



# Investigating Energy Efficiency, Economic Performance, and Emission of the Diesel Engine Using Natural Gas with a Combination of Biodiesel B5 and B20 in Diesel Fuel

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Haghighat Shoar F.<sup>1\*</sup> MSc,  
Najafi B.<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Haghighat Shoar F, Najafi B. Investigating Energy Efficiency, Economic Performance, and Emission of the Diesel Engine Using Natural Gas with a Combination of Biodiesel B5 and B20 in Diesel Fuel. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(3):143-161.

<sup>1</sup> Biosystems Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

### \*Correspondence

Address: Biosystems Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.  
Phone: -  
Fax: -  
f.haghighatshoar@uma.ac.ir

### Article History

Received: December 17, 2020  
Accepted: January 12, 2021  
ePublished: March 05, 2021

## ABSTRACT

One of the major problems in the world is the supply of energy. Biodiesel is one of the alternative fuels and renewable energy sources. The use of B5 biodiesel in diesel fuel mixtures is common and most countries have planned to use B20 biodiesel. The use of natural gas in diesel engines and the study of the possibility of using it in high quantities is another new solution, which can reduce dependence on diesel fuel. In this study, biodiesel was produced from waste oil by transesterification process and used in two levels of 5 and 20% in diesel composition. Then natural gas was used in three levels of 60, 70, and 80% (% G / T) in the diesel engine. Engine tests were performed at full-load at 1500 rpm. In general, the test results showed that in conditions where biodiesel B20 was used in the composition of diesel fuel and gaseous fuel was used in the amount of 80% in a diesel engine, suitable conditions in terms of reducing emissions, increasing energy efficiency, and reducing economic costs were obtained; Under these conditions, compared to a conventional diesel engine, brake power, and energy efficiency increased by 8.86 and 29.06%, respectively. Also, brake specific fuel consumption, CO, and CO<sub>2</sub> were reduced by 26.5, 57.58, and 4.54%, respectively. Although the amount of NO<sub>x</sub> increased slightly, but, decreased the economic cost compared to diesel 26.47% \$/kwh, so the results were valuable.

**Keywords** Biodiesel, Natural Gas, Diesel Engine, Emissions of Greenhouse Gases, and Economic Performance

## CITATION LINKS

[1] Review of fossil fuels... [2] Impact of natural gas injection... [3] An optical investigation of substitution rates... [4] The exhausted gas recirculation... [5] A novel fuel containing glycerol triacetate additive, biodiesel... [6] Renewable transitions and the net energy from oil liquids... [7] Fossil fuel depletion and socio-economic... [8] Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine... [9] Performance and combustion analysis of diesel... [10] Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion... [11] Performance and combustion analysis of diesel engine... [12] Environmental impacts of biodiesel production... [13] Engine performance, emission and bio characteristics... [14] Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. [15] Experimental Investigation of Waste Vegetable Oil-Diesel Fuel... [16] Modeling of a dual fueled diesel engine... [17] Current scenario and potential of biodiesel production... [18] Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine... [19] Study of the effect of ethyl ester of sunflower oil... [20] Study of Egyptian castor biodiesel-diesel fuel properties... [21] Development and use of emissions inventories... [22] Limiting factors for the use of palm oil biodiesel... [23] Clean Cities Alternative Fuel Price Report. [24] Performance and emission characteristics of variable compression ratio... [25] Study on viscosity and surface tension... [26] Experimental investigations of effects of hydrogen blended CNG... [27] Performance and emission analysis of a dual fuel variable compression ratio (VCR) CI engine... [28] Experimental studies on the biodiesel production parameters optimization... [29] A comparative study on coated and uncoated diesel engine... [30] An experimental study on the influence of an oxygenated... [31] Application of waste cooking oil... [32] Investigation of exhaust emissions from a stationary... [33] Effects of the three dual-fuel strategies... [34] Experimental study of the combustion... [35] Effect of n-butanol and diethyl ether as oxygenated additives... [36] Performance, emission and combustion characteristics of multi-cylinder... [37] Effects on performances, emissions and particle size distributions... [38] Effects of injection timing and injection pressure... [39] Properties investigation and performance analysis...

## بررسی بازدهی انرژی، عملکرد اقتصادی و آلاینده‌ی موتور دیزل با استفاده از گاز طبیعی به همراه بکارگیری ترکیبی از بیودیزل B5 و B20 در سوخت دیزل

فرید حقیقت‌شعار\* MSc

دانشجوی دکتری انرژی تجدید پذیر، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

بهمن نجفی PhD

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

### چکیده

یکی از مشکلات عمده کشورهای جهان، تأمین انرژی مورد نیاز است. بیودیزل یکی از سوخت‌های جایگزین و منابع انرژی تجدید پذیر می‌باشد. در غالب کشورها استفاده از بیودیزل B5 در ترکیب سوخت دیزل مرسوم است و اغلب آن‌ها برای به‌کارگیری ترکیب بیودیزل B20 برنامه‌ریزی کرده‌اند. استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزلی و بررسی امکان بکارگیری آن در درصدهای بالا یک راهکار نوین دیگر هست، که می‌تواند وابستگی به سوخت دیزل را کمتر کند. در این راستا در این مطالعه، بیودیزل با فرآیند ترانس استریفیکاسیون از روغن پسماند تولید شد و در دو سطح ۵ و ۲۰٪ در سوخت دیزل ترکیب گردید. سپس از گاز طبیعی در سه سطح ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ (G/T) در موتور دیزل استفاده شد. آزمایش‌ها موتور در بار کامل و در دور ۱۵۰۰ rpm انجام گرفت. به‌طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که برای شرایطی که از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل و از سوخت گازی نیز در مقدار ۸۰٪ در موتور دیزل استفاده می‌شود، به دلیل کاهش در اغلب آلاینده‌های انتشاری موتور، افزایش بازدهی انرژی و کاهش هزینه اقتصادی، شرایط مناسبی فراهم می‌گردد؛ به طوری که تحت این شرایط در مقایسه با موتور دیزل معمولی، توان ترمزی و بازده انرژی به ترتیب ۸۶/۸ و ۲۹/۰۶٪ افزایش می‌یابد، همچنین مصرف سوخت ویژه ترمزی، CO و CO<sub>2</sub> نیز به ترتیب ۵۸/۵۷ و ۴/۴۵٪ کاهش پیدا می‌کند، هرچند مقدار NO<sub>x</sub> اندکی افزایش می‌یابد، ولی هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل ۴۷/۲۶٪ کمتر می‌شود و لذا از این جهت نتایج ارزشمندی را در پی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** بیودیزل، گاز طبیعی، موتور دیزل، انتشار گازهای گلخانه‌ای و عملکرد اقتصادی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

\*نویسنده مسئول: f.haghighatshoar@uma.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه، یکی از مشکلات عمده کشورهای جهان، تأمین انرژی مورد نیاز است. تقاضای جهانی انرژی به طور سالانه، بیش از ۱۲ میلیارد تن سوخت نفتی (BTOE) می‌باشد، که این منجر به آزادسازی CO<sub>2</sub> ۳۹/۵۰ می‌شود؛ در صورت بکارگیری این سوخت‌های فسیلی با این روند روبه صعود، پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۳۰، تولید گازهای گلخانه‌ای به‌طور سالانه تا ۷۰Gt-CO<sub>2</sub> نیز افزایش یابد<sup>[1]</sup>. جایگزینی منابع انرژی با سوخت‌های کم کربن برای حل مشکلات زیست‌محیطی ضروری است. در میان سوخت‌های فسیلی، گاز

طبیعی سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارد. ایران جزو کشورهایی هست که به لحاظ انرژی گازی سرآمد است؛ لذا استفاده از گاز طبیعی به همراه سوخت دیزل در موتور دیزلی، در شرایطی که مخلوطی مناسب از گاز طبیعی و هوا در محفظه احتراق فراهم شود<sup>[2]</sup>، روش کارآمدی می‌تواند باشد. در این شرایط با جایگزینی بخشی از سوخت دیزل با سوخت گاز طبیعی شرایط مناسب می‌تواند برای دستیابی به احتراق کارآمد و تمیز فراهم شود.<sup>[3]</sup> استفاده از مقادیر پایین گاز طبیعی در موتورهای دیزلی به عنوان راهکاری مناسب بررسی و گزارش شده است<sup>[4]</sup>. در تحقیقی اکبریان و نجفی در موتور دیزلی از گاز طبیعی در مقادیر ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ حجمی استفاده کرده بودند، با توجه به نتایج تحقیقات آن‌ها، با استفاده از گاز طبیعی عملکرد و انتشار آلاینده‌ی از موتور بهبود یافته بود<sup>[5]</sup>. در تحقیقی دیگر لی و همکاران تأثیر نسبت‌های مختلف جایگزینی گاز طبیعی فشرده (CNG) را بر روی ویژگی‌های عملکردی و آلاینده‌ی موتور آزمایش کرده بودند. آزمایش‌ها در مقادیر پایینی از گاز طبیعی فشرده در شرایط مقداری زیر ۵۰٪ حجمی، در موتور دیزل انجام شده بود؛ نتایج آن‌ها نشان داد که از طریق جایگزینی گاز طبیعی فشرده با سوخت دیزل، یک حالت احتراق کارآمد به همراه انتشار آلاینده‌ی پایین برای موتورهای دیزلی حاصل می‌شود.<sup>[3]</sup> اما با توجه به نبود پژوهش در مورد بررسی امکان استفاده از مقادیر بالای گاز طبیعی و بکارگیری ترکیب بیودیزل در مقادیر مختلف، انجام تحقیق در جهت مشخص نمودن اثرگذاری مقادیر بالای گاز طبیعی بر عملکرد و میزان انتشار آلاینده‌های موتور دیزلی دارای اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر نتایج برنامه‌ریزی‌ها، کمبود در تأمین سوخت دیزل را از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰ نشان می‌دهند. این ارزیابی، یک نقطه شروعی را برای حرکت به سمت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر امکان‌پذیر می‌کند<sup>[6]</sup>.

همچنین این پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که، الکتریسیته تولیدی با استفاده از موتورهای دیزلی در نیروگاه‌ها نیز تا سال ۲۰۲۵ قادر به تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان نخواهد بود، اما با گسترش منابع انرژی تجدید پذیر مانند سوخت‌های زیستی و انرژی حاصل از زیست توده، تأمین انرژی تا سال ۲۰۴۰ نیز امکان‌پذیر خواهد بود<sup>[7]</sup>. فناوری‌های پایدار برای تولید منابع انرژی جایگزین از منابع تجدید پذیر به تدریج در حال گسترش است. بیودیزل یکی از محبوب‌ترین سوخت‌های زیستی است. افزایش تقاضا برای استفاده از بیودیزل در موتورهای دیزلی به دلیل اثرگذاری آن‌ها بر روی کاهش مشکلات زیست‌محیطی می‌باشد. تحقیقات متعددی در زمینه افزودن بیودیزل حاصل از منابع مختلف روغنی به سوخت دیزل و بررسی عملکرد آن در موتور صورت گرفته است. در تحقیقی توسط احمد و اوگونوکول تولید بیودیزل از روغن پانداری پلاندرا (Pandary Polyandra) صورت گرفته بود و تاثیر استفاده از این نوع بیودیزل بر روی عملکرد و انتشار آلاینده‌ی موتور دیزل بررسی شده بود، با استفاده از ترکیبات

گزارش شده بود<sup>[13]</sup>. در پژوهشی دیگر توسط عابد و همکاران بیودیزل حاصل از مواد اولیه مختلف (جاتروفا، جلبک و روغن پسماند) با نسبت‌های B10 و B20 با دیزل مخلوط شده بود؛ انجام آزمایش با استفاده از یک موتور دیزلی تک سیلندر صورت گرفته بود. نتایج آن‌ها نشان داده بود که میزان انتشار CO<sub>2</sub>، CO در مقایسه با سوخت دیزل برای مخلوط بیودیزل B10 و B20 (جاتروفا، جلبک و روغن پسماند) کمتر است و میزان انتشار NOx از مخلوط‌های بیودیزل B10 و B20 برای تمامی ترکیبات در مقایسه با سوخت دیزل افزایش می‌یابد<sup>[14]</sup>. در مطالعه‌ای دیگر اویدوپو و همکاران عملکرد موتور دیزل را به صورت تجربی با عملکرد ترکیبات بیودیزل حاصل از روغن پسماند (B5، B10 و B15) بررسی کرده بودند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده بود که تغییرات عملکردی موتور برای B15 و B10 ناچیز است و B5 در مقایسه با B15 عملکرد بهتری را دارد<sup>[15]</sup>. با احتساب فاکتور هزینه برای مواد اولیه جهت تولید بیودیزل و همچنین با در نظر گرفتن بحث رقابت غذایی برای مواد اولیه روغنی<sup>[16]</sup>، ملاحظه می‌شود که اگر بیودیزل از روغن‌های پسماند تولید شود، می‌تواند با سوخت‌های فسیلی رایج به لحاظ اقتصادی رقابت کند. استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت تجدید پذیر برای تأمین انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)، به سرعت در حال افزایش است<sup>[17]</sup>. بیودیزل در ساختار شیمیایی خود حاوی ۱۰ تا ۱۲٪ اکسیژن می‌باشد که سبب کاهش انتشار گازهای خروجی موتور می‌شود<sup>[18,5]</sup>. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل می‌تواند میزان انتشار آلاینده‌های کربنی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد<sup>[19,20]</sup>. روش ترانس‌استریفیکاسیون در فرآیند تولید بیودیزل رایج است. در حال حاضر، استفاده از ۵٪ مخلوط سوخت بیودیزل و دیزل (B5) مرسوم است و بیشتر کشورها برای استفاده از ۲۰٪ بیودیزل (B20) برنامه‌ریزی کرده‌اند<sup>[21]</sup>. تحقیقات نشان می‌دهد که بیودیزل می‌تواند تا ۲۰٪ در سوخت دیزل ترکیب شود و در موتور دیزل استفاده شود<sup>[20]</sup>. با توجه به تحقیقات صورت گرفته‌شده، ملاحظه می‌شود که تأثیر استفاده از گاز طبیعی (NG) در مقادیر بالا در موتور دیزل مشخص نیست و در محدود تحقیقات صورت گرفته هم گاز طبیعی با مقادیر پایین زیر ۵۰٪ حجمی استفاده شده است و یا در برخی نیز از گاز طبیعی فشرده (CNG) استفاده شده است، این در حالی است که در تحقیق حاضر از گاز طبیعی (NG) در موتور دیزل استفاده می‌شود؛ که در این حالت نحوه‌ی بکارگیری سوخت گازی نیز با روش متفاوت در مقایسه با دیگر پژوهش‌ها ذکر خواهد شد. از طرفی دیگر تأثیر این مقادیر بالا از گاز طبیعی (NG) در کنار استفاده از ترکیب بیودیزل در مقادیر B5 و B20 در موتورهای دیزلی نیز بررسی نشده است؛ تولید بیودیزل از منابع مختلف روغنی، به دلیل تشکیل متیل استرها یا ترکیبات مختلف دارای اهمیت است، زیرا هر یک از این ترکیبات بیودیزل بر عملکرد موتور و انتشار آلاینده‌ی از آن تأثیرگذار است و از سوی دیگر اثرگذاری این شرایط

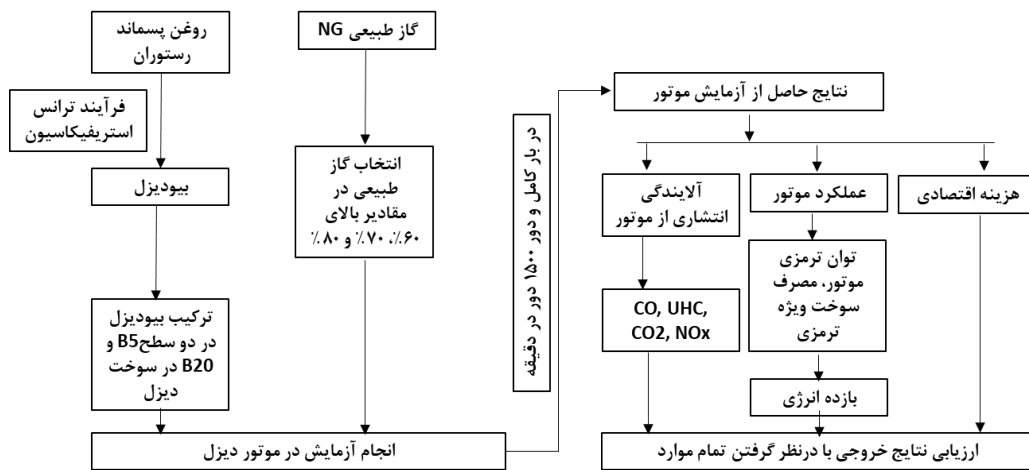
بیودیزل میزان انتشار آلاینده‌هایی مانند دی اکسید کربن، مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن اندازه‌گیری شده بود. نتایج آن‌ها نشان داده بود که ویژگی‌های عملکردی بیودیزل نزدیک به دیزل است و با استفاده از مخلوط بیودیزل انتشار آلاینده‌های مونوکسید کربن و دی اکسید کربن، به ترتیب در ۸۱/۷ و ۶۵/۷٪ در مقایسه با دیزل کاهش می‌یابد، البته به جز اکسیدهای نیتروژن که اندکی افزایش داشت<sup>[8]</sup>. در مطالعه‌ای دیگر توسط گاتوم و کومار بیودیزل از روغن پیه (چربی حیوانی) تولید شده و در نسبت‌های مختلف (۱۰ و ۲۰٪) با دیزل مخلوط و به عنوان سوخت ترکیبی در موتور استفاده شده بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده بود که مصرف سوخت ویژه برای ترکیبی که بیودیزل در آن بکاررفته بیشتر است؛ تحقیق آن‌ها نشان می‌داد که بیودیزل حاصل از چربی حیوانی می‌تواند بدون ایجاد تغییر در طراحی موتور با اثربخشی مناسب استفاده شود<sup>[9]</sup>. در پژوهشی دیگر چاریتها و همکاران عملکرد موتور دیزل را با استفاده از بیودیزل حاصل از روغن پنبه‌دانه (COME) بررسی کرده بودند؛ در تحقیق آن‌ها بیودیزل (COME) به عنوان سوخت از طریق انژکتور سوخت پاشش شده بود و تزریق سوخت دیزل از طریق منیفولد ورودی صورت گرفته بود. طبق نتایج آن‌ها، کاهش همزمان NOx و انتشار CO<sub>2</sub> با استفاده از بیودیزل COME بدست آمده بود؛ به‌طوری که ۲۲٪ کاهش در NOx و ۳۰٪ کاهش انتشار کربن دی‌اکسید را فراهم نموده بود<sup>[10]</sup>. در تحقیقی دیگر آزاد و رسول عملکرد موتور دیزل را با استفاده از بیودیزل حاصل از روغن هسته انگور و روغن پسماند بررسی کرده بودند؛ این آزمایش با استفاده از یک موتور چهار سیلندر، چهار زمانه دیزل همراه با یک دینامومتر الکترومغناطیسی انجام شده بود و مخلوط بیودیزل B5 و B10 برای هر دو نمونه بررسی شده بود. آزمایش در شرایط بار کامل صورت گرفته بود؛ این مطالعه بیودیزل B5 را به عنوان ترکیبی مناسب به لحاظ عملکردی در موتور دیزل گزارش کرده بود<sup>[11]</sup>. در تحقیقی دیگر توسط کامیل و همکاران تولید بیودیزل از پسماند قهوه صورت گرفته بود و ترکیب B5 تا B20 بررسی شده بود. جهت مقایسه نتایج، سوخت دیزل خالص به عنوان معیار در نظر گرفته شده بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده بود که، ترکیب بیودیزل انتشار کمی از CO<sub>2</sub>، CO را تولید می‌کند؛ برای ترکیب B5 این انتشارها به ترتیب ۰/۳۴ و ۱۲/۵٪ کاهش را نشان داده بود، ولی سطح بالاتری از انتشار NOx از هردو ترکیب بیودیزل گزارش شده بود<sup>[12]</sup>. در تحقیقی دیگر ده‌ارماراجا و همکاران بررسی عملکرد موتور و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌های بیودیزل مشتق شده از روغن سبوس برنج را در روی یک موتور چهار زمانه و تک سیلندر در ۱۵۰۰ دور در دقیقه مورد بررسی قرار داده بودند. نتایج آن‌ها نشان داده بود که ترکیب بیودیزل B20 منجر به تأخیر در احتراق کمتری می‌شود و فرآیند احتراق را نیز بهبود می‌دهد و سبب تبخیر سریع سوخت می‌شود. برای این ترکیب بیودیزل، بالاترین بازده انرژی و پایین‌ترین میزان انتشار CO

۲- مواد و روش‌ها

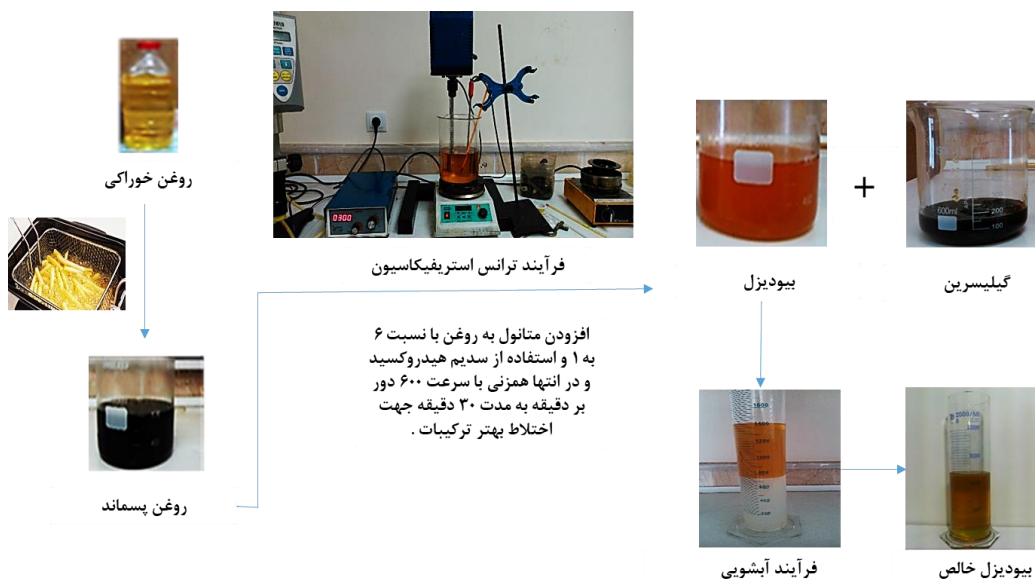
۲-۱- فرآیند تولید بیودیزل از روغن پسماند رستوران و اندازه‌گیری خواص فیزیکی سوخت بیودیزل

با نگاه کلی به تحقیقاتی که تاکنون بر روی سوخت بیودیزل انجام شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که بسته به شرایط و استاندارد آزمایش، مواد اولیه بکار رفته برای تولید سوخت و نوع موتور مورد آزمایش، نتایج متفاوتی از این سوخت‌ها حاصل می‌شود؛ دلیل عمده تناقض نتایج محققین در این است که خواص فیزیکی بیودیزل به شدت به نوع و مقدار تری‌گلیسیریدهای موجود در روغن‌ها وابسته است. در میان منابع مختلف روغنی، تولید بیودیزل از روغن پسماند به دلیل مدیریت آن و جلوگیری از مشکلات زیست‌محیطی و بحث عدم رقابت این محصول با محصولات غذایی اهمیت دارد. لذا در این تحقیق، بیودیزل از روغن پسماند رستوران با استفاده از فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون تولید شد (شکل ۲). روغن پسماند از محل رستوران سلف دانشگاه محقق

بر روی عملکرد بازده انرژی و شرایط اقتصادی به وجود آمده هم یک عامل مشخص مهمی است که بر روی آن در تحقیقات بحث نشده است، این در حالی است که تغییر هر یک از متغیرهای قابل اندازه‌گیری موتور و ترکیبات سوخت ورودی می‌تواند منجر به تغییرات عملکردی موتور، انتشار آلاینده‌ی موتور، بازده انرژی و هزینه اقتصادی شود؛ در این راستا در این پژوهش برای اولین بار تأثیرگذاری بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران در حالت‌های B5 و B20 به همراه شرایطی که از مقادیر بالایی از گاز طبیعی (۶۰٪، ۷۰٪ و ۸۰٪) نیز در موتور دیزل استفاده می‌شد، بررسی گردید و همچنین اثرات زیست‌محیطی، عملکردی موتور و همچنین تأثیرات اقتصادی آن نیز بررسی شد، تا شرایط مناسب در راستای بهبود عملکرد موتور و میزان آلاینده‌های انتشاری را مشخص سازد. در قالب ساختاری شماتیک، کلیه مراحل انجام این تحقیق در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱) مدار شماتیک از مراحل انجام تحقیق



شکل ۲) فرآیند تولید سوخت بیودیزل از روغن پسماند رستوران

در این تحقیق خواص فیزیکی سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند براساس ASTM اندازه‌گیری شد: تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی سوخت بیودیزل نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات بیودیزل تولیدی بر اساس نتایج آزمایش GC-Mass

مقدار نمونه	مقدار نمونه	مقدار نمونه	مقدار نمونه
اولئیک اسید 3.75%	اوکتادکانوئیک اسید 37.66%	دوکانوئیک اسید 3.49%	اوکتادکانوئیک اسید 1.46%
لینولئیک اسید 1.22%	اوکلانوئیک اسید 0.74%	تترادکانوئیک اسید 11.59%	اوکتادکانوئیک اسید 0.18%
پنتادکانوئیک اسید 7.17%	هگزادکانوئیک اسید 20.25%	نونادکانوئیک اسید 0.14%	هینیکوسانوئیک اسید 9.29%



دستگاه چگالی سنج دیجیتال مدل DA-130N



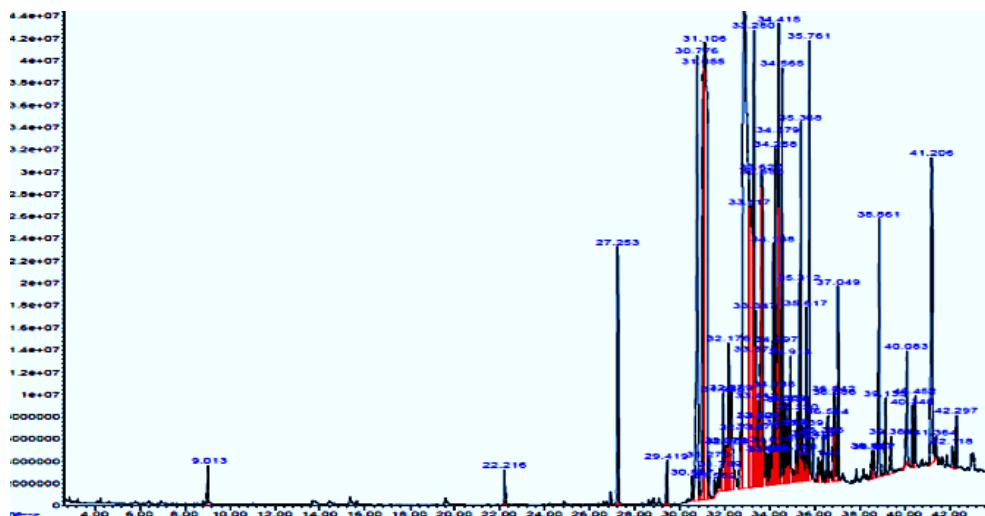
دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل DV-II Prime



اندازه‌گیری نقطه‌ی اشتعال به روش فنجان باز

شکل ۴) تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی سوخت بیودیزل

اردبیلی تهیه شد، این روغن پسماند بعد از پخت و پز صورت گرفته برای وعده‌های غذایی ناهار و شام حاصل شده بود. استفاده از این روغن پسماند در جهت تولید بیودیزل، می‌توانست ضمن مدیریت این نوع پسماند روغنی، به بحث استفاده از انرژی تجدید پذیر و کاهش بکارگیری سوخت‌های فسیلی نیز کمک کند. ابتدا ۲ لیتر از روغن پسماند در درون یک ظرف فلزی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی-گراد حرارت داده شد، تا اگر آبی در داخل روغن وجود داشته باشد از آن حذف گردد. سپس در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون، ۸۰۰ گرم از این روغن پسماند تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. در ادامه متانول با نسبت مولی ۱:۶ به روغن پسماند اضافه شد. هیدروکسید سدیم ۱% (بر اساس وزنی) با متانول مخلوط شد و تا ۷۰°C گرم شد. سپس، محتویات این دو ظرف در دمای ۷۰°C به هم اضافه شدند و به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزنی با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. پس از جدا شدن بیودیزل از گلیسرین، بیودیزل آب شویی شد تا مواد اضافی آن از بین برود [22]. برای دستیابی به بیودیزل با درصد خلوص بالا، این امولسیون سه بار با آب شسته شد، آب شویی با آب مقطر و در دمای ۵۰°C انجام شد. در شکل ۳، نتایج حاصل از آزمون GC-Mass نشان داده شده است. جدول ۱، ترکیبات استر موجود در ترکیب بیودیزل تولید شده را بر اساس نتایج GC-Mass نشان می‌دهد. از آزمون GC-Mass (کروماتوگرافی گازی) برای شناسایی ترکیبات شیمیایی بیودیزل استفاده شده بود. مشخصات دستگاه کروماتوگرافی گازی مورد آزمایش به صورتی بود که شامل، اسپکترومتری جرمی GC:7890A، MS:5975C با لوله‌ای به قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و طول ۳۰ متر بود. آزمون بر اساس استاندارد ASTM D6584 صورت گرفته بود. با توجه به نتایج آزمون GC-Mass، در بیودیزل مذکور درصد استرهای اسید چرب اوکتادکانوئیک اسید، هگزادکانوئیک اسید و تترادکانوئیک اسید بیشتر بود.



شکل ۳) نتایج حاصل از آزمون GC-Mass



مقدار گاز طبیعی به کل سوخت (G/T) نشان داده شده است. m.G جریان جرمی گاز طبیعی (سی سی بر ثانیه) و m.D جریان جرمی سوخت دیزل (سی سی بر ثانیه) می باشد. این رابطه بر اساس درصد بیان می شود.

$$\frac{G}{T} (\%) = 100 \times \frac{m_G}{m_G + m_D} \quad (1)$$

بعد از تنظیم مقدار گاز طبیعی ورودی در ادامه ترکیبات مختلف بیودیزل نیز به صورت جدول ۳، مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه سوخت های مورد آزمایش در این تحقیق به صورت جدول ۳ آماده سازی شده بود:

در این مطالعه، آزمایش ها موتور جهت انتخاب نمونه های مناسب سوخت با عملکرد بالا و با انتشار آلاینده های پایین موتور انجام شد. هدف از این آزمایش ارائه روشی در جهت کاهش هزینه اقتصادی و بهبود بازده انرژی موتور دیزل بود. برای ترکیبات مذکور خصوصیات فیزیکی سوخت های تولید شده توسط استانداردهای ذکر شده در بخش ۱-۲، مورد آزمایش قرار گرفت؛ که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

### ۳-۲- روابط حاکم و روش آزمون موتور با احتساب عدم قطعیت

#### برای نتایج حاصل

در این مطالعه، از یک موتور دیزلی تک سیلندر مدل Kirloskar DA10 هندی، برای انجام آزمایش استفاده شد. آزمایش موتور در شرایط بار کامل صورت گرفت تا بررسی عملکرد سوخت در شرایط

جدول ۳) نمونه های سوخت برای آزمایش موتور

ردیف	نمونه	دیزل (% vol)	بیودیزل (% vol)	گاز طبیعی (%G/T)
۱	دیزل خالص	۱۰۰	۰	۰
۲	دیزل + ۶۰% گاز طبیعی	۱۰۰	۰	۶۰
۳	دیزل + ۷۰% گاز طبیعی	۱۰۰	۰	۷۰
۴	دیزل + ۸۰% گاز طبیعی	۱۰۰	۰	۸۰
۵	بیودیزل B5	۹۵	۵	۰
۶	بیودیزل B5 + ۶۰% گاز طبیعی	۹۵	۵	۶۰
۷	بیودیزل B5 + ۷۰% گاز طبیعی	۹۵	۵	۷۰
۸	بیودیزل B5 + ۸۰% گاز طبیعی	۹۵	۵	۸۰
۹	بیودیزل B۲۰	۸۰	۲۰	۰
۱۰	بیودیزل B۲۰ + ۶۰% گاز طبیعی	۸۰	۲۰	۶۰
۱۱	بیودیزل B۲۰ + ۷۰% گاز طبیعی	۸۰	۲۰	۷۰
۱۲	بیودیزل B۲۰ + ۸۰% گاز طبیعی	۸۰	۲۰	۸۰

جدول ۴) خصوصیات فیزیکی نمونه های سوخت برای آزمایش موتور

نوع	استاندارد ASTM	دیزل خالص	بیودیزل B5	بیودیزل B۲۰
دانسیته در 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	D4052	0.841	0.862	0.884
فلش پوینت (°C)	D93	74	86	88
ویسکوزیته در 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	D445	4.2	4.62	4.91
نقطه ابری شدن (°C)	D5773	-6	-4.7	-3.9
ارزش حرارتی (MJ/kg)	D240	44.58	42.56	41.64

دانسیته سوخت بیودیزل و ترکیبات آن با دیزل، مطابق با استاندارد ASTM D4052، با استفاده از دستگاه دانسیته سنج دیجیتال مدل DA-130N اندازه گیری شد. دقت اندازه گیری دستگاه  $\pm 0.001 \text{ g/cm}^3$  بود. ارزش حرارتی نمونه ها با استفاده از دستگاه بمب کالری متر شرکت Parr، مطابق با استاندارد ASTM D240، اندازه گیری گردید. نقطه ابری شدن نمونه ها مطابق استاندارد ASTM D5773، به وسیله مشاهده شفافیت سوخت که تحت شرایط کنترل شده سرد می گردید، تعیین شد. ویسکوزیته نمونه سوخت های بیودیزل با استفاده از دستگاه ویسکوزیته سنج بروکفیلد مدل DV-II Prime، مجهز به آداپتور UAL، مطابق با استاندارد ASTM D445 در دمای 40°C اندازه گیری شد. دمای نقطه اشتعال یکی از معیارهای سنجش تمایل سوخت به اشتعال می باشد؛ این آزمایش به روش فنجان باز، مطابق با استاندارد ASTM D93 انجام شد. در جدول ۲، خصوصیات فیزیکی بیودیزل در مقایسه با دیزل و گاز طبیعی نشان داده شده است.

بنابراین این جدول نشان می دهد که بیودیزل حاصل از روغن پسماند دارای برخی ویژگی های مفیدی است که می تواند آن را به یک افزودنی مناسب برای استفاده در موتورهای دیزلی تبدیل کند. به عنوان مثال، وجود اکسیژن زیاد در ساختار آن می تواند دلیل اصلی انتخاب این افزودنی برای استفاده در ترکیبات سوخت دیزل باشد.

### ۲-۲- ترکیبات سوخت و تعیین خواص فیزیکی ترکیبات مختلف آن

در این مطالعه، مخلوط بیودیزل (B20 و B5) به دیزل اضافه شد و به همراه استفاده از گاز طبیعی در مقادیر مختلف در موتور دیزل بررسی شد. همان طور که در بخش مقدمه تحقیق بیان شد، امکان استفاده از مقادیر بالای گاز طبیعی در موتور دیزل مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین این مطالعه در کنار استفاده از مقادیر مختلف بیودیزل، مقادیر مختلف گاز طبیعی را نیز در درصدهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰% (G/T) بررسی نموده است. از رابطه ۱، برای تعیین مقدار گاز طبیعی مورد نظر جهت استفاده در موتور دیزل، استفاده شد. در این روش، با جایگزینی بخشی از سوخت دیزل با سوخت گاز طبیعی احتراق صورت می گرفت. گاز طبیعی از طریق مسیر ورودی هوا وارد مخلوط کننده هوا و سوخت (همزن) می شد و سپس وارد محفظه احتراق می گردید (شکل ۵). در رابطه ۱، نحوه محاسبه

جدول ۲) خصوصیات فیزیکی بیودیزل در مقایسه با دیزل و گاز طبیعی

نوع	استاندارد ASTM	دیزل	گاز طبیعی	بیودیزل
دانسیته در 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	D4052	0.841	0.55	0.892
فلش پوینت (°C)	D93	74	-	139
ویسکوزیته در 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	D445	4.2	-	5.04
نقطه ابری شدن (°C)	D5773	-6	-	8
ارزش حرارتی (MJ/kg)	D240	44.58	49.1	38.79
فرمول مولکولی		C <sub>14</sub> H <sub>24</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
وزن مولکولی (gr/mol)		192	16.04	270

تعبیه شده بود) استفاده گردید. زمان مصرف ۴ سی سی سوخت توسط کرنومتر در نظر گرفته شد و نیروی ترمزی نیز توسط لودسل اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری پارامترهای انتشار موتور از دستگاه آنالیزور گازی KIGAZ 210 استفاده شد. تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش و مشخصات موتور مورد نظر در شکل ۵ و جدول ۵، نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری توان و گشتاور تولیدشده توسط موتور دیزل، از یک مولد برق تولید الکتریسیته به عنوان دینامومتر استفاده شد. به این‌گونه که ابتدا با توجه به ابعاد موتور دیزل و مولد برق الکتریکی، یک شاسی آهنی طراحی و ساخته شد و سپس به محور ورودی مولد برق، محوری دیگری دقیقاً در راستای محور اصلی جوش داده شده و مولد برق از طریق دو محور آن (یعنی محور اصلی و اضافه‌شده)، بر روی دو یاتاقان سوار شد و به صورت کاملاً معلق قرار گرفت. محور اصلی مولد برق از طریق یک کولپینگ دقیقاً در یک راستا به محور خروجی موتور دیزل متصل گردید. برای اندازه‌گیری گشتاور، در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از مرکز محور مولد برق، تیری به طول ۳۵ سانتی‌متر به بدنه مولد برق متصل شد و طرف دیگر تیر (به صورت لولایی) به یک لودسل متصل گردید

جدول ۵) خصوصیات فیزیکی نمونه‌های سوخت برای آزمایش موتور

نوع موتور	پاشش مستقیم، عمودی، چهار زمانه	تایمینگ پاشش سوخت	26° CA BTDC
قطر سیلندر	۱۰۲ mm	نسبت تراکم	17.5:1
فاصله نقطه مرگ پایین و بالا	۱۱۶ mm	نوع سیستم خنک-کاری	آب خنک
حجم جابه‌جایی	0.948 l	فشار پاشش	۲۰۰ bar
نرخ‌های خروجی	7.4 kW @ 1500 rpm	BMEP	1500 rpm 6.21 bar

بحرانی مورد تحلیل قرار گیرد، عملکرد مناسب موتور در این حالت می‌توانست شرایط عملکردی مطلوب برای حالت‌های دیگر موتور را نیز تضمین کند، زیرا موتور در شرایط بار کامل به دلیل قرار گرفتن در شرایط بسیار سخت عملکردی، نیازمند بکارگیری توان بالا به جهت جلوگیری از افت توان عملکردی موتور است و از این جهت میزان مصرف سوخت بالا و انتشار آلایندگی بالاتری نسبت بقیه حالت‌ها دارد و از طرفی با توجه به اکثر تحقیقات صورت گرفته مشخص گردیده است که با افزایش بار، گشتاور موتور افزایش می‌یابد و این سبب بالا رفتن توان ترمزی موتور می‌شود؛ این تأثیرگذاری برای دور موتور نیز صادق است و لذا با توجه به این عملکرد، دور موتور نیز در دور موتور معمول ۱۵۰۰ rpm تنظیم گردید. دورسنج مورد استفاده در این تحقیق، از نوع مغناطیسی بود که سرعت دورانی موتور را براساس تعداد پالس‌های مغناطیسی که از دنده‌های چرخنده چرخ لنگ ارسال می‌شد، اندازه‌گیری می‌کرد. الکتریسیته تولیدشده توسط مولد برق نیز از طریق یک مقاومت متغیر الکتریکی به المنت‌های حرارتی (هیتر) منتقل می‌گردید و مصرف می‌شد و در نتیجه با تغییر مقاومت الکتریکی موتور تحت بار قرار می‌گرفت. وقتی درجه مقاومت الکتریکی بر روی صفر قرار داشت، عملاً در این شرایط الکتریسیته تولیدشده توسط مولد برق مصرف نمی‌شد و در نتیجه موتور تحت بار قرار نمی‌گرفت و شرایط دور آرام را داشت؛ در صورتیکه درجه مقاومت متغیر الکتریکی، در درجه انتهایی خود قرار می‌گرفت، بار اعمال شده به موتور معادل حداکثر بار دینامومتر (۱۰۰٪ بار دینامومتر) می‌گردید. دمای هوای ورودی و گازهای خروجی از اگزوز، با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مصرف سوخت از پیپت ۱۲ سی‌سی (که دو طرف بالا و پایین آن دو شیر ورودی و خروجی



شکل ۵) تجهیزات آزمایش و موتور دیزلی

جدول ۶) خطا و دامنه برای پارامترهای عملکردی آزمون موتور

ردیف	پارامتر	واحد	محدوده	دقت	صحت	عدم اطمینان
				Resolution	Accuracy	Uncertainty
۱	دور موتور	rpm	1-9,999	1 rpm	±1%	±1.12%
۲	جریان هوای ورودی	m/s	0-10	±1	0.01 m/s	±3.92%
۳	بار	N	0-100	±1	0.1 N	±1.021%
۴	جریان گاز ورودی از فلومتر	CC	0-10000	±1	0.1 CC	±1.794%
۵	انتشار CO	ppm	0-8000	1 ppm	±1	-
۶	انتشار CO <sub>2</sub>	%Vol	0-99	0.1%	±1	-
۷	انتشار NOx	ppm	0-5155	1 ppm	±1	-
۸	انتشار UHC	ppm	0-50	1 ppm	±1	-

همچنین خطای هر یک از پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور نیز محاسبه گردید، مقدار این عدم اطمینان برای نتایج خروجی آزمون موتور از رابطه ۴ حاصل گردید، مقدار عدم اطمینان برای هر یک از شرایط انتشار CO، CO<sub>2</sub>، NOx و UHC به ترتیب +1.242، +1.65، +0.82 و +0.051 بدست آمد و برای مصرف سوخت ویژه و توان ترمزی نیز مقادیر به ترتیب +3.42 و +2.28 حاصل شد. همچنین عدم قطعیت کلی نیز با استفاده از رابطه ۵، محاسبه گردید.

$$Un = [(\delta_{CO})^2 + (\delta_{CO_2})^2 + (\delta_{NOx})^2 + \dots + (\delta_{BSFC})^2]^{0.5} \quad (5)$$

عدم اطمینان کلی (Un) از محاسبه خطاهای انتشار آلاینده‌گی و خطای مصرف سوخت ویژه و توان ترمزی که ذکر گردید حساب شد، لذا هر یک از این متغیرهای مستقل مذکور با نمادهای δCO، δCO<sub>2</sub>، δNOx، δUHC، δBP، δBSFC در رابطه ۵، جایگذاری شده و مقدار عدم اطمینان کلی تعیین گردید، که برابر +3.86 حاصل گردید. در نمودارهای تحلیلی هر کدام از این پارامترها نیز این مقدار تغییرات توسط علامت تغییرات حد بالا و پایین مشخص شده است، که از این جهت با در نظر گرفتن محدوده خطاهای آزمایش تحلیل نتایج آزمایش صورت گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش موتور برای هر نمونه‌ی مختلف سوخت ارائه شده است. بررسی نتایج موتور با مقایسه بین شرایط مختلف ترکیبات سوخت (بیودیزل و مقادیر مختلف گاز طبیعی) و سوخت دیزل خالص انجام گرفته است. ارزیابی اقتصادی مصرف سوخت یکی از مهم‌ترین عوامل جهت تعیین بهترین شرایط عملکردی در موتور دیزل می‌باشد؛ لذا در این پژوهش، هزینه سوخت دیزل، بیودیزل B<sub>5</sub> و B<sub>20</sub> به ترتیب ۲/۵۵، ۲/۵۱ و ۲/۴۹ دلار در هر گالن در نظر گرفته شده است [23]. همچنین هزینه گاز طبیعی نیز ۰/۰۰۸۵ دلار به ازای هر لیتر، در محاسبات اعمال شده است [5]. برای هر نمونه سوخت، هزینه اقتصادی سوخت بر اساس توان ترمزی

(طرف دیگر لودسل به شاسی متصل شده بود). با اندازه‌گیری نیرو از طریق لودسل (بر حسب نیوتن) و ضرب آن در طول تیر (۰/۳۵ متر) گشتاور اعمال شده بر حسب (نیوتن در متر) اندازه‌گیری گردید. از طرف دیگر، با اندازه‌گیری دور موتور (Nrpm) و نیروی وارد شده بر لودسل (F)، توان ترمزی موتور محاسبه شد و سپس در رابطه ۲ قرار داده شد و مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی محاسبه گردید.

$$BSFC = \frac{3600 \times 60 \times 1000 \times m_s}{2\pi \times 0.35 \times F \times N_{rpm}} \quad (2)$$

همچنین توان سوخت (P<sub>fuel</sub>) نیز محاسبه شد؛ پارامترهای مورد استفاده در این رابطه، LHV یا مقدار ارزش حرارتی پایین (با واحد مگاژول بر کیلوگرم) و m.s جریان جرمی سوخت (سی‌سی بر ثانیه) را شامل می‌شدند. همچنین بازده انرژی (η<sub>b</sub>) نیز با رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$\eta_b = \frac{Bp}{P_{fuel}} \times 100 = \frac{Bp}{m_s \times LHV \times 10} \quad (3)$$

برای تمام آزمایش‌های صورت گرفته مقدار خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری اعم از آلاینده سنج و ترمومترها و جریان سنج هوا و مقدار عدم اطمینان بررسی و محاسبه گردید. همچنین برای همه نتایج خروجی از آزمایش موتور، مقدار عدم اطمینان کل محاسبه شد و محدوده خطای آن نیز در تمام نتایج نمودارها اعمال گردید و با در نظر گرفتن محدوده تغییرات خطا و نمایش آن‌ها در نمودارها بحث صورت گرفت؛ همچنین لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌ها موتور، اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور در سه تکرار صورت گرفت و قبل از تحلیل نتایج، به لحاظ آماری بررسی شد و بعد از انجام آزمون معنی‌داری تیمارهای آزمایش در برابر خطاهای آزمایش، به بحث و تحلیل پرداخته شد و لذا از این جهت نتایج با قطعیت کامل بیان شده است. برای خطای اندازه‌گیری دستگاه‌ها، عدم اطمینان داده‌ها با توجه به رابطه ۴ محاسبه شد [16]. که δR مقدار عدم اطمینان و R تابع پاسخ بود، X<sub>1</sub>، X<sub>2</sub>، X<sub>3</sub>، ... و X<sub>n</sub> هم متغیرهای مستقل بودند، همچنین δ<sub>1</sub>، δ<sub>2</sub>، δ<sub>3</sub>، ... و δ<sub>n</sub> نمادهای عدم قطعیت هر متغیر مستقل بودند.

$$\delta_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial X_1} \delta_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X_2} \delta_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X_3} \delta_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial X_n} \delta_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

در تمام آزمون‌های مورد آزمایش موتور با استفاده از رابطه ۴، صحت داده‌های اندازه‌گیری شده تأیید شد و در تکمیل آن از رابطه ۵ نیز در جهت محاسبه عدم اطمینان کل آزمایش استفاده شد. خطا و دامنه برای پارامترهای عملکردی آزمون موتور به شرح جدول ۶ حاصل شده بود.

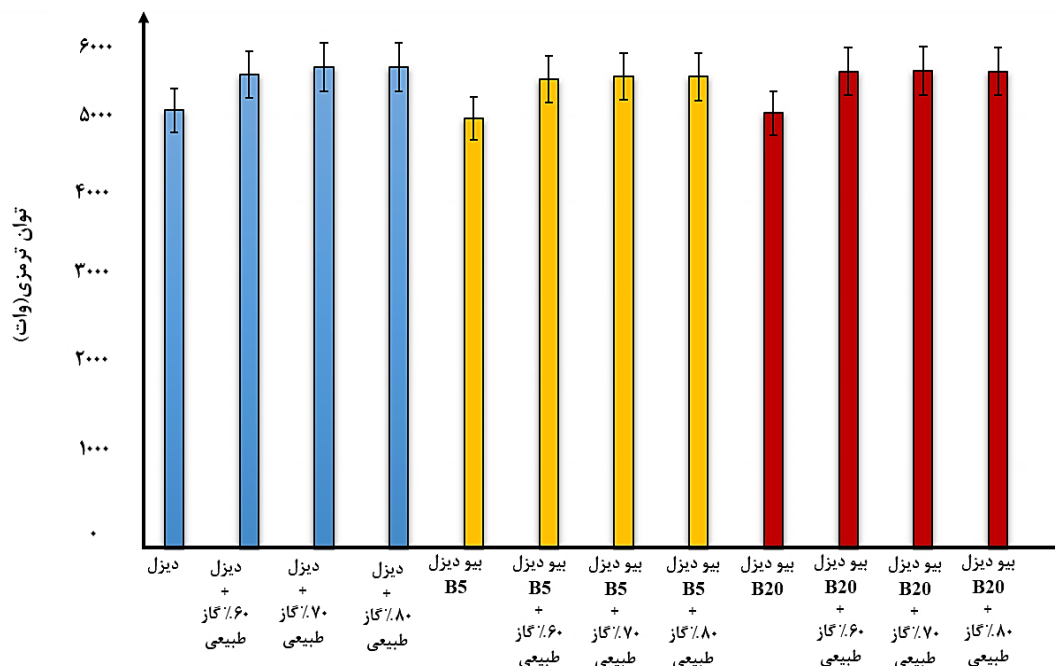


می‌گردید. اما با افزودن گاز طبیعی به موتور دیزل و استفاده از آن افزایش چشمگیری در توان ترمزی موتور ملاحظه شده بود و این شرایط توان ترمزی را برای ترکیبات بیودیزل B5 و B20 نیز بهبود داده بود. در شرایطی که در موتور دیزل فقط از ترکیب دیزل خالص و گاز طبیعی با مقدار ۸۰٪ استفاده شده بود، مقدار توان ترمزی در مقایسه با دیزل به ۹/۸۷٪ افزایش یافته بود؛ در این شرایط هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل خالص  $24/92 \text{ \$/kwh}$  کاهش یافته بود. این نشان می‌داد که به لحاظ اقتصادی هم استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزل به صرفه است. برای شرایطی هم که از بیودیزل B5 در ترکیب سوخت استفاده شده بود، با استفاده از ۷۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل، بالاترین مقدار افزایش توان ترمزی در مقایسه با دیزل برابر با ۷/۷۳٪ حاصل شده بود؛ برای این شرایط هم هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل  $30/44 \text{ \$/kwh}$  کاهش داشت. این در شرایطی بود که با استفاده از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل، در بالاترین مقدار با استفاده از ۷۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل، مقدار توان ترمزی ۹/۰۱٪ افزایش یافته بود و هزینه اقتصادی نیز  $27/73 \text{ \$/kwh}$  کاهش یافته بود. لذا این نتایج نشان می‌داد که استفاده از گاز طبیعی در درصدهای بالا می‌تواند برای بهبود توان ترمزی موتور دیزل موثر باشد. دلیل بهبود توان ترمزی در موتور دیزل برای شرایطی که گاز طبیعی استفاده شده بود می‌توانست مقدار دانسیته پایین گاز طبیعی به محفظه احتراق باشد (جدول ۲)؛ زیرا دانسیته کم گاز طبیعی به دلیل فراهم‌سازی فرصت کافی برای احتراق سوخت، سبب ایجاد شرایط احتراق کامل سوخت می‌گردد و بنابراین توان ترمزی را

محاسبه شده از داده‌های دینامومتر برآورد شده است و سپس مقدار هزینه الکتریسیته تولیدشده بر اساس دلار بر هر کیلووات ساعت بدست آمده است. نتایج تحلیل اقتصادی در کنار نتایج عوامل مشخص آلایندگی و عملکردی موتور برای هر بخش به شرح ذیل می‌باشد.

### ۳-۱- توان ترمزی

توان ترمزی یکی از مهم‌ترین عوامل قابل اندازه‌گیری عملکرد موتور است. با توجه به شکل ۶، ملاحظه می‌شود که افزودن بیودیزل به سوخت دیزل، اندکی توان ترمزی را در مقایسه با دیزل خالص کاهش داده است، مقدار کاهش توان ترمزی برای شرایط بیودیزل B5 و B20 به ترتیب برابر ۱/۸۵ و ۰/۶۵٪ بدست آمده بود. تغییر خواص فیزیکی سوخت بر روی تغییر عوامل قابل اندازه‌گیری عملکرد موتور تأثیرگذار می‌باشد<sup>[24,25]</sup>. با تغییر خواص فیزیکی سوخت، فرآیند احتراق سوخت نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد و لذا به عنوان عامل مهمی در جهت تغییر توان ترمزی می‌تواند، مورد نظر قرار گیرد؛ از این جهت کاهش توان ترمزی می‌تواند مربوط به افزایش دانسیته و ویسکوزیته سوخت باشد (جدول ۴). طبق پژوهش سروانان و همکاران نیز استفاده از بیودیزل سبب کاهش توان ترمزی موتور شده بود، که لذا با نتایج این تحقیق در ارتباط بود. بر اساس تحلیل اقتصادی نیز هزینه الکتریسیته به ازای دلار بر هر کیلووات ساعت نشان می‌داد که، شرایط بیودیزل B5 و B20 در مقایسه با دیزل خالص هزینه اقتصادی را به ترتیب ۱۶/۰۶ و  $4/7 \text{ \$/kwh}$  کاهش می‌دهد. به طور کلی طبق نتایج تحلیل اقتصادی استفاده از بیودیزل B5 و B20 و همچنین گاز طبیعی در اغلب شرایط سبب کاهش هزینه به ازای دلار بر هر کیلووات ساعت



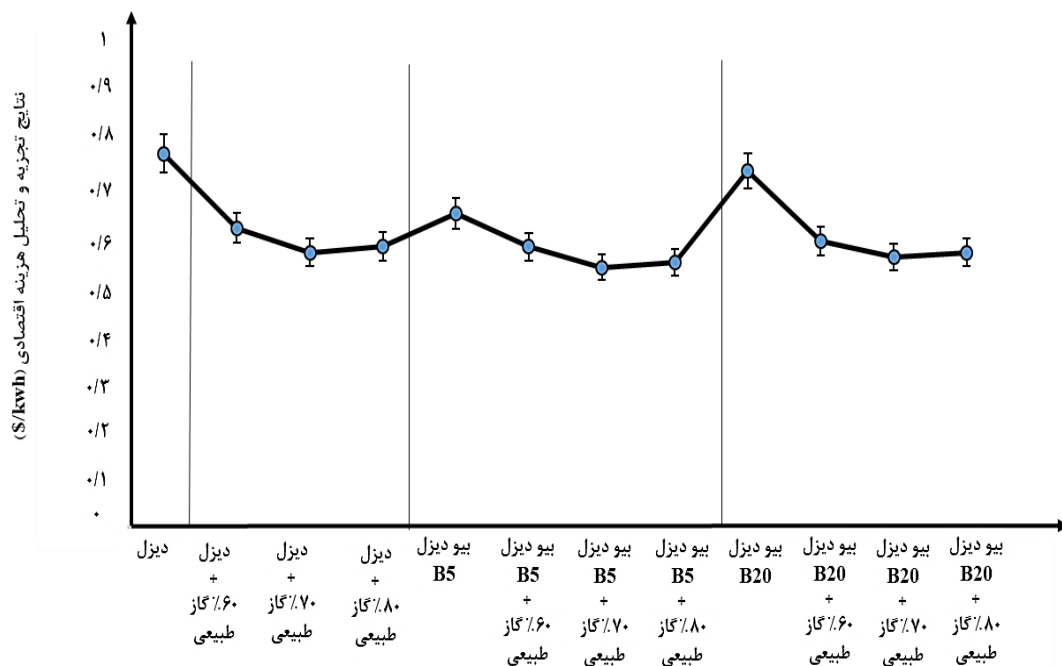
شکل ۶) توان ترمزی (w)

سوخت ویژه ترمزی موتور نیز صورت گرفته بود. همچنین در مطالعه الکاوی و همکاران به تأثیرگذاری بیودیزل بر روی خواص فیزیکی سوخت پرداخته شده بود، که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد [28]. با بکارگیری گاز طبیعی در موتور دیزل، مقدار کاهش بیش‌تر نیز شده بود و لذا استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزلی عملکرد مثبتی را در کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی به همراه داشت. در موتور دیزل استفاده از ۷۰٪ گاز طبیعی در کنار سوخت دیزل خالص، در مقایسه با موتور دیزلی مرسوم مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی را ۲۶/۶۸٪ کاهش داده بود و این در شرایطی بود که هزینه اقتصادی را هم  $26/4 \text{ \$/kwh}$  کاهش داده بود و لذا از این جهت بااهمیت بود. برای همین شرایط، با استفاده از بیودیزل B5 به جای دیزل خالص مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی و هزینه اقتصادی به ترتیب  $30/71\%$  و  $30/44 \text{ \$/kwh}$  کاهش یافته بود. بنابراین در مقایسه با دیزل خالص استفاده از بیودیزل B5 در جهت نیل به مصرف سوخت ویژه ترمزی پایین و هزینه اقتصادی کمتر در اولویت است. برای شرایطی هم که از بیودیزل B20 در موتور دیزل با گاز طبیعی ۷۰٪ استفاده شده بود، مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی و هزینه اقتصادی در مقایسه با سوخت دیزل به ترتیب  $27/62\%$  و  $27/7 \text{ \$/kwh}$  کاهش یافته بود. لذا با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که استفاده از B5 در ترکیب سوخت دیزل و بکارگیری آن در موتور دیزل با ۷۰٪ گاز طبیعی نسبت به بقیه شرایط مطلوب‌تر است. در کل در موتور دیزلی که از گاز طبیعی استفاده می‌کرد، کاهش بیشتر مصرف سوخت ویژه ترمزی محسوس بود. این می‌تواند به دلیل کاهش دانسیته سوخت باشد (جدول ۲)؛ زیرا کاهش

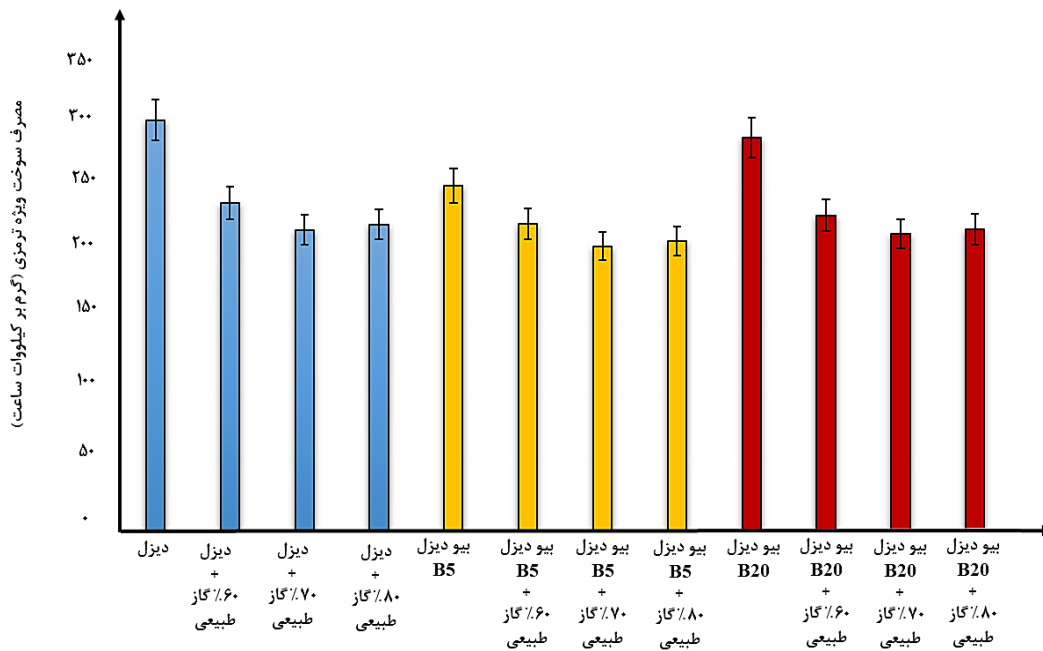
افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش مقدار گاز طبیعی توانسته بود به بهبود احتراق، افزایش درجه حرارت احتراق در حجم ثابت و افزایش نرخ انتشار گرما در مرحله احتراق مخلوط منجر شود [26,27]. همچنین، طبق تحقیقات اکبریان و نجفی و شارما و کاوشال که عملکرد گاز طبیعی را در مقادیر پایین بررسی کرده بودند، استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزل به عنوان عامل مهمی در جهت افزایش توان ترمزی گزارش شده بود، که لذا با نتایج این پژوهش مطابقت دارند [27,5]. نتایج تجزیه و تحلیل هزینه اقتصادی در شکل ۷ نشان داده شده است.

### ۳-۲- مصرف سوخت ویژه ترمزی

مصرف سوخت ویژه ترمزی یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی موتور است. محققان به دنبال کاهش این پارامتر هستند؛ زیرا این امر باعث کاهش هزینه اقتصادی و مقدار سوخت مصرفی در موتور دیزل می‌شود. نتایج شکل ۸، نشان می‌دهد که با استفاده از بیودیزل در هر دو مقدار B5 و B20 مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی کاهش می‌یابد. در مقایسه با دیزل خالص، ترکیب بیودیزل B5 و B20 به ترتیب سبب کاهش ۱۶/۰۲ و ۴/۲۸٪ مصرف سوخت ویژه ترمزی شده بود؛ این کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی سبب کاهش هزینه اقتصادی نیز گشته بود؛ به طوری که برای هر کدام به ترتیب  $16/06 \text{ \$/kwh}$  و  $4/71 \text{ \$/kwh}$  کاهش را در پی داشت. دلیل این کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی با استفاده از ترکیب بیودیزل در سوخت دیزل، کاهش در توان ترمزی می‌باشد (شکل ۶)؛ کاهش توان ترمزی، بنا به تغییر خواص فیزیکی سوخت (دانسیته و ویسکوزیته)، به واسطه بیودیزل افزوده شده به دیزل اتفاق افتاده بود؛ بنابراین به واسطه افزایش ویسکوزیته سوخت، کاهش مصرف



شکل ۷) نتایج تجزیه و تحلیل هزینه اقتصادی (\$/kwh)



شکل ۸) مصرف سوخت ویژه ترمزی (gr/kWh)

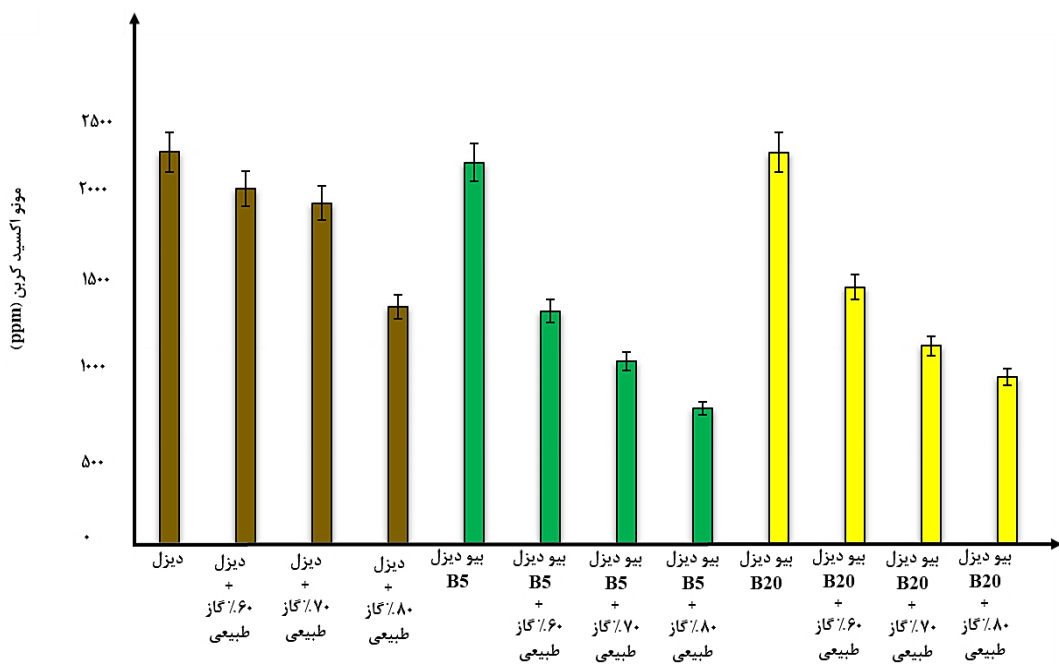
بنابراین این نتایج با نتایج این مطالعه مطابقت داشت، زیرا در این پژوهش نیز مصرف سوخت ویژه کاهش یافته بود.

۳-۳- انتشار مونواکسید کربن CO، دی‌اکسید کربن CO<sub>2</sub> و

هیدروکربن‌های نسوخته UHC

CO یکی از آلاینده‌های قابل توجه موتور دیزل است. افزایش این نوع آلاینده‌های انتشاری سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی فراوانی می‌گردد. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که میزان انتشار CO در حالت دیزل خالص بیش‌تر از حالت‌های دیگر است. این به دلیل

دانسسته سوخت باعث افزایش توان ترمزی موتور می‌شود (بخش ۳-۱) و این افزایش توان ترمزی باعث کاهش مصرف سوخت ویژه می‌شود (رابطه ۲). در موتور دیزل با افزودن گاز طبیعی در مقدار زیاد، این مقدار پایین‌تر از سوخت دیزل نیز حاصل شده بود. افزایش توان ترمزی دلیل این شرایط بود؛ زیرا افزایش توان ترمزی در موتور دیزل منجر به کاهش مقدار مصرف سوخت ویژه می‌شود، همچنین بر اساس مطالعه مصطفی طبق بررسی که بر روی استفاده از مقادیر پایین گاز طبیعی در موتور دیزل انجام داده بودند، کاهش از ۴/۲٪ مصرف سوخت ویژه در مقایسه با دیزل گزارش شده بود[29]؛



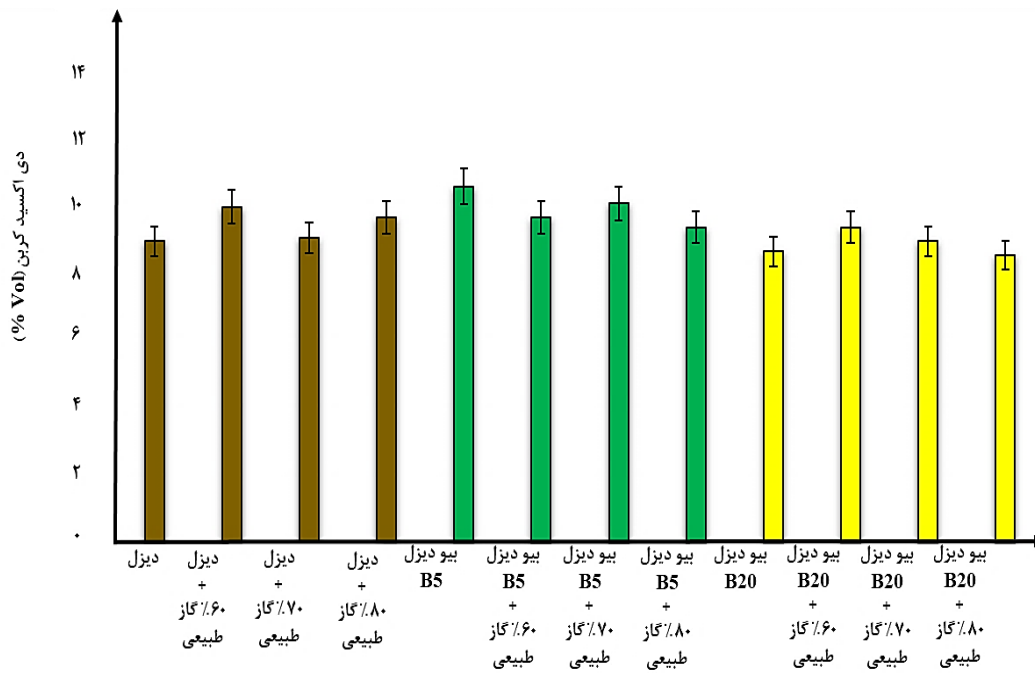
شکل ۹) انتشار مونواکسید کربن CO (ppm)

استفاده از گاز طبیعی می‌تواند عوامل قابل اندازه‌گیری عملکرد مانند توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی را بهبود بخشد و افزودن بیودیزل نیز به دلیل فراهم‌سازی اکسیژن کافی در فرآیند احتراق می‌تواند به بهبود عملکرد این روند، کمک کند. در بین تحقیقات بررسی بر روی استفاده از بیودیزل به همراه مقادیر بالایی از گاز طبیعی در موتور دیزل انجام نشده بود؛ اگرچه طبق نتایج تحقیق سروانان و همکاران که در روی موتور دیزل (بدون استفاده از گاز طبیعی) صورت گرفته بود، افزودن بیودیزل به عنوان راهکاری مناسب در جهت کاهش انتشار CO از موتور دیزل گزارش شده بود<sup>[24]</sup>، که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

آلاینده انتشاری دیگر موتور CO<sub>2</sub> است. بهبود روند احتراق به بهبود خواص فیزیکی سوخت بستگی دارد. بیشتر تحقیقات به اهمیت سوخت‌های اکسیژنه در بهبود احتراق اشاره کرده‌اند. وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی سوخت باعث افزایش بازده تنفسی موتور می‌شود و در نتیجه افزایش بازده حرارتی موتور را نیز ممکن می‌سازد؛ لذا از این جهت فراهم‌سازی مقدار اکسیژن در حد مورد نیاز، بر بهبود فرآیند احتراق تأثیر می‌گذارد. از طرفی با استفاده از بیودیزل ضریب هم ارزی موتور (نسبت هوا به سوخت) نیز افزایش می‌یابد<sup>[28,31]</sup>، لذا این عامل نیز بر تغییر فرآیند احتراق می‌تواند موثر باشد؛ به طوری که طبق نتایج شکل ۱۰، با استفاده از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل ملاحظه می‌شود که مقدار انتشار دی‌اکسید کربن از موتور دیزل کاهش می‌یابد، که این به دلیل وجود نسبت هم ارزی بالای سوخت و در نتیجه ورود هوای بیشتر به داخل محفظه احتراق است، که بر این اساس، این عامل نیز سبب کاهش انتشار آلاینده کربنی شده است؛ از این جهت بیودیزل B20 فرآیند احتراق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی دیگر طبق تحقیقی گزارش شده است که سوخت B20 در میان دیگر ترکیبات بیودیزل عملکرد موتوری تقریباً نزدیکی به عملکرد موتوری دیزل دارد، لذا استفاده از B20 می‌تواند نتایج بهتری را در کنار بهبود دیگر پارامترهای موتور دیزل فراهم سازد<sup>[28,36]</sup>. با افزایش بیودیزل از B5 به B20 در ترکیب سوخت دیزل، انتشار CO<sub>2</sub> کاهش داشت؛ نسبت هم ارزی بیشتر موتور در داخل محفظه احتراق و همچنین بهبود کارایی احتراق می‌تواند از جمله دلایل این کاهش بیش‌تر در مقدار B20 باشد، بنابراین، افزودن B20 در ترکیب سوخت برای کاهش روند انتشار دی‌اکسید کربن موثر می‌باشد.

به طور کلی طبق نتایج شکل ۱۰، استفاده از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن از موتور دیزل راهکار مناسبی است، به خصوص برای شرایطی که این ترکیب در موتور دیزل با گاز طبیعی در مقدار ۸۰٪ بکار گرفته شود که تحت آن شرایط نتیجه مطلوب‌تری را نیز دربر دارد. از نتایج شکل ۱۱، انتشار هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) نیز قابل ملاحظه است که با استفاده از بیودیزل به دلیل دارا بودن اکسیژن در ساختار

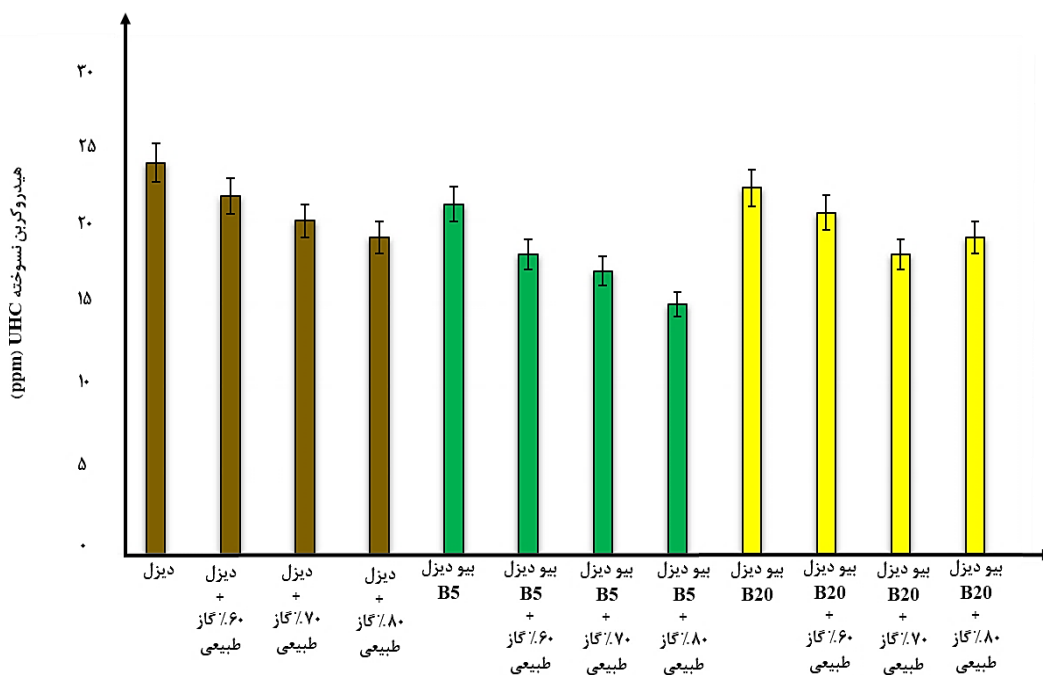
بود اکسیژن در ساختار سوخت دیزل خالص است (جدول ۲). به این دلیل که بیودیزل در ساختار خود حاوی اکسیژن می‌باشد؛ افزودن سوخت‌های اکسیژنه برای کاهش انتشار CO مناسب هستند<sup>[30,31]</sup>؛ بنابراین با افزودن بیودیزل به سوخت دیزل میزان انتشار CO کاهش یافته است. وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی سوخت باعث احتراق مناسب‌تر سوخت و تبدیل مقدار بیشتری از انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی می‌شود، از این جهت فرآیند احتراق و انتشار آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شرایطی که از B5 و B20 در ترکیب سوخت دیزل استفاده شده بود، مقدار انتشار مونواکسید کربن در مقایسه با دیزل به ترتیب ۲/۶۵ و ۱/۰۱٪ کاهش یافته بود و این در شرایطی بود که هزینه اقتصادی را نیز به ترتیب ۱۶/۰۶٪ و ۴/۷٪ کاهش داده بود. همچنین، طبق تحقیقات هوانگ و همکاران و سروانان و همکاران افزودن بیودیزل به سوخت دیزل در کاهش انتشار CO از موتور دیزل تأثیرگذار گزارش شده بود<sup>[24,31]</sup>. ساختار تشکیل‌دهنده سوخت و خواص فیزیکی آن نیز بر عملکرد موتور دیزل تأثیر می‌گذارد؛ زیرا تغییر خواص فیزیکی سوخت بر روی روند پاشش سوخت از انژکتور و احتراق آن نقش دارد. برای موتور دیزل، در اکثر شرایط، استفاده از گاز طبیعی توانسته بود میزان انتشار CO را در مقایسه با موتور دیزل بسیار کاهش دهد؛ این به دلیل پایین بودن مقدار کربن در سوخت گاز طبیعی است (جدول ۲)، که منجر به احتراق پاک‌تر و کاهش انتشار CO شده است؛ همچنین، در تحقیقات انجام‌شده توسط موفیجور و همکاران و کان و همکاران که از گاز طبیعی در مقادیر پایین در موتور دیزل استفاده شده بود، گزارش شده بود که استراتژی استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزل به دلیل بهبود در فرآیند احتراق و جلوگیری از احتراق ناکارآمد سوخت بر کاهش میزان انتشار آلاینده‌های کربنی موثر است<sup>[32,33]</sup>. بنابراین این نتایج با نتایج مطالعه آن‌ها نیز مطابقت داشت. در موتور دیزل استفاده از ۸۰٪ گاز طبیعی در کنار سوخت دیزل، سبب کاهش انتشار مونواکسید کربن تا مقدار ۳۹/۶٪ در مقایسه با موتور دیزل شده بود و این در صورتی بود که هزینه اقتصادی را نیز ۲۴/۹۲٪ کاهش داده بود. همچنین برای شرایطی هم که در این موتور از سوخت B5 به جای دیزل استفاده شده بود، مقدار انتشار مونواکسید کربن به مقدار بیشتری نیز کاهش یافته بود که این به دلیل حضور اکسیژن در ترکیب سوخت می‌باشد، به طوری که تحت این شرایط انتشار مونواکسید کربن و هزینه اقتصادی به ترتیب ۶۵/۵۴٪ و ۲۹/۱٪ کاهش یافته بود. برای شرایطی هم که از سوخت B20 در ترکیب سوخت دیزل استفاده شده بود و ۸۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل بکار گرفته شده بود، مقدار کاهش انتشار مونواکسید کربن بهتر از شرایط موتور دیزل نیز عمل نموده بود، به طوری که تحت آن شرایط مقدار انتشار مونواکسید کربن و هزینه اقتصادی به ترتیب ۵۷/۵۸٪ و ۲۶/۴۶٪ در مقایسه با دیزل بهبود یافته بود. لذا ملاحظه می‌شود که موتور دیزل با



شکل ۱۰) انتشار CO2 (درصد حجمی)

مقدار انتشار دی‌اکسید کربن از موتور دیزل ۳/۴۱٪ کاهش می‌یابد و این در صورتی است که مقدار هزینه اقتصادی نیز \$/kwh ۴/۷٪ کاهش می‌یابد. برای شرایطی هم که این ترکیب در موتور دیزل با ۸۰٪ گاز طبیعی استفاده می‌گردد، مقدار کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل به ترتیب ۴/۵۴٪ و \$/kwh ۲۶/۴۷٪ حاصل می‌شود؛ که ملاحظه می‌گردد

شیمیایی آن، فرآیند احتراق بهبود یافته است و از انتشار هیدروکربن‌های نسوخته جلوگیری شده است و در این میان استفاده از گاز طبیعی نیز سبب بهبود فرآیند احتراق و لذا کاهش این نوع آلاینده انتشاری شده است؛ به طوری که در شرایط استفاده از بیو دیزل B20 در موتور دیزل بکار گرفته با گاز طبیعی ۸۰٪، مقدار انتشار UHC در مقایسه با دیزل خالص ۲۰/۸٪ کاهش یافته است. برای شرایطی که از B20 در ترکیب سوخت دیزل استفاده شود،



شکل ۱۱) انتشار هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)



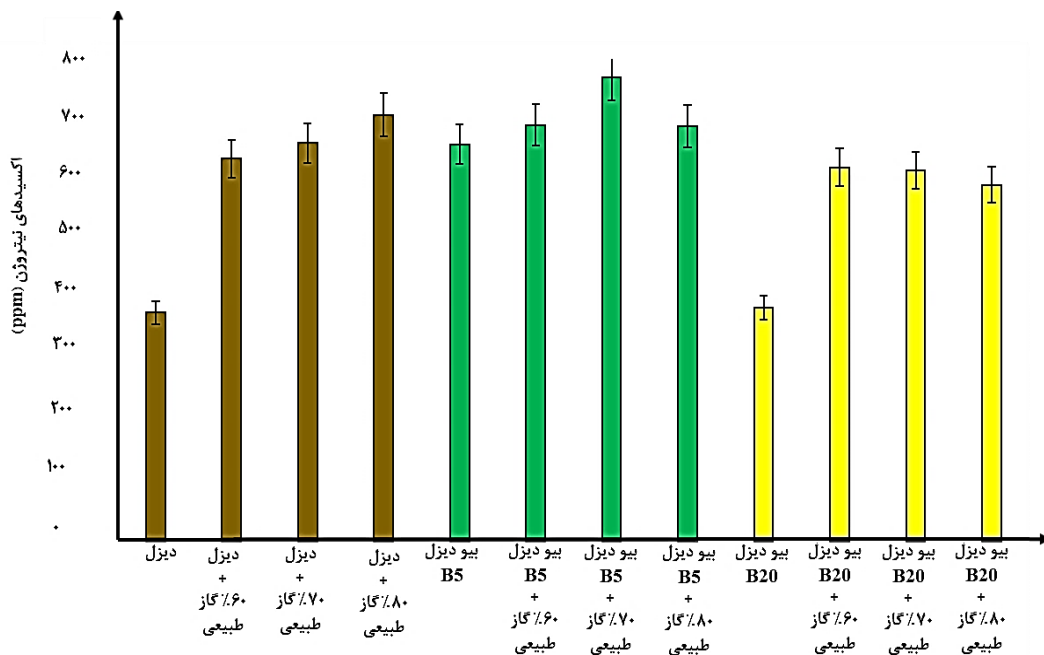
بودند که افزایش ویسکوزیته سوخت و تأثیرگذاری آن در فرآیند پاشش سوخت و احتراق، به عنوان عوامل تأثیرگذاری در انتشار اکسیدهای نیتروژن از موتور دیزل می‌باشد<sup>[38,24]</sup> و لذا با نتایج این تحقیق مطابقت داشت.

همچنین نتایج شکل ۱۲، نشان می‌دهد که برای بیودیزل B20 انتشار NOx نسبت به B5 کمتر است؛ این می‌تواند به دلیل افزایش مقدار اکسیژن در سوخت به واسطه استفاده از بیودیزل B20 باشد، که می‌توانست منجر به ایجاد تغییراتی در زمان احتراق گردد<sup>[31]</sup>؛ همچنین تأثیرگذاری بر دمای احتراق نیز از جمله عوامل قابل اندازه‌گیری مهم است<sup>[36]</sup>، زیرا سوخت‌های اکسیژنی می‌توانند سبب کاهش دمای احتراق شوند و این می‌تواند سبب تغییر در روند انتشار این آلاینده شود، لذا این عامل می‌توانست در کاهش انتشار NOx از مقدار بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل در مقایسه با B5 موثر باشد؛ هرچند در کل شرایط استفاده از بیودیزل در انتشار NOx نسبت به دیزل خالص بالاتر بود. به طور کلی در تمام شرایط به لحاظ کاهش انتشار NOx بیودیزل B20 بهتر از B5 عمل کرده بود. دمای گاز خروجی یکی از پارامترهای عملکردی موتور است که می‌تواند اطلاعاتی در مورد روند احتراق سوخت (بیشتر در مورد دمای شعله احتراق) ارائه دهد. دمای گاز خروجی از موتور می‌تواند بیانگر دمای احتراق موتور باشد و همچنین بر سایر انتشارات موتور (مخصوصاً انتشار NOx) نیز تأثیر بگذارد. در شکل ۱۳ مقدار دمای گازهای خروجی از موتور نیز که اندازه‌گیری شده است، نشانگر این گفته است که دمای گازهای خروجی از موتور در شرایط بیودیزل B5 در ترکیب سوخت دیزل در مقایسه با B20 بیشتر است و لذا این عامل سبب جدا شدن

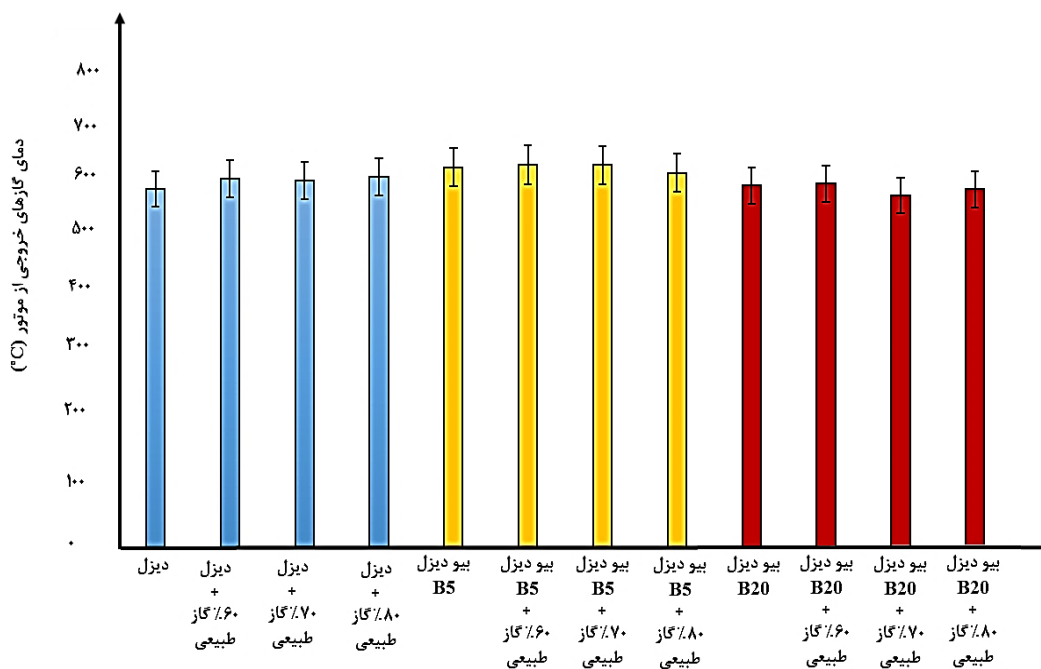
این حالت در مقایسه با بقیه شرایط بهتر عمل کرده است و لذا در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و هزینه اقتصادی موثرتر است. بنابراین میزان انتشار CO2 در موتور دیزل تحت این شرایط به دلیل کم بودن کربن در ترکیب سوخت گاز طبیعی، مناسب‌تر است (جدول ۲). همچنین در تحقیقات دی‌بلازیو و همکاران که استفاده از گاز طبیعی در مقادیر پایین را بررسی کرده بودند، گزارش شده است که افزایش مقدار استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزل در بهبود عملکرد موتور دیزلی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن از آن موثر است<sup>[37]</sup>. در کل نتایج این بخش نشان می‌دهد که استفاده از گاز طبیعی در موتور دیزل به همراه ترکیبی از بیودیزل B20 در جهت کاهش انتشارات کربنی روش کارایی می‌باشد.

#### ۳-۴- انتشار اکسیدهای نیتروژن NOx

انتشار NOx یکی دیگر از آلاینده‌های انتشاری موتور دیزل است، البته انتشار این آلاینده به اندازه CO و CO2 در محیط‌زیست خطر ایجاد نمی‌کند. این انتشار در اثر دمای بالای محفظه احتراق ایجاد می‌شود. طبق نتایج شکل ۱۲، با افزودن بیودیزل B5 در ترکیب سوخت دیزل، میزان انتشار NOx در مقایسه با دیزل اندکی افزایش می‌یابد. این افزایش در مقدار NOx می‌تواند مربوط به تغییر در خاصیت‌های فیزیکی سوخت باشد؛ زیرا این تغییر در خواص فیزیکی سبب ایجاد تغییر در دمای محفظه احتراق و پاشش انژکتور و سایر عملکردهای موتور می‌گردد که همه در انتشار آلاینده‌های موتور تأثیرگذار می‌باشند. این خواص فیزیکی سوخت بیشتر به ویسکوزیته و دانسیته سوخت مربوط می‌شود که سبب تغییر در فرآیند احتراق سوخت می‌گردد؛ طبق تحقیقاتی هم که توسط سروانان و همکاران و جیاقیانگ و همکاران انجام شده بود، انتشار NOx با افزودن بیودیزل B5 افزایش یافته بود و گزارش کرده



شکل ۱۲) انتشار اکسیدهای نیتروژن NOx (ppm)



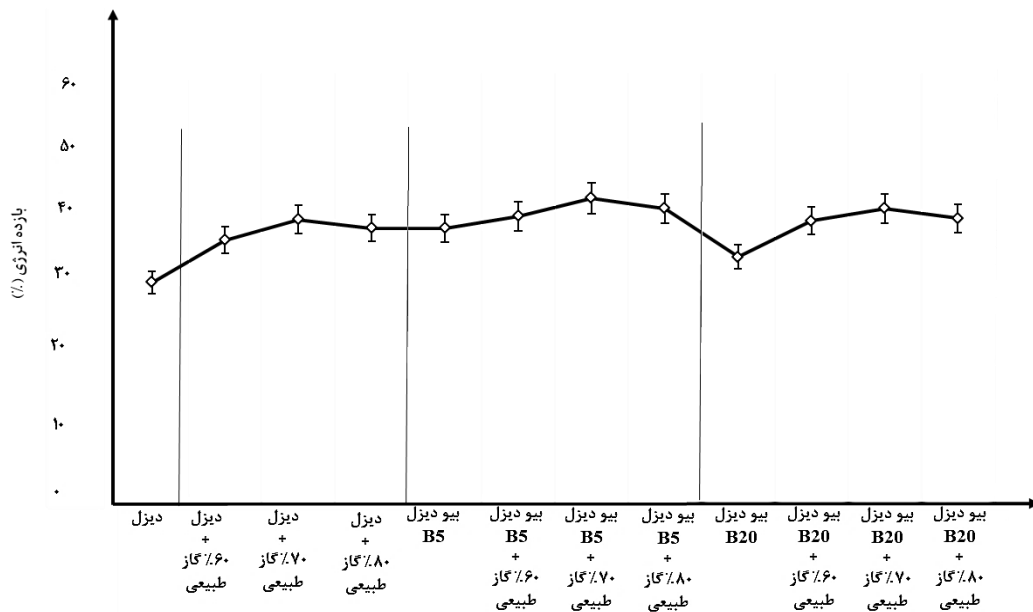
شکل ۱۳) دماي گازهاي خروجي از موتور (درجه سانتی‌گراد)

### ۵-۳- بازده انرژی (η<sub>b</sub>)

در نظر گرفتن پارامتر بازده انرژی برای بررسی عملکرد موتور مهم است. بالا بودن بازدهی انرژی موتور نشان‌دهنده عملکرد بالای موتور است. طبق شکل ۱۴، مقدار بازده انرژی در شرایطی که از بیودیزل و گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده است، بیش‌تر از دیزل خالص است؛ افزایش بازده انرژی برای شرایطی که از گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده است، می‌تواند به دلیل افزایش توان ترمزی موتور باشد؛ زیرا طبق رابطه ۳، افزایش توان ترمزی سبب افزایش بازده انرژی موتور می‌شود. برای شرایطی هم که از بیودیزل B5 و B20 در ترکیب سوخت استفاده شده بود علاوه بر عامل توان ترمزی، تأثیرگذاری عوامل قابل اندازه‌گیری توان سوخت و ارزش حرارتی نیز سبب تغییر در مقدار بازده انرژی (رابطه ۳)، شده بود. همچنین، طبق تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، نیز بیان شده است که افزودن مقادیر بالایی از بیودیزل سبب تغییر در مقدار بازده انرژی در مقایسه با دیزل می‌گردد، که این ناشی از تغییر در توان ترمزی و عملکرد موتور دیزل می‌باشد<sup>[39,27]</sup>. طبق نتایج شکل ۱۴، با استفاده از ۷۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل مقدار توان ترمزی در مقایسه با دیزل خالص ۸/۷۷٪ افزایش می‌یابد و این در صورتی است که سبب کاهش \$/kwh ۲۶/۴۴٪ هزینه اقتصادی نیز می‌شود. در شرایطی هم که از بیودیزل B5 در ترکیب سوخت دیزل استفاده می‌شود و از ۷۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده می‌گردد، مقدار این بازده انرژی اندکی نیز بهبود می‌یابد و نسبت به موتور دیزل، ۱۱/۷۶٪ افزایش می‌یابد، در این شرایط بالاترین بازده انرژی برای موتور حاصل شده بود. همچنین این شرایط سبب

اتم‌های نیتروژن و واکنش آن‌ها با اتم اکسیژن شده است و لذا از این جهت انتشار NOx در طی این حالت افزایش یافته است؛ این بدین جهت است که سوخت‌های اکسیژن‌دار سبب کاهش دماي گازهاي خروجي مي‌شوند. دماي گازهاي خروجي براي شرايطي هم که از گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده بود، اندکی هم بیشتر است و لذا در شرایطی که از گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده بود، مقدار انتشار NOx اندکی نیز افزایش یافته بود؛ این نتیجه در تحقیقات مرتبط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است؛ طبق مطالعات سروانان و همکاران و کان و همکاران میزان انتشار NOx در حالت استفاده از گاز طبیعی به دلیل افزایش نرخ انتشار گرما در مرحله احتراق مخلوط، در موتور دیزل کمی افزایش می‌یابد<sup>[24,33]</sup>. بنابراین این نتیجه ممکن است به دلیل افزایش دما در طول فرآیند احتراق باشد؛ طبق تحقیقی دیگر هم گزارش شده بود که، افزایش مقدار گاز طبیعی می‌تواند منجر به بهبود احتراق و افزایش دمای فرآیند احتراق شود<sup>[27]</sup>.

لذا این نتیجه نشان می‌دهد که تقریباً تمام شرایط انتشار NOx در موتور دیزلی که با گاز طبیعی کار می‌کند باید بالاتر از موتور دیزل باشد. البته در مقایسه با بقیه شرایط برای حالتی که از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل بکار گرفته شده است و همچنین از ۸۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده است، نتایج انتشار NOx قابل‌قبول‌تر است، هرچند این انتشار اندکی نسبت به موتور دیزل بالاتر است ولی با توجه به کاهش انتشار دیگر آلاینده‌های خطرناک‌تر مانند: CO و CO2 مزیت بیشتری داشته و از طرفی به دلیل بهبود شرایط عملکردی موتور برتریّت دارد.



شکل ۱۴ (ب) بازده انرژی (η<sub>b</sub>)

بسیاری از مشکلات و نیازهای موجود به منابع انرژی را برطرف کند.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از مشکلات عمده کشورهای جهان، تأمین انرژی مورد نیاز است. استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بهترین راه برای بهبود این شرایط می‌باشد. تولید بیودیزل از روغن پسماند و مدیریت آن برای جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست و تبدیل آن به بیودیزل جهت استفاده در موتورهای دیزلی می‌تواند راه حل مناسبی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد. استفاده از بیودیزل در مقدار B5 در موتورهای دیزلی رایج است و بیشتر کشورها برای حرکت به سمت استفاده از B20 برنامه‌ریزی کرده‌اند؛ لذا در این تحقیق بیودیزل از روغن پسماند با استفاده از روش ترانس استریفیکاسیون تولید شد و در این دو سطح B5 و B20 مورد ارزیابی قرار گرفت. در میان سوخت‌های فسیلی گاز طبیعی به دلیل دارا بودن کربن کمتر، احتراق تمیزتری دارد؛ کشور ایران نیز به دلیل دارا بودن ذخایر عظیم گازی به لحاظ استفاده از این منبع انرژی محدودیت و مشکل چندانی ندارد؛ لذا بررسی امکان استفاده از گاز طبیعی در موتورهای دیزلی یک راهکار جدیدی هست که تحقیقات زیادی نیز بر روی آن انجام نشده است و از طرفی برای معدود تحقیقات صورت گرفته هم امکان استفاده از مقادیر بالای گاز طبیعی بررسی نشده است و از طرفی تأثیر استفاده از بیودیزل در کنار این پارامترها نیز بررسی نشده است؛ بنابراین در این راستا در تحقیق حاضر، با استفاده از مقادیر بالایی از گاز طبیعی، امکان استفاده آن‌ها در موتور دیزل بررسی شد تا شرایط مناسبی برای بهبود عملکرد موتور و میزان آلاینده‌ها حاصل شود. بدین جهت موتور دیزلی با سه نسبت مختلفی از گاز طبیعی (۶۰، ۷۰ و ۸۰٪)، در بار کامل و rpm

کاهش  $\$/kwh$  ۳۰/۴۴٪ هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل شده بود؛ لذا این نتیجه بسیار ارزشمند بود. برای شرایطی هم که بیودیزل B20، در ترکیب سوخت به کار گرفته شده بود و از ۷۰٪ گاز طبیعی در موتور دیزل استفاده شده بود در مقایسه با دیزل خالص مقدار بازده انرژی ۱۰/۳۴٪ افزایش داشت و مقدار هزینه اقتصادی نیز  $\$/kwh$  ۲۷/۷۳٪ کاهش یافته بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که در هر دو شرایط بیودیزل B5 و B20 مقدار بازدهی انرژی در مقایسه با دیزل خالص عملکرد بالایی را دارد. در پژوهش الکاوی و همکاران نیز نتیجه‌ای مشابه با نتایج این تحقیق در جهت عملکرد بهتر بیودیزل در روی مقدار بازده انرژی موتور گزارش شده بود<sup>[28]</sup>، که بنابراین با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

اما همراه با بهبود بازده انرژی و مقادیر هزینه اقتصادی، باید بهبود سایر عوامل قابل اندازه‌گیری انتشار آلایندگی و عملکردی موتور نیز در انتخاب بهترین شرایط عملکردی در نظر گرفته شود. بنابراین با در نظر گرفتن این شرایط ملاحظه می‌شود که در شرایطی که از بیودیزل B20 در ترکیب سوخت دیزل استفاده شده است و سوخت گازی نیز در مقدار ۸۰٪ در موتور دیزل بکار گرفته شده است، شرایط مناسبی به لحاظ کاهش اغلب آلاینده‌های انتشاری موتور دیزل، افزایش بازده انرژی و کاهش هزینه اقتصادی بدست آمده است؛ به طوری که تحت این شرایط در مقایسه با دیزل خالص توان ترمزی و بازده انرژی به ترتیب ۸/۸۶ و ۲۹/۰۶٪ افزایش یافته است، در حالی که مصرف سوخت ویژه ترمزی، CO و CO<sub>2</sub> به ترتیب ۲۶/۵، ۵۷/۵۸ و ۴/۴۵٪ کاهش یافته است، هرچند مقدار NO<sub>x</sub> اندکی افزایش داشت ولی هزینه اقتصادی در مقایسه با دیزل  $\$/kwh$  ۲۶/۴۷٪ کاهش یافته بود و لذا استفاده از این شرایط در موتور دیزل در راستای بهبود شرایط عملکرد اقتصادی، بازده انرژی و انتشار آلایندگی از آن مناسب است و بکارگیری آن می‌تواند

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان تأیید می‌کنند که تمامی نتایج ذکرشده در این مقاله صرفاً حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان مقاله است.

**تعارض منافع:** نتایج این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافع ندارد.

**سهم نویسندگان:** فرید حقیقت شعار (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۷۵٪) و بهمن نجفی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪).

**منابع مالی:** از محل اعتبارات دانشگاه محقق اردبیلی تأمین گردید.

### منابع

- 1- Abas N, Kalair A, Khan N. Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*. 2015;69:31-49.
- 2- You J, Liu Z, Wang Z, Wang D, Xu Y. Impact of natural gas injection strategies on combustion and emissions of a dual fuel natural gas engine ignited with diesel at low loads. *Fuel*. 2020;260:116414.
- 3- Lee CF, Pang Y, Wu H, Nithyanandan K, Liu F. An optical investigation of substitution rates on natural gas/diesel dual-fuel combustion in a diesel engine. *Applied Energy*. 2020;261:114455.
- 4- You J, Liu Z, Wang Z, Wang D, Xu Y, Du G, Fu X. The exhausted gas recirculation improved brake thermal efficiency and combustion characteristics under different intake throttling conditions of a diesel/natural gas dual fuel engine at low loads. *Fuel*. 2020;266:117035.
- 5- Akbarian E, Najafi B. A novel fuel containing glycerol triacetate additive, biodiesel and diesel blends to improve dual-fuelled diesel engines performance and exhaust emissions. *Fuel*. 2019;236:666-76.
- 6- Solé J, García-Olivares A, Turiel A, Ballabrera-Poy J. Renewable transitions and the net energy from oil liquids: A scenarios study. *Renewable Energy*. 2018;116:258-71.
- 7- Capellán-Pérez I, Mediavilla M, de Castro C, Carpintero Ó, Miguel LJ. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. *Energy*. 2014;77:641-66.
- 8- Ogunkunle O, Ahmed NA. Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel-diesel blends. *Energy Reports*. 2020;6:2999-3007.
- 9- Gautam R, Kumar S. Performance and combustion analysis of diesel and tallow biodiesel in CI engine. *Energy Reports*. 2020;6:2785-93.
- 10- Charitha V, Thirumalini S, Prasad M, Srihari S. Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion on diesel-bio diesel in a light duty engine. *Renewable Energy*. 2019;134:1081-8.
- 11- Azad K, Rasul M. Performance and combustion analysis of diesel engine fueled with grape seed and waste cooking biodiesel. *Energy Procedia*. 2019;160:340-7.
- 12- Kamil M, Ramadan KM, Awad OI, Ibrahim TK, Inayat A, Ma X. Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine. *Science of the Total Environment*. 2019;675:13-30.

۱۵۰۰ بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که: (۱) موتور دیزل با استفاده از گاز طبیعی می‌تواند بسیاری از پارامترهای عملکردی و آلاینده‌ی و اقتصادی موتور را بهبود دهد و همچنین استفاده از بیودیزل در ترکیب سوخت دیزل به همراه این شرایط توانسته بود، شرایط مناسب‌تری را نیز ایجاد کند. (۲) بیودیزل به دلیل دارا بودن اکسیژن در ساختار خود قادر بود مقدار آلاینده‌ی‌های کربنی را در مقایسه با دیزل خالص کاهش دهد و از سوی دیگر استفاده از گاز طبیعی نیز به جهت پایین بودن مقدار کربن انتشاری و بهبود عملکرد موتوری به دلیل داشتن دانسیته سوخت پایین‌تر در مقایسه با دیزل توانسته بود، توان ترمزی موتور را بهبود دهد و میزان انتشار آلاینده‌ی دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن موتور را کمتر کند؛ (۳) همچنین وجود اکسیژن در ترکیب بیودیزل B20 به جهت فراهم‌سازی شرایط مناسب برای احتراق سوخت، در بهبود عملکرد موتور و کاهش هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) بهتر نیز عمل کرده بود و در کنار استفاده از گاز طبیعی در مقادیر بالا (۶۰، ۷۰ و ۸۰٪)، که سبب بهبود توان ترمزی موتور و سایر عوامل قابل اندازه‌گیری عملکرد موتور شده بودند، توانسته بود بازده عملکردی موتور را بیشتر نیز بهبود بخشد. (۴) بهبود بازده انرژی به دلیل بهبود توان ترمزی از جمله مزایای اصلی استفاده از گاز طبیعی بود. (۵) همچنین به دلیل پایین بودن هزینه اقتصادی گاز طبیعی و بیودیزل حاصل از روغن پسماند در مقایسه با دیزل، استفاده از این ترکیبات در موتور دیزل راهکار اقتصادی مناسبی را نتیجه می‌داد. از میان شرایط مختلف بررسی‌شده، انتخاب شرایطی که می‌توانست اکثر عوامل قابل اندازه‌گیری عملکرد، آلاینده‌ی، بازده انرژی و اقتصادی را بهبود دهد، اهمیت داشت. لذا با در نظر گرفتن این مطلب، از میان نتایج مختلف تحقیق، انتخاب شرایط مناسب بررسی گردید. طبق نتایج حاصل ملاحظه شد که استفاده از گاز طبیعی در مقدار ۸۰٪ در موتور دیزل به همراه ترکیب بیودیزل B20 در سوخت دیزل می‌تواند نتیجه مناسبی در بهبود اغلب پارامترهای مذکور در مقایسه با دیزل خالص داشته باشد. در این شرایط در مقایسه با دیزل مقدار توان ترمزی و بازده انرژی به ترتیب ۸/۸۶ و ۲۹/۰۶٪ افزایش یافته بود و همچنین مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی، انتشار CO و CO<sub>2</sub> به ترتیب ۲۶/۵، ۵۷/۵۸ و ۴/۵۴٪ کاهش یافته بود، هرچند مقدار NO<sub>x</sub> اندکی افزایش یافته بود. ولی هزینه اقتصادی به عنوان یک عامل مهم و تأثیرگذار، در مقایسه با دیزل \$/kwh ۲۶/۴۷٪ کاهش یافته بنابراین از این جهت نتایج این تحقیق نشان می‌داد که استفاده از این شرایط عملکردی در موتور دیزل در جهت کاهش مصرف سوخت دیزلی، کاهش آلاینده‌ی‌های کربنی و افزایش بازده انرژی دارای اهمیت است.

**تشکر و قدردانی:** از کارکنان محترم بخش رستوران سلف دانشگاه محقق اردبیلی و از مسئول محترم کارگاه موتور دانشگاه محقق اردبیلی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

- characteristics of a biodiesel fueled reactivity controlled compression ignition engine (RCCI). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(7):4548-60.
- 27- Sharma M, Kaushal R. Performance and emission analysis of a dual fuel variable compression ratio (VCR) CI engine utilizing producer gas derived from walnut shells. *Energy*. 2020;192:116725.
- 28- Elkelawy M, Bastawissi HA, Esmaeil KK, Radwan AM, Panchal H, Sadasivuni KK, Ponnamma D, Walvekar R. Experimental studies on the biodiesel production parameters optimization of sunflower and soybean oil mixture and DI engine combustion, performance, and emission analysis fueled with diesel/biodiesel blends. *Fuel*. 2019;255:115791.
- 29- Musthafa MM. A comparative study on coated and uncoated diesel engine performance and emissions running on dual fuel (LPG-biodiesel) with and without additive. *Industrial Crops and Products*. 2019;128:194-8.
- 30- Devarajan Y, Beemkumar N, Ganesan S, Arunkumar T. An experimental study on the influence of an oxygenated additive in diesel engine fuelled with neat papaya seed biodiesel/diesel blends. *Fuel*. 2020;268:117254.
- 31- Hwang J, Bae C, Gupta T. Application of waste cooking oil (WCO) biodiesel in a compression ignition engine. *Fuel*. 2016;176:20-31.
- 32- Mofijur M, Rasul M, Hassan NM, Uddin MN. Investigation of exhaust emissions from a stationary diesel engine fuelled with biodiesel. *Energy Procedia*. 2019;160:791-7.
- 33- Kan X, Wei L, Li X, Li H, Zhou D, Yang W, Wang CH. Effects of the three dual-fuel strategies on performance and emissions of a biodiesel engine. *Applied Energy*. 2020;262:114542.
- 34- Han J, Wang S, Vittori RM, Somers LM. Experimental study of the combustion and emission characteristics of oxygenated fuels on a heavy-duty diesel engine. *Fuel*. 2020;268:117219.
- 35- Imtenan S, Masjuki HH, Varman M, Fattah IR, Sajjad H, Arbab MI. Effect of n-butanol and diethyl ether as oxygenated additives on combustion-emission-performance characteristics of a multiple cylinder diesel engine fuelled with diesel-jatropha biodiesel blend. *Energy Conversion and Management*. 2015;94:84-94.
- 36- Singh M, Sandhu SS. Performance, emission and combustion characteristics of multi-cylinder CRDI engine fueled with argemone biodiesel/diesel blends. *Fuel*. 2020;265:117024.
- 37- Di Blasio G, Belgiorno G, Beatrice C. Effects on performances, emissions and particle size distributions of a dual fuel (methane-diesel) light-duty engine varying the compression ratio. *Applied energy*. 2017;204:726-40.
- 38- Jiaqiang E, Pham M, Deng Y, Nguyen T, Duy V, Le D, Zuo W, Peng Q, Zhang Z. Effects of injection timing and injection pressure on performance and exhaust emissions of a common rail diesel engine fueled by various concentrations of fish-oil biodiesel blends. *Energy*. 2018;149:979-89.
- 13- Dharmaraja J, Nguyen DD, Shobana S, Saratale GD, Arvindnarayan S, Atabani AE, Chang SW, Kumar G. Engine performance, emission and bio characteristics of rice bran oil derived biodiesel blends. *Fuel*. 2019;239:153-61.
- 14- Abed KA, Gad MS, El Morsi AK, Sayed MM, Elyazeed SA. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian journal of petroleum*. 2019;28(2):183-8.
- 15- Oyedepo SO, Airhihen PI, Adelekan DS, Ohijeagbon OI, Kelvin EU, Dirisu JO, Udo MO. Experimental Investigation of Waste Vegetable Oil-Diesel Fuel Blends Effects on Performance of Compression Ignition Engine. *Procedia Manufacturing*. 2019;35:1039-46.
- 16- Najafi B, Akbarian E, Lashkarpour SM, Aghbashlo M, Ghaziaskar HS, Tabatabaei M. 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*. 2019;168:1128-37.
- 17- Khan HM, Ali CH, Iqbal T, Yasin S, Sulaiman M, Mahmood H, Raashid M, Pasha M, Mu B. Current scenario and potential of biodiesel production from waste cooking oil in Pakistan: An overview. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019;27(10):2238-50.
- 18- Noor CM, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *renewable and sustainable energy reviews*. 2018;94:127-42.
- 19- Najafi B, Khani M. Study of the effect of ethyl ester of sunflower oil and its different mixtures with diesel on performance and emission parameters of a turbocharged direct injection diesel engine. 2011;4(1):45-55.
- 20- Attia AM, Nour M, Nada SA. Study of Egyptian castor biodiesel-diesel fuel properties and diesel engine performance for a wide range of blending ratios and operating conditions for the sake of the optimal blending ratio. *Energy Conversion and Management*. 2018;174:364-77.
- 21- Lewis P, Frey HC, Rasdorf W. Development and use of emissions inventories for construction vehicles. *Transportation research record*. 2009;2123(1):46-53.
- 22- Ghazanfari J, Najafi B, Ardabili SF, Shamshirband S. Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard. *Cogent Engineering*. 2017;4(1):1411221.
- 23- U.S.D.o. Clean Cities Alternative Fuel Price Report. *Energy*. 2017. In: JULY 2017.
- 24- Saravanan A, Murugan M, Reddy MS, Parida S. Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua. *Fuel*. 2020;263:116751.
- 25- Das M, Sarkar M, Datta A, Santra AK. Study on viscosity and surface tension properties of biodiesel-diesel blends and their effects on spray parameters for CI engines. *Fuel*. 2018;220:769-79.
- 26- Kalsi SS, Subramanian KA. Experimental investigations of effects of hydrogen blended CNG on performance, combustion and emissions



39- Madiwale S, Karthikeyan A, Bhojwani V. Properties investigation and performance analysis of a diesel engine fuelled with Jatropa, Soybean, Palm and Cottonseed biodiesel using Ethanol as an additive. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(1):657-64.