

## Investigating power generation in a dual-fuel combustion process (hydrogen-diesel-biodiesel) in the presence of a combined oxygenated additive

AbdolReza Mehin Ghaffari Nia<sup>1</sup>, Vahid Rostampour<sup>2</sup>, MohammadHossein Abaspour Fard<sup>3</sup>, Adel Rezvani Vand Fanaei<sup>4</sup>, arash Mohebbi<sup>5</sup>, Javad Zareei<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Department of Biosystems Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, [r.ghaffarinia@urmia.ac.ir](mailto:r.ghaffarinia@urmia.ac.ir)

<sup>2</sup> **Corresponding author**, Department of Biosystems Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, [v.rostampour@urmia.ac.ir](mailto:v.rostampour@urmia.ac.ir)

<sup>3</sup> Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, [abaspour@um.ac.ir](mailto:abaspour@um.ac.ir)

<sup>4</sup> Department of Biosystems Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, [a.rezvanivand@urmia.ac.ir](mailto:a.rezvanivand@urmia.ac.ir)

<sup>5</sup> Department of Biosystems Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, [a.mohebbi@urmia.ac.ir](mailto:a.mohebbi@urmia.ac.ir)

<sup>6</sup> Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, [javadzareei@um.ac.ir](mailto:javadzareei@um.ac.ir)

### ARTICLE INFO

*Article type*

Research Article

*Article history*

Received 2025.07.25

Received in revised form 2025.09.02

Accepted 2025.09.27

Available online 2025.11.25

*Keywords*

Diesel

Biodiesel

Dual-Fuel Combustion

Oxygenated Additive

Hydrogen

### ABSTRACT

This study investigates the performance and emission characteristics of a dual-fuel engine running at full load on diesel, biodiesel blends (B5 and B20), hydrogen-oxygen (HHO) gas, and a blended additive (combination of acetone, ethanol, sulcatol, and dimethyl carbonate). Tests were conducted to evaluate key performance metrics, including brake power, brake-specific fuel consumption, and various emissions, including unburned hydrocarbons, carbon monoxide, carbon dioxide, and nitrogen oxides. The results show that if the effects of HHO and the blended additive are excluded, diesel consistently outperforms both biodiesel blends (B5 and B20) regarding braking power and efficiency and exhibits superior combustion properties. However, the addition of HHO improved the brake power and reduced the emission of unburned hydrocarbons and carbon monoxide in biodiesel blends, especially at lower concentrations of the combined additives. However, while CO<sub>2</sub> emission was lower for biodiesel blends than diesel, the presence of HHO also improved NO<sub>x</sub> emissions. These findings demonstrate the potential of HHO as a performance enhancer in biodiesel applications while emphasizing the need for careful management of NO<sub>x</sub> emissions. Also, the effect of the combined additives in certain conditions, such as the emission of unburned hydrocarbons or the emission of nitrogen oxides in high percentages of using biodiesel (B20A6), is more prominent, which can improve the conditions in critical conditions. However, the B5A2 fuel sample can be relatively identified as a suitable fuel in different percentages of HHO from the point of view of engine emissions.

## Introduction

Compression Ignition (CI) engines remain essential in transportation and agriculture, yet face challenges regarding NO<sub>x</sub>, CO, UHC, and PM emissions. Strategies to mitigate these include partial diesel substitution with biodiesel and hydrogen utilization in dual-fuel mode. Biodiesel reduces net CO<sub>2</sub> but suffers from lower heating value, reducing brake power [1]. Hydrogen enhances combustion efficiency via high flame speed but increases NO<sub>x</sub> formation due to elevated temperatures [2,3]. Oxygenated additives like glycerol derivatives and DMC can accelerate oxidation without drastically raising peak temperature [4]. The primary research gap concerns synergistic effects of combining multiple oxygenated additives with HHO and biodiesel. This study identifies an optimal additive blend for diesel-biodiesel-HHO dual-fuel application.

## Methodology

### Fuel Design and Preparation

Biodiesel was synthesized from waste cooking oil via the transesterification method. Relevant thermophysical properties (density, calorific value, viscosity, and cetane number) were quantified in strict accordance with ASTM standards, as presented in Table 1.

### Cite This Paper

Mehin Ghaffari Nia, AbdolReza., Rostampour, Vahid., Abaspour Fard, MohammadHossein., Rezvani Vand Fanaei, Adel., Mohebbi, arash., & Zareei, Javad. (2026). Investigating power generation in a dual-fuel combustion process (hydrogen-diesel-biodiesel) in the presence of a combined oxygenated additive. *Fuel and Combustion*, 18 (3), 126-146. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.547016.1443> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



**Table 1. Thermophysical properties of base fuels**

Properties	Diesel	Biodiesel	Hydrogen	ASTM Method
Density @ 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	840	885.3	0.0838	D1298
Calorific Value (MJ/kg)	42.49	39.77	119.93	D3338
Viscosity @ 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3.95	4.39	–	D3338
Cetane Number (–)	50	55	5–10	D613

### Dual-Fuel System and Engine Testing

HHO gas was generated via dry cell electrolyzer (NaOH electrolyte) and introduced into the intake manifold at 0–2 L/s. Tests were performed on a single-cylinder, direct-injection diesel engine (HSD1G-178FE, 0.406 L, 2.8 kW) at 1500 rpm under full load. Brake power was calculated from torque measurements. Emissions (CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>) were analyzed using an MRU Delta 1600L (±1 ppm). Each test was replicated three times. Brake power was calculated as:

$$P = (2\pi Tn)/60000 = Tn/9550 \quad (1)$$

where T is torque (N·m) and n is engine speed (rpm).

## Results and Discussion

### Engine Performance (Brake Power and BSFC)

In the absence of HHO, B5 and B20 produced lower brake power than diesel (max BP: B5 ~5.693 kW; B20 ~5.478 kW) due to their lower calorific value. HHO addition significantly compensated for this deficit. The B5A2 sample (5% Biodiesel + 2% Additive) achieved the highest BP (5.764 kW), indicating enhanced combustion from active hydrogen/oxygen species. At higher additive concentrations (B5A6, B20A6), BP marginally decreased (~6%), suggesting adverse combustion effects. BSFC values for B20 blends were generally higher than diesel. Notably, at B20, additive addition with HHO increased BSFC rather than improving it, likely due to combustion phasing interference or charge cooling.

### Pollutant Emissions

**CO and UHC:** HHO gas effectively reduced CO and UHC emissions via enhanced oxidation from hydrogen's flame speed and HHO's oxygen content [5]. The B5A2 sample performed best. B20A2 also showed notable CO reduction at higher HHO flow rates, indicating synergy between HHO and low additive concentrations.

**CO<sub>2</sub>:** Biodiesel blends exhibited lower CO<sub>2</sub> than diesel due to their biogenic nature and lower C/H ratio. HHO further reduced CO<sub>2</sub> by displacing carbonaceous fuel. B5, B5A2, and B20 showed the greatest CO<sub>2</sub> reductions (5.4%–8.4% depending on HHO flow).

**NO<sub>x</sub>:** Contrary to expectations, a net reduction in NO<sub>x</sub> relative to diesel was observed. The highest reduction occurred with B20A6. This is attributed to ethanol's high latent heat of vaporization and HHO-induced volumetric efficiency changes, which moderated peak combustion temperatures and suppressed thermal NO<sub>x</sub> formation. This highlights the complementary role of the liquid additive in mitigating HHO's thermal penalty.

## Conclusions

This study demonstrated that simultaneous HHO and optimized additive (D30E15S28A27) effectively mitigates biodiesel's deficiencies in dual-fuel CI engines. Key findings include:

1. HHO Gas enhances combustion, increasing brake power and reducing CO/UHC emissions.
2. The Combined Additive moderates combustion temperature, preventing NO<sub>x</sub> increase, especially at high biodiesel content (B20) or high HHO flow.
3. The B5A2 formulation (5% Biodiesel + 2% Additive) with optimal HHO flow provides the best balance of enhanced power and reduced emissions (CO, UHC, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>).

Future work should include part-load testing and practical-scale electrolyzer efficiency assessment.

## References

- [1] S. Amid, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, A. Hajiahmad, B. Najafi, H. S. Ghaziaskar, et al., "Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends," *Energy Convers. Manage.*, vol. 203, p. 112245, 2020.
- [2] M. K. Baltacioglu, H. T. Arat, M. Ozcanli, and K. Aydin, "Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 8347–8353, 2016.
- [3] B. Subramanian and V. Thangavel, "Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25479–25492, 2020.
- [4] R. Sedghi, H. Shahbeik, H. Rastegari, S. Rafiee, W. Peng, A.-S. Nizami, et al., "Turning biodiesel glycerol into oxygenated fuel additives and their effects on the behavior of internal combustion engines: A comprehensive systematic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, p. 112805, 2022.
- [5] P. Selvi Rajaram, A. Kandasamy, and P. J. Arokiasamy Remigious, "Effectiveness of oxygen enriched hydrogen-HHO gas addition on direct injection diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Therm. Sci.*, vol. 18, no. 1, 2014.

## Author Contributions

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

## Data Availability Statement

The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

## Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Engine Research and Design Company of Iran Khodro (IPCO) for their technical support and provision of experimental facilities. The authors also wish to acknowledge the financial and logistical support provided by Urmia University.

## Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

## Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

## بررسی عملکرد و آلاینده‌گی فرایند احتراق دوگانه‌سوز (هیدروژن-دیزل-بیودیزل) در حضور افزودنی ترکیبی اکسیژن‌دار

عبدالرضا مهین غفاری نیا<sup>۱</sup>، وحید رستم‌پور<sup>۲</sup>، محمدحسین عباسپور فرد<sup>۳</sup>، عادل رضوانی وند فنائی<sup>۴</sup>، آرش محبی<sup>۵</sup>، جواد زارعی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، [r.ghaffarinia@urmia.ac.ir](mailto:r.ghaffarinia@urmia.ac.ir)

<sup>۲</sup> نویسنده مخاطب، دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، [v.rostampour@urmia.ac.ir](mailto:v.rostampour@urmia.ac.ir)

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [abaspour@um.ac.ir](mailto:abaspour@um.ac.ir)

<sup>۴</sup> استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، [a.rezvanivand@urmia.ac.ir](mailto:a.rezvanivand@urmia.ac.ir)

<sup>۵</sup> استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، [a.mohebbi@urmia.ac.ir](mailto:a.mohebbi@urmia.ac.ir)

<sup>۶</sup> استادیار، مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [javadzareei@um.ac.ir](mailto:javadzareei@um.ac.ir)

### چکیده

این مطالعه به بررسی ویژگی‌های عملکردی و انتشار آلاینده‌های یک موتور دوگانه سوز احتراق تراکمی با مصرف مخلوط‌های بیودیزل (B5 و B20)، گاز هیدروژن-اکسیژن (HHO) و یک افزودنی ترکیبی (ترکیبی از استین، اتانول، سولکتال و دی متیل کربنات) در شرایط بار کامل موتور می‌پردازد. در این پژوهش، آزمون‌های تجربی در یک موتور دیزل تک‌سیلندر با دور ثابت ۱۵۰۰ rpm و بار کامل انجام شد و ترکیب بهینه‌ی افزودنی‌ها با استفاده از طراحی آزمایش D-optimal در نرم‌افزار Design Expert تعیین شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه ترمزی و غلظت آلاینده‌ها (CO، HC، NOx) بر اساس استانداردهای ASTM انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که در غیاب HHO و افزودنی ترکیبی، مخلوط سوختی دیزل و بیودیزل (B5 و B20) از نظر توان ترمزی و کارایی بهتر عمل می‌کند و آلاینده‌های کمتری تولید می‌کند را نشان می‌دهد. اما افزودن HHO باعث بهبود توان ترمزی و کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسیدکربن در مخلوط‌های بیودیزل، به ویژه در غلظت‌های پایین تر افزودنی ترکیبی شد. با این وجود انتشار دی اکسیدکربن برای مخلوط‌های بیودیزل در مقایسه با دیزل کمتر بود، حضور HHO منجر به بهبود انتشار اکسیدهای نیتروژن نیز شد. این یافته‌ها پتانسیل HHO را به‌عنوان یک تقویت‌کننده عملکرد در کاربردهای بیودیزل نشان می‌دهد و در عین حال بر نیاز به مدیریت دقیق انتشار اکسیدهای نیتروژن تأکید می‌کند. همچنین تأثیر افزودنی ترکیبی در شرایط خاص مانند انتشار هیدروکربن‌های نسوخته، یا انتشار اکسیدهای نیتروژن در درصدهای بالای به کارگیری بیودیزل (B20A6) بیشتر برجسته می‌شود که می‌تواند در شرایط بحرانی شرایط را بهبود دهد. با این حال می‌توان نمونه سوخت B5A2 را به‌طور نسبی به‌عنوان سوختی مناسب در درصدهای مختلف HHO از نقطه نظر انتشارات آلاینده‌های موتور پیشنهاد کرد.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴

کلیدواژه‌ها:

دیزل

بیودیزل

احتراق دوگانه سوز

افزودنی اکسیژن دار

هیدروژن

### مقدمه

تداوم مصرف سوخت‌های فسیلی و تأثیر آن‌ها بر آلودگی‌های زیست محیطی، محققان را به سمت یافتن منابع سوخت پاک سوق داده است. هیدروژن تنها سوخت تجدیدپذیری است که محتوای کربن ندارد [۱]. بدیهی است که با کاهش کربن در سوخت، انتشار آلاینده‌های موتور (به جز اکسیدهای نیتروژن) کاهش می‌یابد [۲] هیدروژن به‌عنوان یک سوخت پاک و سازگار با محیط

### Cite This Paper

Mehin Ghaffari Nia, AbdolReza., Rostampour, Vahid., Abaspour Fard, MohammadHossein., Rezvani Vand Fanaei, Adel., Mohebbi, arash., & Zareei, Javad. (2026). Investigating power generation in a dual-fuel combustion process (hydrogen-diesel-biodiesel) in the presence of a combined oxygenated additive. Fuel and Combustion, 18 (3), 126-146. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.547016.1443> (In Persian)

ارجاع‌دهی به این مقاله



زیست [۳،۴]، یک منبع سوخت با محتوای انرژی قابل توجه است [۵]. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، «روندها و چشم‌اندازهای جهانی هیدروژن»، ارزش تجاری گاز هیدروژن در سال ۲۰۲۲ بیش از ۱۵۴ میلیارد دلار بود [۵].

هیدروژن را می‌توان با روش‌های الکتروشیمیایی، بیولوژیکی و ترموشیمیایی تولید کرد. مطلوب‌ترین روش برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیز آب [۶] با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی است [۷]. انرژی خورشیدی و آب بطور نسبی در سراسر جهان در دسترس هستند [۹،۸]. با این وجود لازم است هزینه تولید هیدروژن باید با استفاده از الکترولیز آب کاهش یابد. همچنین دوام، قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های تولید انرژی باید افزایش یابد [۱۰].

در فرآیند الکترولیز آب، در حالت معمول، گازهای هیدروژن و اکسیژن به‌صورت جداگانه در دو الکترود تولید می‌شوند؛ هیدروژن در کاتد و اکسیژن در آند جمع‌آوری می‌شود. با این حال، در برخی سامانه‌های الکترولیز موسوم به مولد گاز هیدروکسی، گازهای تولیدی بدون جداسازی از یکدیگر به‌صورت ترکیب دو مول هیدروژن و یک مول اکسیژن از خروجی جمع‌آوری می‌شوند که به آن گاز هیدروکسی (HHO) یا براون گاز گفته می‌شود. این مخلوط پیش‌احتراقی به‌دلیل ماهیت واکنش‌پذیر خود، در برخی مطالعات تجربی به عنوان افزودنی احتراقی به سوخت‌های دیزل و بیودیزل تزریق می‌شود تا فرآیند احتراق بهبود یابد و راندمان ترمودینامیکی افزایش یابد [۱۱]. گاز هیدروکسی را می‌توان از تمام سطوح الکترودها با استفاده از ژنراتورها یا مولدهای نوع سلول مرطوب تولید کرد. اما مشکل اصلی این ژنراتورها تولید گرما و کاهش بازده تولید است. در ژنراتورهای نوع سلول خشک، آب بین الکترودها جریان دارد و گرمای کمتری تولید می‌کند. این نوع ژنراتورها از نوع کارآمدتری هستند [۱۲]. در این روش معمولاً از NaOH یا KOH برای یونیزه کردن آب به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود [۱۳].

گاز هیدروکسی حاوی ۱ مول هیدروژن و ۲ مول اکسیژن است [۱۴]. موتور دیزلی که از سوخت دیزل همراه با سوخت‌های گازی دیگرمانند گاز طبیعی، بیوگاز یا هیدروژن استفاده می‌کند، «موتور دیزل دوگانه‌سوز» نامیده می‌شود [۱۶،۱۵]. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از گاز HHO که ترکیبی از دو مول هیدروژن و یک مول اکسیژن است و مستقیماً از فرآیند الکترولیز آب بدون جداسازی گازها به‌دست می‌آید، می‌تواند فرآیند احتراق سوخت‌های دیزل را بهبود دهد. در این حالت، HHO به‌صورت گاز مکمل به مسیر ورودی هوا تزریق می‌شود، در حالی که سوخت اصلی همان دیزل یا مخلوط دیزل-بیودیزل است. حضور هم‌زمان هیدروژن و اکسیژن در HHO موجب تسریع احتراق اولیه، افزایش سرعت شعله، و بهبود بازده احتراق می‌شود، زیرا اکسیژن فعال موجود در گاز HHO در همان ناحیه‌ی احتراق مشارکت می‌کند و نیاز به اختلاط ثانویه را کاهش می‌دهد. بنابراین، هدف از استفاده از گاز هیدروکسی، ارتقای پایداری و کامل‌تر شدن فرآیند احتراق و در نهایت کاهش انتشار آلاینده‌ها است، نه جایگزینی کامل سوخت دیزل [۱۴]. بنابراین می‌تواند فرآیند احتراق را در موتورهای دیزل بهبود بخشد. استفاده از هیدروژن باعث افزایش نسبت H/C سوخت و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌های حاوی کربن می‌شود [۱۷]. همچنین، سرعت انتشار گاز هیدروژن در هوا بسیار زیاد است، بنابراین ناهمگنی تزریق سوخت دیزل کاهش می‌یابد و مخلوط سوخت و هوا یکنواخت‌تر می‌شود [۱۹،۱۸].

همچنین سوخت بیودیزل می‌تواند عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی را بهبود بخشد [۲۱،۲۰]. بیودیزل مانند هیدروژن یک سوخت تجدیدپذیر و پاک است [۲۳،۲۲]. استفاده از بیودیزل به‌طور قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد [۲۴]. مطالعات در زمینه احتراق بیودیزل نشان داده است که سوخت بیودیزل می‌تواند انتشار ذرات معلق، هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)<sup>۱</sup> و مونوکسید کربن را کاهش دهد [۲۶،۲۵]. با این وجود بیودیزل در مقایسه با سوخت دیزل توان ترمزی

<sup>1</sup> Unburned Hydrocarbon

کمتری نسبت به مقدار ارزش حرارتی سوخت تولید می‌کند. اکنون محققان به دنبال حل این مشکل هستند. یکی از راه‌های پیشنهادی استفاده از مواد افزودنی گازی با محتوای انرژی بالا مانند هیدروژن است [۲۴].

دلیل انتشار بیشتر اکسیدهای نیتروژن در بیودیزل-هیدروژن که در موتور احتراق تراکمی کار می‌کند، در دسترس بودن اکسیژن اضافی و دمای بالای محفظه احتراق است. به منظور کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن روش‌های مختلفی نظیر EGR<sup>۱</sup> و استفاده از انواع مختلف افزودنی‌ها در سوخت دیزل در حوزه موتورهای احتراق تراکمی انجام شده است [۲۷، ۲۴].

امروزه به کارگیری افزودنی‌های اکسیژن‌دار در سوخت بیودیزل-دیزل باعث کاهش انتشارات موتور از جمله اکسیدهای نیتروژن و افزایش عملکرد موتور (توان موتور و بازده حرارتی موتور) شده است [۲۹، ۲۸]. افزودنی‌های اکسیژن‌دار با افزایش محتوای اکسیژن مشارکت کننده در فرایند احتراق، می‌توانند بازدهی احتراق را افزایش و میزان مصرف سوخت را کاهش دهند؛ با این اقدام، بر اساس بقای جرم، میزان مصرف ماده با انرژی حرارتی بالا کاهش و دمای محفظه احتراق کاهش می‌یابد. از میان افزودنی‌های اکسیژن‌دار، دی‌متیل کربنات و افزودنی‌های مشتق شده از گلیسرول پتانسیل بالایی برای افزایش عملکرد موتورهای اشتعال تراکمی و کاهش آلاینده‌های موتور به خصوص اکسیدهای نیتروژن از خود نمایش داده اند [۳۱، ۳۰].

با بررسی‌های صورت گرفته مقالات تحقیقاتی محدودی بر روی افزودن دی‌متیل کربنات و افزودنی‌های مشتق شده از گلیسرول در موتور اشتعال تراکمی متمرکز بودند. به خصوص زمانی که دایره جستجوی مقالات را محدود به فرایند احتراق دوگانه‌سوز می‌کنیم، به کارگیری دی‌متیل کربنات و افزودنی‌های مشتق شده از گلیسرول به همراه سوخت حاوی دیزل-بیودیزل بسیار محدود می‌شود.

افزودنی‌های اکسیژن‌دار به دست آمده از گلیسرول می‌توانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و احتراق سوخت‌های دیزل و بنزین را بهبود بخشند [۳۲]. این مواد شیمیایی همچنین می‌توانند احتراق نامطلوب سوخت‌های تجدیدپذیر جایگزین (مانند بیودیزل) را از بین ببرند [۳۳]. افزودنی‌های مبتنی بر گلیسرول ممکن است اتمیزاسیون اولیه و تزریق سوخت را بهبود بخشند و در عین حال رسوبات در نوک انژکتور و اطراف آن و خوردگی و سایش موتور را کاهش دهند. این درحالی است که به کارگیری این افزودنی‌ها در فرایند احتراق دوگانه‌سوز با هیدروژن بسیار محدود بوده و منابع علمی منتشر شده کمی در این خصوص موجود است. به‌طور متوسط، افزودنی‌های مبتنی بر گلیسرول می‌توانند بازده حرارتی موتور دیزل با ترکیبات دیزل-بیودیزل را تا بیش از ۳٪ بهبود بخشند و علاوه بر این مصرف سوخت ویژه ترمزی مخلوط‌های دیزل-بیودیزل را تا حدود ۳٪ کاهش دهند. این نتیجه را می‌توان به‌طور عمده به محتوای اکسیژن بالاتر این مواد افزودنی نسبت داد که باعث بهبود فرآیند احتراق می‌شوند [۳۰]. به‌طور کلی، افزودنی‌های مبتنی بر گلیسرول می‌توانند فشار احتراق را (حدود ۳٪) کاهش دهند، سرعت انتشار گرما را (بیش از ۵٪/۵) افزایش دهند، تاخیر احتراق (بیش از ۱۳٪) را کاهش دهند و مدت زمان احتراق را نسبت به مخلوط‌های دیزل-بیودیزل کوتاه کنند (حدود ۳۵٪) [۳۰]. این تغییرات را می‌توان به ساختار اکسیژن‌دار این افزودنی‌ها نسبت داد که باعث تسریع واکنش‌های اکسیداسیون می‌شوند. اگرچه اتفاق آرای مشخصی در مورد اثرات افزودنی‌های مبتنی بر گلیسرول بر انتشار گازهای خروجی موتورهای اشتعال تراکمی وجود ندارد، اما می‌توان به این جمع بندی رسید که این مواد اکسیژن‌دار می‌توانند با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت به‌طور موثری با مسئله احتراق ناقص مقابله کنند [۳۴، ۳۵]. به عبارتی، افزودنی‌های مشتق شده از گلیسرول می‌توانند به‌طور قابل توجهی مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، دوده و انتشار هیدروکربن‌های نسوخته را در حدود ۵٪ کاهش دهند [۳۰]. اما اتفاق نظر مشخصی در مورد کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن در حضور این افزودنی‌ها وجود ندارد.

<sup>1</sup> Exhaust gas recirculation

بررسی‌ها نشان می‌دهند، امروزه از افزودنی‌های ترکیبی برای مقابله با معایب مختلف ترکیبات سوخت استفاده می‌شود. به طوریکه می‌توان درصد‌های بهینه‌ای از افزودنی‌های مختلف در ترکیبات سوخت‌ها را جستجو نمود که موجب دستیابی به رفتار مد نظر در موتورهای احتراق تراکمی می‌شود [۳۶-۳۸]. بر این اساس، پژوهش حاضر در نظر دارد ترکیب بهینه‌ای از افزودنی‌های مشتق شده از گلیسرین (استین، و سولکتال)، اتانول (به دلیل بهبود ویژگی‌های احتراقی) و دی‌متیل کربنات (به دلیل کاهش قابل توجه انتشار اکسیدهای نیتروژن) پیدا کند. گام بعدی به کارگیری این افزودنی ترکیبی بهینه در فرایند احتراق دوگانه‌سوز (دیزل-بیودیزل-هیدروژن) است. در ادامه به بررسی پارامترهای موثر در رسیدن به تولید توان پایدار پرداخته می‌شود. پایداری تولید توان در احتراق موتورهای احتراق تراکمی دوگانه‌سوز که با افزودنی‌های مبتنی بر گلیسرول، افزودنی‌های اکسیژن‌دار و سوخت گازی هیدروژن کار می‌کنند به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

تجزیه و تحلیل تولید توان می‌تواند با ارائه اطلاعات قابل اعتماد در مورد جنبه‌های هزینه‌ای و اثرات زیست‌محیطی موتورهای احتراق تراکمی، کاستی‌های تحلیل راندمان حرارتی را کاهش دهد [۳۹-۴۱].

اخیراً مطالعات مختلفی در مورد استفاده از گاز هیدروکسی با سوخت بیودیزل در موتور دیزل توسعه یافته است. جیوتی و همکاران پتانسیل تولید بیودیزل از سنبل آبی را به عنوان سوخت آزمایشی و همچنین تأثیر فشار تزریق سوخت پایلوت را بر عملکرد هیدروژن که یک موتور دیزل دوگانه‌سوز را راه اندازی می‌کند، بررسی کردند. برای مرحله آزمون موتور، یک موتور تحقیقاتی ۴/۸ کیلووات در نظر گرفته شد. سه فشار پاشش سوخت پایلوت، یعنی ۲۲۰ بار، ۲۴۰ بار، و ۲۶۰ بار در نسبت تراکم ۱۷/۵ و زمان پاشش استاندارد ۲۳ درجه قبل از نقطه مرگ بالا برای شرایط بارگذاری مختلف در نظر گرفته شد. بیشینه راندمان حرارتی ترمزی تحت حالت سوخت دوگانه به ترتیب ۲۶٪/۱۱، ۲۸٪/۱۱ و ۲۷٪/۲۱. برای فشار پاشش سوخت پایلوت ۲۲۰ بار، ۲۴۰ بار و ۲۶۰ بار در مقایسه با سوخت شاهد ۲۵٪/۱۱ مشاهده شد [۴۲].

گئو مطالعه‌ای را برای بررسی بیودیزل حاصل از روغن بادام شیرین در یک موتور احتراق تراکمی انجام داد. علاوه بر این، پارامترهای عملکرد و انتشار آلاینده‌ها را با احتراق تراکم بار پیش مخلوط با سوخت هیدروژن بهبود بخشید. به منظور کاهش مصرف سوخت فسیلی، هیدروژن در منیفولد ورودی وارد شد. از آنجایی که هیدروژن به خوبی قبل از احتراق القا می‌شود، برای احتراق بهتر با هوای ورودی شارژ شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان هیدروژن بهینه منجر به حداکثر بهبود عملکرد موتور می‌شود. در مقایسه با ترکیب شاهد، راندمان حرارتی ۸/۳۸ درصد در بار کامل افزایش یافت و کاهش ۷۰ درصدی، ۵۶ درصدی و ۲۷ درصدی برای انتشار HC، CO و دود به ترتیب مشاهده شد [۴۳].

پاریمی و همکاران، ویژگی‌های عملکردی، احتراق و انتشار آلاینده‌های یک موتور احتراق تراکمی را با استفاده از مخلوط بیودیزل دانه کوسوم (دانه کاج) غنی شده با هیدروژن ارزیابی کردند. دبی جریان هیدروژن در ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر در دقیقه تنظیم شد و فشار تزریق در محدوده ۱۸۰-۲۴۰ بار متغیر بود. با افزودن هیدروژن به بیودیزل ۲۰ درصد، راندمان حرارتی ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی بهبود یافت. ویژگی‌های احتراق، یعنی فشار سیلندر و نرخ آزاد شدن حرارت خالص، نیز بهبود یافتند. انتشار مونوکسید کربن، هیدروکربن‌ها و دود نیز به استثنای اکسیدهای نیتروژن کاهش یافت. فشار تزریق بالاتر تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های عملی داشت. در فشار تزریق ۲۴۰ بار، بالاترین بازده حرارتی و کمترین مصرف سوخت به ترتیب ۳۲٪/۰۹ و ۲۲٪/۰ کیلوگرم بر کیلووات ساعت بود [۴۴].

هاله‌المیت و همکاران اثرات گاز طبیعی شهری، هیدروژن و سوخت مخلوط شده با متیل استر روغن را بر روی عملکرد یک

موتور دوگانه‌سوز مورد بررسی قرار دادند. گاز شهری و هیدروژن به عنوان سوخت اولیه مورد استفاده قرار گرفتند، در حالی که بیودیزل به عنوان سوخت پایلوت ثانویه در موتور دوگانه‌سوز استفاده شد. عملکرد و سطوح آلودگی موتور دوگانه‌سوز با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه و نتایج با مقادیر تجربی مقایسه شد. از طرح فاکتوریل کامل برای به حداقل رساندن تعداد آزمایش استفاده شده است. طراحی آزمایش‌ها با ماتریس طراحی تجربی از ۲۷ ترکیب مجزا در نظر گرفته شد. هدف اصلی این تلاش، بهینه‌سازی دبی‌های مختلف جریان سوخت برای راندمان حرارتی ترمزی بهتر و آلاینده‌های خروجی پایین‌تر بود. مدل سطح پاسخ توسعه‌یافته با نتایج تجربی برای دبی‌های جریان سوخت انتخاب‌شده با استفاده از رویکرد مطلوبیت تأیید شد. آزمایش‌ها با سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، نسبت تراکم ۱۷/۵، فشار تزریق ۲۴۰ بار، نازل شش سوراخ با قطر ۰/۲ میلی‌متر و زمان تزریق ۲۷ درجه قبل از مرگ بالا انجام شد. دبی جریان بهینه برای بیودیزل، سوخت گازی و هیدروژن به ترتیب ۰/۸، ۷، و ۰/۴۴ کیلوگرم در ساعت برای حداکثر بازده حرارتی و کمینه بودن سطح انتشار آلاینده‌های خروجی بود [۴۵].

با بررسی منابع می‌توان به این جمع‌بندی رسید که استفاده از هیدروژن در موتورهای دیزل با سوخت پایلوت حاوی بیودیزل و دیزل موجب افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌شود. در سال‌های اخیر به کارگیری برخی افزودنی‌ها به سوخت دیزل و بیودیزل به عنوان راه‌حلی برای کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن پیشنهاد شده است.

بر همین اساس سنتیل و همکاران تأثیر افزودنی‌های آنتی‌اکسیدانی طبیعی را بر عملکرد بیودیزل غنی شده با هیدروژن در یک موتور دیزل تجزیه و تحلیل کردند. در طی مراحل آزمایش، هیدروژن در منیفولد ورودی وارد شد و مخلوط B20 بیودیزل حاصل از جولی فلورا به محفظه احتراق تزریق شد. سه نمونه سوخت آزمایشی برای فرآیند آزمایش مانند دیزل، B20 و B20 با هیدروژن در دبی‌های مختلف شامل ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. B20 با هیدروژن افزایش بازده حرارتی ترمزی را نشان داد. اما انتشار NOx به ترتیب ۲۶ و ۲۸ درصد نسبت به دیزل افزایش یافت. در همین تحقیق به منظور به حداقل رساندن انتشار اکسیدهای نیتروژن، افزودنی آنتی‌اکسیدانی طبیعی ملیا آزداراک<sup>۱</sup> به میزان 1000 ppm اضافه شد و مشخص شد که این مخلوط سوختی با بهبود ۲.۷ درصد برای بازده حرارتی نسبت به حالت بدون افزودنی همراه بود. همچنین انتشار اکسیدهای نیتروژن را نیز به مقدار قابل توجهی کاهش داد [۴۶].

سلامی و همکاران مطالعه‌ای را با هدف بررسی اثر ترکیبی دیزل، بیودیزل، هیدروژن، نانوذرات اکسید آلومینیوم و سیستم چرخش گاز اگزوز بر انتشار آلاینده‌ها و عملکرد موتور دیزل انجام دادند. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که با افزایش ۳۰ درصدی بیودیزل، میزان هیدروکربن‌ها و مونوکسید کربن به ترتیب ۱۱/۷ درصد و ۱۴/۹ درصد کاهش یافت. با این حال، قدرت و گشتاور را کاهش داد. افزایش سهم چرخش گاز اگزوز در هوای ورودی باعث کاهش قدرت و گشتاور به دلیل کاهش اکسیژن شد و با افزودن ۳۰ درصد گاز خروجی به هوای ورودی، میزان HC را ۳/۲ درصد کاهش داد. اما باعث افزایش مونوکسیدکربن شد. با افزایش غلظت نانوذرات از 30 به 60ppm، مقدار HC به میزان ۵/۴ درصد کاهش یافت. افزایش بیشتر غلظت باعث کاهش مونوکسیدکربن شد اما اکسیدهای نیتروژن را ۸٪ افزایش داد. با این حال، گشتاور ۴/۸۹ درصد افزایش یافت [۴۷].

اردی و همکاران یک مطالعه تجربی را در یک موتور احتراق تراکمی تزریق مستقیم، تنفس طبیعی، ۴ زمانه و ۴ سیلندر انجام دادند که با ترکیبات دیزل-بیودیزل (حاصل از سویا)-هیدروژن به عنوان سوخت و نانوذرات اکسید آلومینیوم به عنوان افزودنی کار می‌کرد. آزمایش‌ها بین دور موتور ۱۲۰۰ و ۲۸۰۰ دور در دقیقه و در حالت بار کامل انجام شد. هر آزمایش سه بار تکرار شد و نتایج به منظور اطمینان از جمع‌آوری نتایج دقیق‌تر میانگین‌گیری شد. مصرف سوخت ویژه ترمزی به عنوان پارامتر

<sup>1</sup> Melia Azedarach

عملکردی و مونوکسید کربن، دی اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن به عنوان مشخصات انتشار موتور تعیین شد. افزودنی نانوذرات با کمک یک دستگاه اولتراسونیک با سوخت مخلوط شد. غنی‌سازی هیدروژن از طریق منی‌فولد ورودی انجام شد [۴۸] که از این جهت با مطالعه سلامی و همکاران همسو است.

مدات و همکاران تأثیر ترکیب بیودیزل، سوخت مخلوط نانو، و ترکیب سوخت نانوامولسیون را بر احتراق، عملکرد و همچنین انتشار موتور دیزل دوگانه‌سوز بررسی کردند. نمونه‌های سوخت با نسبت‌های حجمی در یک موتور تک سیلندر از نقطه نظر انتشار گازهای خروجی موتور با سوخت دیزل خالص مقایسه شد که نشان دهنده کاهش انتشار CO، UHC و NOx با افزودن ۲۰۰ پی پی ام تیوسیانات نقره به عنوان افزودنی نانو بود. این کاهش با افزایش درصد حجمی هیدروژن افزایش یافت که در آن ترکیب سوخت  $D50B50N200 + 4\% H2O2$  مقادیر انتشار آلاینده کمتری داشت. گاز هیدروژن به دلیل افزایش نسبت سطح/حجم نانوذرات و وقوع پدیده‌های ریز انفجار ذرات سوخت پاشیده شده، باعث افزایش فشار درون سیلندر و نرخ انتشار حرارت می‌شود. کاهش قابل توجهی در مصرف سوخت ویژه ترمزی به دلیل تأثیر مثبت استفاده از ترکیب نانو بیودیزل و سوخت‌های نانو امولسیون مشاهده شد. افزایش راندمان حرارتی ترمزی برای سوخت‌های بیودیزل ترکیبی و نانوامولسیونی بیودیزل نشان داده شد، که در آن  $D50B50N200 + 4\% H2O2$  دارای بالاترین راندمان حرارتی ترمزی با ۲۷/۱۶٪ در مقایسه با همه سوخت‌های آزمایش شده بود [۴۹].

بسیاری از مطالعات انجام شده در حیطه تأثیرات متقابل افزودنی‌ها و هیدروژن در فرایند احتراق دوگانه‌سوز، در حضور افزودنی‌های نانو نشان می‌دهند که از بعد هزینه ای و بازیافت مواد حاصل احتراق اثرات سوئی بر جا می‌گذارند. همچنین ورود نانوذرات به سیستم احتراق و روغن کاری، به مرور زمان می‌تواند موجب فرسودگی موتور شود. در حالی که مطالعات محدودی در مورد بررسی تأثیر افزودنی‌های اکسیژن‌دار بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دوگانه‌سوز با هیدروژن انجام شده است. بررسی ترکیب بهینه از افزودنی‌های چندگانه اکسیژن‌دار (شامل دی متیل کربنات، استین، اتانول و سولکتال) در بیودیزل که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، می‌تواند موضوعی نوآورانه در احتراق دوگانه‌سوز با هیدروژن از نقطه نظر تولید انرژی پایدار و تأثیرات زیست محیطی باشد. بر این اساس مطالعه حاضر می‌تواند به عنوان نقشه راه برای بررسی چندگانه تولید انرژی از منبعی پاک مانند هیدروژن باشد. تحقیق حاضر ویژگی‌های عملکردی و انتشار آلاینده‌گی موتور احتراق تراکمی دوگانه‌سوز با سوخت دیزل-بیودیزل-هیدروژن را در حضور ترکیب بهینه ای از افزودنی‌های دی متیل کربنات، اتانول، استین و سولکتال مورد بررسی قرار می‌دهد.

## روش کار

این تحقیق در دو مرحله صورت گرفته است که در اینجا به بیان جزئیات هر مرحله پرداخته می‌شود. مرحله اول آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها و نحوه تهیه افزودنی ترکیبی را ارائه می‌دهد. در مرحله دوم نحوه انجام آزمون‌های موتوری توضیح داده می‌شود و تحلیل‌های متقاضی ارائه می‌شود.

### آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها

در این مطالعه سوخت بیودیزل با استفاده از ترانس استریفیکاسیون حاصل از پسماند روغن آشپزی، الکل متانول (با نسبت الکل به روغن ۶:۱) و کاتالیزور سدیم هیدروکسید در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در مدت زمان ۳۰ دقیقه با شدت هم زنی ۶۰۰

دور در دقیقه تولید شد [۵۰].

برای تولید HHO از یک ژنراتور نوع سلول خشک استفاده شد [۲۷]. گاز HHO تولید شده در بالای ژنراتور از طریق سوراخ‌هایی در الکتروده‌های بالایی جمع‌آوری شد. گاز تولید شده برای اطمینان از ایمنی سیستم از یک تله آب عبور داده شد. الکترولیت قلیایی با افزودن NaOH به آب مقطر تهیه شد. فرآیند الکترولیز با استفاده از یک دیزل ژنراتور جریان متناوب ۲۲۰ ولت انجام شد. با استفاده از مبدل AC به DC، برق AC به برق مستقیم تبدیل شد. مقدار ولتاژ و جریان توسط مولتی‌متر KYORITSU KEW MATE 2000 اندازه‌گیری شد. مقدار گاز HHO تولید شده با استفاده از حجم آب تخلیه شده (با استفاده از سیلندر مدرج و کرنومتر) اندازه‌گیری شد [۲۷].

خواص ترموفیزیکی سوخت‌های پایه (دیزل، بیودیزل و هیدروژن) بر اساس استاندارد ASTM در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی بیودیزل، دیزل و هیدروژن

Properties	Diesel	Biodiesel	Hydrogen	ASTM Method
Density @ STD	0.84	0.8853	0.0838	D1298
Calorific value (MJ/kg)	42.49	39.77	119.93	D3338
Viscosity @ 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3.95	4.39	-	D3338
Cetane number <sup>1</sup> (-)	50	55	10-May	D613
Auto ignition temperature <sup>2</sup> (°C)	280	415	585	-
Chemical Formula <sup>3</sup>	C <sub>14</sub> H <sub>24</sub>	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> +0.5O <sub>2</sub>	-

قبل از تهیه نمونه‌های سوختی، در ابتدا تصمیم بر تهیه ترکیب بهینه‌ای از افزودنی‌های اکسیژن‌دار گرفته شد. به این ترتیب که در ابتدا ترکیب‌های بهینه افزودنی‌ها در حالت تک سوز با استفاده از ترکیبات ارائه شده در جدول ۲ برای سوخت‌های B0 (دیزل خالص)، B5 (بیودیزل ۵ درصد + دیزل ۹۵ درصد) و B20 (بیودیزل ۲۰ درصد + دیزل ۸۰ درصد) مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به اینکه تعداد نمونه‌ها زیاد بود، و با در نظر گرفتن هزینه اقتصادی تهیه نمونه سوخت‌ها، تصمیم بر استفاده از روش D-Optimal در نرم افزار Design expert برای تهیه کمترین سیاهه آزمون در راستای تهیه بهترین ترکیب از افزودنی‌ها استفاده شد. در این جدول A، B، C، D و E به ترتیب نشانگر بیودیزل، دی متیل کربنات (DMC)، اتانول، سولکتال و استین بوده و سطوح ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب متناظر به مقدار صفر، ۲، ۵، و ۲۰ درصد می‌باشند.

جدول ۲- تعیین سناریوی بهینه برای انجام آزمون موتور در راستای دستیابی به بهترین ترکیب از افزودنی‌ها

Biodiesel	DMC	Ethanol	Solketal	Acetin	Order
Level 2 of A	Level 4 of B	Level 2 of C	Level 3 of D	Level 5 of E	1
Level 2 of A	Level 2 of B	Level 4 of C	Level 3 of D	Level 1 of E	2
Level 2 of A	Level 5 of B	Level 3 of C	Level 4 of D	Level 1 of E	3
Level 3 of A	Level 5 of B	Level 2 of C	Level 2 of D	Level 3 of E	4
Level 3 of A	Level 3 of B	Level 1 of C	Level 4 of D	Level 5 of E	5
Level 2 of A	Level 4 of B	Level 1 of C	Level 2 of D	Level 1 of E	6
Level 1 of A	Level 3 of B	Level 3 of C	Level 2 of D	Level 2 of E	7
Level 4 of A	Level 2 of B	Level 5 of C	Level 2 of D	Level 1 of E	8

Level 2 of A	Level 1 of B	Level 4 of C	Level 2 of D	Level 4 of E	9
Level 4 of A	Level 1 of B	Level 2 of C	Level 3 of D	Level 1 of E	10
Level 1 of A	Level 1 of B	Level 2 of C	Level 1 of D	Level 2 of E	11
Level 1 of A	Level 2 of B	Level 2 of C	Level 5 of D	Level 4 of E	12
Level 2 of A	Level 5 of B	Level 1 of C	Level 5 of D	Level 2 of E	13
Level 3 of A	Level 2 of B	Level 4 of C	Level 1 of D	Level 3 of E	14
Level 1 of A	Level 2 of B	Level 1 of C	Level 3 of D	Level 3 of E	15
Level 4 of A	Level 3 of B	Level 3 of C	Level 5 of D	Level 3 of E	16
Level 3 of A	Level 4 of B	Level 4 of C	Level 5 of D	Level 1 of E	17
Level 1 of A	Level 5 of B	Level 4 of C	Level 1 of D	Level 5 of E	18
Level 3 of A	Level 1 of B	Level 3 of C	Level 1 of D	Level 5 of E	19
Level 1 of A	Level 1 of B	Level 5 of C	Level 4 of D	Level 3 of E	20
Level 2 of A	Level 3 of B	Level 2 of C	Level 1 of D	Level 3 of E	21
Level 4 of A	Level 2 of B	Level 4 of C	Level 4 of D	Level 2 of E	22
Level 3 of A	Level 5 of B	Level 5 of C	Level 3 of D	Level 4 of E	23
Level 4 of A	Level 4 of B	Level 1 of C	Level 1 of D	Level 4 of E	24
Level 1 of A	Level 3 of B	Level 1 of C	Level 1 of D	Level 1 of E	25

بر اساس بررسی‌های انجام شده، ترکیب افزودنی‌ها شامل ۳۰، ۱۵، ۲۸ و ۲۷ درصد (به ترتیب برای DMC، اتانول، سولکتال و استین)، در B0، B2، B5 و B20 انتخاب شدند. بر این اساس افزودنی D<sub>30</sub>E<sub>15</sub>S<sub>28</sub>A<sub>27</sub> به عنوان بهترین ترکیب افزودنی با کمترین هزینه آماده سازی انتخاب شد (با علامت AA در شکل ۱)؛ که در اینجا، D بیانگر دی متیل کرینات، E بیانگر اتانول، S بیانگر سولکتال، و A بیانگر استین است. ترکیبات سوخت در احتراق شامل هیدروژن در ۵ سطح با دبی‌های صفر تا ۲ میلی لیتر بر ثانیه (با گام‌های ۰.۵ میلی لیتر بر ثانیه)، بیودیزل با صفر، ۵ و ۲۰ درصد، و افزودنی تهیه شده با صفر، ۲، ۴، و ۶ درصد بود. آزمون موتور در بار کامل و در دور ثابت (۱۵۰۰ دور در دقیقه) در یک موتور دیزل تک سیلندر مورد انجام شد که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات موتور

Table 3- Engine specifications

Model: HSD1G-178FE
Engine type: Vertical, four-stroke, single-cylinder
Constant speed, Direct injection CI engine
Rated power: 2.8 kW@2200 rpm
Displacement volume: 0.406 L
Cooling type: Air Cooling

برای محاسبه توان ترمزی که همان توان موجود در چرخ لنگر است، از معادله (۱) استفاده شد. در این معادله P عبارتست از توان ترمزی بر حسب کیلووات، T گشتاور بر حسب نیوتون متر و n دور موتور بر حسب دور بر دقیقه است.

$$P = \frac{2\pi Tn}{60000} = \frac{Tn}{9550} \quad (1)$$

برای محاسبه گشتاور از رابطه ۲ استفاده شد. بر اساس این رابطه، گشتاور عبارتست از حاصلضرب نیرو در فاصله عمودی نیروسنج تا مرکز دوران. در این معادله T عبارتست از گشتاور تولید شده توسط موتور در چرخ لنگر (N.m)، F برآیند نیروهای وارده بر حسب (N) و R فاصله گریز از مرکز میل لنگ به (m).

$$T = F \times R \quad (۲)$$

برای پایش و ثبت پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی، از مجموعه‌ای از حسگرها و تجهیزات اندازه‌گیری دقیق استفاده شد. دمای گازهای خروجی موتور با استفاده از ترموکوپل نوع K (ساخت Omega، دقت  $\pm 0.1$  درجه سلسیوس) اندازه‌گیری شد. دمای روغن و هوای ورودی نیز با ترموکوپل‌های مشابه در نقاط مختلف ثبت شد. فشار و گشتاور خروجی موتور به ترتیب توسط سنسور فشار دیجیتال WIKA (مدل S-10، دقت  $0.25\%FS$ ) و دینامومتر مکانیکی مدل HSD1G-178FE اندازه‌گیری شدند. برای تحلیل ترکیب گازهای خروجی، از آنالایزر گاز مدل MRU Delta 1600L استفاده شد که قادر به اندازه‌گیری  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $HC$ ،  $O_2$  و  $NO_x$  با دقت ۱ ppm است. دبی گاز HHO ورودی نیز توسط روتامتر گازی مدل Omega FMA-1600A (دقت  $\pm 1\%FS$ ) کنترل و کالیبره شد. کلیه داده‌ها به صورت پیوسته در سامانه ثبت داده (Data Logger, NI-DAQ) مدل (USB-6211) ذخیره و برای تحلیل آماری مورد استفاده قرار گرفتند.

به منظور اطمینان از دقت داده‌های تجربی، کلیه اندازه‌گیری‌ها با رعایت اصول تکرارپذیری و کالیبراسیون انجام شد. پارامترهای عملکردی شامل توان ترمزی، گشتاور، مصرف سوخت و دمای گازهای خروجی، و نیز آلاینده‌های خروجی ( $CO$ ،  $CO_2$ ،  $HC$ ،  $NO_x$ ) با تجهیزات و حسگرهای مشخص شده در جدول ۴ اندازه‌گیری شدند.

جدول ۴- دقت داده‌های تجربی

Table 4- Accuracies of the experimental data

Measurement Parameter	Instrument/Model	Measurement Accuracy	Description/Location
Exhaust Gas Temperature	K-Type Thermocouple (Omega)	$\pm 0.1$ °C	Exhaust pipe
Torque	Piezo Pressure Sensor (AVL GH12D)	$\pm 0.25\%$ FS	On Dynamometer
Brake Power	Calculated from Torque $\times$ RPM	-	-
Fuel Flow Rate	Volumetric Flowmeter (Model FMA-1600A)	$\pm 1\%$ FS	Fuel path
Pollutant Gases ( $CO$ , $CO_2$ , $HC$ , $NO_x$ , $O_2$ )	Gas Analyzer (MRU Delta 1600L)	$\pm 1$ ppm	Exhaust outlet
HHO Gas Flow Rate	Rotameter (Omega)	$\pm 1\%$ FS	Air intake path

برای کاهش عدم قطعیت، هر آزمایش در سه تکرار مستقل انجام شد و مقدار نهایی هر پارامتر به صورت میانگین سه تکرار  $\pm$  انحراف معیار (SD) گزارش شد. دقت نهایی اندازه‌گیری‌ها با روش تحلیل انتشار خطا (Error Propagation) محاسبه شد.

## نتایج و بحث

### تأثیر نمونه سوخت‌ها بر پارامترهای عملکردی موتور

شکل ۱ نتایج به دست آمده از مقایسه تغییرات توان ترمزی در حضور نمونه سوخت‌ها نسبت به سوخت شاهد را در شرایط بار کامل نشان می‌دهد. این مقایسه بینش قابل توجهی در مورد عملکرد یک موتور دوگانه سوز با استفاده از دیزل، مخلوط‌های بیودیزل (B5 و B20) و گاز HHO (هیدروژن و اکسیژن) ارائه می‌کند.

زمانی که فقط سوخت‌های حاوی بیودیزل را با سوخت شاهد مقایسه می‌کنیم، مشخص است که هر دو سوخت حاوی بیودیزل خروجی BP کمتری نسبت به دیزل نشان می‌دهند، به طوری که با افزایش بیودیزل توان ترمزی کاهش می‌یابد. حداکثر BP برای B5 حدود  $5/693$  کیلو وات است، در حالی که برای B20 حدود  $5/478$  کیلووات است. این روند با یافته‌های مقالات دیگر مطابقت دارد که محتوای بیودیزل بالاتر می‌تواند منجر به کاهش چگالی انرژی و راندمان احتراق به دلیل وجود اکسیژن بیشتر در مخلوط سوخت شود، که می‌تواند عملکرد را در شرایط بار کامل تحت تأثیر سوء قرار دهد [۱۵، ۵۱].

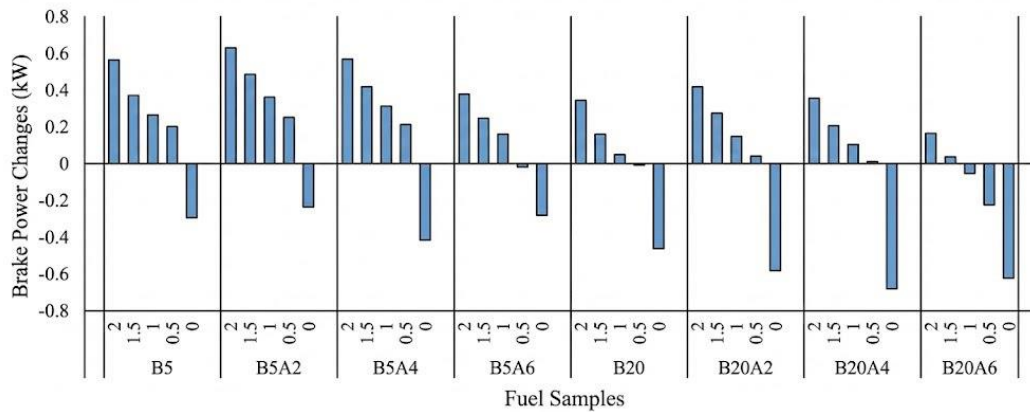


Figure 1- Effect of fuel samples on engine braking power

شکل ۱- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر توان ترمزی موتور

به نظر می‌رسد افزودن گاز HHO بر توان ترمزی در نمونه سوخت‌های خاص تأثیر مثبت دارد. به طوریکه نمونه سوخت B5A2 در حضور ۲ لیتر در ثانیه HHO، بالاترین خروجی BP را نسبت به سایر نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد که به حدود ۵.۷۶۴ کیلووات می‌رسد. این نشان می‌دهد که غلظت متوسط افزودنی‌ها (در بازه مورد آزمایش) می‌تواند بازده احتراق و توان خروجی را افزایش دهد. این یافته‌ها منطبق با برخی مطالعات است که نشان می‌دهد افزودن هیدروژن با تقویت احتراق کامل‌تر، راندمان حرارتی را بهبود می‌بخشد و انتشار گازهای آلاینده را کاهش می‌دهد [۲۷].

در نمونه سوخت‌های B5A6 و B20A6، توان ترمزی در غلظت‌های بالای HHO مقداری کاهش می‌یابد (حدود ۶٪) که نشان‌دهنده اثرات منفی بالقوه بر ویژگی‌های احتراق است. تحقیقات نشان می‌دهد که HHO بیش از حد می‌تواند منجر به احتراق ناقص یا افزایش مدت زمان احتراق شود که ممکن است عملکرد کلی موتور را کاهش دهد [۵۲].

بطور کلی می‌توان جمع بندی کرد که نمونه سوخت B5A2، توان ترمزی را نسبت به حالت B5 افزایش می‌دهد و کمبود توان ترمزی ناشی از افزودن بیودیزل به سوخت دیزل را کمی جبران می‌کند. این افزایش توان با حضور HHO تقویت می‌شود. بالاترین میزان افزایش توان ترمزی مربوط به نمونه سوخت B5A2 است.

شکل ۲ تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC)<sup>۱</sup> را در حضور نمونه سوخت‌ها نسبت به سوخت شاهد نشان می‌دهد. مقادیر BSFC برای B5 و B20 به طور کلی بالاتر از مقادیر دیزل است، که نشان می‌دهد ترکیبات بیودیزل از نظر مصرف سوخت کارایی کمتری دارند. این ادعا با تحقیقاتی مطابقت دارد که نشان می‌دهد بیودیزل معمولاً چگالی انرژی کمتری در مقایسه با سوخت دیزل دارد که منجر به دبی مصرف سوخت بالاتر می‌شود [۵۳].

بالاترین میزان مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به نمونه سوخت‌های B20A2، B20A4 و B20A6 در تمام دبی‌های HHO است. این روند پیشنهاد می‌دهد، در درصدهای بالاتر بیودیزل، بهتر است تلفیقی از HHO و افزودنی مورد نظر وجود نداشته باشد. این را می‌توان به احتراق ناقص یا تایمینگ احتراق نامناسب به دلیل وجود ماده افزودنی نسبت داد که می‌تواند بازده کلی را تحت تأثیر سوء قرار دهد.

<sup>1</sup> Break Specific Fuel Consumption (BSFC)

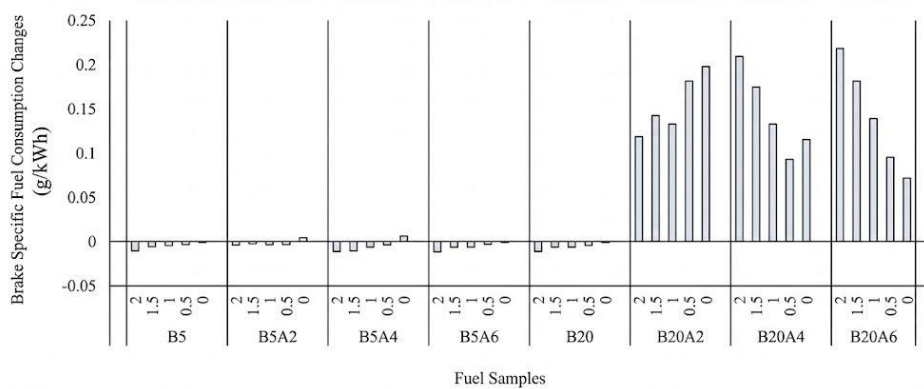


Figure 2- Effect of fuel samples on brake specific fuel consumption (BSFC)

شکل ۲- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC)

### تأثیر نمونه سوخت‌ها بر پارامترهای آلاینده‌گی موتور

شکل ۳ روند تغییرات انتشار مونوکسیدکربن را نسبت به سوخت شاهد برای نمونه‌های سوخت مورد آزمایش نشان می‌دهد. انتشار CO برای سوخت دیزل روند کاهشی را با افزایش دبی HHO نشان می‌دهد، از ۲۵۸ پی‌پی‌ام در ۰ لیتر در ثانیه HHO شروع می‌شود تا حداکثر ۹۹۰ پی‌پی‌ام در ۱ واحد HHO قبل از کاهش به ۸۰۳ پی‌پی‌ام در ۲ واحد HHO ادامه می‌یابد. این نشان می‌دهد که افزودن HHO به بهبود راندمان احتراق کمک می‌کند، زیرا هیدروژن باعث احتراق کامل‌تر می‌شود، که با یافته‌های دیگران مطابقت دارد بطوریکه هیدروژن می‌تواند به طور قابل توجهی انتشار CO را به دلیل انتشار و سرعت شعله بالا کاهش دهد [۵۴، ۶].

با افزایش میزان بیودیزل در سوخت، انتشار CO نسبت به دیزل روند افزایشی نشان می‌دهد. این درحالی است که حضور افزودنی HHO موجب کاهش انتشار مونوکسیدکربن می‌شود. در نمونه سوخت B5 انتشار CO از کاهش ۴۶۶ ppm در ۱ واحد HHO تا ۲۱۰ ppm در ۰ واحد HHO را نشان می‌دهد، در حالی که B20 دارای مقادیر افزایشی ۵۱۲.۶ ppm بوده که با حضور ۱ و ۲ واحد HHO تا تقریباً ۴۰۰ ppm توانسته است میزان انتشار مونوکسید را نسبت به سوخت دیزل کاهش دهد. سطوح بالاتر CO در مخلوط‌های بیودیزل را می‌توان به چگالی انرژی کمتر آنها نسبت داد که می‌تواند منجر به احتراق ناقص در شرایط خاص شود [۵۵، ۱۴].

مخلوط سوختی B20A2 کاهش قابل توجه انتشار CO را نسبت به سوخت دیزل نشان می‌دهد، به ویژه در دبی‌های بالاتر HHO، که می‌توان عنوان کرد ترکیب HHO و درصد پایینی از افزودنی ترکیبی می‌تواند به طور موثر برخی از ناکارآمدی‌های ذاتی مرتبط با احتراق بیودیزل و دیزل را کاهش دهد.

دیزل به طور مداوم انتشار CO کمتری را در مقایسه با هر دو ترکیب B5 و B20 در تمام دبی‌های HHO نشان می‌دهد. این با تحقیقاتی مطابقت دارد که نشان می‌دهد سوخت دیزل معمولاً به دلیل چگالی انرژی بالاتر و ویسکوزیته کمتر، خواص احتراق بهتری نسبت به بیودیزل نشان می‌دهد [۵۲].

به نظر می‌رسد وجود مواد افزودنی در مخلوط‌های بیودیزل باعث افزایش راندمان احتراق، به ویژه در غلظت‌های بهینه (به عنوان مثال، B5A2) می‌شود. با این حال، استفاده بیش از حد از مواد افزودنی ممکن است مزایای بیشتری به همراه نداشته باشد و در صورت کاهش کارآمدی احتراق می‌تواند منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود [۵۶].

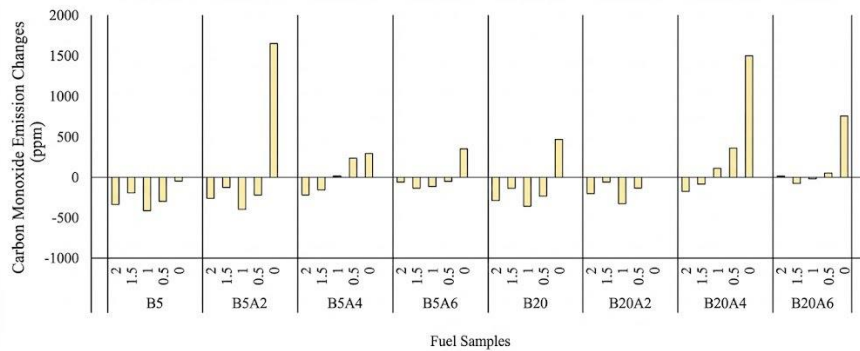


Figure 3- Effect of fuel samples on carbon monoxide emissions

شکل ۳- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار مونوکسیدکربن

شکل ۴ تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در حضور نمونه سوخت‌ها را نسبت به سوخت شاهد ارائه می‌دهد. افزایش میزان انتشار دی اکسیدکربن از یک منظر می‌تواند مربوط به احتراق کامل باشد [۲۰]. اما با محتوای کربن سوخت نیز در ارتباط است. در حالت کلی واقعیت این است که مطالعات به دنبال کاهش انتشارات کربنی در احتراق می‌باشند. برای این که بتوان اثبات کرد نمونه سوخت موجب کاهش انتشار آلایندگی کربنی شده است، بایستی با انتشار مونوکسیدکربن نیز مقایسه شود. همان‌طور که مشخص است نمونه سوخت‌های B5، B5A2 و B20 بالاترین میزان کاهش دی اکسیدکربن نسبت به سوخت دیزل را دارند. انتشار دی اکسیدکربن برای دیزل با افزایش دبی HHO کاهش جزئی نشان می‌دهد که از ۰/۷/۵٪ در ۰ لیتر در ثانیه HHO تا ۰/۷/۸٪ در ۲ لیتر در ثانیه HHO متغیر است که تفاوت زیادی ندارند. این روند نشان می‌دهد در حالی که افزودن HHO می‌تواند راندمان احتراق را افزایش دهد، انتشار کلی دی اکسیدکربن از دیزل نسبتاً پایدار باقی می‌ماند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که موتورهای دیزلی معمولاً به دلیل ویژگی‌های احتراقشان که تحت تأثیر محتوای کربن سوخت است، انتشار دی اکسیدکربن بیشتری تولید می‌کنند.

از طرفی دیگر با مقایسه با مقادیر انتشار مونوکسیدکربن می‌توان مشاهده کرد این نمونه سوخت‌ها همچنین مقادیر مونوکسید کربن را نیز کاهش داده‌اند که با افزایش دبی HHO این کاهش، بیشتر شده است. یکی از دلایل این اتفاق عدم وجود محتوای کربن در نمونه سوخت‌های حاوی HHO است.

هر دو ترکیب بیودیزل انتشار دی اکسیدکربن کمتری را در مقایسه با دیزل نشان می‌دهند. به عنوان مثال، B5 انتشار دی اکسیدکربن را از ۰/۵/۴٪ در ۲ واحد HHO تا ۰/۷/۲٪ در ۰ واحد HHO تغییر می‌دهد، در حالی که B20 دارای مقادیری از ۰/۵/۹۴٪ در ۲ واحد HHO تا ۰/۸/۴٪ در ۰ واحد HHO است. سطوح پایین دی اکسیدکربن در مخلوط‌های بیودیزل را می‌توان به ماهیت تجدیدپذیر آنها و این واقعیت نسبت داد که آنها از زیست توده مشتق شده‌اند که دی اکسیدکربن را در طول رشد گیاه جذب می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد که بیودیزل می‌تواند انتشار خالص دی اکسیدکربن را تا ۰/۷۸٪ در مقایسه با دیزل به دلیل مزایای چرخه عمر آن کاهش دهد [۵۷].

نمونه سوخت B5A2 انتشار CO2 نسبتاً پایدار را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد وجود HHO به حفظ سطوح CO2 پایین‌تر در مقایسه با دیزل استاندارد کمک می‌کند، که نشان دهنده بهبود کاهش انتشار آلایندگی کربنی است. این روند در انتشار مونوکسیدکربن نیز مشاهده می‌شود (شکل ۴).

نمونه سوخت B20A2 نیز کاهش انتشار دی اکسیدکربن را نشان می‌دهد (به ویژه در دبی‌های HHO بالاتر، با مقادیر حدود

۶/۹۳٪ در ۲ واحد HHO). این روند نشان می‌دهد که ترکیب HHO و بیودیزل می‌تواند به طور موثر برخی از انتشار کربنی را که معمولاً با احتراق بیودیزل مرتبط است کاهش دهد.

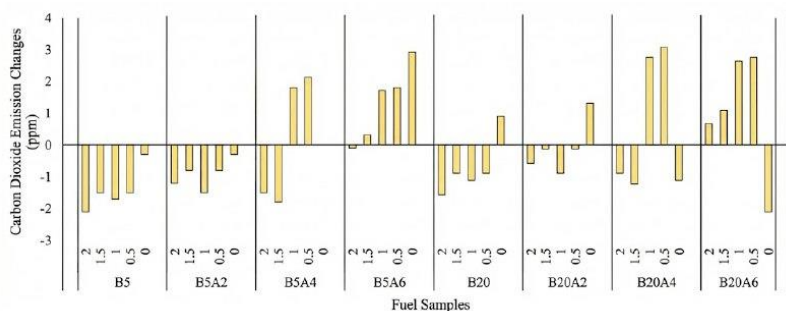


Figure 4- The impact of fuel samples on carbon dioxide emissions

شکل ۴- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار دی اکسیدکربن

شکل ۵ تغییرات انتشار اکسیدهای نیتروژن را نسبت به سوخت شاهد ارائه می‌دهد. بطور کلی می‌توان بیان نمود که افزودن HHO و افزودنی ترکیبی موجب کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت به سوخت دیزل می‌شود. بالاترین میزان کاهش اکسیدهای نیتروژن در حضور سوخت B20A6 رخ می‌دهد. وجود افزودنی گازی می‌تواند با تغییر بازدهی حجمی و فشار داخل محفظه احتراق موجب جلوگیری از تمرکز دما و به دنبال آن کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن شود. می‌توان عنوان کرد، وجود افزودنی ترکیبی به تنهایی در درصدهای پایین بیودیزل نمی‌تواند دلیلی بر کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن شود. اما مشاهده می‌شود با افزایش درصد بیودیزل، وجود این افزودنی می‌تواند به کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن کمک کند و باعث بهبود شرایط احتراق شود. یکی از دلایل این امر وجود اتانول در نمونه افزودنی می‌تواند باشد که با ظرفیت گرمایی خود می‌تواند گرمای محیط احتراق را جذب کرده و موجب جلوگیری از ایجاد تمرکز حرارتی شده و انتشار اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد. این وضعیت با درصدهای بالای بیودیزل دارای همبستگی بالایی است.

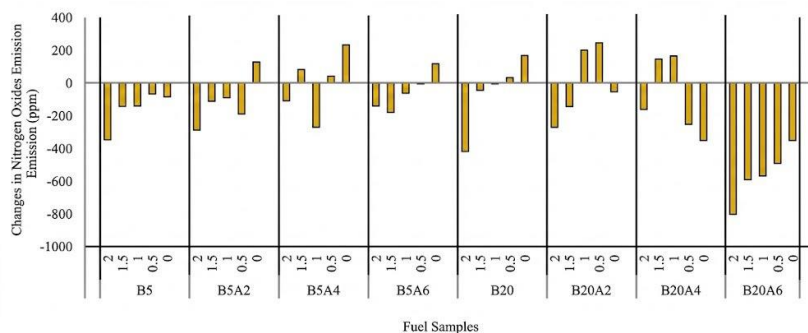


Figure 5- Effect of fuel samples on nitrogen oxide emissions

شکل ۵- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار اکسیدهای نیتروژن

شکل ۶ نشان دهنده تغییرات انتشار هیدروکربن‌های نسوخته در حضور نمونه سوخت‌ها نسبت به سوخت شاهد است. افزودن بیودیزل در مقایسه با دیزل، انتشار UHC بالاتری از خود نشان می‌دهند (به خصوص در B20). به طوری که که نمونه سوخت

B20 دارای انتشار ۴۲.۹ ppm در ۲ واحد HHO است. سطوح بالای انتشار UHC در مخلوط‌های بیودیزل را می‌توان به چگالی انرژی کمتر و محتوای اکسیژن بالاتر آنها نسبت داد، که می‌تواند منجر به احتراق ناقص در شرایط خاص شود [۵۸، ۵۹]. نمونه سوخت B5A2، کاهش قابل توجهی را در انتشار UHC نسبت به سوخت دیزل نشان می‌دهد (به طور متوسط حدود ۴۰ پی پی ام در ۱ واحد HHO). این نشان می‌دهد که افزودنی بهینه همراه با HHO راندمان احتراق را افزایش می‌دهد و منجر به کاهش هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. مطالعات مشابه گزارش کرده‌اند که هیدروژن می‌تواند انتشارات UHC را با بهبود ویژگی‌های احتراق کاهش دهد. نمونه سوخت B20A2 هم کاهش انتشار UHC را نشان می‌دهد، به ویژه در دبی‌های HHO پایین تر. کاهش قابل توجه انتشار UHC نشان می‌دهد که ترکیب HHO و بیودیزل می‌تواند به طور موثر برخی از ناکارآمدی‌های ذاتی مرتبط با احتراق بیودیزل را کاهش دهد [۲۷].

کاهش انتشار UHC مشاهده شده در حضور HHO با یافته‌های مطالعات مختلف که نقش هیدروژن را در بروز احتراق تمیزتر با تسهیل اکسیداسیون کامل تر سوخت برجسته می‌کند، مطابقت دارد [۲۷، ۵۶].

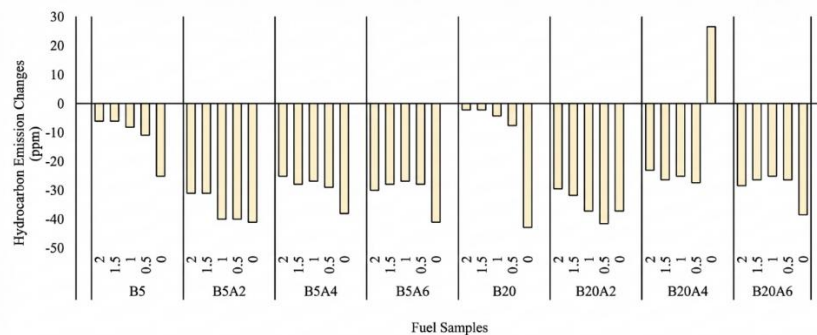


Figure 6- Effect of fuel samples on unburned hydrocarbon emissions

شکل ۶- تأثیر نمونه سوخت‌ها بر انتشار هیدروکربن‌های نسوخته

## نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی تأثیرات افزودنی ترکیبی (دارای محتوای استین، دی متیل کربنات، اتانول و سولکتال) در حضور افزودنی گازی HHO بر میزان انتشار آلاینده‌ها و ویژگی‌های عملکردی سوخت‌های دیزل، B5 و B20 در موتور دیزل پرداخت. مطابق با یافته‌های به دست آمده می‌توان عنوان کرد، حضور افزودنی گازی HHO و افزایش آن در شرایط احتراق به تنهایی می‌تواند برخی از ناکارآمدی‌های سوخت دیزل، B5 و B20 را جبران کند. از طرفی دیگر در شرایط به کارگیری از افزودنی ترکیبی این جبران کمی بهبود می‌یابد. اما به نظر می‌رسد هنوز بالاترین تأثیر ناشی از افزودنی گازی HHO است. اما در شرایط خاص مانند انتشار هیدروکربن‌های نسوخته، یا انتشار اکسیدهای نیتروژن در درصدهای بالای به کارگیری بیودیزل (B20A6) می‌تواند موثر باشد. همچنین کاهش انتشار مونوکسیدکربن مشاهده شده با معرفی HHO با یافته‌های مطالعات مختلف که نقش هیدروژن را در ترویج احتراق تمیزتر با تسهیل اکسیداسیون کامل تر سوخت برجسته می‌کند، مطابقت دارد. با این حال، متعادل کردن مزایای کاهش انتشار مونوکسیدکربن با افزایش پتانسیل اکسیدهای نیتروژن، که اغلب با دمای احتراق بالاتر ناشی از افزودن هیدروژن همراه است، بسیار مهم است. این دو افزودنی (افزودنی گازی و ترکیبی) می‌توانند معایب همدیگر را در شرایط بحرانی پوشش دهند. اگرچه نتایج به دست آمده بیانگر اثر مثبت گاز HHO و افزودنی ترکیبی بر بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌های

موتور دوگانه‌سوز است، اما این پژوهش دارای چند محدودیت است. نخست، آزمایش‌ها در شرایط بار کامل و دور ثابت (۱۵۰۰ rpm) انجام شده‌اند و رفتار موتور در بارهای جزئی و دوره‌های متغیر مورد بررسی قرار نگرفته است. دوم، اندازه‌گیری‌های تجربی محدود به پارامترهای خروجی گاز و مصرف سوخت بوده و تحلیل دقیق‌تر فرآیند احتراق بر اساس فشار داخل سیلندر یا نرخ آزادسازی حرارت صورت نگرفته است. همچنین، در این پژوهش تنها از یک سلول خشک کوچک برای تولید گاز HHO استفاده شد و ارزیابی بازده الکترولیز و مصرف توان آن در مقیاس بزرگ‌تر انجام نشد. شرایط محیطی مانند دما و رطوبت هوا در طول آزمایش ثابت نگه‌داشته شده و تأثیر آن‌ها بر عملکرد موتور بررسی نشده است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

## منابع

- [1] V. Knop, A. Benkenida, S. Jay, and O. Colin, "Modelling of combustion and nitrogen oxide formation in hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 19, pp. 5083–5097, 2008.
- [2] N. Saravanan, G. Nagarajan, C. Dhanasekaran, and K. Kalaiselvan, "Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 16, pp. 4071–4080, 2007.
- [3] I. Dincer, "Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems," *Int. J. Energy Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 29–55, 2007.
- [4] A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11366–11372, 2010.
- [5] H. T. Arat, "Simulation of diesel hybrid electric vehicle containing hydrogen enriched CI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 20, pp. 10139–10146, 2019.
- [6] M. K. Baltacioglu, H. T. Arat, M. Özcanli, and K. Aydin, "Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 8347–8353, 2016.
- [7] I. Trujillo-Olivares, F. Soriano-Moranchel, L. A. Álvarez-Zapata, R. de Guadalupe González-Huerta, and J. M. Sandoval-Pineda, "Design of alkaline electrolyser for integration in diesel engines to reduce pollutants emission," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 47, pp. 25277–25286, 2019.
- [8] A. S. Ramadhas, "Fuels and trends," *Altern. Fuel. Transp.*, vol. 1, 2016.
- [9] R. Cammack, M. Frey, and R. Robson, *Hydrogen as a Fuel: Learning from Nature*. CRC Press, 2001.
- [10] M. S. Yadav, S. Sawant, J. A. Anavkar, and H. V. Chavan, "Investigations on generation methods for oxy-hydrogen gas, its blending with conventional fuels and effect on the performance of internal combustion engine," *J. Mech. Eng. Res.*, vol. 3, no. 9, pp. 325–332, 2011.
- [11] T. Arjun, K. Atul, A. P. Muraleedharan, P. A. Walton, P. Bijinraj, and A. A. Raj, "A review on analysis of HHO gas in IC engines," *Mater. Today: Proc.*, vol. 11, pp. 1117–1129, 2019.
- [12] A. Sudrajat, E. M. Handayani, N. Tamaldin, and A. K. M. Yamin, "Principle of generator HHO hybrid multistack type production technologies to increase HHO gas volume," in *SHS Web of Conferences*, vol. 49, EDP Sciences, 2018.
- [13] T. M. Ismail, K. Ramzy, M. Abelwhab, B. E. Elnaghi, M. A. El-Salam, and M. Ismail, "Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from dry cell," *Energy Convers. Manage.*, vol. 155, pp.

287–300, 2018.

- [14] P. Selvi Rajaram, A. Kandasamy, and P. J. Arokiasamy Remigious, "Effectiveness of oxygen enriched hydrogen-HHO gas addition on direct injection diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Therm. Sci.*, vol. 18, no. 1, 2014.
- [15] E. Akbarian and B. Najafi, "A novel fuel containing glycerol triacetate additive, biodiesel and diesel blends to improve dual-fuelled diesel engines performance and exhaust emissions," *Fuel*, vol. 236, pp. 666–676, 2019.
- [16] E. Akbarian, B. Najafi, M. Jafari, S. Faizollahzadeh Ardabili, S. Shamshirband, and K.-W. Chau, "Experimental and computational fluid dynamics-based numerical simulation of using natural gas in a dual-fueled diesel engine," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 1, pp. 517–534, 2018.
- [17] S. Szwaja and K. Grab-Rogalinski, "Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 4413–4421, 2009.
- [18] T. M. Ismail, K. Ramzy, M. Abelwhab, B. E. Elnaghi, M. Abd El-Salam, and M. Ismail, "Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from dry cell," *Energy Convers. Manage.*, vol. 155, pp. 287–300, 2018.
- [19] T. M. Ismail, K. Ramzy, B. E. Elnaghi, T. Mansour, M. Abelwhab, M. A. El-Salam, *et al.*, "Modelling and simulation of electrochemical analysis of hybrid spark-ignition engine using hydroxy (HHO) dry cell," *Energy*, vol. 181, pp. 1–14, 2019.
- [20] S. F. Ardabili, B. Najafi, M. Aghbashlo, Z. Khounani, and M. Tabatabaei, "Performance and emission analysis of a dual-fuel engine operating on high natural gas substitution rates ignited by aqueous carbon nanoparticles-laden diesel/biodiesel emulsions," *Fuel*, vol. 294, p. 120246, 2021.
- [21] H. Karimmaslak, B. Najafi, S. S. Band, S. Ardabili, F. Haghghat-Shoar, and A. Mosavi, "Optimization of performance and emission of compression ignition engine fueled with propylene glycol and biodiesel-diesel blends using artificial intelligence method of ANN-GA-RSM," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 15, no. 1, pp. 413–425, 2021.
- [22] M. Ozcanli, H. Serin, K. Aydin, and S. Serin, "Ricinus Communis (Castor Oil) methyl ester as a natural additive for biodiesel fuels," *Energy Educ. Sci. Technol. Part A*, vol. 27, pp. 331–336, 2011.
- [23] D. Reece and C. Peterson, "Acute toxicity of biodiesel to freshwater and marine organisms," National Renewable Energy Lab., Golden, CO, USA, Rep., 1995.
- [24] A. Rimkus, J. Matijošius, M. Bogdevičius, Á. Bereczky, and Á. Török, "An investigation of the efficiency of using O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> (hydroxile gas-HHO) gas additives in a CI engine operating on diesel fuel and biodiesel," *Energy*, vol. 152, pp. 640–651, 2018.
- [25] B. Najafi, E. Akbarian, S. M. Lashkarpour, M. Aghbashlo, H. S. Ghaziaskar, and M. Tabatabaei, "Modeling of a dual fueled diesel engine operated by a novel fuel containing glycerol triacetate additive and biodiesel using artificial neural network tuned by genetic algorithm to reduce engine emissions," *Energy*, vol. 168, pp. 1128–1137, 2019.
- [26] B. Najafi, S. Faizollahzadeh Ardabili, S. Shamshirband, K.-W. Chau, and T. Rabczuk, "Application of ANNs, ANFIS and RSM to estimating and optimizing the parameters that affect the yield and cost of biodiesel production," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 1, pp. 611–624, 2018.
- [27] B. Subramanian and V. Thangavel, "Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25479–25492, 2020.
- [28] V. N. Adrian, N. D. Catalin, and C. Radu, "On some possible effects of using renewable oxygenated fuels in a large marine diesel engine," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 966–977, 2022.
- [29] F. H. Shoar, B. Najafi, and A. Mosavi, "Effects of triethylene glycol mono methyl ether (TGME) as a novel oxygenated additive on emission and performance of a dual-fuel diesel engine fueled with natural gas-diesel/biodiesel," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 1172–1189, 2021.
- [30] R. Sedghi, H. Shahbeik, H. Rastegari, S. Rafiee, W. Peng, A.-S. Nizami, *et al.*, "Turning biodiesel glycerol

- into oxygenated fuel additives and their effects on the behavior of internal combustion engines: A comprehensive systematic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, p. 112805, 2022.
- [31] L. Aguado-Deblas, J. Hidalgo-Carrillo, F. M. Bautista, C. Luna, J. Calero, A. Posadillo, *et al.*, "Evaluation of dimethyl carbonate as alternative biofuel: performance and smoke emissions of a diesel engine fueled with diesel/dimethyl carbonate/straight vegetable oil triple blends," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1749, 2021.
- [32] P. Verma, S. Stevanovic, A. Zare, G. Dwivedi, T. Chu Van, M. Davidson, *et al.*, "An overview of the influence of biodiesel, alcohols, and various oxygenated additives on the particulate matter emissions from diesel engines," *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1987, 2019.
- [33] L. Xu, Y. Wang, and D. Liu, "Effects of oxygenated biofuel additives on soot formation: A comprehensive review of laboratory-scale studies," *Fuel*, vol. 313, p. 122635, 2022.
- [34] N. Rahmat, A. Z. Abdullah, and A. R. Mohamed, "Recent progress on innovative and potential technologies for glycerol transformation into fuel additives: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 987–1000, 2010.
- [35] M. R. Monteiro, C. L. Kugelmeier, R. S. Pinheiro, M. O. Batalha, and A. da Silva César, "Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 109–122, 2018.
- [36] A. Cornejo, I. Barrio, M. Campoy, J. Lázaro, and B. Navarrete, "Oxygenated fuel additives from glycerol valorization. Main production pathways and effects on fuel properties and engine performance: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1400–1413, 2017.
- [37] M. G. Bidir, N. Millerjothi, M. S. Adaramola, and F. Y. Hagos, "The role of nanoparticles on biofuel production and as an additive in ternary blend fuelled diesel engine: A review," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 3614–3627, 2021.
- [38] P. Sharma, M. P. Le, A. Chhillar, Z. Said, B. Deepanraj, D. N. Cao, *et al.*, "Using response surface methodology approach for optimizing performance and emission parameters of diesel engine powered with ternary blend of Solketal-biodiesel-diesel," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 52, p. 102343, 2022.
- [39] F. Hashemi, R. Pourdarbani, S. Ardabili, and J. L. Hernandez-Hernandez, "Life Cycle Assessment of a Hybrid Self-Power Diesel Engine," *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, vol. 26, no. 1, pp. 17–28, 2023.
- [40] T. Krexner, I. Kral, A. Gronauer, F. J. Medel-Jiménez, and A. Bauer, "Comparison of a system expansion and allocation approach for the handling of multi-output processes in life cycle assessment—a case study for nano-cellulose and biogas production from elephant manure," *Die Bodenkultur: J. Land Manag. Food Environ.*, vol. 72, no. 3, pp. 113–121, 2022.
- [41] C. Ternel, A. Bouter, and J. Melgar, "Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030," *Transp. Res. D: Transp. Environ.*, vol. 97, p. 102897, 2021.
- [42] B. J. Bora, P. Sharma, B. Deepanraj, and Ü. Ağbulut, "Investigations on a novel fuel water hyacinth biodiesel and Hydrogen-Powered engine in Dual-Fuel Model: Optimization with I-optimal design and desirability," *Fuel*, vol. 345, p. 128057, 2023.
- [43] E. G. Varuvel, "Effect of premixed hydrogen on the performance and emission of a diesel engine fuelled with prunus amygdalus dulcis oil," *Fuel*, vol. 341, p. 127576, 2023.
- [44] K. B. Parimi, B. Sukhvinder Kaur, S. V. P. Lankapalli, and J. Sagari, "Investigation on a diesel engine fueled with hydrogen-compressed natural gas and Kusum seed biodiesel: Performance, combustion, and emission approach," *Heat Transf.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–18, 2022.
- [45] S. S. Halewadimath, N. R. Banapurmath, V. Yaliwal, V. Gaitonde, T. Y. Khan, C. Vadlamudi, *et al.*, "Experimental Investigations on Dual-Fuel Engine Fueled with Tertiary Renewable Fuel Combinations of Biodiesel and Producer—Hydrogen Gas Using Response Surface Methodology," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4483, 2023.
- [46] S. Ramalingam, M. DhakshinaMoorthy, and S. Subramanian, "Effect of natural antioxidant additive on hydrogen-enriched biodiesel operated compression ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 48,

pp. 20771–20783, 2022.

[47] M. J. Eslami, B. Hosseinzadeh Samani, S. Rostami, R. Ebrahimi, and A. Shirneshan, "Investigating and optimizing the mixture of hydrogen-biodiesel and nano-additive on emissions of the engine equipped with exhaust gas recirculation," *Biomass Convers. Biorefin.*, pp. 1–12, 2022.

[48] E. Tosun and M. J. Özcanlı, "Hydrogen enrichment effects on performance and emission characteristics of a diesel engine operated with diesel-soybean biodiesel blends with nanoparticle addition," *Int. J. Automot. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 648–654, 2021.

[49] M. Elkelawy, S. E.-d. H. Etaiw, H. A.-E. Bastawissi, M. I. Ayad, A. M. Radwan, and M. M. Dawood, "Diesel/biodiesel/silver thiocyanate nanoparticles/hydrogen peroxide blends as new fuel for enhancement of performance, combustion, and Emission characteristics of a diesel engine," *Energy*, vol. 216, p. 119284, 2021.

[50] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, M. Alizamir, A. Mosavi, S. Shamshirband, and T. Rabczuk, "Using SVM-RSM and ELM-RSM approaches for optimizing the production process of methyl and ethyl esters," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 2889, 2018.

[51] M. Galal, M. A. Aal, and M. El Kady, "A comparative study between diesel and dual-fuel engines: Performance and emissions," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 174, no. 11-12, pp. 241–256, 2002.

[52] S. Dev, H. Guo, and B. Liko, "A Study on the High Load Operation of a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Engine," *Front. Mech. Eng.*, vol. 6, p. 545416, 2020.

[53] S. Amid, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, A. Hajiahmad, B. Najafi, H. S. Ghaziaskar, *et al.*, "Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends," *Energy Convers. Manage.*, vol. 203, p. 112245, 2020.

[54] M. K. Baltacioglu, R. Kenanoglu, and K. Aydın, "HHO enrichment of bio-diesohol fuel blends in a single cylinder diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 34, pp. 18993–19004, 2019.

[55] S. O. Bitire and T.-C. Jen, "Performance and emission analysis of a CI engine fueled with parsley biodiesel–diesel blend," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 143–153, 2022.

[56] B. Subramanian, T. Venugopal, M. Feroskhan, and R. Sivakumar, "Emission characteristic of a dual fuel compression ignition engine operating on diesel+ hydrogen & diesel+ HHO gas with same energy share at idling condition," in *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 573, IOP Publishing, 2020.

[57] A. Hashemi-Nejhad, B. Najafi, S. Ardabili, G. Jafari, and A. Mosavi, "The Effect of Biodiesel, Ethanol, and Water on the Performance and Emissions of a Dual-Fuel Diesel Engine with Natural Gas: Sustainable Energy Production through a Life Cycle Assessment Approach," *Int. J. Energy Res.*, vol. 47, no. 1, 2023.

[58] D. L. Loo, Y. H. Teoh, H. G. How, J. S. Teh, L. C. Andrei, S. Starčević, and F. Sher, "Applications characteristics of different biodiesel blends in modern vehicles engines: a review," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, p. 9677, 2021.

[59] A. Diané, G. W. Yomi, S. Zongo, T. Daho, and H. Jeanmart, "Characterization, at Partial Loads, of the Combustion and Emissions of a Dual-Fuel Engine Burning Diesel and a Lean Gas Surrogate," *Energies*, vol. 16, no. 15, p. 5587, 2023.