

## پژوهشی

## محاسبه تاثیرات استفاده از سوخت بیودیزل بر شاخص‌های عملکردی یک موتور دیزل در دور ثابت

رسول لقمانپور زرینی<sup>۱</sup>، سهراب مجدفر<sup>۲</sup>، رحیم مالمیر<sup>۳</sup>، یداله اقدود چابکی<sup>۴</sup>

r-loghmanpour@tvu.ac.ir

۱- مربی گروه ماشین‌های کشاورزی، آموزشکده کشاورزی ساری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، مازندران

۲- کارشناس ارشد گروه معماری کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

۳- مربی گروه معماری کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

۴- دانشجوی دکتری مهندسی انرژی، دانشکده مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر، سنجش شاخص‌های کارکردی موتور دیزل در اثر اختلاط سوخت گازوئیل رایج در ایران و سوخت بیودیزل از نوع متیل استر روغن گیاهی پسماند است. برای این منظور در ابتدا مخلوط‌های مختلف سوخت با درصدهای حجمی B80, B60, B40, B20, B0 آماده گردید. سپس با اعمال بارهای مختلف (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) در دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه به موتور دیزل مورد آزمایش (تراکتور MF240) با استفاده از یک دینامومتر الکتریکی شاخص‌های کارکردی موتور مورد سنجش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دمای دود خروجی، راندمان حرارتی و نسبت هوا به سوخت تا مخلوط سوخت B40 به ترتیب حدود ۲۰۰ کلوین، ۲۵ درصد و ۱۲۰ واحد فزونی یافته و شاخص‌های مذکور با افزایش بیشتر درصد سوخت بیودیزل از مخلوط سوخت B40 به بالاتر تقلیل پیدا می‌کنند. شاخص نسبت هوا به سوخت در مخلوط سوخت B40 نسبت به بقیه مخلوط‌های سوخت بالاتر و فرایند تغییرات نسبت هوا به سوخت در همه بارهای دینامومتر همسان است. به آن دلیل که مخلوط سوخت B40 پایین‌ترین مصرف سوخت و مصرف ویژه سوخت ترمزی را دارد. استفاده از این مخلوط به عنوان مخلوط سوخت برتر از نظر مصرف اقتصادی سوخت در موتورهای دیزل با دور ثابت پیشنهاد می‌گردد. توان ترمزی و آهنگ مصرف هوا در تمام بارهای دینامومتر و در کلیه مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل یکسان می‌باشند. همچنین در بخش دیگری از تحقیق، میزان انتشار آلاینده‌های دوده و مونوکسید کربن حاصل از احتراق سوخت‌های بیودیزل و دیزل توسط دستگاه‌های سنجش آلاینده‌گی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصل از آن نشان داد انتشار آلاینده‌های مورد سنجش در سوخت بیودیزل از درصد پایین‌تری برخوردار است. با توجه به الزامات زیست محیطی و روند کاهش ذخایر فسیلی و نتایج این پژوهش، می‌توان از سوخت تجدیدپذیر بیودیزل به عنوان یکی از اصلی‌ترین گزینه‌ها در جایگزینی سوخت دیزل نام برد.

واژگان کلیدی: بیودیزل، دیزل، دینامومتر، مصرف سوخت، سوخت تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله:	۱۳۹۸/۰۹/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله:	۱۳۹۹/۰۲/۲۹

## ۱- مقدمه

در حال حاضر دنیا با بحران منابع انرژی مواجه است و منابع ضیق سوخت‌های فسیلی دیگر توانایی پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی را ندارند. از سوی دیگر افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ایجاد شده توسط آن دانشمندان را به کاوش برای منابع جایگزینی که تجدیدپذیر بوده و فاقد آلاینده‌ها باشند تشویق می‌نماید [۱]. سوخت‌های گوناگونی به عنوان جایگزین سوخت دیزل در موتورهای دیزلی مورد مطالعه قرار گرفتند که اصلی‌ترین آن سوخت حاصل از ضایعات روغن گیاهی است [۲-۶]. موتورهای دیزل جایگاه برجسته‌ای در تأمین نیروی محرکه صنعت و کشاورزی دارند. این موتورها از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت و ایجاد آلودگی هستند. در یک چشم‌انداز آرمانی، سوخت جایگزین مناسب برای موتورهای دیزل باید حفظ مزایای این موتورها را ضمانت کند [۷].

سوخت بیودیزل عبارت است از استرهای منوالکیل اسیدهای چرب با زنجیره طویل که از منابع تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود [۳]. به منظور بکارگیری مستقیم روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی به عنوان منبع انرژی در موتورهای درونسوز و دارا بودن شرایط احتراق مناسب، لازم است تا ساختار مولکولی این منابع به اجزاء ساده‌تری شکسته و متعادل گردد. بیودیزل بدون گوگرد است و دی‌اکسید گوگرد منتشر شده در آن نزدیک صفر است. تقلیل انتشار هیدروکربن‌های نسوخته در سوخت بیودیزل به دلیل وجود اکسیژن در آن است. عدد ستان سوخت بیودیزل در قیاس با گازوئیل بیشتر بوده به همین خاطر قدرت احتراق مناسبی دارد [۸-۹]. برای استفاده از سوخت بیودیزل در موتور دیزل به جای سوخت گازوئیل، اصولاً هیچ تغییر اساسی در موتور لازم نیست و فقط بسته به ارزش حرارتی، چگالی، ویسکوزیته و عدد ستان آن باید تنظیماتی بر روی میزان سوخت پاشیده شده، فشار پاشش در افشانه، مدت زمان پاشش سوخت و شروع پاشش انجام گیرد [۱۰]. بیودیزل خالص را B100 و ترکیب ۲۰٪ از آن با ۸۰٪ سوخت دیزل را اصطلاحاً B20 می‌نامند. در واقع این ترکیب از سوخت بدون هیچ تغییرات اساسی قابل استفاده در موتورهای دیزل است. جایگزینی بیودیزل به جای یک سوخت فسیلی منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و

در نتیجه کاهش روند پدیده گرمایش زمین می‌گردد [۴-۵]. هنگامی که گیاه سویا رشد و نمو می‌کند، CO<sub>2</sub> هوا را جذب می‌نماید و روغن این گیاهان پس از استخراج تحت فرآیند تولید بیودیزل به سوخت تبدیل می‌شود و پس از سوختن، CO<sub>2</sub> و آلاینده‌های دیگری را تولید می‌کنند که به اتمسفر باز می‌گردند. این چرخه باعث افزایش غلظت CO<sub>2</sub> در هوا نمی‌شود، زیرا فتوسنتز گیاهان و نیاز آن‌ها به CO<sub>2</sub> باعث ثابت ماندن میزان دی‌اکسید کربن در هوا می‌گردد [۱۱]. در جدول (۱) درصد غلظت آلاینده‌های منتشر شده در محیط ناشی از سوخت‌های B100 و B20 با سوخت دیزل معمولی مقایسه شده است [۱۲].

همان‌گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، درصد غلظت کلیه آلاینده‌ها برای سوخت بیودیزل اعم از B100 و B20 کم‌تر از سوخت دیزل معمولی است و تنها پارامتر NO<sub>x</sub> است که به مقدار بسیار کم افزایش داشته است. بنابراین استفاده از سوخت بیودیزل باعث افزایش میزان آلاینده‌های نیترات اکسیژن (NO<sub>x</sub>) در بسیاری از موتورها می‌شود. بیودیزل در ساختار خود نیتروژن ندارد، بنابراین افزایش NO<sub>x</sub> مربوط به نیتروژن موجود در سوخت نمی‌باشد. NO<sub>x</sub> تشکیل شده در موتور از نیتروژن موجود در هوای ورودی و واکنش آن در دمای بسیار بالا ناشی از احتراق در محفظه سیلندر ایجاد می‌گردد [۱۳].

در سال ۱۹۹۹، ASTM<sup>۱</sup> استاندارد جدیدی را برای سوخت بیودیزل با نام PS121-99 ارائه داد. همچنین در سال ۲۰۰۱ استاندارد جدید D-6751 برای بیودیزل خالص (B-100) به تصویب رسید. این استاندارد مخلوطی از سوخت بیودیزل و گازوئیل تا سقف ۲۰٪ بیودیزل B20 را در بر می‌گیرد [۱۴].

جدول (۱) مقایسه درصد غلظت آلاینده‌های محیط ناشی از سوخت‌های B100 و B20 در مقایسه با سوخت دیزل [۱۰].

B20	B100	نام آلاینده
-۲۰٪	-۶۷٪	هیدروکربن‌های نسوخته
-۱۲٪	-۴۸٪	منواکسید کربن
-۱۲٪	-۴۷٪	ذرات ریز معلق
-۲٪	-۱۰٪	NO <sub>x</sub>
-۲۰٪	-۱۰۰٪	سولفات‌ها
-۱۳٪	-۸۰٪	هیدروکربن‌های آروماتیکی چند حلقه‌ای PAH

<sup>1</sup>American Society for Testing & Materials

شاخص‌های کارکردی موتور دیزل مورد استفاده شامل آهنگ مصرف هوا، آهنگ مصرف سوخت، راندمان حرارتی ترمزی، دمای دود خروجی، توان ترمزی، مصرف ویژه سوخت ترمزی و مصرف ویژه سوخت ترمزی، نوع سوخت بیودیزل استفاده شده با درصد حجمی ۶۰ و ۸۰ درصد، نوع تراکتور و موتور مورد آزمایش و میزان دور ثابت آن از نوآوری‌های این مطالعه می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا مخلوط‌های مشخصی از سوخت بیودیزل و گازوئیل رایج در ایران مطابق جدول شماره ۲ تهیه شد. سپس با اعمال بارهای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) به وسیله دینامومتر به موتور در دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه شاخص‌های کارکردی موتور دیزل موجود در تراکتور مسی فرگوسن ۲۴۰ در آزمایشگاه سنجش موتور دانشکده کشاورزی ساری ارزیابی شدند. شکل ۲ تصویری از تراکتور و دستگاه دینامومتر مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول شماره (۲) درصد حجمی سوخت بکار رفته در آزمایش.

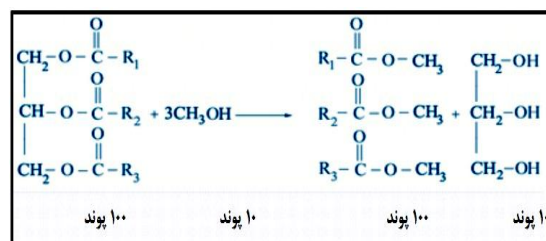
ردیف	درصد‌های مخلوط سوخت	علامت اختصاری
۱	۱۰۰٪ دیزل	B0
۲	۲۰٪ بیودیزل + ۸۰٪ دیزل	B20
۳	۴۰٪ بیودیزل + ۶۰٪ دیزل	B40
۴	۶۰٪ بیودیزل + ۴۰٪ دیزل	B60
۵	۸۰٪ بیودیزل + ۲۰٪ دیزل	B80



شکل (۲) دینامومتر متصل به تراکتور مورد استفاده در آزمایش (MF 240).

بر اساس آزمایش‌ها و پژوهش‌های انجام شده، اساس تولید بیودیزل به شکل امروزی بر پایه فرآیندی به نام تغییر و تبدیل استری<sup>۱</sup> شکل گرفت. در این فرآیند روغن گیاهی (یا چربی حیوانی) پس از عبور از فیلتر برای از بین بردن اسیدهای چرب آزاد، با قلیا فرآیند می‌گردد. سپس با یک الکل (معمولاً متانول) و یک کاتالیزور (معمولاً هیدروکسید سدیم یا پتاسیم) ترکیب می‌شود. تری گلیسریدهای روغن برای تشکیل استرها و گلیسرول واکنش شیمیایی انجام داده و سپس از یکدیگر جدا شده و مورد تصفیه قرار می‌گیرد. واکنش شیمیایی انجام گرفته در این فرآیند، در شکل (۱) نمایش داده شده است [۱۵]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طی این واکنش مقدار ۱۰۰ پوند چربی یا روغن گیاهی (برای مثال روغن دانه‌های سویا) با ۱۰ پوند از الکل با زنجیره کوتاه که با ROH نمایش داده شده است (عموماً متانول و گاهی نیز اتانول)، در مجاورت کاتالیزور (عموماً هیدروکسید پتاسیم یا سدیم مخلوط با متانول) واکنش داده شده است و ۱۰ پوند گلیسرین و ۱۰۰ پوند بیودیزل به عنوان محصولات واکنش تولید گردیده، زنجیره اسیدهای چرب در این واکنش با R1 و R2 و R3 نمایش داده شده است که همان‌گونه که اشاره شد مربوط به اسیدهای پالمیتیک<sup>۲</sup>، استیریک<sup>۳</sup>، اولیک<sup>۴</sup> و لینولیک<sup>۵</sup> ترکیبات روغن‌ها و چربی‌ها می‌باشد [۱۵].

با توجه به اهمیت موضوع مصرف سوخت تجدیدپذیر پاک با بازده بالاتر، در پژوهش حاضر با اعمال بارهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و به کمک دینامومتر الکتریکی در دور معین ۱۳۴۰ دور بر دقیقه شاخص‌های کارکردی موتور دیزل سوار بر تراکتور در صورت استفاده از سوخت بیودیزل که قابل تعمیر به سایر موتورهای دیزل موجود در صنعت و کشاورزی می‌باشد، مورد سنجش قرار گرفت.



شکل (۱) واکنش تولید متیل استر و گلیسرول.

<sup>4</sup> Oleic

<sup>5</sup> Linoleic

<sup>1</sup> Transesterification

<sup>2</sup> Palmitic

<sup>3</sup> Stearic

**۲-۱-۲- کوپلینگ**

کوپلینگ به عنوان عامل اتصال بین دستگاه دینامومتر و موتور است. به طور کلی کوپلینگ بر اساس مشخصات مکانیکی و کاری موتور و دینامومتر انتخاب می‌شود. کوپلینگ مورد استفاده این تحقیق دارای گشتاور انتقالی ۴۰۰ نیوتن متر، گشتاور بحرانی ۱۲۰۰ نیوتن متر و محدوده سرعت ۱۰۰۰ تا ۷۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد.

**۲-۱-۳- دستگاه مهار یا کنترل کننده دینامومتر**

کنترل و تنظیم میزان ترمز دینامومترها با استفاده از یک کنترل کننده صورت می‌گیرد. دستگاه مهار بر اساس کنترل کننده‌های منطقی است.

**۲-۱-۴- دستگاه آلاینده سنج دوده و مونو اکسید کربن**

برای بررسی میزان انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت بیودیزل مورد مطالعه و قیاس آن با سوخت دیزل مرسوم، از دو دستگاه سنجش آلاینده‌گی استفاده شد. در این تحقیق برای سنجش میزان انتشار دوده از دستگاه آلاینده سنج AVL 4155 smoke meter با میزان دقت  $1\text{mg}/\text{m}^3$  و برای سنجش آلاینده مونوکسید کربن (CO) از دستگاه آلاینده سنج AVL Digas 4000 با میزان دقت  $0.1/1.0\%$  استفاده شد.

**۲-۱-۵- موتور**

موتور مورد استفاده در این پژوهش، از نوع دیزل چهار زمانه (Engine diesel, Model AD3.152, Perkins, England) مجهز به توربو شارژر بکار رفته بر روی یک تراکتور مسی فرگوسن مدل ۲۴۰ (MF 240) می‌باشد. بخش اعظمی از نتایج حاصله از شاخص‌های عملکردی موتور مورد آزمایش، قابل تعمیم به اکثر موتورهای دیزل موجود در صنعت و کشاورزی از جمله موتورهای لیستر می‌باشد.

**۲-۱-۶- سوخت مورد استفاده**

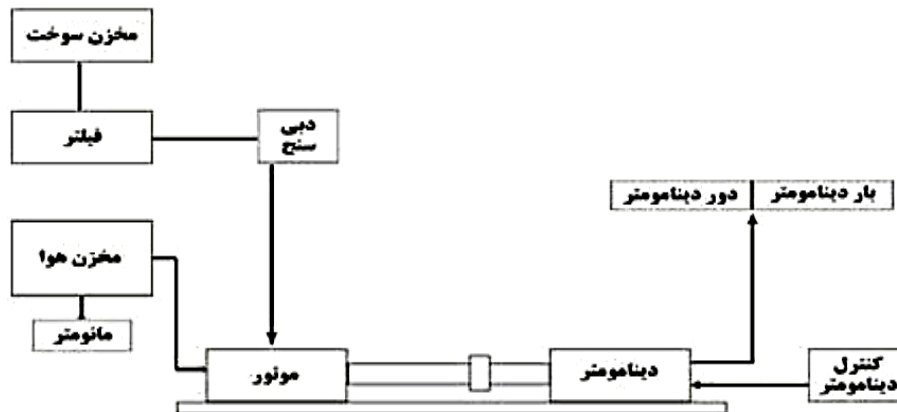
سوخت‌های استفاده شده در این آزمایش شامل گازوئیل مرسوم در ایران و همچنین متیل استر روغن گیاهی پسماند است که ویژگی‌های هر دو سوخت به ترتیب در جداول شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است.

با توجه به این که سوخت بیودیزل حاصل ترکیبی از متیل استرهای مختلف است، و بر اساس نوع روغن گیاهی و یا موادی که بیودیزل از آن تهیه می‌شود، درصد‌های ترکیبی مختلفی از این متیل استرها تشکیل خواهد شد. با در نظر گرفتن این امر در معادلات احتراق برای سوخت بیودیزل یک متیل استر به عنوان مدل مطالعه موردی در نظر گرفته شده و محاسبات احتراق و معادله واکنش بر اساس فرمول شیمیایی این متیل استر انجام شده است.

**۲-۱- تجهیزات آزمایش****۲-۱-۱- دینامومتر الکتریکی**

برای اندازه‌گیری قدرت و گشتاور هر موتور گردنده و یا میزان نیروی مورد نیاز برای چرخش هر مکانیزمی از دستگاه دینامومتر استفاده می‌گردد. دینامومتر از دو قسمت اصلی روتور یا محور مرکزی که با کوپلینگ به موتور متصل می‌گردد و قسمت استاتور یا بدنه ثابت که کاملاً معلق بوده و به وسیله بازویی به نیروسنج متصل است. اصول کار دستگاه دینامومتر به این صورت است که با استفاده از یک سیال واسط و یا نیروی ترمزی الکترومغناطیسی، روتور توسط استاتور نگه داشته می‌شود و نیروی عکس‌العمل استاتور با استفاده از نیروسنج اندازه‌گیری می‌شود. از حاصلضرب نیرو در طول بازو میزان گشتاور محاسبه و توسط سامانه دیجیتالی به نمایش گذاشته می‌شود. دینامومتر الکتریکی یکی از بهترین دستگاه‌های سنجش گشتاور و قدرت موتورهای احتراقی و الکتریکی است.

دینامومتر مورد استفاده در این تحقیق ادی کارنت مدل ۱۹۰ (Eddy Current Dyno-190) بوده است. کنترل دقیق سرعت و گشتاور، اینرسی پایین و دوام بالا از مزایای این نوع دینامومتر نسبت به سایر مدل‌های موجود است. این دستگاه دارای بیشینه توان نامی ۱۹۰ کیلووات، بیشینه گشتاور نامی ۶۰۰ نیوتن متر در  $1500\text{rpm}$  و بیشینه سرعت  $7500\text{rpm}$  می‌باشد. هر وسیله‌ای که برای اندازه‌گیری به کار می‌رود، نیاز به تعیین صحت و دقت یا کالیبراسیون و آزمون عدم قطعیت دارد. از همین رو پس از انجام تست و کالیبراسیون طبق روش موجود در دفترچه راهنما، میزان خطای خوانش گشتاور این دستگاه با سطح اطمینان ۹۵٪ برابر  $\pm 0.2\%$ ، دقت خوانش دور برابر  $1\text{rpm}$  و دقت سنجش توان کمتر از ۱ کیلووات برآورد شد [۱۶].



شکل (۳) تجهیزات مورد استفاده در آزمایش.

جدول (۳) ویژگی‌های مهم سوخت دیزل مورد استفاده به همراه استانداردهای ASTM [۱۷].

ردیف	نام مشخصه	روش استاندارد آزمون	سوخت دیزل	واحد
۱	نقطه اشتعال	ASTM D-93	۶۱	C°
۲	گرانروی سینماتیک	ASTM D-445	۴/۱	mm <sup>2</sup> /S
۳	چگالی	ASTM D-4052	۰/۸۳۹	g/cm <sup>3</sup>
۴	ارزش حرارتی پایین	ASTM D-240	۴۲/۵۷	MJ/kg
۵	جرم مولکولی	---	۲۰۹	kg/mol
۶	درصد جرمی کربن	---	۸۶/۵	%
۷	درصد جرمی هیدروکربن	---	۱۳/۵	%
۸	درصد جرمی گوگرد	---	۰/۷۱	%

جدول (۴) ویژگی‌های مهم سوخت بیودیزل مورد استفاده به همراه استانداردهای ASTM و مقادیر مجاز [۱۷].

ردیف	نام مشخصه	روش استاندارد آزمون	حدود مجاز	سوخت دیزل	واحد
۱	نقطه اشتعال	ASTM D-92	کمتر از ۱۳۰	۱۷۶	C°
۲	گرانروی سینماتیک	ASTM D-445	۱/۹ تا ۶	۴/۷۳	mm <sup>2</sup> /s
۳	نقطه ابری شدن	ASTM D-2500	---	-۱	C°
۴	نقطه ریزش	ASTM D-97	---	-۴	C°
۵	گلیسرین آزاد	ASTM D-6584	حداکثر شماره ۰/۰۲	۰/۰۱۶	% mass
۶	آب و رسوبات	ASTM D-2709	حداکثر شماره ۰/۰۵	۰/۰۵	% vol
۷	چگالی	---	---	۰/۸۸	g/cm <sup>3</sup>
۸	ارزش حرارتی پایین	---	---	۳۸۷۳۰	kJ/kg

کنترلی شامل بار اعمالی به موتور و مخلوط‌های مختلف سوخت (B80, B60, B40, B20, B0) بوده است. بارهای مشخص (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) از سوی دینامومتر الکتریکی به موتور اعمال شد، به گونه‌ای که با تغییر اهرم دستی شانه گاز دور موتور در مقدار ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه ثابت شد. سپس با اندازه‌گیری دمای دود خروجی به وسیله دماسنج و آهنگ مصرف هوا به شیوه اندازه‌گیری اختلاف فشار و آهنگ مصرف سوخت با

برای اندازه‌گیری سوخت مصرف شده از مخزن جانبی بر روی یک ترازوی دیجیتالی با دقت یک گرم استفاده شد. همچنین زمان تغییرات جرمی سوخت توسط یک کرنومتر اندازه‌گیری گردید.

## ۲-۲- شیوه و مراحل آزمایش

آزمایش‌ها به منظور بررسی اثرگذاری سوخت بیودیزل بر شاخص‌های کارکردی موتور صورت گرفت. پارامترهای

### ۳-۱- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر آهنگ مصرف هوا

آهنگ مصرف هوا ( $M_a$ ) که در معادله (۴) آمده است، به فشار هوای محیط ( $P$ )، سرعت هوای عبوری از صفحه روزنه‌دار ( $V_a$ )، ثابت هوا ( $R$ ) و دمای هوای ورودی به موتور ( $T_{ia}$ ) وابسته است.

$$M_a = \frac{P \times M_a}{R \times T_a} \quad (4)$$

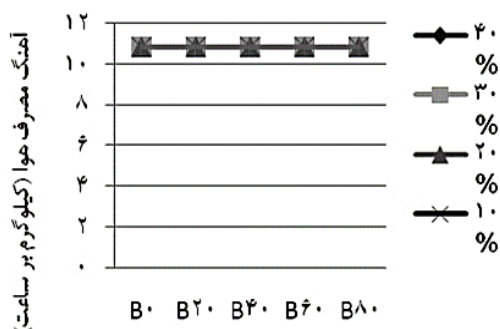
بررسی مقادیر شکل (۴) نشان می‌دهد که آهنگ مصرف هوای موتور در تمام مخلوط‌های سوخت و بارهای دینامومتر یکسان است. بر اساس یک قاعده کلی در همه موتورهای دیزل آهنگ مصرف هوا ثابت و آهنگ مصرف سوخت متغیر است، زیرا در این موتورها در ابتدای چرخه موتور میزان معینی هوا وارد سیلندر می‌شود و در زمان پاشش سوخت، هوای وارد شده در داخل سیلندر حبس شده و هیچ‌گونه ارتباطی بین محفظه سیلندر و بیرون آن وجود نخواهد داشت.

### ۳-۲- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر آهنگ مصرف سوخت

آهنگ مصرف سوخت ( $M_f$ ) که در معادله (۲) آمده است به چگالی سوخت ( $P_f$ ) و دبی حجمی جریان سوخت ( $Q_f$ ) بستگی دارد.

$$M_f = P_f \times Q_f \quad (2)$$

با غنی‌تر شدن مخلوط هوا - سوخت قدرت موتور افزایش می‌یابد ولی وجود سوخت اضافی باعث افزایش آلایندگی گازهای خروجی و افزایش مصرف سوخت می‌شود.



شکل (۴) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر آهنگ مصرف هوا در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.

اندازه‌گیری زمان برای مصرف ۱۰ سانتی‌متر مکعب سوخت و حل معادلات مربوطه شاخص‌های دبی جرمی هوا، دبی جرمی سوخت، راندمان حرارتی ترمزی<sup>۱</sup>، دمای دود خروجی<sup>۲</sup>، توان ترمزی<sup>۳</sup>، نسبت هوا به سوخت<sup>۴</sup>، مصرف ویژه سوخت<sup>۵</sup> برای هر نوع مخلوط سوخت در بارهای مختلف دینامومتر و همچنین میزان انتشار گازهای آلاینده (دوده و مونوکسید کربن) توسط ابزار آلاینده‌سنج بررسی شدند.

### ۳-۲- عدم قطعیت

در این پژوهش ابتدا برای هر نقطه، سه داده آزمایشگاهی جمع‌آوری شده است و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده نهائی آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از معادله (۱) محاسبه شده است [۱۸].

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (1)$$

در این فرمول  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه می‌باشد. انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها از طریق معادله (۲) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

مقدار درصد عدم قطعیت ( $x$ ) داده‌های آزمایشگاهی از رابطه (۳) محاسبه شده است [۱۸].

$$x = 100 \sigma_m \sqrt{x} \quad (3)$$

که در آن  $x$  مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است.

### ۳- نتایج و بحث

مشخصات بیودیزل بدست آمده از روغن‌های گیاهی، وابسته به زنجیره‌های اسیدهای چربی است که در خوراک استفاده شده وجود دارد [۱۹]. در نتیجه باید توجه نمود که نتایج حاصل از این پژوهش منحصر به بیودیزل با پایه روغن پسماند خوراکی است و قابل تعمیم به سایر سوخت‌های بیودیزل نبوده و قیاس نتایج آن‌ها از نوع قیاس مع‌الفارغ است.

<sup>4</sup> Air-Fuel Ratio

<sup>5</sup> Specific Fuel Consumption

<sup>1</sup> Thermal Efficiency

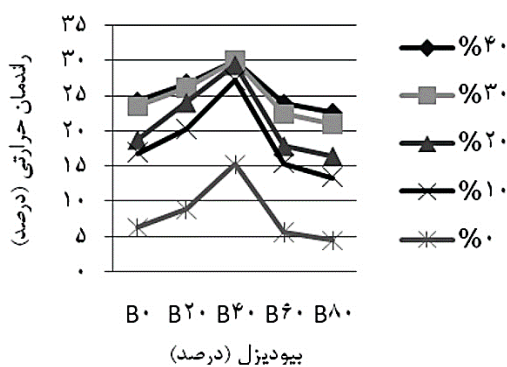
<sup>2</sup> Exhaust Gas Thermal

<sup>3</sup> Brake Horse Power

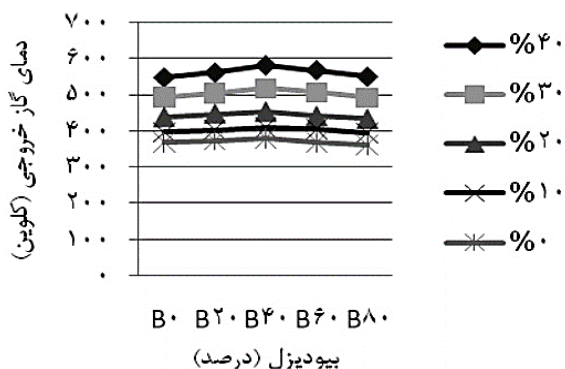
با بررسی مقادیر شکل (۶) مشخص می‌شود که راندمان حرارتی تا مخلوط سوخت B40 افزایش یافته و از مخلوط سوخت B40 تا B80 تقلیل می‌یابد. همچنین راندمان حرارتی در تمام مخلوط‌های سوخت با زیاد شدن بار، افزایش می‌یابد.

#### ۳-۴- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر دمای دود خروجی

با توجه به مقادیر به دست آمده در شکل (۷) مشخص می‌شود که دمای دود خروجی با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط‌های سوخت تا مخلوط سوخت B40 افزایش یافته ولی از مخلوط سوخت B40 تا B80 تقلیل می‌یابد. افزایش دمای دود خروجی تا مخلوط سوخت B40 به دلیل زیاد شدن فشار سیلندر در این بازه است. همچنین کاهش دمای دود خروجی از مخلوط سوخت B40 تا B80 به دلیل کاهش فشار سیلندر در این بازه است. با افزایش بار دمای دود خروجی در تمامی مخلوط‌های سوخت افزایش می‌یابد.



شکل (۶) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر راندمان حرارتی در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.



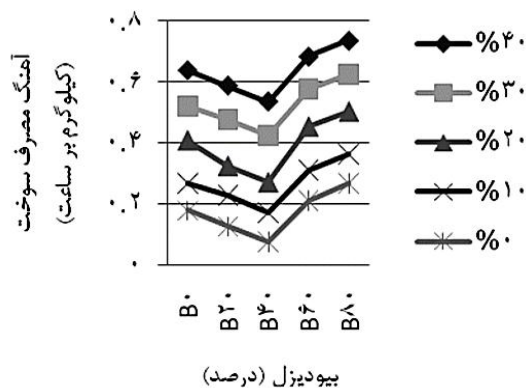
شکل (۷) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر دمای دود خروجی در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.

از طرفی افزایش مصرف سوخت به معنای کاهش راندمان موتور است [۲۰]. بررسی مقادیر شکل (۵) نشان می‌دهد که آهنگ مصرف سوخت از مخلوط B0 تا B40 تقلیل یافته و از مخلوط B40 تا B80 افزایش می‌یابد. علت تقلیل آهنگ مصرف سوخت با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تا مخلوط سوخت B40 وجود حالت ایده‌آل از نظر گرانی و چگالی مخلوط سوخت و بهتر شدن وضعیت احتراق است [۲۱]. با افزایش بار، آهنگ مصرف سوخت موتور در تمامی مخلوط‌های سوخت افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه استفاده از مخلوط سوخت B40 در موتورهای دیزل با دور ثابت به علت پایین‌ترین مصرف سوخت در بین مخلوط‌های مختلف سوخت به عنوان سوخت برتر از حیث مصرف بهینه سوخت پیشنهاد می‌شود.

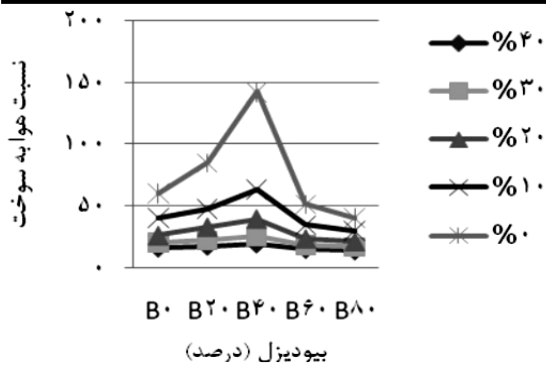
#### ۳-۳- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر راندمان حرارتی ترمزی

راندمان حرارتی ترمزی میزان بهره‌دهی حرارت رها شده در فرآیند احتراق و تولید قدرت ترمزی را نشان می‌دهد. این شاخص با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌گردد. راندمان حرارتی بستگی به توان خروجی موتور، دبی سوخت مصرفی و ارزش حرارتی آن دارد. به علت نقش برجسته ترکیب سوخت بر راندمان حرارتی موتور، تأثیر ترکیب سوخت مورد آزمایش بر راندمان حرارتی موتور مورد بررسی قرار گرفت. راندمان حرارتی ترمزی با توان ترمزی ( $W$ ) رابطه مستقیم و با دبی جرمی مخلوط سوخت ( $M_{f mix}$ ) و ارزش حرارتی مخلوط سوخت ( $H_{v mix}$ ) رابطه عکس دارد.

$$\eta_{th} = \frac{W}{M_{f mix} \times H_{v mix}} \quad (3)$$



شکل (۵) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر آهنگ مصرف سوخت در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.



شکل (۹) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر نسبت هوا به سوخت در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.

تفاوت زیاد نسبت هوا به سوخت در صفر درصد بار نسبت به بقیه بارها به خاطر کارکرد موتور در حالت بدون بار است.

### ۳-۷- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر مصرف ویژه سوخت ترمزی

چگالی سوخت و ارزش حرارتی سوخت در مصرف ویژه سوخت ترمزی موتور، به ترتیب اثر مستقیم و معکوس دارد. لذا در بارهای یکسان مخلوط سوخت کمترین مصرف ویژه را خواهد داشت که هر دو شرایط کوچک بودن چگالی و بزرگ بودن ارزش حرارتی را داشته باشد (یعنی یک حالت مطلوب بین سوخت دیزل و بیودیزل). مصرف ویژه سوخت (SFC) که در معادله (۷) آمده است، برحسب کیلوگرم بر کیلووات ساعت به صورت جرم سوخت مصرفی ( $M_f$ ) به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی ( $W$ ) تعریف می‌شود [۱۹].

$$SFC = \frac{M_f}{W} \quad (7)$$

با بررسی مقادیر شکل (۱۰) مشخص می‌شود که مصرف ویژه سوخت تا مخلوط سوخت B40 تقلیل یافته و از مخلوط سوخت B40 تا B80 افزایش می‌یابد. کاهش مصرف ویژه سوخت تا مخلوط سوخت B40 به علت کاهش آهنگ مصرف سوخت است و افزایش مصرف ویژه سوخت از مخلوط سوخت B40 تا B80 به دلیل افزایش آهنگ مصرف سوخت در این بازه است. مخلوط سوخت B40 پایین‌ترین میزان مصرف ویژه سوخت را دارد و استفاده از آن به عنوان مخلوط برتر از نظر مصرف بهینه سوخت پیشنهاد می‌شود. علت کاهش آهنگ مصرف سوخت با افزایش سوخت بیو دیزل در مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تا ۴۰٪، وجود حالت مطلوب از نظر گرانشی و چگالی مخلوط سوخت بین سوخت دیزل و بیودیزل و بهبود شرایط احتراق است.

### ۳-۵- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر توان ترمزی

توان ترمزی ( $W$ ) که در معادله (۵) آمده است، همان توان اندازه‌گیری شده در خروجی موتور است که با گشتاور ( $T$ ) و دور موتور ( $N$ ) رابطه مستقیم دارد.

$$W = 2 \times \pi \times N \times T \quad (5)$$

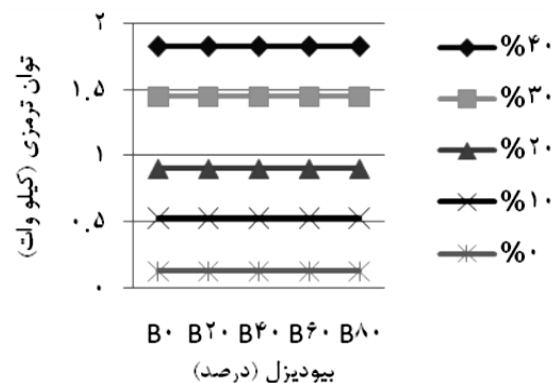
با بررسی مقادیر شکل (۸) مشخص می‌گردد که توان ترمزی در یک بار معین برای تمامی مخلوط‌های سوخت یکسان است، که علت آن تنظیم دور دینامومتر با تغییر میزان سوخت در دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه است. دلیل افزایش توان ترمزی با افزایش بار در کلیه مخلوط‌های سوخت به خاطر افزایش گشتاور ترمزی با افزایش بار است.

### ۳-۶- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر نسبت هوا به سوخت

نسبت هوا به سوخت که در رابطه (۶) آمده است، برابر نسبت آهنگ مصرف هوا ( $M_a$ ) به آهنگ مصرف سوخت ( $M_f$ ) است.

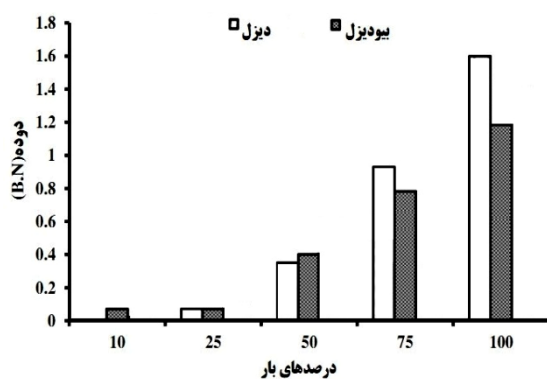
$$\frac{M_a}{M_f} = \text{سوخت به هوا نسبت} \quad (6)$$

با بررسی مقادیر شکل (۹) مشخص می‌شود که نسبت هوا به سوخت تا مخلوط سوخت B40 افزایش یافته و از مخلوط سوخت B40 تا B80 تقلیل می‌یابد. دلیل افزایش نسبت هوا به سوخت تا مخلوط سوخت B40 یکسان بودن آهنگ مصرف هوای موتور در بار معین و کاهش آهنگ مصرف سوخت در این بازه است. همچنین علت تقلیل نسبت هوا به سوخت از مخلوط سوخت B40 تا B80 افزایش آهنگ مصرف سوخت و یکسان بودن آهنگ مصرف هوای موتور در بار معین در این بازه است. با افزایش بار، نسبت هوا به سوخت در کلیه مخلوط‌های سوخت تقلیل می‌یابد.

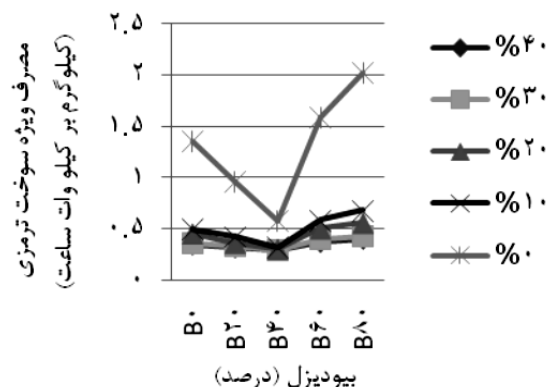


شکل (۸) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر توان ترمزی در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.





شکل (۱۱) مقایسه میزان انتشار آلاینده دوده از احتراق سوخت‌های بیودیزل و دیزل.

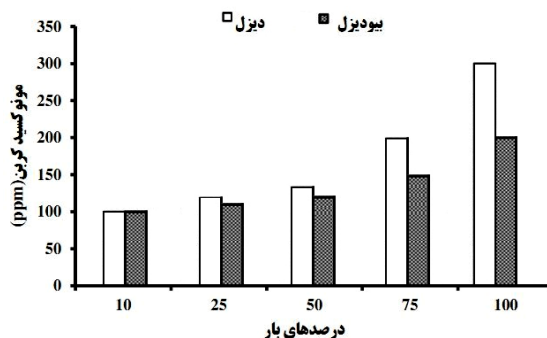


شکل (۱۰) اثرگذاری سوخت بیودیزل بر مصرف ویژه سوخت ترمزی در بارهای مختلف و دور ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه.

### ۳-۹- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر میزان انتشار مونوکسید کربن

تغییر مقادیر مونوکسید کربن (CO) با شرایط مختلف بار موتور در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. با افزایش گشتاور، میزان انتشار مونوکسید کربن افزایش می‌یابد، اما تغییرات بار بیشینه شدیدتر است. به طوری که در گشتاور بیشینه، سوخت بیودیزل مورد استفاده حدود ۳۵ درصد نسبت به دیزل CO کمتری تولید می‌کند. از دلایل این امر می‌توان به وجود اکسیژن بیشتر در سوخت بیودیزل نسبت به دیزل اشاره کرد [۲۳].

با افزایش سهم زیست دیزل (اتیل استر) در مخلوط سوخت، با توجه به محتوای اکسیژن سوخت زیست دیزل، کیفیت احتراق افزایش می‌یابد و موجب می‌شود تا حداکثر دما و فشار داخل استوانه افزایش یابد و به تبع آن، مقدار آلاینده اکسیدهای ازت را افزایش می‌یابد ولی مقدار تولید آلاینده‌های UHC و دوده کاهش می‌یابد.



شکل (۱۲) مقایسه میزان انتشار آلاینده مونوکسید کربن از احتراق سوخت‌های بیودیزل و دیزل.

افزایش درصد سوخت بیودیزل به دلایل چگالی بزرگتر و ارزش حرارتی کوچکتر آن نسبت به سوخت دیزل، باعث افزایش چگالی مخلوط سوخت و موجب کاهش انرژی حرارتی آن می‌گردد. افزایش چگالی مخلوط سوخت موجب افزایش جرم مصرفی مخلوط سوخت و همچنین افزایش ارزش حرارتی سوخت باعث افزایش انرژی آزاد شده و در نتیجه تولید توان بیشتر می‌شود.

### ۳-۸- اثرگذاری سوخت بیودیزل بر میزان انتشار دوده

مقادیر مختلف دوده و تغییرات آن با افزایش گشتاور در سرعت ۱۳۴۰ rpm در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود. همانطور که از شکل استنباط می‌شود، در گشتاورهای پایین تغییرات دوده ناچیز است، اما در گشتاور بیشینه سوخت بیودیزل مورد استفاده در قیاس با سوخت دیزل ۱۲/۵ درصد دوده را کاهش داده است. محتوای بالای اکسیژن بیودیزل سبب می‌شود کربن موجود در سوخت با آن واکنش داده و به صورت CO از موتور خارج شود و دوده کاهش می‌یابد. گوکالپ و همکاران نیز در تحقیقی جهت استفاده از سوخت بیودیزل روغن سویا و ترکیبات آن با دیزل معمولی (B5، B20، B50 و B100) به نتیجه مشابهی دست یافتند. در این مطالعه انتشار دوده برای B50 در حدود ۶۲ درصد و برای بیودیزل خالص ۷۴ درصد در مقایسه با دیزل مشاهده شد [۲۲]. انتشار دوده با کاهش نسبت کربن به هیدروژن در سوخت کاهش می‌یابد. نسبت کربن به هیدروژن سوخت زیست دیزل کمتر از گازوئیل است. همچنین، فقیر بودن مخلوط سوخت و هوا علت تشکیل دوده است.

## ۴- نتیجه گیری

به دلیل یکسان بودن دمای آزمایشگاه در طول انجام آزمایش تغییرات ناچیز نیز در آهنگ مصرف هوا وجود ندارد. بنابراین آهنگ مصرف هوای موتور در همه بارهای دینامومتر و برای تمامی مخلوط‌های سوخت یک مقدار ثابت است. آهنگ مصرف سوخت موتور تا مخلوط سوخت B40 سیر نزولی دارد، اما با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط‌های سوخت از مخلوط سوخت B40 به بالاتر سیر صعودی پیدا می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که روند کاهشی و افزایشی آهنگ مصرف سوخت در تمام بارهای دینامومتر برابر است. مخلوط سوخت B40 نسبت به بقیه مخلوط‌های سوخت کمترین میزان مصرف سوخت را دارد و از دیدگاه اقتصادی مصرف سوخت، مخلوط سوخت B40 از بقیه با صرفه‌تر بوده و استفاده از آن پیشنهاد می‌گردد.

با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط‌های سوخت تا مخلوط سوخت B40 راندمان حرارتی افزایش یافته و از مخلوط سوخت B40 به بالاتر راندمان حرارتی تقلیل می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که مخلوط سوخت B40 در یک بار مشخص نسبت به بقیه مخلوط‌های سوخت دارای راندمان حرارتی بالاتری است. دمای دود خروجی تا مخلوط سوخت B40 افزایش یافته و از مخلوط سوخت B40 به بالاتر کاهش می‌یابد. همچنین روند تغییرات دمای دود خروجی در تمام بارهای دینامومتر مثل هم است. فراتر از این با افزایش بار، شاخص دمای دود خروجی در همه مخلوط‌های سوخت افزایش می‌یابد. توان ترمزی موتور در بار مشخص برای همه مخلوط‌های سوخت یکسان است. زیرا با تغییر میزان سوخت، دور دینامومتر در حد ثابت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه نگه داشته می‌شود. نسبت هوا به سوخت تا مخلوط سوخت B40 افزایش یافته و از مخلوط سوخت B40 به بالاتر تقلیل می‌یابد. روند تغییرات نسبت هوا به سوخت در بارهای مختلف دینامومتر مانند هم است.

همچنین مخلوط سوخت B40 در یک بار مشخص بالاترین نسبت هوا به سوخت را در مقایسه با بقیه مخلوط‌های سوخت دارد. مصرف ویژه سوخت ترمزی تا مخلوط سوخت B40 تقلیل یافته و از مخلوط سوخت B40 به بالاتر افزایش می‌یابد. روند تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی در همه بارهای دینامومتر مانند هم است. مخلوط سوخت B40

یک بار معین دارای پایین‌ترین مصرف ویژه سوخت ترمزی نسبت به بقیه مخلوط‌های سوخت است. در نتیجه مخلوط سوخت B40 در قیاس با بقیه مخلوط‌های سوخت از حیث مصرف اقتصادی سوخت دارای برتری بوده و استفاده از آن پیشنهاد می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، سوخت تجدیدپذیر بیودیزل با متوسط درصد پایین‌تر انتشار آلاینده‌ها از جمله دوده و مونوکسید کربن و همچنین شرایط مناسب و آسان‌تر نگهداری و انتقال به سبب مشخصه‌های شیمیایی آن از جمله دمای اشتعال بالاتر نسبت به سوخت دیزل و اختلاف جزئی در میزان شاخص‌های عملکردی در احتراق، می‌تواند به عنوان گزینه‌ای جدی برای جایگزینی سوخت دیزل با منشاء فسیلی مورد توجه قرار گیرد. این امر در حالی است که عواملی چون روند افزایش تقاضا برای انرژی، کاهش ذخایر انرژی با منشاء فسیلی و همچنین سیاست‌گذاری‌های کلان در زمینه اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تر در خصوص آلاینده‌های زیست محیطی این رقابت را جدی‌تر می‌نماید.

## ۵- مراجع

- [1] Demirbas, A. "Progress and Recent Trends in Biofuels". *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.33, pp.1-18. 2006.
- [2] Y., Hemmat, B., Ghobadian, M., Loghavi, S., Kamgar, and E., "Fayyazi. Biodiesel Fuel Production from Residual Animal fat as Inedible and Inexpensive Feedstock". *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol.5, No.1, pp.84-91, 2016.
- [3] S., Sundarapandian, and G., Devaradjane. "Performance and Emission Analysis of Biodiesel Operated CI Engine". *Engineering Computing and Architecture*, Vol.1, No.2, pp.1-22, 2017.
- [4] U., Lou, and Z., Stephen. "The Effect of Viscosity and other Properties of Vegetable Oil Fuels on Spray Characteristics". *Proceedings of the Second International Conference on Small Engines and Their Fuels in Developing countries*, uk. 2016.
- [5] H. L., Goettler, M., Ziejewski, and A. M., knudson. "Performance of a Diesel Engine Operating on Blends of Diesel Fule and Crude Sunflower Oil at Normal and Elevated Fuel Temperatures". Paper 852087, SAE. 2013.
- [6] H., Jam, A., Ghazanfari, and M., Shamsi. "Investigating the Effects of using Biodiesel Prepared from Persian Lilac oil on the Exhaust Emissions of a Diesel Engine". *Agricultural*

- puting and Architecture. Vol.1, No.2, pp.1-22, 2012.
- [22] B., Gokalp, E., Buyukkaya and H., Soyhan. "Performance and Emissions of a Diesel Tractor Engine Fueled with Marine Diesel and Soybean Methyl Ester". Biomass and Bioenergy, Vol.35, pp.3575-3583, 2011.
- [23] J., Xue, T., Grift and A., Hansen. "Effect of Biodiesel on Engine Performances and Emissions". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.15, pp.1098-1116. 2011.
- [24] B., Najafi, V., Piroozpanah, and B., Ghobadian, Experimental Investigation of Diesel Engine Performance Parameters and Pollution using Biodiesel", Modares Thechnical and Engineering, Special Issue on Mechanical Engineering, (In Farsi). Vol.28, pp.78-101, 2007.
- Machinery Journal. Accepted for publication (In Press). 2018.
- [7] V., Rezaee, A.R., Shokri, and M., Nemati. "Investigation of Performance of a Small Diesel Engine using Biodiesel". SAE paper No. 2007-32-0075. 2015.
- [8] S. H., Yoon, H. K., Suhand, C.S.Lee. "Effect of Spray and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Fuel in a Compression Ignition Engine". Energy and Fuels, Vol.23, pp.1486-149, 2009.
- [9] S.H., Park, S.H., Yoon, and C.S., Lee. "Effect of the Temperature Variation on Properties of Iodiesel and Biodiesel-Ethanol Blends Fuels". Oil & Gas Science and Technology, Vol.63, No.6, pp.737-745, 2008.
- [۱۰] سعیدی نیچران، محمدرضا، قبادیان، برات، نجفی، غلامحسن. بررسی تجربی متغیرهای عملکردی یک موتور دیزل با استفاده از سوخت بیودیزل. مجله تحقیقات موتور، سال پنجم، شماره ۱۶، صفحه ۳۶-۲۹، پاییز ۱۳۸۸.
- [11] [www.Biodiesel.org / Standards& Warranties.html](http://www.Biodiesel.org / Standards& Warranties.html).
- [12] A. Ramadhas, S. Jayaraj and C. Muraleedharan. "Theoretical Modeling and Experimental Studies on Biodiesel-Fueled Engine". Renewable Energy, Vol.31, No.11, pp.1813-1826, 2017.
- [13] EPA office. "Cleaner Diesel Handbook", Environmental Defense. 2014.
- [14] National Biodiesel Board: <http://www.biodiesel-intl.com/index.html>.
- [15] Van Gerpen J., Shanks B., Pruszko R., Clements D. & Knothe G. "Biodiesel Production Technology, National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [16] AW Dynamometer, Manufacturing Dynamometer Systems since 1957, [www.awdynamometer.com](http://www.awdynamometer.com).
- [17] M., Saidi Neicharan, B., Ghobadian, and G., Najafi, "Experimental Investigation of a Diesel Engine Performance Using Biodiesel Fuel". Jul. 17. 2010.
- [۱۸] باغدار حسینی، سعید، حسینی، ناصر، بشیرنژاد، کاظم، مهدی هروی، حمید. اثر جایگزینی بیودیزل بر انتشار آلاینده ها در کوره های صنعتی، چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، دانشگاه کاشان، بهمن ۱۳۹۰.
- [19] R., Amini Niaki, and A., Ghazanfari. "Comparison of Fuel and Emission Properties of Petro Diesel and Sunflower Biodiesel Prepared by Optimized Production Variables". Fuel, Vol.109, pp.384-388, 2016.
- [۲۰] خرازان، مهدی. طراحی موتورهای بیستونی. مشهد: نشر نما. ۱۳۸۸.
- [21] S. Sundarrapandian, and G. Devaradjane. "Performance and Emission Analysis of Bio Diesel Operated CI Engine". Engineering, Com-