB - 1/15 \times \\ & AD - 1/7 \times AE - 688/93 \times BC + 0/77 \\ & \times BD - 6/27 \times BE + 0/77 \times CD + 1/13 \\ & \times CE + 1722/33 \times ABC + 9/33 \times ABE \\ & + 23/09 \times BCE - 57/73 \times ABCE \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} HC = & +172/65 \times A + 98/57 \times B \\ & + 46/79 \times C - 114/79 \times AB - 11/53 \times \\ & AD - 42/42 \times AE - 54/92 \times BE \\ & - 251/51 \times ABC + 84/05 \times ABE \\ & - 311/77 \times ABCE \end{aligned} \quad (6)$$

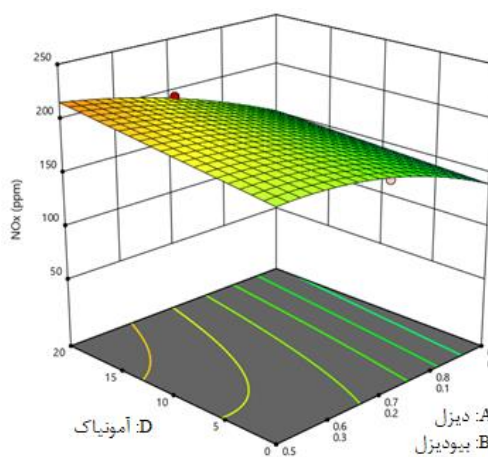
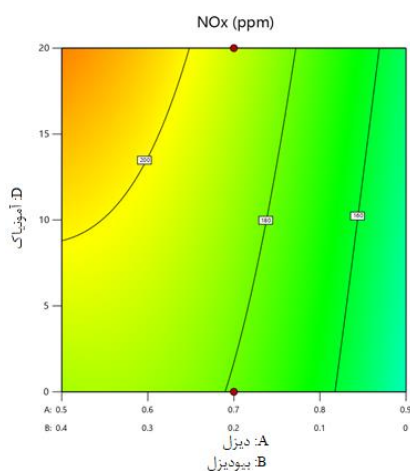
با افزایش آمونیاک، فشار سیلندر و نرخ انتشار گرما بالاتر می‌رود. همچنین انتشار NOx به دلیل دمای سیلندر بالاتر بیش‌تر می‌شود (Wu, Zhang *et al.* 2023).

تأثیر سوخت‌های مختلف برای ۲۵ درصد بار موتور در شکل ۵-الف بر آلاینده‌گی NOx نشان داده شده است. کم‌ترین مقدار انتشار NOx برابر با ۹۸ ppm برای زمانی است که هیچ سوختی به دیزل اضافه نشده و بار موتور در حداقل مقدار، یعنی ۲۵ درصد است و سوخت دیزل تمام انرژی موتور را تأمین می‌کند. در شکل ۵-ب بیش‌ترین مقدار انتشار NOx با ۲۳۳ ppm در سوخت ۴۰ درصد دیزل، ۴۰ درصد بیودیزل، ۲۰ درصد بیواتانول و ۲۰ درصد حجمی هوای ورودی آمونیاک در حالی که بار موتور در حداکثر مقدار یعنی ۷۵ درصد مشاهده شد که Nadimi *et al.* (2023) در موتور دوگانه‌سوز دیزل-آمونیاک، افزایش NOx را با افزایش آمونیاک گزارش کردند، که به دلیل نیتروژن موجود در آمونیاک و دمای احتراق بالاست. از مقایسه شکل ۵-الف و ۵-ب مشاهده می‌شود که بیش‌ترین تأثیر بر آلاینده‌گی NOx مربوط به بار موتور است. در واقع با افزایش بار موتور دمای سیلندر به شدت افزایش پیدا می‌کند، که منجر به افزایش انتشار این آلاینده‌گی شده است (Wu, Zhang *et al.* 2023).

در یک ترکیب سوخت ثابت با افزایش بار موتور از ۲۵ به ۷۵ درصد، انتشار NOx حدود ۴۹ درصد افزایش داشت. همچنین در بار ثابت با افزایش آمونیاک، بیواتانول و بیودیزل میزان NOx به ترتیب حدود ۱۱، ۱۴ و ۲۲ درصد افزایش یافت. این امر نشان دهنده این است که بعد از بار موتور بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک بیش‌ترین تأثیر را بر انتشار این آلاینده‌گی داشتند.

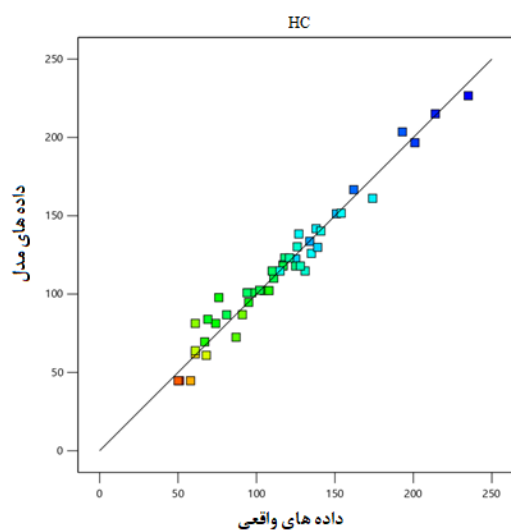


(الف)



(ب)

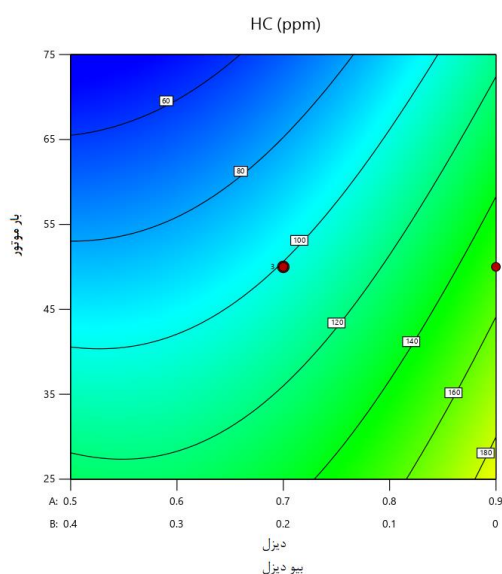
شکل ۵- تأثیر سوخت‌های مختلف بر انتشار NO_x (الف) بار موتور ۷۵ درصد (ب) بار موتور ۲۵ درصد



شکل ۶- مطابقت داده‌های واقعی و داده‌های مدل HC

در معادله ۶ ضریب تغییرات $1/94$ به دست آمد که نشان می‌دهد داده‌های آزمایش شده با مدل تطبیق مناسب دارد. هم‌چنین ضریب تبیین (R^2) مقدار 0.9635 به دست آمد. بنابراین با این مدل متغیرهای وابسته به خوبی توسط متغیرهای مستقل قابل پیش‌بینی هستند و مدل رگرسیونی به طور کامل داده‌ها را برازش می‌کند. مطابقت داده‌های پیش‌بینی شده از مدل نرم‌افزاری برای انتشار HC با داده‌های واقعی که در شکل ۶ نشان داده شده گویای این است که داده‌های پیش‌بینی شده با مدل از اعتبار خوبی برخوردار هستند.

انتشار هیدروکربن را کاهش داد. در انتشار HC با توجه به نتایج به دست آمده تأثیر سوخت‌ها نسبت به بار موتور بیش‌تر ملاحظه شد. به طوری که در شرایط ثابت سوخت و در بارهای مختلف انتشار هیدروکربن بیشینه ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقات دیگر هم مشاهده شد با توجه به اینکه بیودیزل دارای ارزش ستان بالای است می‌تواند کاهش عدد ستان به دلیل حضور بیواتانول را جبران کند. بنابراین، افزایش میزان بیودیزل باعث افزایش عدد ستان شده و باعث کاهش انتشار HC می‌شود (Zöldy 2011).

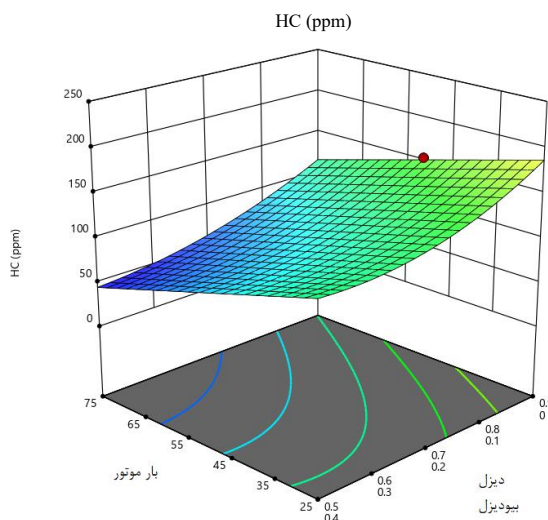


شکل ۷- تأثیر سوخت‌های مختلف بر انتشار HC در بارهای مختلف موتور

همان‌گونه که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، بیشترین مقادیر توان و گشتاور موتور در بار ۷۵ درصد به دست آمده است؛ به طوری که توان برابر با ۳/۳ کیلووات و گشتاور معادل ۱۴/۳۴۲ نیوتن‌متر ثبت گردید. این شرایط در حالی حاصل شد که ترکیب سوخت شامل ۸۰ درصد دیزل و ۲۰ درصد بیودیزل بوده و همچنین ۲۰ درصد از هوای ورودی موتور با آمونیاک جایگزین شده بود.

معمولاً استفاده از بیودیزل و بیواتانول در مقایسه با گازوئیل خالص انتشار آلاینده‌ی را به صورت کلی کاهش می‌دهد ولی از سوی دیگر باعث افزایش NOx می‌شود. این درحالی است که معمولاً مقدار توان و عملکرد موتور تغییر معنی‌داری نمی‌کند (Najafi, Ebrahimzade et al. 2011). در برخی تحقیقات گزارش شده، استفاده از آمونیاک به دلیل اینکه چگالی انرژی کم‌تر و مقادیر گرمایش کم‌تری ارائه می‌دهد، باعث کاهش شاخص‌های عملکردی موتور

در شکل ۷ تأثیر نسبت‌های مختلف سوخت و بار موتور در انتشار HC نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش مقدار دیزل در سوخت و با افزایش بار موتور انتشار هیدروکربن کاهش می‌یابد (Meysami and Ghazikhani, 2013). کم‌ترین انتشار HC با ۵۰ ppm در نسبت سوخت مایع ۴۰ درصد دیزل، ۴۰ درصد بیودیزل و ۲۰ درصد بیواتانول و ۲۰ درصد حجمی آمونیاک از هوای ورودی و در بار ۷۵ درصد مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد در یک بار ثابت با افزایش نسبت سوخت‌های تجدیدپذیر می‌توان ۵۰ تا ۶۰ درصد



تحلیل آماری گشتاور و توان

در جدول ۹ نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تأثیر متقابل نوع سوخت، بار موتور و همچنین استفاده از آمونیاک بر گشتاور و توان گزارش شده است. تأثیر متغیرهای مستقل بر گشتاور و توان در جدول ۹ نشان می‌دهد برهم‌کنش تمام عواملی مستقل در سطح ۱ درصد معنی‌دار است به جز برهم‌کنش بیواتانول × توان دو آمونیاک، بیودیزل × آمونیاک، بیواتانول × توان دو بار موتور که در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد.

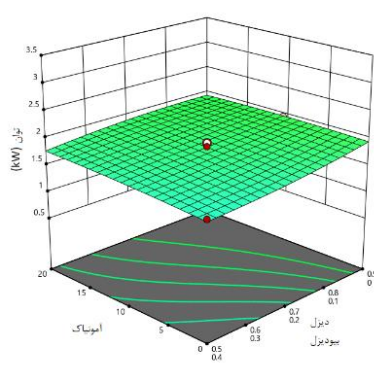
تجزیه واریانس مدل‌های گشتاور و توان نشان داد، عدم برازش (Lack of fit) معنی‌دار نیست که نشان دهنده دقت کافی مدل‌ها برای ارزیابی تأثیر عواملی مستقل بر گشتاور و توان است. ضریب تبیین (R^2) برای گشتاور و توان ۰/۹۹۸۲ محاسبه شده، که نشان دهنده تناسب بسیار خوب مدل‌ها با داده‌های تجربی است.

نتایج نشان داد با کاهش میزان سوخت دیزل از ۱۰۰ درصد به ۴۰ درصد سهم در سوخت مایع در یک بار ثابت به طور متوسط ۲۳ درصد عملکرد موتور کاهش یافت. اضافه کردن آمونیاک باعث بهبود حدود ۵ درصدی در عملکرد موتور نسبت به حالت بدون آمونیاک شد.

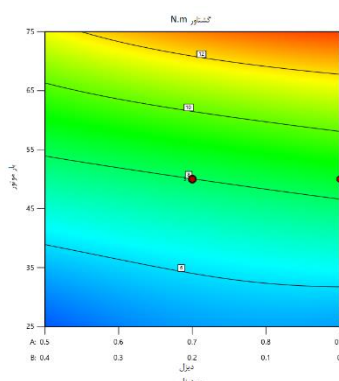
خواهد شد (Yapicioglu and Dincer 2018) در حالی که شکل -ب نشان می‌دهد آمونیاک تغییر یمنی‌داری در توان و گشتاور موتور ندارد و حتی در ترکیب با بیودیزل عملکرد مناسب‌تری هم دارد.

جدول ۹- نتایج مدل تاثیر گازوئیل (A)، بیودیزل (B)، بیواتانول (C)، آمونیاک (D) و بار موتور (E) بر عملکرد موتور

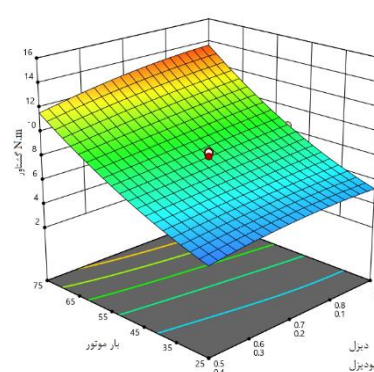
متغیر وابسته	منبع تغییر	گشتاور			توان		
		میانگین مربعات	ضریب معناداری	درجه آزادی	میانگین مربعات	ضریب معناداری	درجه آزادی
مدل	۱۳	۴۱/۹۲	> 0.0001	۱۳	۲/۲۳	> 0.0001	۱۳
LinearMixture	۲	۲۲/۵۶	> 0.0001	۲	۱/۲۰	> 0.0001	۲
AE	۱	۱۶۸/۱۵	> 0.0001	۱	۸/۹۳	> 0.0001	۱
BD	۱	۰/۱۰۶۲	۰/۰۶۶۷	۱	۰/۰۰۵۷	۰/۰۶۴۲	۱
BE	۱	۴۴/۹۷	> 0.0001	۱	۲/۳۸	> 0.0001	۱
CE	۱	۱۲/۸۰	> 0.0001	۱	۰/۶۸۲۷	> 0.0001	۱
ABD	۱	۰/۹۶۲۶	> 0.0001	۱	۰/۰۵۱۶	> 0.0001	۱
AE ²	۱	۱/۸۵	> 0.0001	۱	۰/۱۰۱۶	> 0.0001	۱
CD ²	۱	۰/۱۵۹۶	۰/۰۲۶۳	۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۳۰۰	۱
CE ²	۱	۰/۲۰۲۹	۰/۰۱۳۱	۱	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۴۶	۱
ABDE	۱	۰/۳۲۴۲	۰/۰۰۲۲	۱	۰/۰۱۸۱	۰/۰۰۱۷	۱
BCDE	۱	۰/۴۷۳۴	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۲۴۹	۰/۰۰۰۳	۱
ABE ²	۱	۱/۸۹	> 0.0001	۱	۰/۰۹۴۴	> 0.0001	۱
باقی‌مانده	۳۳	۰/۰۲۹۵	—	۳۳	۰/۰۰۱۵	—	۳۳
عدم برازش	۲۸	۰/۰۳۲۷	۰/۱۳۰۱	۲۸	۰/۰۰۱۷	۰/۱۳۶۳	۲۸
خطای خالص	۵	۰/۰۱۱۸	—	۵	۰/۰۰۰۶	—	۵
کل	۴۶	—	—	۴۶	—	—	۴۶



(ب)



(الف)



شکل ۸- تأثیر سوخت‌های مختلف و بار بر گشتاور و توان موتور (الف) بار موتور بر گشتاور (ب) نسبت سوخت‌ها بر توان

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل تک‌سیلندر پاشش مستقیم با استفاده از مخلوط‌های مختلف چهار سوخت دیزل، بیودیزل، بیواتانول و آمونیاک پرداخته است. از روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی ترکیب سوخت‌ها و تحلیل آماری دقیق اثرات عامل‌های ورودی، به عنوان رویکردی جدید برای شناسایی شرایط بهینه عملیاتی موتور استفاده شده است. در این پژوهش آزمایش‌ها در شرایط مختلف بار موتور و نسبت‌های مختلف سوخت صورت گرفت. عامل‌های اندازه‌گیری شده شامل گشتاور، توان خروجی، و انتشار آلاینده‌های CO، HC و NOx بودند. نتایج زیر از این پژوهش حاصل شدند. استفاده از ترکیب سوخت ۴۰٪ دیزل، ۴۰٪ بیودیزل، ۲۰٪ بیواتانول و ۲۰٪ آمونیاک در بار ۷۵٪ منجر به کم‌ترین انتشار HC (50 ppm) شد. همچنین، انتشار CO در بار ۲۵٪ با همین ترکیب به ۱۴۶ ppm کاهش یافت که نسبت به زمان استفاده از دیزل خالص نشان‌دهنده کاهشی به میزان ۶۵٪ است.

بیش‌ترین انتشار NOx (233 ppm) در ترکیب ۴۰٪ دیزل، ۴۰٪ بیودیزل، ۲۰٪ بیواتانول و ۲۰٪ آمونیاک در بار ۷۵٪ مشاهده شد. کم‌ترین میزان NOx (98 ppm) با دیزل خالص و در بار ۲۵٪ ثبت شد.

کاهش سه‌م دیزل از ۱۰۰٪ به ۴۰٪ در مخلوط سوخت، توان موتور را به‌طور متوسط ۲۳٪ کاهش داد. افزودن آمونیاک تا ۲۰٪ حجم هوای ورودی، عملکرد را حدود ۵٪ بهبود بخشید. بیش‌ترین توان (۳.۳ kW) و گشتاور (۱۴.۳ N.m) در ترکیب ۸۰٪ دیزل و ۲۰٪ بیودیزل با ۲۰٪ آمونیاک در بار ۷۵٪ مشاهده شد.

افزایش بار موتور از ۲۵٪ به ۷۵٪ انتشار NOx را تا حدود ۴۹٪ افزایش داد، و در مقابل میزان HC و CO را به‌ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۶۵٪ کاهش داد، که نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر در بارهای بالاتر است.

جهت تکمیل این تحقیق و تعمیم نتایج به شرایط مختلف پیشنهاد می‌شود آزمایشات با موتورهای با شرایط مختلف مانند موتورهای مجهز به توربوشارژر و ... انجام شود. در ضمن به منظور بررسی اثرات خوردگی، یا دو حالتی شدن سوخت‌ها، آزمایشات در زمان‌های طولانی‌تر و حتی در شرایط رانندگی واقعی انجام شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مایلند مرلقب قدردانی خود را از شورای پژوهشی دانشگاه شهرکرد برای حمایت مالی از این مطالعه تحت شماره کمک هزینه 96GRN31M1007براز کنند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

ابوالفضل ضیاءالدینی: روش‌شناسی

سجاد رستمی: استاد راهنما

بهرام حسین‌زاده سامانی: اعتبارسنجی

مصطفی کیانی: اعتبارسنجی

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این کار توسط شورای پژوهشی دانشگاه شهرکرد تحت شماره کمک هزینه 96GRN31M1007 پشتیبانی شده است.

منابع

- Asghari, M., B. H. Samani and R. Ebrahimi (2022). "Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors." *Energy Conversion and Management* **258**: 115514.
- Dimitriou, P. and R. Javaid (2020). "A review of ammonia as a compression ignition engine fuel." *International Journal of Hydrogen Energy* **45**(11): 7098-7118.
- Janakiraman, S., T. Lakshmanan and P. Raghu (2021). "Experimental investigative analysis of ternary (diesel+ biodiesel+ bio-ethanol) fuel blended with metal-doped titanium oxide

Emission of Diesel Engine under Variable Load Conditions. 21st Annual International Conference on Mechanical Engineering.

- nanoadditives tested on a diesel engine." *Energy* **235**: 121148.
- Nadimi, E., G. Przybyła, M. T. Lewandowski and W. Adamczyk (2023). "Effects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine." *Journal of the Energy Institute* **107**: 101158.
- Najafi, B., R. Ebrahimzade and A. Hajiri (2011). "Effect of Ethanol, Biodiesel and Diesel Blend Fuel on Performance and Pollutants Parameters of Diesel Engine." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* **43**(1): 11-17.
- pirzad, moeini, shekariz and kazemifar (2015). "Application of ethanol/gasoline mixtures with appropriate additives as diesel engine fuel." *Oil research* **25**(82): 184-190.
- Ritchie, H., M. Roser and P. Rosado (2020). "CO₂ and greenhouse gas emissions." *Our world in data*.
- Rivera, X. C. S., E. Topriska, M. Kolokotroni and A. Azapagic (2018). "Environmental sustainability of renewable hydrogen in comparison with conventional cooking fuels." *Journal of Cleaner Production* **196**: 863-879.
- Scharl, V. and T. Sattelmayer (2022). "Ignition and Combustion Characteristics of Diesel Piloted Ammonia Injections." *Fuel Communications*: 100068.
- Shahir, S., H. Masjuki, M. Kalam, A. Imran, I. R. Fattah and A. Sanjid (2014). "Feasibility of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compatibility, safety and combustion." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **32**: 379-395.
- Wu, Y., Y. Zhang, C. Xia, A. Chinnathambi, O. Nasif, B. Gavurová, M. Sekar, A. Anderson, N. T. L. Chi and A. Pugazhendhi (2023). "Assessing the effects of ammonia (NH₃) as the secondary fuel on the combustion and emission characteristics with nano-additives." *Fuel* **336**: 126831.
- Yapicioglu, A. and I. Dincer (2018). "Performance assesment of hydrogen and ammonia combustion with various fuels for power generators." *International Journal of Hydrogen Energy* **43**(45): 21037-21048.
- Yang, Z., Fei, C., Li, Y., Wang, D., & Sun, C. (2023). Experimental study of the effect of physical and chemical properties of alcohols on the spray combustion characteristics of alcohol-diesel blended fuels. *Energy*, 263, 126158.
- Zentou, H., Z. Z. Abidin, M. Zouanti and D. Greetham (2017). "Effect of operating conditions on molasses fermentation for bioethanol production." *International Journal of Applied Engineering Research* **12**(15): 5202-5506.
- Zöldy, M. (2011). "Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines." *Transport* **26**(3): 303-309.
- Meysami, F and M. Ghazikhani (2013). The Effect of Using Biodiesel on the Performance and