



Original Article

## Evaluation of diesel engine performance efficiency with biodiesel fuel derived from Linseed

Farid Moradi<sup>1</sup>, Tarahom Mesri Gundoshmian<sup>1\*</sup>, Sajad Jafarzadeh<sup>1</sup>

1- Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Biodiesel,  
Linseed,  
Engine Performance,  
Torque,  
Specific Fuel  
Consumption,

Received:  
May 08, 2025

Revised:  
March 16, 2026

Accepted:  
March 18, 2026

\* Corresponding author:  
[mesrigtm@uma.ac.ir](mailto:mesrigtm@uma.ac.ir)

### ABSTRACT

#### Introduction

Energy is a fundamental driver of economic development worldwide. Currently, approximately 80–90% of global energy is supplied by fossil fuels, which face increasing challenges including resource depletion and environmental degradation. In response, research efforts have shifted toward developing renewable alternatives such as biodiesel. This study examines the impact of biodiesel produced from linseed oil on the performance of tractor engines, addressing the urgent need for sustainable fuel solutions in agricultural machinery that maintain operational efficiency while reducing environmental impact.

#### Materials and Methods

Linseed oil was extracted from local varieties in Khalkhal County using n-hexane as a solvent in a Soxhlet apparatus, yielding 33% oil. The oil was then converted to biodiesel via a transesterification reaction, and its physicochemical properties were analyzed according to the ASTM D-6751 standard. Engine performance was evaluated on a TYM tractor engine across seven speed levels (380 to 620 rpm) using four fuel blends (0%, 5%, 10%, and 25% biodiesel). A Sigma 5 dynamometer was employed to measure torque and power output, while the specific fuel consumption (SFC) was calculated from the fuel consumption rate and the measured power.

#### Results and Discussion

The results indicated a statistically significant relationship between engine speed and torque output ( $P < 0.0001$ ). Maximum torque (563.67 Nm) was recorded at 380 rpm, while minimum torque (165.17 Nm) occurred at 620 rpm. The use of biodiesel blends led to a slight reduction in torque, decreasing from 472.9 Nm with pure diesel to 466.72 Nm with the B25 blend—a trend attributable to the lower calorific value of biodiesel. Peak power output (29.24 kW) was observed at 580 rpm. Biodiesel blends caused a minor but consistent decrease in power across all tested speeds. Specific fuel consumption (SFC) increased with rising engine speed; however, biodiesel blends significantly improved fuel efficiency, likely due to enhanced combustion efficiency and higher oxygen content.

ANOVA results showed no significant interaction between engine speed and fuel type for torque and power ( $P = 0.9996$ ), but a significant interaction was observed for SFC ( $P = 0.031$ ).

### How to cite:

Moradi, F., Mesri Gundoshmian, T. and Jafarzadeh, S. (2025). *Evaluation of diesel engine performance efficiency with biodiesel fuel derived from Linseed*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (4):71-85. <https://doi.org/10.22034/jam.2026.68067.1342>



This is an open-access article under the CC BY NC license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



### *Conclusion*

The produced linseed biodiesel complied with the ASTM D6751 standard, confirming its viability as an alternative fuel for diesel engines. Although slight reductions in torque and power output were observed—attributable to biodiesel's lower energy content—the fuel demonstrated improved consumption characteristics. This study suggests that linseed biodiesel can be effectively utilized in tractor engines, provided optimal blend ratios and operating conditions are carefully selected. Future research should focus on optimizing blend formulations and investigating emission profiles to further validate the practical application of linseed biodiesel in agricultural machinery.

---



## ارزیابی عملکرد راندمان موتور دیزل با سوخت بیودیزل مشتق از روغن بزرک

فرید مرادی<sup>۱</sup>، ترجم مصری گندشمین<sup>۱\*</sup>، سجاد جعفرزاده<sup>۱</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸

۱- گروه آموزشی مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

\* نویسنده مسئول: E-mail: [mesrigtm@uma.ac.ir](mailto:mesrigtm@uma.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش، تولید بیودیزل از روغن بزرک و ارزیابی عملکرد آن در موتور تراکتور مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله نخست، روغن بزرک از رقم محلی شهرستان خلخال استخراج و با روش ترانس استریفیکاسیون به بیودیزل تبدیل شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیودیزل تولیدشده، شامل چگالی، گرانشی سینماتیک، نقطه اشتعال و میزان گوگرد، اندازه‌گیری و با استاندارد ASTM D-6751 مقایسه گردید. نتایج حاکی از انطباق خواص بیودیزل با استانداردهای بین‌المللی بود؛ بنابراین، این سوخت برای استفاده در موتور تراکتور TYM تأیید شد. در مرحله دوم، آزمایش‌هایی بر روی موتور تراکتور TYM با ترکیب‌های مختلف سوخت دیزل و بیودیزل انجام شد. متغیرهای آزمایش شامل سرعت‌های مختلف موتور و درصد حجمی متیل استر بزرک در ترکیب سوخت بودند. یافته‌ها نشان داد که سرعت موتور تأثیر معناداری بر گشتاور و توان خروجی دارد، به طوری که با افزایش سرعت، گشتاور کاهش یافت. نتایج نشان داد استفاده از بیودیزل بزرک علیرغم کاهش گشتاور موتور (۴۷۲/۹ برای دیزل خالص در مقابل ۴۶۶/۷۲ برای ترکیب ۲۵٪ بیودیزل) و توان خروجی موتور (۲۳/۹۸ برای دیزل خالص در مقابل ۲۳/۶۶ برای ترکیب ۲۵٪ بیودیزل)، مصرف ویژه سوخت در ترکیب‌های حاوی بیودیزل بهبود یافت که نشان‌دهنده کارایی بهتر این سوخت در مصرف انرژی است و این اثر در تمام سرعت‌ها یکسان بود. تحلیل واریانس نتایج بیانگر این واقعیت بود که اثر متقابل بین سرعت موتور و نوع سوخت بر گشتاور و توان معنادار نبود ( $p = ۰/۹۹۹۶$ )، که بیانگر تأثیر یکنواخت بیودیزل در تمام محدوده سرعت‌های آزمایش شده است. با این حال، اثر متقابل این دو عامل بر مصرف ویژه سوخت معنادار بود ( $p = ۰/۰۳۱$ )، که حاکی از رفتار متفاوت بیودیزل در سرعت‌های مختلف موتور است. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد، اگرچه بیودیزل بزرک موجب کاهش جزئی در گشتاور و توان موتور شد، اما بهبود مصرف سوخت و سازگاری زیست‌محیطی آن، این سوخت را به عنوان گزینه مناسبی برای استفاده در موتورهای دیزلی معرفی می‌کند.

کلمات کلیدی: بیودیزل، بذر بزرک، عملکرد موتور تراکتور، گشتاور، مصرف سوخت ویژه.

## ۱- مقدمه

انرژی بخش حیاتی برای توسعه هر کشوری است. در هر کشور، مصرف انرژی به ازای هر نفر نشان‌دهنده رشد صنعتی و اقتصادی، همچنین سطح بالاتر زندگی مردم است. حدود ۸۰٪ تا ۹۰٪ از انرژی جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. بر اساس نرخ مصرف فعلی، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که این روند همچنان افزایش خواهد یافت (Warkhade and Babu 2019). تقاضای روزافزون برای سوخت‌های فسیلی باعث کاهش منابع آن‌ها و افزایش سطح آلودگی می‌شود که منجر به وضع مقررات سخت‌گیرانه‌تری در خصوص انتشار آلاینده‌ها برای وسایل نقلیه می‌شود. این ویژگی باعث شده است که تصمیم‌گیرندگان و پژوهشگران به جستجوی سوختی از منابع پایدار بپردازند که کمترین آلودگی را تولید کرده و قابلیت تجدیدپذیری داشته باشد (Hosseini et al. 2017a)، مانند بیودیزل مبتنی بر روغن‌های گیاهی، الکل‌ها و غیره، تا به‌زودی جایگزین سوخت‌های متداول شوند. بیودیزل مبتنی بر روغن‌های گیاهی می‌تواند نسل اول باشد، مانند روغن‌های خوراکی نظیر روغن نارگیل، نخل، کلزا، آفتابگردان، و نسل دوم (روغن‌های غیرخوراکی) مانند پونگامیا پیناتا، جتروپا کریکوس، کرچک، مانگوی دریایی، نیم، ماهوا و غیره، و بیودیزل نسل سوم مبتنی بر میکروآلگ‌ها است (Hosseini et al. 2017b). بیودیزل یک استر آلکیل است که از واکنش بین روغن گیاهی و الکل در حضور یک کاتالیزگر تولید می‌شود. بیودیزل تاریخچه‌ای بسیار گسترده دارد؛ اما هزینه بالای تولید، دسترسی به مواد اولیه و هزینه پایین نفت خام موجود اجازه نداد که این سوخت به یک منبع بالقوه برای جایگزینی دیزل تبدیل شود. بسیاری از پژوهشگران تکنیک‌های مختلف استخراج بیودیزل را برای مقابله با این مشکلات امتحان کرده و با انواع روغن‌های خوراکی و غیرخوراکی کار کرده‌اند (Abbaszadeh et al. 2012). آنها همچنین منابع دیگری برای تولید بیودیزل از جمله روغن‌های پخت‌وپز استفاده‌شده، چربی‌های حیوانی و میکروآلگ‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. محتوای بالای اسیدهای چرب آزاد (FFA) در روغن‌ها، بازده بیودیزل را کاهش می‌دهد و بنابراین باید قبل از فرآیند تولید بیودیزل، این مقدار کاهش یابد. به همین دلیل، یک ترانس استریفیکاسیون دو مرحله‌ای برای کاهش محتوای FFA در روغن انجام می‌شود (Budhreja et al. 2022). مهم‌ترین بخش یک ماشین موتور آن است و سوختی که بر احتراق تأثیر می‌گذارد به عنوان عامل اصلی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت در موتور می‌تواند بر عملکرد برخی از اجزای موتور مانند ارتعاش تأثیر بگذارد. صدا و ارتعاش ناشی از فرآیند احتراق در موتور تأثیر مستقیم بر کاربران خواهد داشت. نویز و ارتعاش موتور دیزل می‌تواند اثرات مضر بر شنوایی و بدن کاربر داشته باشد (Siavash et al. 2021). این موضوع به‌ویژه در موتورهایی با نسبت فشرده‌سازی بالا و فشارهای احتراقی سریع مشاهده می‌شود. معروف‌ترین اختلال بالینی ناشی از قرارگیری در

معرض ارتعاش، انگشت سفید ناشی از ارتعاش (VWF) است. گاهی اوقات به این حالت به عنوان "دست مرده" یا بیماری رینود از منشأ شغلی شناخته می‌شود. موتورهای دیزل کوچک به طور گسترده‌ای در تراکتورهای دستی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Singh et al. 2023). تراکتور دستی یکی از ماشین‌آلات کشاورزی بسیار مفید است. این نوع تراکتورها برای مزارع کوچک مناسب هستند. مزایای اقتصادی و توانایی‌های کنترل تراکتورهای دستی در شرایط مختلف و جاده‌ها باعث افزایش استفاده از این تراکتورها برای حمل محصولات کشاورزی و انسان‌ها در مزارع و جاده‌های روستایی شده است (Hosseinzadeh-Bandbafha et al. 2021). در ایران بیش از ۱۲۰,۰۰۰ تراکتور دستی وجود دارد. اپراتورهای تراکتورهای دستی در معرض ارتعاشات منتقل‌شده به دست با سطوح بالا قرار دارند. کار با این ماشین‌آلات برای مدت طولانی باعث بروز اختلالات زیادی می‌شود (Emaish et al. 2021) و قسمت‌های مختلف بدن مانند گوش، ستون فقرات و اختلالات گوارشی و بیماری‌های عروقی را آسیب می‌زند. همچنین این موضوع باعث کاهش بهره‌وری و کیفیت کار می‌شود (Heidary et al. 2013). با توجه به اهمیت موضوع محققین مختلفی نیز بر روی این امر تحقیقاتی را صورت دادند:

Temizer و Eskici (2020) در مطالعه‌ای بر روی خصوصیات احتراقی و روغن روانکاری سوخت‌های ترکیبی دیزل و بیودیزل در یک موتور دیزل، به بررسی تأثیرات مختلف سوخت‌های B10، B20 و D100 پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت‌های ترکیبی بیودیزل باعث کاهش ویسکوزیته، نقطه اشتعال، TAN و رطوبت در روغن روانکاری می‌شود، در حالی که چگالی، مقدار TBN و محتوای خاکستر سولفات آن افزایش می‌یابد. همچنین، غلظت فلزات در روغن موتور با استفاده از بیودیزل بیشتر از دیزل خالص بود (Temizer and Eskici 2020).

Khoobbakht و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای بر تأثیر ترکیبات بیودیزل-اتانول-دیزل بر شاخص‌های عملکردی موتور دیزل با استفاده از مدل‌سازی سطح پاسخ، نشان دادند که افزایش درصد بیودیزل و اتانول در سوخت‌ها باعث کاهش قدرت ترمز موتور شد. همچنین، به‌طور کلی، مصرف سوخت ویژه با افزایش درصد بیودیزل و اتانول افزایش یافت، در حالی که کارایی حرارتی موتور و قدرت ترمز موتور کاهش یافت. به علاوه، مقادیر بهینه برای بیشترین کارایی حرارتی و قدرت ترمز موتور به ترتیب در شرایط خاص از سوخت‌های ترکیبی و بار موتور متفاوت مشاهده شد (Khoobbakht et al. 2019).

Idris و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی عملکرد موتور با استفاده از سوخت‌های ترکیبی بیودیزل و اکو دیزل (ED)، نشان دادند که ترکیب بیودیزل و ED می‌تواند عملکرد موتور دیزل را بهبود بخشد. نتایج نشان دادند که حداکثر عملکرد موتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه با قدرت ۴۳/۳۰ کیلووات، گشتاور ۱۲۴/۹۳ نیوتن متر و

برای استخراج روغن گیاهی باید پس از پودر شدن بزرک‌ها توسط آسیاب خانگی، با استفاده از دستگاه سوکسوله و حلال n-هگزان انتقال جرم از مواد پودر شده به حلال انجام پذیرفت و توسط دستگاه تقطیر حلال از روغن جدا گردید. در نهایت بازده روغن از دانه بزرک ۳۳٪ به دست آمد. استفاده از روغن‌های گیاهی به طور مستقیم در موتور دیزل، با توجه به ویسکوزیته بالای روغن به علت اتمیزه نشدن مناسب، باعث به وجود آمدن مشکلاتی از قبیل پایین بودن کیفیت اشتعال و احتراق ناقص سوخت می‌شود. از طرف دیگر با تشکیل لایه‌ای از سوخت محترق نشده روی دیواره سیلندر، کار سیستم روانکاری را مختل می‌نماید. عدد ستان پایین روغن‌های گیاهی باعث کوبش در بارها و دماهای پایین می‌گردد. به طور کلی روغن‌های گیاهی دارای تاخیر در اشتعال زیاد و احتراق آرامتری نسبت به سوخت دیزل می‌باشند. از طرف دیگر به دلیل مسدود شدن انژکتور و همچنین نیاز به پمپ انژکتور با فشار بالا، موتورهای روغن گیاهی سوز نمی‌توانند پاشش مستقیم باشند. برای رفع این مشکلات و جایگزین نمودن روغن گیاهی به عنوان سوخت در موتورهای دیزل باید بعضی از خواص آن را اصلاح کرد.

چهار روش اصلی برای استفاده از روغن‌های نباتی و حیوانی در یک موتور دیزل به عنوان سوخت بیودیزل شامل ۱- استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی به عنوان سوخت ۲- میکرو امولسیون ۳- پیرولیز ۴- ترانس استریفیکاسیون می‌باشد. در این تحقیق روش ترانس استریفیکاسیون برای تولید بیودیزل انتخاب گردید. این روش دارای مزایای بیشتری است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- با ترانس استریفیکاسیون روغن‌ها، اتم‌های اکسیژن در مولکول بیودیزل حفظ می‌شوند و از آن جدا نمی‌گردند. وجود اکسیژن در مولکول بیودیزل یکی از مزایای این سوخت است به طوری که به این سوخت‌ها، سوخت‌های اکسیژن دار نیز می‌گویند. در روش پیرولیز اکسیژن از مولکول بیودیزل خارج می‌گردد.
- ۲- تولید با این روش به امکانات و شرایط کمتری نیاز دارد.
- ۳- راندمان تولید بالایی دارد.
- ۴- این روش، روش معمول‌تری است و کارخانجات تولید بیودیزل در اغلب کشورهای تولید کننده بیودیزل، از این روش برای تولید استفاده می‌کنند.

ترانس استریفیکاسیون عبارت است از واکنش دادن یک روغن گیاهی یا چربی حیوانی با یک الکل در حضور کاتالیزور برای تولید استر به عنوان بیودیزل و گلیسرول می‌باشد. روغن استحالی با روش ترانس استریفیکاسیون که در شکل (۲) واکنش مربوط نشان داده شده به بیودیزل و گلیسرول تبدیل گردید. هدف این تحقیق تولید بیو دیزل بوده و از توضیح در مورد محصول فرعی این تحقیق یعنی گلیسرول که یک محصول تجاری می‌باشد صرف نظر شده است. شکل

مصرف سوخت ویژه E-5 ۲/۴۵ کیلوگرم به ازای هر کیلووات ساعت بدست آمد. همچنین، طبق آزمون t زوجی، تفاوت معناداری در گشتاور موتور مشاهده شد که با ترکیب بیودیزل و ED به میزان ۰/۰۷ گرم افزایش یافت (Idris et al. 2023).

Ayazi و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود بر روی مصرف سوخت و آلاینده‌های موتور دیزل با استفاده از ترکیب‌های سه‌گانه سوخت دیزل، بیودیزل و بیواتانول، نشان دادند که استفاده از این ترکیب‌ها باعث کاهش قابل توجهی در آلاینده‌های CO، CO<sub>2</sub> و NO می‌شود. نتایج نشان دادند که مصرف سوخت با استفاده از ترکیب‌های B10E10D80 و B10E20D70 تنها ۲٪ و ۳٪ بیشتر از سوخت دیزل خالص بود و با استفاده از B10E15D75 مصرف سوخت برابر با دیزل خالص بود. همچنین، آلاینده‌ها مانند CO، CO<sub>2</sub> و NO، C6H14 به ترتیب ۲۰-۳۸٪، ۱-۶٪، ۱۱-۱۴٪ و ۳-۲۴٪ کاهش یافتند (Ayazi et al. 2023).

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر استفاده از سوخت‌های دیزل-بیودیزل با درصد‌های مختلف بر عملکرد موتور دیزل در سرعت‌های مختلف است. این مطالعه به تحلیل دقیق گشتاور، توان و مصرف ویژه سوخت در شرایط عملیاتی مختلف موتور پرداخته و هدف آن ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد موتور دیزل با استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و کم‌اثرتر بر محیط‌زیست می‌باشد. این تحلیل می‌تواند به درک بهتری از اثرات ترکیبات بیودیزل در شرایط واقعی کمک کرده و به توسعه راهکارهای کارآمدتر برای استفاده از سوخت‌های بیودیزل در صنایع موتوری در آینده منجر شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو مرحله انجام پذیرفت، در مرحله اول بیودیزل از بزرک تولید شد و در مرحله دوم بیودیزل تولیدی به منظور آزمون و ارزیابی عملکرد موتور در تراکتور مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق بزرک از رقم محلی شهرستان خلخال خریداری و استخراج روغن و تبدیل به بیودیزل در آزمایشگاه مواد غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد واحد شوشتر انجام پذیرفت.



شکل ۱- گیاه بزرک

Fig 1. Flax plant



شکل ۴- ترکیب روغن و متانول در حضور کاتالیزور  
Fig 4. Mixing of oil and methanol in the presence of a catalyst



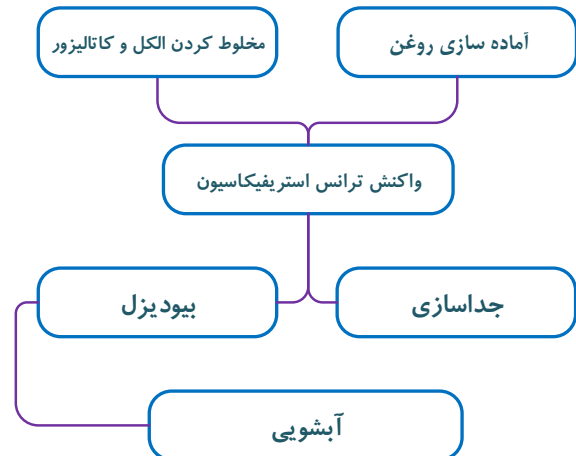
شکل ۵- جداسازی بیودیزل (قسمت بالا) و گلیسرول  
Fig 5. Separation of biodiesel (top layer) and glycerol

برای استفاده از سوخت بیودیزل در موتور تراکتور خواص بیودیزل تولید شده مطابق استانداردهای مورد نظر تعیین شد لذا پس از تولید بیودیزل به روش ترانس استریفیکاسیون برخی از خواص مهم آن مانند چگالی، گرانیوی سینماتیک، نقطه‌ی اشتعال، نقطه‌ی ابری شدن، نقطه‌ی ریزش و مقدار گوگرد با روش آزمایشی ASTM در شرکت البرز تدبیر کاران تهران اندازه‌گیری شده و نتایج آن با استاندارد بین المللی ASTM D-6751 مطابقت داده شد. در جدول (۱) خواص بیودیزل تولید شده از روغن بزرک همراه با استانداردهای مربوطه و بازه‌ی مورد قبول، ارائه شده است با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول، مشاهده می‌شود که خصوصیات اصلی بیودیزل تولید شده از روغن بزرک، مطابق استانداردهای ASTM D-6751 است بنابراین با اطمینان از استاندارد بودن این سوخت از این سوخت در موتور تراکتور TYM که در تصویر (۶) نشان داده شده، استفاده شد. روش اندازه‌گیری خصوصیات مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

(۳) شماتیک مراحل تولید بیودیزل و تصویر (۴) مرحله آزمایشگاهی واکنش ترانس استریفیکاسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۲- واکنش ترانس استریفیکاسیون  
Fig 2. Schematic of the transesterification reaction



شکل ۳- مراحل تولید بیودیزل  
Fig 3: Steps in biodiesel production

برای تبدیل روغن استخراجی به بیودیزل و انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون نیاز به یک الکل و یک کاتالیست می‌باشد. الکل مصرفی از الکل‌های نوع اول یا دوم منوهیدریدی آلیفاتیکی که شامل متانول، اتانول، پروپانول، بوتانول و آمیل الکل استفاده می‌شود. در این پژوهش از متانول به عنوان الکل و هیدروکسید پتاسیم (KOH) به عنوان کاتالیزور استفاده گردید. برای انجام واکنش، یک لیتر روغن را در ارلن ریخته و روی هم‌زن مغناطیسی که بر روی دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده قرار گرفت، پس از ۱۰-۱۵ دقیقه که روغن گرم شد به آن مقدار ۲۱۷ گرم KOH متانولی ۲ مولار (برای تهیه KOH متانولی ۲ مولار باید ۱۱۲ گرم هیدروکسید پتاسیم در مقداری متانول به طور کامل حل کرد (این واکنش فوق‌العاده گرماده می‌باشد) سپس آنقدر متانول اضافه نموده تا حجم کل یک لیتر گردد و هم‌زن را بر روی سرعت ۴۰۰-۲۵۰ دور در دقیقه تنظیم کرده تا مخلوط به طور کامل حل شده و واکنش به طور کامل انجام شود و مرحله استر کردن به پایان برسد. این مرحله باید تا حصول رنگ ارغوانی ادامه پیدا کند که حدود ۱۵-۱۰ دقیقه زمان نیاز دارد. در پایان این مرحله دو محصول از واکنش بدست می‌آید که محصول اصلی بیودیزل بوده و محصول فرعی گلیسرین است که ماده‌ای تجاری می‌باشد. در مرحله بعد این دو محصول با استفاده از قیف جدا کننده جداسازی می‌شوند که در شکل (۵) نشان داده شده است.

## ۲-۱- چگالی

به قطر خارجی ۳۳/۲-۳۴/۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۲۵-۱۱۵ میلیمتر تا سطح علامت خورده استاندارد ریخته، سپس به منظور ایجاد شرایط همگن در محلول، آن را به دمای ۴۰ درجه سانتیگراد می‌رسانند. نمونه را حداقل ۱۴ درجه سانتیگراد بالای نقطه ابری شدن و پس از هم دما شدن با محیط در دستگاه سردکن قرار داده و در هر ۳ درجه سانتیگراد کاهش، دمای نمونه کنترل و به محض رویت اولین ذرات کریستال و مومی شکل، دمای نمونه بعنوان نقطه ابری شدن اعلام می‌گردد.

## ۲-۵- نقطه ریزش

نقطه ریزش پایین‌ترین دمایی است که سوخت هنوز در آن به حالت سیال است. این آزمون تحت استاندارد D97 صورت می‌گیرد. این آزمون توسط دستگاه تعیین نقطه ریزش انجام می‌گیرد. به این صورت که سرد کردن را پس از ظهور حالت مومی ملکول‌های سنگین ادامه می‌دهیم تا تمام نمونه به حالت مومی و متبلور درآید و دیگر سوخت جریان نیابد. دمای آستانه توقف جریان به عنوان نقطه ریزش درج می‌گردد.

## ۲-۶- مقدار گوگرد

اندازه‌گیری میزان گوگرد به روش اشعه ایکس انجام می‌گیرد. این آزمون تحت استاندارد D2622 انجام گرفته و برای این کار نمونه را در ظرف مخصوص دستگاه قرار داده و دستگاه بطور اتوماتیک در سه تکرار میزان گوگرد را اندازه‌گیری نمود. سرعت آنالیز دستگاه ۱ تا ۲ دقیقه برای هر نمونه بود.

## ۲-۷- ارزش حرارتی

ارزش حرارتی، میزان انرژی آزاد شده از جرم مشخص ماده می‌باشد و به صورت خالص و یا ناخالص وجود دارد. در حالت خالص ماده تولیدی به حالت گاز، و آب حاصل به صورت مایع می‌باشد ولی در حالت ناخالص آب حاصل نیز بخار می‌شود.

این آزمایش تحت استاندارد D240 انجام می‌گیرد و به وسیله دستگاه بمب کالری انجام می‌شود. در این روش ارزش حرارتی با سوختن حدود یک گرم از نمونه در بمب کالری متر در شرایط کنترل شده تعیین می‌گردد. ارزش حرارتی بطور اتوماتیک از محاسبه دمای قبل، بعد و در حین احتراق و با در نظر گرفتن انتقال حرارت حاصل از سوخت با تصحیح مقدار گوگرد موجود در نمونه به دست می‌آید.

## ۲-۸- شاخص ستان

شاخص ستان عددی است که بیانگر درصد حجمی ستان و هپتا متیل ننان در یک سوخت مرجع می‌باشد که همان خاصیت احتراق سوخت نمونه را دارد (درجه خودسوزی نفت گاز). این شاخص تحت استاندارد D 976 و به وسیله رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

برای اندازه‌گیری چگالی از دستگاه چگالی‌متر دیجیتالی تحت استاندارد D4052 متعلق به استانداردهای انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM) استفاده شد. روش کار بدین صورت است که حجم کوچکی در حدود ۰/۷ میلی‌لیتر از نمونه را به دستگاه تزریق کرده و پس از برطرف شدن نوسانات در عدد ارائه شده بر روی مانیتور دستگاه (نوسانات نشانه کالیبره کردن اتوماتیک دستگاه است)، دانسیته نمونه به طور اتوماتیک محاسبه شد.

## ۲-۲- گرانروی سینماتیک

گرانروی سینماتیکی براساس زمان عبور حجم معینی از مایع در دمای ثابت ۴۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری گرانروی سینماتیکی از دستگاه گرانروی سنخ استوالد تحت استاندارد D446 استفاده شد. برای تعیین گرانروی سوخت از دستگاه حمام ویسکوزیته استفاده می‌گردد. روش آزمایش به این صورت است که ابتدا حمام گرانروی را در دمای آزمایش ۴۰ درجه سانتیگراد تنظیم کرده و با توجه به اطلاعات مربوط به ویسکوزیته تقریبی روغن نسبت به انتخاب به لوله ویسکومتر مناسب با گستره اندازه‌گیری مورد نظر اقدام می‌شود. در این صورت گرانروی براساس رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$V = C.T \quad (1)$$

$V$  = گرانروی سینماتیکی (سانتیمتر استوک)  
 $C$  = ثابت کالیبره گرانروی سنخ (میلیمتر بر مجذور ثانیه)  
 $T$  = متوسط زمان عبور نمونه (ثانیه) می‌باشند.

## ۲-۳- نقطه اشتعال

نقطه اشتعال سوخت پایین‌ترین دمایی است که در آن سوخت به اندازه کافی به بخار تبدیل می‌شود و با هوا یک مخلوط قابل اشتعال ایجاد می‌کند بطوری که با نزدیک شدن شعله آتش به آن در یک لحظه مشتعل و سپس خاموش می‌شود. دمای نقطه اشتعال یکی از معیارهای سنجش تمایل نمونه به تشکیل ترکیب قابل اشتعال با هوا تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاه می‌باشد. نقطه اشتعال تحت استاندارد D93 تعریف و با رابطه (۲) اندازه‌گیری می‌گردد.

$$FP = C + 0/0033(760 - P) \quad (2)$$

$C$  = نقطه اشتعال بدست آمده از آزمون (درجه سانتیگراد)  
 $P$  = فشار هوای محل آزمایش (میلیمتر جیوه)  
 $FP$  = نقطه اشتعال تصحیح شده (درجه سانتیگراد).

## ۲-۴- نقطه ابری شدن

استاندارد D2500 برای اندازه‌گیری نقطه ابری شدن تعریف گردیده و برای محاسبه آن، نمونه را در استوانه شیشه‌ای استاندارد

کشور، مشخصه‌های عملکردی موتور (گشتاور، توان، مصرف سوخت) مورد آزمون و بررسی قرار گرفت.

تراکتور مورد استفاده در تحقیق، تراکتور مدل TYM ساخت کشور کره جنوبی، سال ساخت ۲۰۱۳، با توان اسمی ۴۲/۷ و دور موتور ۲۶۰۰ دور در دقیقه، برای اندازه‌گیری میزان مصرف سوخت، از دستگاه سوخت سنج با مخزن ۲۰۰ سی‌سی و کرنومتر استفاده شد و برای اندازه‌گیری مشخصه‌های عملکردی موتور، از یک دینامومتر مدل Sigma 5 n j froment dynamometer ساخت کشور آلمان استفاده گردید.

#### ۲-۱۱- محاسبه مصرف ویژه سوخت

بازده انرژی تراکتورها بر مبنای زمان و واحد سوخت، مصرف ویژه سوخت نامیده می‌شود و بر مبنای L/kwhr و kg/kwhr یا gr/kwhr می‌باشد در این تحقیق از واحد گرم بر کیلو وات ساعت استفاده گردید. مصرف ویژه سوخت محور تواندهی، با PSFC<sup>۱</sup> نشان داده می‌شود. و با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه می‌گردد.

$$M_f = Q_f \times \rho_f \quad (4)$$

$$PSFC = \frac{M_f}{P} \quad (5)$$

که در آن  $M_f$  برابر نرخ مصرف سوخت (کیلوگرم بر ساعت)

$Q_f$  برابر نرخ مصرف سوخت (لیتر بر ساعت)

$\rho_f$  چگالی سوخت (کیلوگرم در لیتر)

$P$  توان حاصل از دینامومتر (کیلو وات)

$PSFC$  مصرف ویژه سوخت بر حسب گرم بر کیلووات ساعت

$$CI = 454.74 - 1641.416D + 774.74D^2 - 0.554B + 97.803(LogM)^2 \quad (3)$$

CI = شاخص ستان سوخت

M = نقطه جوش (درجه فارنهایت)

D = چگالی

B = متوسط نقطه جوش

#### ۲-۹- عدد اسیدی

اندازه‌گیری میزان اسید موجود در یک نمونه بر مبنای اندازه‌گیری وزن ماده باقی‌مانده جهت خنثی کردن یک گرم نمونه می‌باشد. این آزمون تحت استاندارد D664 صورت پذیرفت. این آزمایش به وسیله دستگاه تیتراسیون انجام گردید. بدین صورت که وزن مشخصی از نمونه در مخلوطی از تولوئن و پروپانول و مقدار لندکی آب تیترا شد که تیرانت واکنش، هیدروکسید پتاسیم می‌باشد.

#### ۲-۱۰- آزمون مشخصه‌های عملکردی سوخت بیودیزل

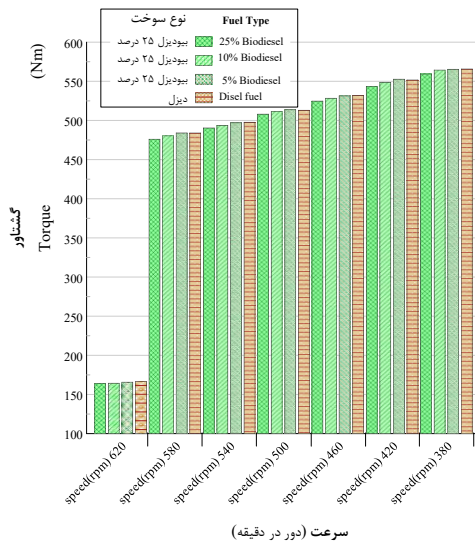
برای اجرای آزمون، آزمایشی با سه تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، در ۱۰۰٪ بیشینه بار، موتور تراکتور TYM انجام گرفت. فاکتورهای آزمایش شامل سرعت‌های دینامومتر (فاکتور A) در ۷ سطح (۳۸۰، ۴۲۰، ۴۶۰، ۵۰۰، ۵۴۰، ۵۸۰ و ۶۲۰ دور در دقیقه) و درصد حجمی متیل استر بزرک در مخلوط سوختی با دیزل مرسوم (فاکتور B) در چهار سطح (۰، ۵، ۱۰، ۲۵ درصد) بود و در مرکز توسعه مکانیزاسیون

#### جدول ۱- خواص بیودیزل تولیدی و مقایسه با حدود بیودیزل استاندارد ASTM D 6751

Table 1. Characteristics of the produced biodiesel versus ASTM D6751 standard specifications

| خصوصیت           | واحد                                  | بیودیزل استاندارد | میتیل استریز بزرک | روش آزمایش ASTM |
|------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| چگالی            | گرم بر سانتیمتر مکعب                  | ---               | ۰/۸۶۳             | D4052           |
| گرانروی سینماتیک | سانتی استوک                           | ۱/۹ - ۶           | ۲/۳۵              | D445            |
| نقطه اشتعال      | درجه سانتیگراد                        | کمتر از ۱۳۰       | ۲۸                | D93             |
| نقطه ابری شدن    | درجه سانتیگراد                        | ---               | -۳                | D2500           |
| نقطه ریزش        | درجه سانتیگراد                        | ----              | -۱۲               | D97             |
| میزان گوگرد      | درصد وزنی                             | کمتر از ۰/۰۵      | Apr-00            | D2622           |
| ارزش حرارتی      | مگاژول بر کیلوگرم                     | ۳۷ - ۴۲           | ۴۰/۶۲۵            | D240            |
| محدوده تقطیر     | درجه سانتیگراد                        | ۳۴۰ - ۳۶۰         | ۳۴۲-۳۴۵           | D86             |
| شاخص ستان        | ---                                   | بیشتر از ۴۷       | ۵۱                | D976            |
| عدد اسیدی        | میلیگرم هیدروکسید پتاسیم بر گرم نمونه | کمتر از ۰/۱۸      | ۰/۱۵              | D664            |

برخلاف مصرف ویژه سوخت، در اینجا اثر متقابل بین سرعت و نوع سوخت معنادار نبود، زیرا تغییرات گشتاور عمدتاً به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی موتور در سرعت‌های مختلف است، نه نوع سوخت. این نشان می‌دهد که هرچند نوع سوخت بر مقدار گشتاور تأثیر دارد، اما این تأثیر در تمام سرعت‌ها به صورت یکسان باقی می‌ماند و تفاوت قابل ملاحظه‌ای در رفتار گشتاور بر اساس ترکیب سوخت در سرعت‌های مختلف مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷- مقایسه گشتاور موتور با ترکیب‌های مختلف سوخت در سرعت‌های مختلف موتور

Fig 7. Comparison of engine torque for different fuel blends at various engine speeds

شکل (۸) گشتاور اندازه‌گیری شده موتور در سرعت‌های مختلف و با استفاده از ترکیب سوخت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشترین گشتاور حاصل در سوخت خالص و سرعت ۳۸۰ دور با مقدار ۵۶۵/۶۶ اندازه‌گیری شده است و کمترین مقدار گشتاور تولید شده در سرعت ۶۲۰ دور در دقیقه و استفاده از ترکیب ۲۵ درصد بیودیزل و دیزل با مقدار ۱۶۴ اندازه‌گیری شده است. برای مقایسه تأثیر ترکیبات سوختی بر گشتاور تولیدی موتور، نمودار میانگین هر ترکیب سوختی در سرعت‌های مختلف ترسیم شده است.

شکل (۹) میانگین گشتاور موتور با سرعت‌های مختلف در هر نوع ترکیب سوختی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با استفاده از سوخت خالص مقدار گشتاور بیشتری نسبت به سایر ترکیبات سوختی بیودیزل و دیزل گشتاور تولید شده است. بیشترین مقدار گشتاور در خالص‌ترین میزان سوختی یعنی دیزل با مقدار ۴۷۲/۹ و کمترین مقدار نیز در بالاترین ترکیب بیودیزل یعنی ۲۵ درصد ترکیب شده با دیزل مرسوم با مقدار ۴۶۶/۷۲ بدست آمد. نتایج بیانگر آن است که نوع سوخت تأثیر معناداری بر مقدار گشتاور تولیدی دارد، به طوری که ترکیبات مختلف سوخت دیزل و بیودیزل موجب



شکل ۶- دینامومتر متصل به تراکتور جهت اندازه‌گیری پارامترهای مورد مطالعه

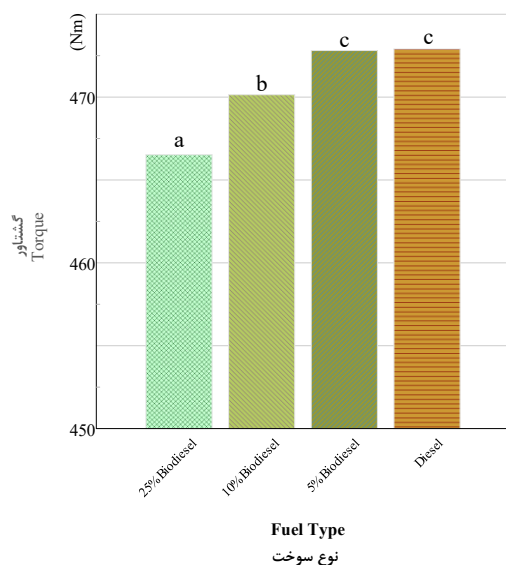
Fig 6. Tractor-mounted dynamometer for parameter measurement

### ۳- نتایج و بحث

جدول (۲) تحلیل واریانس گشتاور نشان داده شده است با توجه به نتایج حاصله، سرعت موتور تأثیر معناداری بر گشتاور تولیدی دارد ( $Pr < 0.0001$ )، به طوری که با افزایش سرعت، تغییرات قابل توجهی در گشتاور مشاهده می‌شود. همچنین، نوع سوخت نیز بر گشتاور اثرگذار بوده و تفاوت معناداری بین سوخت‌های مختلف مشاهده شده است ( $F = 10.61, Pr < 0.0001$ ). با این حال، اثر متقابل بین سرعت و نوع سوخت از نظر آماری معنادار نبوده است ( $Pr = 0.9996$ )، این امر نشان می‌دهد تأثیر نوع سوخت بر گشتاور مستقل از تغییرات سرعت عمل کرده و تعامل خاصی بین این دو متغیر مشاهده نشده است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2 = 0.9993$ ) حاکی از برازش مناسب مدل بر داده‌ها و توضیح بخش عمده‌ای از تغییرات گشتاور توسط متغیرهای مستقل است.

در شکل (۷) گشتاور موتور در سرعت‌های مختلف و با درصدهای مختلف ترکیب سوخت دیزل و بیو دیزل نشان داده شده است. با توجه به شکل در سرعت پایین‌تر گشتاور بیشتری مشاهده شد و افزایش سرعت موتور سبب کاهش معنی‌دار گشتاور گردید. بیشترین مقدار گشتاور در کمترین سرعت یعنی ۳۸۰ دور بر دقیقه با مقدار ۵۶۳.۶۷ و کمترین مقدار نیز در بالاترین سرعت یعنی ۶۲۰ دور بر دقیقه با مقدار ۱۶۵.۱۷ بدست آمد. همان‌طور که در تحلیل واریانس مشخص شد، سرعت موتور تأثیر معناداری بر گشتاور دارد، به طوری که با افزایش سرعت، تغییرات قابل توجهی در مقدار گشتاور مشاهده می‌شود. معمولاً در سرعت‌های پایین، گشتاور مقدار بیشتری دارد و با افزایش سرعت، به دلیل محدودیت‌های احتراق و کارایی حجمی موتور، گشتاور کاهش می‌یابد. این روند طبیعی است، زیرا در سرعت‌های بالاتر، زمان لازم برای پر شدن سیلندر با مخلوط سوخت و هوا کاهش یافته و راندمان حجمی افت می‌کند.

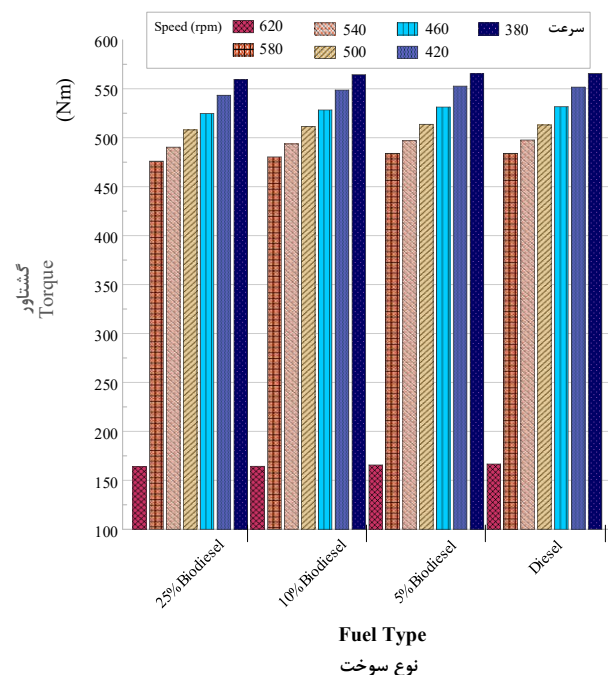
در جدول (۳) تحلیل واریانس برای توان موتور در سرعت‌ها و نوع سوخت‌های مختلف نشان داده شده است که سرعت موتور تأثیر بسیار معناداری بر مقدار توان تولیدی دارد ( $F = Pr < 0.0001$ )، که بیانگر تغییرات چشمگیر توان با افزایش سرعت موتور است. همچنین، نوع سوخت نیز بر توان خروجی تأثیر داشته و تفاوت معناداری بین انواع سوخت مشاهده شده است ( $F = Pr < 0.0001$ )، با این حال، اثر متقابل بین سرعت و نوع سوخت از نظر آماری معنادار نبوده است ( $Pr = 0.9970$ )، که نشان می‌دهد تغییر نوع سوخت در تمامی سرعت‌ها تأثیری مشابه بر توان موتور داشته و تعامل خاصی بین این دو متغیر مشاهده نشده است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2 = 0.9991$ ) نشان‌دهنده برازش مناسب مدل و تبیین بخش عمده‌ای از تغییرات توان توسط متغیرهای مستقل است.



شکل ۹- میانگین گشتاور موتور در سوخت‌های مختلف  
Fig 9. Average engine torque across various fuel types

در شکل (۱۰) مقایسه میانگین برای توان موتور در سرعت‌های مختلف و ترکیب‌های سوختی نشان داده شد. بیشترین مقدار توان در سرعت ۵۸۰ دور بر دقیقه با مقدار ۲۹/۲۴ و کمترین مقدار نیز در بالاترین سرعت یعنی ۶۲۰ دور بر دقیقه با مقدار ۱۰/۸۹ بدست آمد. افزایش توان موتور با افزایش سرعت دوران آن از دلایل مختلفی ناشی می‌گردد که به‌طور مستقیم به بهبود عملکرد موتور و افزایش کارایی سیستم‌های مختلف آن مرتبط است. با افزایش سرعت دوران موتور، ابتدا میزان سوخت و هوای وارد شده به موتور نیز افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که موتور توانایی بیشتری در تبدیل انرژی شیمیایی موجود در سوخت به انرژی مکانیکی داشته باشد. در همین راستا، با افزایش سرعت دوران، فرآیند احتراق در موتور به صورت مؤثرتری انجام می‌شود، چراکه زمان بین هر دو انفجار کاهش می‌یابد. این کاهش زمان باعث می‌شود که موتور قادر باشد تعداد بیشتری انفجار را در واحد زمان انجام دهد و بدین ترتیب توان تولیدی افزایش یابد.

تغییر در عملکرد موتور شده‌اند. معمولاً افزایش درصد بیودیزل در ترکیب سوخت به دلیل چگالی و ارزش حرارتی پایین‌تر آن، منجر به کاهش گشتاور می‌شود. از سوی دیگر، بیودیزل دارای عدد ستان بالاتری است که می‌تواند منجر به احتراق بهتر و یکنواخت‌تر شود، اما به دلیل محتوای اکسیژن بالاتر، میزان انرژی آزاد شده در هر سیکل احتراق کمتر از دیزل خالص خواهد بود. با این حال، تفاوت‌های مشاهده‌شده در تمامی سرعت‌ها تقریباً یکسان بوده است، زیرا اثر متقابل بین سرعت و نوع سوخت معنادار نبوده ( $Pr = 0.9996$ ). این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه نوع سوخت بر میزان گشتاور تأثیر دارد، اما این تأثیر به‌طور یکنواخت در تمام سرعت‌ها مشاهده شده و وابسته به سرعت موتور نیست. دلیل این موضوع آن است که تغییرات گشتاور بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های مکانیکی و احتراقی موتور قرار دارد و نوع سوخت تنها یک عامل محدودکننده در میزان انرژی تولیدی محسوب می‌شود، بدون اینکه بتواند تغییرات چشم‌گیری در رفتار گشتاور در سرعت‌های مختلف ایجاد کند. در مطالعه ای اتولو و کوچاک نشان دادند که گشتاور و قدرت موتور با استفاده از بیودیزل حاصل از متیل استر روغن پسماند به‌طور متوسط در حدود ۳/۴ درصد و ۴/۵ درصد نسبت به گازوییل خالص کاهش دارد که دلیل آن را گرانی بالا و ارزش گرمایی پایین بیودیزل (۸/۸ درصد کمتر از دیزل) می‌دانند.



شکل ۸- مقایسه گشتاور موتور در سرعت‌های مختلف موتور با استفاده از ترکیب‌های مختلف سوخت  
Fig 8. Comparison of engine torque at different engine speeds using various fuel blends

علاوه بر این، در سرعت‌های بالاتر، کارایی مکانیکی موتور نیز بهبود می‌یابد. حرکت چرخشی سریع‌تر در این سرعت‌ها باعث کاهش تلفات انرژی ناشی از اصطکاک و افزایش کارایی سیستم می‌شود. از طرفی، ترکیب بهینه‌تر سوخت و هوا در سرعت‌های بالاتر باعث می‌شود که احتراق به صورت کامل‌تری انجام گیرد، که نتیجه‌ی آن تولید توان بیشتر است. همچنین، عملکرد بهتر سیستم‌های جانبی موتور مانند سیستم تهویه و آگزوز در این سرعت‌ها به کاهش مقاومت در برابر جریان گازها و بهبود عملکرد کلی موتور کمک می‌کند. در نهایت، این تغییرات به طور کلی باعث می‌شود که موتور در سرعت‌های بالاتر

علاوه بر این، در سرعت‌های بالاتر، کارایی مکانیکی موتور نیز بهبود می‌یابد. حرکت چرخشی سریع‌تر در این سرعت‌ها باعث کاهش تلفات انرژی ناشی از اصطکاک و افزایش کارایی سیستم می‌شود. از طرفی، ترکیب بهینه‌تر سوخت و هوا در سرعت‌های بالاتر باعث می‌شود که احتراق به صورت کامل‌تری انجام گیرد، که نتیجه‌ی آن تولید توان بیشتر است. همچنین، عملکرد بهتر سیستم‌های جانبی موتور مانند سیستم تهویه و آگزوز در این سرعت‌ها به کاهش مقاومت در برابر جریان گازها و بهبود عملکرد کلی موتور کمک می‌کند. در نهایت، این تغییرات به طور کلی باعث می‌شود که موتور در سرعت‌های بالاتر

جدول ۲- آنالیز واریانس برای گشتاور موتور در سرعت‌ها و نوع سوخت‌های مختلف استفاده شده  
Table 2. Variance analysis of engine torque for different engine speeds and fuel blends

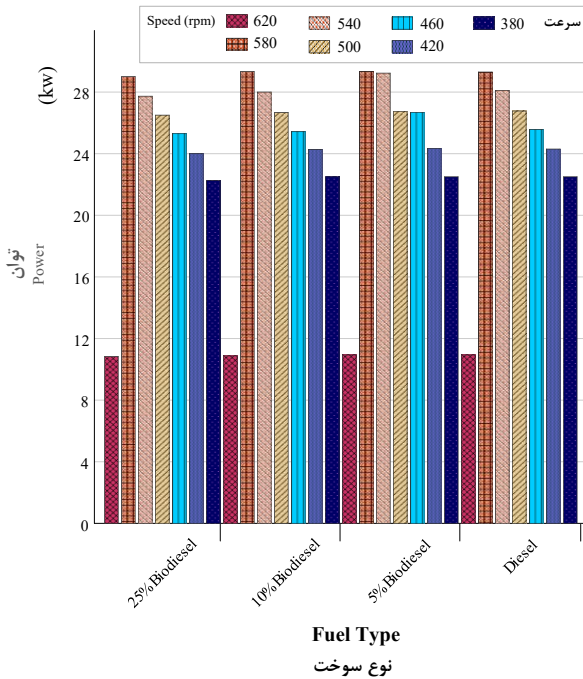
| Source<br>منابع تغییر     | DF<br>درجه آزادی | SS<br>مجموع مربعات | Mean Square<br>میانگین مربعات | F Value            | Pr > F |
|---------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------|
| SPEED<br>سرعت             | 6                | 1366596.405        | 227766.067                    | 12780.5**          | <.0001 |
| Fuel<br>سوخت              | 3                | 567.381            | 189.127                       | 10.61**            | <.0001 |
| SPEED*Fuel<br>سوخت * سرعت | 18               | 68.452             | 3.803                         | 0.21 <sup>ns</sup> | 0.9996 |
| Error                     | 56               | 998                | 17.821                        |                    |        |

شکل (۱۱) توان موتور در انواع ترکیبات سوخت با سرعت‌های مختلف موتور را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار توان در سوخت دیزل مرسوم با مقدار ۲۳/۹۸ و کمترین مقدار نیز در ترکیب ۲۵ درصدی سوخت بیودیزل با دیزل مرسوم با مقدار ۲۳/۶۶ بدست آمد. شکل (۱۲) میانگین توان اندازه‌گیری شده در هر ترکیب مختلف سوخت با سرعت‌های مختلف موتور نمایش داده شده است. با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود با افزایش درصد بیودیزل در ترکیب سوخت، توان موتور کاهش می‌یابد. این کاهش توان به دلایل مختلفی مرتبط است. اولاً، بیودیزل معمولاً انرژی کمتری نسبت به دیزل خالص دارد، چرا که ترکیب شیمیایی آن باعث کاهش انرژی حرارتی حاصل از

احتراق می‌شود. همچنین، بیودیزل‌ها معمولاً چگالی بالاتری دارند که می‌تواند بر میزان سوخت مصرفی و کارایی موتور تأثیر منفی بگذارد. ویژگی‌های احتراق بیودیزل، از جمله دمای بالاتر احتراق و زمان احتراق متفاوت، نیز می‌تواند منجر به کاهش کارایی موتور شود. علاوه بر این، ویسکوزیته بالای بیودیزل ممکن است مشکلاتی در سیستم سوخت‌رسانی ایجاد کرده و باعث سوخت‌رسانی ناکافی شود. در نهایت، ناخالصی‌ها و رطوبت موجود در بیودیزل‌ها می‌توانند بر فرآیند احتراق تأثیر منفی بگذارند و توان موتور را کاهش دهند.

جدول ۳- آنالیز واریانس برای توان موتور در سرعت‌ها و نوع سوخت‌های مختلف استفاده شده  
Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for engine power at different speeds and fuel types

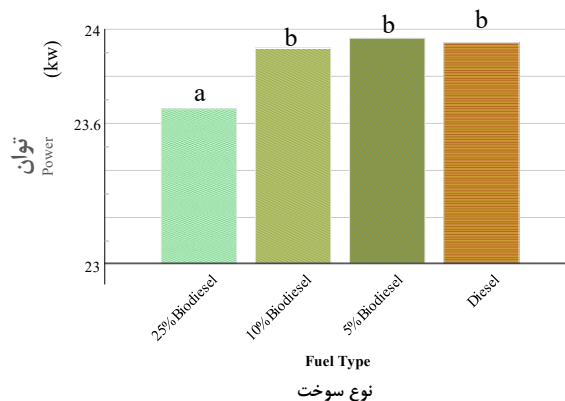
| Source<br>منابع تغییر     | DF<br>درجه آزادی | SS<br>مجموع مربعات | Mean Square<br>میانگین مربعات | F Value            | Pr > F |
|---------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------|
| SPEED<br>سرعت             | 6                | 2725.226429        | 454.204405                    | 10808.3**          | <.0001 |
| Fuel<br>سوخت              | 3                | 1.125119           | 0.375040                      | 8.92**             | <.0001 |
| SPEED*Fuel<br>سوخت * سرعت | 18               | 0.224048           | 0.012447                      | 0.30 <sup>ns</sup> | 0.9970 |
| Error                     | 56               | 2.35333            | 0.042024                      |                    |        |



شکل ۱۱- توان موتور در ترکیب‌های مختلف دیزل و بیودیزل با سرعت‌های مختلف موتور

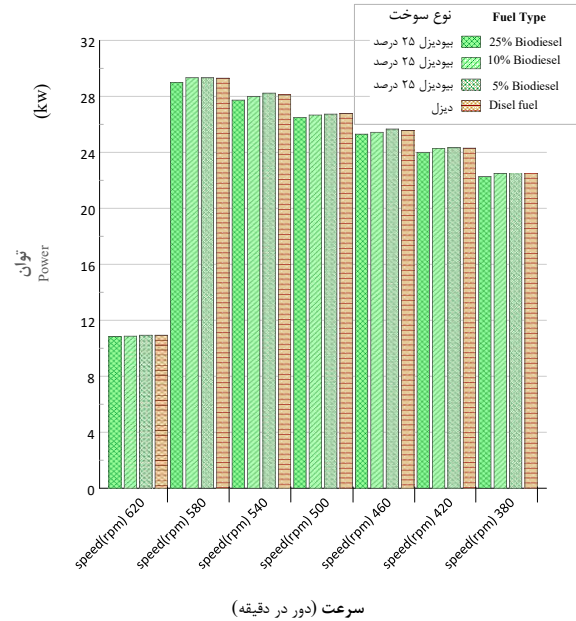
Fig 11. Engine power for different diesel-biodiesel blends at various engine speeds

است که تأثیر نوع سوخت بر مصرف ویژه در سرعت‌های مختلف موتور متفاوت بوده و این دو عامل به صورت وابسته عمل کرده‌اند. مقدار ضریب تعیین ( $R^2 = 0.9961$ ) نشان‌دهنده برازش مناسب مدل و توانایی بالای آن در توضیح تغییرات مصرف ویژه سوخت است. شکل (۱۳) مقایسه میانگین مصرف ویژه موتور در سرعت‌های مختلف با ترکیب‌های مختلف سوخت نشان داده شده است. با افزایش سرعت دوران موتور، مصرف ویژه سوخت به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این روند به دلیل نیاز به توان بیشتر در سرعت‌های بالاتر است، زیرا موتور برای تولید توان اضافی نیاز به مصرف سوخت بیشتری دارد.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین توان موتور در سوخت‌های مختلف

Fig 12. Average engine power comparison across various fuel types



شکل ۱۰- توان موتور در سرعت‌های مختلف با ترکیب‌های مختلف دیزل و بیودیزل

Fig 10. Engine power at different speeds for various diesel-biodiesel blends

جدول (۴) تحلیل واریانس برای مصرف ویژه سوخت را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مشاهده می‌گردد سرعت موتور تأثیر بسیار معناداری بر این متغیر دارد ( $F = 2354.97, Pr < 0.0001$ )، به طوری که با تغییر سرعت، مصرف ویژه سوخت دچار نوسانات چشمگیری می‌شود. علاوه بر این، نوع سوخت نیز تأثیر معناداری بر مصرف ویژه سوخت داشته است ( $F = 9.67, Pr < 0.0001$ )، که نشان‌دهنده تفاوت بین سوخت‌های مختلف در بهینه‌سازی مصرف سوخت است. برخلاف گشتاور و توان، اثر متقابل بین سرعت و نوع سوخت نیز در این مورد معنادار ارزیابی شده است ( $F = 1.94, Pr = 0.0310$ )، که بیانگر آن

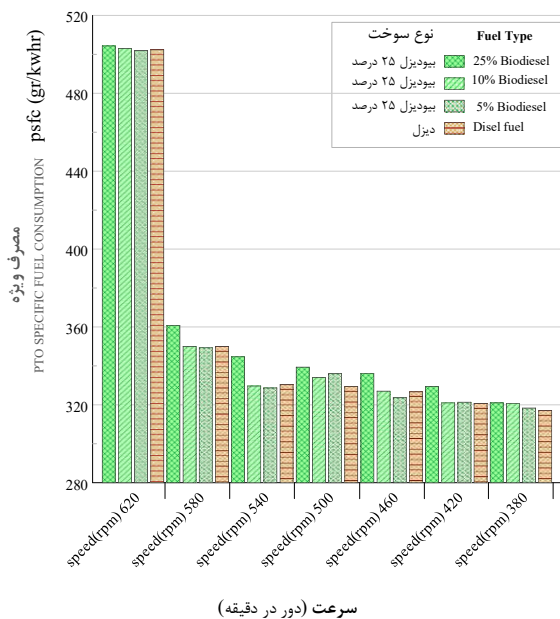
جدول ۴- آنالیز واریانس برای مصرف سوخت ویژه در سرعت‌ها و نوع سوخت‌های مختلف استفاده شده

Table 4: Analysis of variance (ANOVA) for specific fuel consumption at different speeds and fuel types

| Source                    | DF | Type I SS   | Mean Square | F Value | Pr > F |
|---------------------------|----|-------------|-------------|---------|--------|
| SPEED<br>سرعت             | 6  | 309174.4762 | 51529.0794  | 2354.97 | <.0001 |
| Fuel<br>سوخت              | 3  | 634.8929    | 211.6310    | 9.67    | <.0001 |
| SPEED*Fuel<br>سوخت * سرعت | 18 | 762.8571    | 42.3810     | 1.94    | 0.0310 |
| Error                     | 56 | 1225.3333   | 21.8810     |         |        |

همچنین در سرعت‌های بالا، بازده موتور کاهش می‌یابد و تلفات انرژی مانند اصطکاک و تلفات حرارتی افزایش می‌یابد که باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود. علاوه بر این، در سرعت‌های بالاتر ممکن است سیستم سوخت‌رسانی و احتراق نتوانند به طور بهینه عمل کنند و این امر منجر به مصرف بیشتر سوخت برای تولید توان لازم می‌شود. به طور کلی، افزایش مصرف سوخت ویژه در سرعت‌های بالاتر به دلایل فنی مختلفی همچون کاهش بازده موتور، افزایش تلفات انرژی و نیاز به هوای بیشتر برای احتراق بهینه مرتبط است.

ترکیبات سوختی، میانگین مصرف ویژه هر ترکیب سوختی در سرعت‌های مختلف محاسبه شده و در نمودار شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌گردد با افزایش درصد سوخت بیودیزل به دیزل مرسوم در سرعت‌های مختلف باعث افزایش میزان مصرف ویژه سوخت می‌شود. این افزایش در مخلوط ۲۵٪ بیودیزل و دیزل، ۲/۳۷ درصد، در مخلوط ۱۰٪ دارای افزایش ۰/۳۶ درصدی و در مخلوط ۰/۵٪ دارای افزایش ۰/۱۲ درصدی می‌باشد. به نظر می‌رسد این افزایش خیلی اندک به خاطر خصوصیات ترموفیزیکی مخلوط‌های سوختی از قبیل ارزش حرارتی پایین و چگالی بالای بیودیزل بزرگ باشد. کلارک و همکاران (۱۹۹۷) با استفاده از بیودیزل حاصل از روغن سویا ۷/۸٪ کاهش توان و ۱۰٪ افزایش مصرف سوخت ویژه را نسبت به گازوییل گزارش دادند.



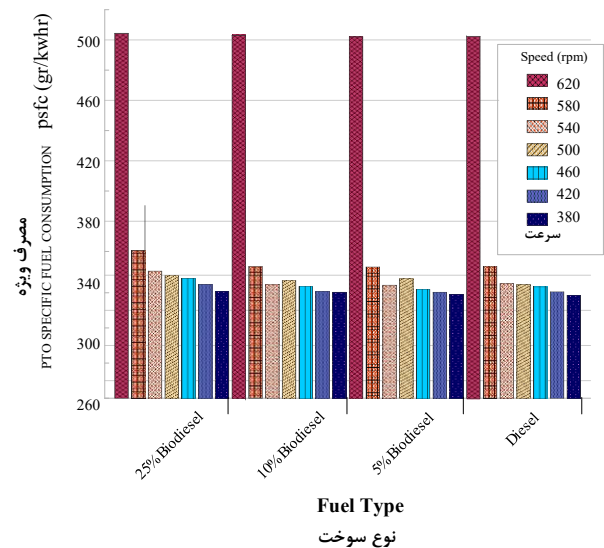
سرعت (دور در دقیقه)

شکل ۱۳- مصرف ویژه موتور در سرعت‌های مختلف با استفاده از

ترکیب‌های مختلف سوختی

Fig 13. Specific fuel consumption at different speeds for various fuel blends

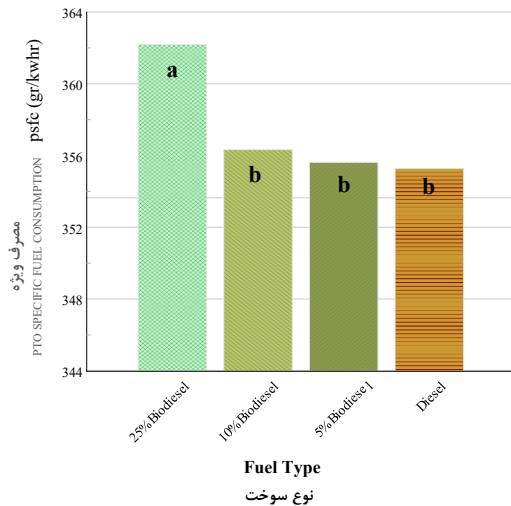
در شکل (۱۴) مصرف ویژه سوخت موتور در سوخت‌های مختلف نشان داده شد. با توجه به داده‌های ارائه شده برای مصرف ویژه سوخت در حالت‌های مختلف ترکیب سوخت، مشاهده شد که بیشترین مقدار مصرف سوخت ویژه در ترکیب ۲۵ درصد سوخت و سرعت ۶۲۰ با مقدار ۵۰۴/۳۳ و کمترین مقدار در سوخت دیزل خالص و سرعت ۳۸۰ با مقدار ۳۱۷ ثبت شده است. برای مقایسه تاثیر انواع درصد



شکل ۱۴- مقایسه مصرف ویژه موتور در ترکیب‌های مختلف سوختی

و با سرعت‌های مختلف موتور

Fig 14. Comparison of specific fuel consumption for different fuel blends at various engine speeds



شکل ۱۵- میانگین مصرف ویژه سوخت موتور در سوخت‌های مختلف

Fig 15. Average specific fuel consumption across various fuel types

تحقیقات زیادی در مورد تاثیر سوخت بیودیزل و ترکیبات مختلف آن با سوخت دیزل بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل انجام شده است. در مطالعه (Xue et al. 2011) نتایج حاصل از مطالعه ۱۶۲ مقاله منتشر شده در مجلات معتبر علمی جهان بررسی شد که نشان می‌داد بیشتر محققان به این نتیجه رسیده اند که:

- ۱- استفاده از سوخت بیودیزل موجب کاهش توان و افزایش مصرف سوخت می‌شود.
- ۲- با استفاده از بیودیزل انتشار آلاینده‌های HC و CO، PM کاهش می‌یابد.

تحقیق (Emaish et al. 2021) نشان داد که درصد بار و سرعت موتور و درصد ترکیب سوخت به طور قابل توجهی بر تمام ویژگی‌های مورد مطالعه شاخصه‌های عملکردی موتور تأثیر می‌گذارند و بهترین مراحل بارگذاری موتور برای به حداکثر رساندن راندمان موتور و به حداقل رساندن مصرف سوخت ویژه و انتشار گازهای گلخانه‌ای بین ۲۵ تا ۷۵ درصد است. افزایش درصد بیودیزل در تمام مراحل بارگذاری منجر به کاهش توان ترمزی موتور (BP)، راندمان حرارتی ترمز، گشتاور محور انتقال قدرت (PTO) و میانگین ترمز شد. نتایج تحقیق (خوب‌بخت و همکاران) نشان داد که افزایش درصد بیودیزل و یا اتانول در مخلوط‌های سوخت باعث کاهش توان ترمزی موتور می‌شود. (Khoobbakht et al. 2019). در مطالعه آمیا و همکاران میزان توان و گشتاور در ترکیب‌های مختلف بیودیزل و دیزل مقداری کمتر از دیزل بوده و مصرف ویژه سوخت افزایش نشان داد. و کاهش گشتاور و توان در ترکیب ۱۵٪ بیودیزل تولیدی از ضایعات روغن پخت و پز و دیزل به ترتیب ۱/۴۴٪ و ۱/۵۴٪ کمتر از گشتاور و توان در استفاده از دیزل مشاهده گردید (Amya et al. 2013).

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه متغیرهای سرعت موتور و نوع سوخت بر عملکرد موتور در زمینه‌های مختلف است. تحلیل واریانس برای گشتاور موتور نشان می‌دهد که افزایش سرعت موتور باعث کاهش گشتاور تولیدی می‌شود و این تغییرات در تمام سرعت‌ها معنادار است. همچنین، نوع سوخت نیز تأثیر معناداری بر گشتاور دارد، به طوری که ترکیب‌های مختلف سوخت دیزل و بیودیزل در گشتاور تأثیرگذارند، اما این تأثیر در سرعت‌های مختلف مشابه است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه نوع سوخت می‌تواند گشتاور را تغییر دهد، اثرات سرعت موتور بر گشتاور از اهمیت بیشتری برخوردار است. در زمینه توان موتور، نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که سرعت موتور تأثیر معناداری بر توان خروجی دارد. افزایش سرعت موجب افزایش توان موتور به دلیل بهبود عملکرد احتراق و کارایی سیستم‌های مکانیکی می‌شود. در عین حال، نوع سوخت نیز بر توان تأثیرگذار است، به ویژه ترکیب‌های مختلف بیودیزل و دیزل. با افزایش درصد بیودیزل در ترکیب سوخت، توان موتور کاهش می‌یابد، که به دلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بیودیزل است. این تغییرات نیز به طور یکنواخت در تمام سرعت‌ها مشاهده شده است. در نهایت، تحلیل مصرف ویژه سوخت نشان می‌دهد که سرعت موتور و نوع سوخت هر دو تأثیر معناداری بر مصرف سوخت ویژه دارند و افزایش سرعت موتور و درصد بیودیزل به دیزل باعث افزایش مصرف ویژه سوخت می‌گردد. در مجموع، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که برای بهبود عملکرد موتور در زمینه‌های گشتاور، توان و مصرف سوخت، باید هم به انتخاب نوع سوخت و هم به تنظیمات سرعت موتور توجه ویژه‌ای شود و افزایش سرعت موتور از حالت استاندارد موتور باعث کاهش چشم‌گیر در توان و گشتاور خروجی و افزایش مصرف ویژه سوخت خواهد شد و استفاده از بیودیزل به عنوان یک سوخت‌های تجدیدپذیر با اختلاف بسیار اندکی شبیه سوخت دیزل بوده و استفاده از ترکیبات مختلف سوخت دیزل و بیودیزل روش مناسبی برای جایگزینی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی خواهد بود.

## منابع

- Abbaszadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhah, M. R., & Najafi, G. (2012). *Current biodiesel production technologies: A comparative review*. Energy Conversion and Management, 63, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>
- Ayazi, M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Hassan, N. M. S. (2023). *Experimental investigation of fuel consumption and emissions of diesel engine fueled with ternary fuel blends of diesel, biodiesel and bioethanol*. Energy Reports, 9, 470–475. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.12.001>
- Budhraj, N. (2022, August 22). *Parameter Optimization for Enhanced Biodiesel Yield from Linum usitatissimum Oil Through Solar Energy Assistance*. Biomass Convers Biorefin 1-16 [online]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1977661/v1>
- Emaish, H., Abualnaja, K. M., Kandil, E. E., & Abdelsalam, N. R. (2021). *Evaluation of the performance and gas emissions of a tractor diesel engine using blended fuel diesel and biodiesel to determine the best loading stages*. Scientific Reports, 11(1), 9811. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89287-0>
- Heidary, B., Hassan-Beygi, S. R., Ghobadian, B., & Taghizadeh, A. (2013). *Vibration analysis of a small diesel engine using diesel-biodiesel fuel blends*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15(3), 117–126.
- Hosseini, S. H., Taghizadeh-Alisarai, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017a). *Effect of added alumina as nano-catalyst to diesel-biodiesel blends on performance and emission characteristics of CI engine*. Energy, 124, 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.109>
- Hosseini, S. H., Taghizadeh-Alisarai, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017b). *Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends*. Renewable Energy, 111, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.013>
- J. Xue, T. E. Grift and A. C. Hansen. (2011). *Effect of Biodiesel on Engine Performances and Emissions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp. 1098-1116. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016>.
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Rafiee, S., Mohammadi, P., Ghobadian, B., Lam, S. S., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2021). *Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends*. Energy Conversion and Management, 241, 114300. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114300>
- Idris, M., Husin, I., Hermawan, I., Novalia, U., D. Batubara, R., Agung Pambudi, N., & Sarifudin, A. (2023). *Engine Performance Using Blended Fuels of Biodiesel and Eco Diesel*. Energy Engineering, 120(1), 107–123. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.019203>
- Khoobakht, G., Karimi, M., & Kheiralipour, K. (2019). *Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling*. Applied Thermal Engineering, 148, 1385–1394. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.025>
- Siavash, N. K., Najafi, G., Hassan-Beygi, S. R., Ahmadian, H., Ghobadian, B., Yusaf, T., & Mazlan, M. (2021). *Time–Frequency Analysis of Diesel Engine Noise Using Biodiesel Fuel Blends*. Sustainability, 13(6), 3489. <https://doi.org/10.3390/su13063489>
- Singh, A., Choudhary, A. K., Sinha, S., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2023). *Analysis of vibrations in a diesel engine produced by Jatropha biodiesel using heterogeneous catalyst*. Energy & Environment, 34(2), 407–428. <https://doi.org/10.1177/0958305X211063935>
- Temizer, İ., & Eskici, B. (2020). *Investigation on the combustion characteristics and lubrication of biodiesel and diesel fuel used in a diesel engine*. Fuel, 278, 118363. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118363>
- Warkhade, G. S., & Babu, A. V. (2019). *Combustion characteristics of linseed (Linum usitatissimum) methyl ester fuelled biodiesel blends in variable compression ratio diesel engine*. Australian Journal of Mechanical Engineering, 17(1), 38–51. <https://doi.org/10.1080/14484846.2018.1525170>
- Clark, S. L., Wagner, L. and Schrock, M.D. (1997). *Methyl and ethyl soybean as renewable fuels for diesel engine*. JAOCS, 10: 632-637.
- Z. Utlu and M. S. Kocak. (2008) *The Effect of Biodiesel Fuel Obtained from Waste Frying Oil on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions*. Renew. Energ., 33, pp. 1936-1941. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.006>