

## بررسی تأثیر بیودیزل روغن پسماند و خاک رنگبر بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل

نوید پوروثوقی<sup>۱\*</sup>، علی محمد نیکبخت<sup>۱\*\*</sup>، صمد جعفرمدار<sup>۳\*\*\*</sup>، میثم طباطبائی<sup>۲\*\*\*\*</sup>،  
سید امیرحسین گلی<sup>۴\*\*\*\*\*</sup>، علی اکبر حبیب‌نیا<sup>۵,۲\*\*\*\*\*</sup> و محسن پاکزاد<sup>۵,۲\*\*\*\*\*</sup>

۱ - دانشگاه ارومیه، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی

۲ - پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، بخش بیوتکنولوژی میکروبی و ایمنی زیستی، تیم تحقیقاتی سوخت‌های زیستی

۳ - دانشگاه ارومیه، گروه مکانیک تبدیل انرژی

۴ - دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و صنایع غذایی

۵ - شرکت ایران خودرو دیزل

(دریافت: ۱۳۹۱/۴/۲۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۸/۱۲، پذیرش: ۹۱/۹/۲۵)

در چند سال اخیر، محققان مطالعات زیادی در مورد بیودیزل به‌عنوان سوختی تجدیدپذیر و جایگزین سوخت دیزل انجام داده‌اند و تأثیر آن بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای اشتعال تراکمی مطالعه شده است، اما تاکنون کاربرد بیودیزل به دلیل هزینه بالاتر، در مقایسه با دیزل محدود شده است. بیودیزل از منابع بیولوژیکی (روغن‌های گیاهی و حیوانی) تولید می‌شود. به دلیل قیمت بالای روغن تازه، محققان در پی منابع ارزان‌قیمت و غیرخوراکی برای تولید بیودیزل‌اند. در این تحقیق، از روغن خاک رنگبر، که از پالایش روغن‌های خوراکی در کارخانه‌های روغن‌کشی حاصل می‌شود، بیودیزل خاک رنگبر تهیه شد. نمونه بیودیزل تهیه‌شده و بیودیزل حاصل از روغن پسماند در مقایسه با سوخت دیزل در موتور دیزل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج برای شرایط عملکرد موتور در بیشینه گشتاور نشان داد که در دور پایین موتور (۱۶۰۰ rpm) هر دو سوخت بیودیزل باعث کاهش ۱۲/۵ درصدی انتشار دوده و افزایش ۶/۴ درصدی آلاینده  $NO_x$  نسبت به دیزل شدند. در بیشینه سرعت (۲۸۰۰ rpm)، بیودیزل روغن خاک رنگبر تأثیر مثبتی روی مصرف سوخت ویژه نسبت به دیزل داشته و در بار کامل مصرف سوخت ویژه کمتری نسبت به دیزل دارد. از طرف دیگر، این سوخت بازده حرارتی ترمزی را نیز بهبود داده و در بار کامل و سرعت ۲۸۰۰ rpm تقریباً ۳/۶ درصد در مقایسه با دیزل افزایش بازده نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: روغن خاک رنگبر، بیودیزل، روغن پسماند، مشخصه‌های عملکرد موتور، آلاینده‌گی موتور

### مقدمه

آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی باعث تشویق بسیاری از محققان برای یافتن سوخت‌های جایگزین سوخت دیزل شده است [۱۹]. بررسی منابع تجدیدپذیر، مانند سوخت بیودیزل، در سال‌های اخیر از اهمیتی روبه‌رشد برخوردار شده است. بیش از صد سال پیش، مخترع مشهوری، به نام رودلف دیزل، موتور دیزل را طراحی کرد که با روغن گیاهی به‌عنوان سوخت

\* دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: navid.porvosogi@yahoo.com)

\*\* استادیار (ایمیل: alinikbakt87@yahoo.com)

\*\*\* استاد (ایمیل: s.jafarmadar@Urmia.ac.ir)

\*\*\*\* استادیار - نویسنده مسئول (ایمیل: tabatabaei@brteam.ir)

\*\*\*\*\* استادیار (ایمیل: amirgoli@cc.iut.ac.ir)

\*\*\*\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: habibnia@ikd-co.com)

\*\*\*\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: pakzad330@yahoo.com)

کار می‌کرد. دکتر رودلف در نمایشگاه پاریس از روغن بادام زمینی برای اولین بار به‌عنوان سوخت در موتور خود استفاده کرد [۲]. عبارت بیودیزل عموماً به متیل یا اتیل استر تولیدشده از روغن گیاهی یا چربی حیوانی، که خواص آن برای سوختن در موتور به حد کافی خوب باشد، اشاره دارد [۷].

روش ترانس‌استریفیکاسیون، بین روش‌های تولید، متداول‌ترین روش برای تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و یا روغن‌های پسماند رستوران‌ها با یک الکل با زنجیره کوتاه است. این سوخت می‌تواند در آینده به‌عنوان یک سوخت جایگزین، برای پرکردن فاصله بین تقاضا و تولید، با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی باشد [۳-۵]. استفاده از بیودیزل به دلیل هزینه بالای آن نسبت به دیزل محدود است. تقریباً ۵۰ تا ۹۰ درصد هزینه تولید بیودیزل مربوط به مواد اولیه می‌شود. به‌منظور کاهش هزینه تولید و گسترش مصرف بیودیزل، استفاده از مواد خام ارزان‌تر مورد نظر است. روغن پسماند جذب‌شده توسط خاک رنگبر (SBE) در فرایند پالایش روغن خام خوراکی یکی از منابع ارزان‌قیمت تولید بیودیزل است که در گذشته از آن چشم‌پوشی می‌شد. SBE یک پسماند صنعتی است که در صنایع پالایش و تصفیه روغن گیاهی، که برای تغییر رنگ آن استفاده می‌شود، تولید می‌شود. سالانه حدود ۱/۵ تا ۲ میلیون تن SBE در جهان تولید می‌شود، در حالی که کل تولید روغن خوراکی جهان در سال ۲۰۰۷ در حدود ۱۲۸/۲ میلیون تن بوده است. به ازای تولید هر تن روغن خوراکی، تقریباً ۱/۲ تا ۱/۶ کیلوگرم SBE تولید می‌شود و حاوی ۲۰ تا ۴۰ درصد وزنی روغن، چربی و رنگ‌دانه‌هاست [۶]. همچنین، آیدین و بایندر در سال ۲۰۱۰ بیودیزل و ترکیب‌های سوختی بیودیزل با دیزل را در موتور آزمایش کردند و مشخصه‌های عملکرد و آلاینده‌گی آن را با سوخت دیزل معمولی مقایسه کردند. آن‌ها گزارش کردند که در سرعت‌های متوسط و بالا برای ترکیبات کمتر از B5 (۵ درصد بیودیزل و ۹۵ درصد دیزل) گشتاور موتور افزایش می‌یابد و تفاوت قابل توجهی در عملکرد بین B5 و B20 نسبت به دیزل وجود ندارد. همچنین، نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار بیودیزل در ترکیب سوخت آلاینده‌های خروجی نسبت به دیزل کاهش می‌یابد [۱]. بویوکایا در سال ۲۰۱۰ عملکرد، آلاینده‌گی و احتراق موتور را با سوخت بیودیزل خالص کلزا و ترکیبات آن با دیزل طی یک مطالعه آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از بیودیزل سبب کاهش دوده در حدود ۶۰ درصد و همچنین ۱۱ درصد افزایش در مصرف سوخت می‌شود. مقدار CO برای B5 و B100 به ترتیب ۹ و ۳۲ درصد کمتر از سوخت دیزل گزارش شده است، در حالی که مقادیر مصرف سوخت ویژه ترمزی (bsfc) برای ترکیبات فوق در حدود ۸/۵ و ۵ درصد افزایش یافته است [۳]. دوردو و همکاران نیز در سال ۲۰۰۳ آلاینده‌های خروجی موتور دیزل پاشش مستقیم سوخت‌گیری شده با بیودیزل ضایعات روغن زیتون را در چند شرایط عملکرد پایدار مطالعه کردند. نتایج مقایسه آلاینده‌های حاصل از احتراق این بیودیزل و سوخت دیزل آلودگی کمتر بیودیزل را آشکار ساخت. داده‌ها برای احتراق بیودیزل کاهش ۵۸/۹ درصد CO، ۸/۶ درصد CO<sub>2</sub>، ۳۷/۵ درصد NO و ۵۷/۷ درصد SO<sub>2</sub> و افزایش ۸۱ درصد NO<sub>2</sub> را نشان دادند. همچنین، بنا بر گزارش‌های آن‌ها، بیودیزل سبب افزایش ناچیزی در مصرف سوخت ویژه ترمزی به مقدار کمتر از ۸/۵ درصد شد [۱۶]. همچنین، زنوزی و همکاران در سال ۱۳۸۷ تاثیر بیودیزل پسماند روغن خوراکی در عملکرد موتور را مورد بحث و بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزودن بیودیزل به سوخت دیزل، توان و گشتاور را به‌علت احتراق کامل افزایش می‌دهد و دوده نیز کاهش می‌یابد. در مجموع نتیجه گرفتند که با افزایش ۲۵ درصد بیودیزل پسماند به سوخت دیزل، عملکرد بدون هیچ تغییر و اصلاحی در اجزای آن بهبود می‌یابد [۱۸].

هدف از این تحقیق ارائه روشی نوین برای تولید بیودیزل از مواد اولیه با درصد اسید چرب آزاد بالا و معرفی منبعی ارزان‌قیمت برای تولید این سوخت است که می‌تواند بستری را برای کاهش هزینه تولید و راه‌کارهای مدیریت پسماند و چالش‌های پیش‌رو فراهم سازد. جهت دستیابی به این مهم، عملکرد و آلاینده‌گی موتور حاصل از احتراق سوخت بیودیزل تولیدی از روغن خاک رنگبر (SBE) در مقایسه با بیودیزل روغن پسماند (WCO) بررسی و ارزیابی شد.

1. Spent Bleaching Earth  
2. Waste Cooking Oil

## مواد و روش‌ها

بیودیزل از دو نوع روغن تهیه شد و به منظور آزمایش در موتور آماده شد.

### تولید بیودیزل

در این تحقیق، روغن پسماند از رستوران دانشگاه ارومیه تهیه شد و بعد از فیلترکردن، برای تعیین درصد اسید چرب آزاد آن، عمل تیتراسیون انجام شد. برای تولید بیودیزل، از بین روش‌های تولید روش ترانس استریفیکاسیون انتخاب شد. واکنش ترانس استریفیکاسیون، با مخلوط کردن روغن با یک الکل (متانول) به نسبت مولی ۶ به ۱ و در حضور یک کاتالیزور بازی یا اسیدی (معمولاً KOH)، در راکتور همزن دار (BSTR)<sup>۱</sup> انجام شد. در مخلوط تولیدشده، پس از جداسازی بیودیزل و گلیسرین، به منظور خالص سازی بیودیزل طی سه مرحله آب شویی شد. خاک رنگبر لازم برای انجام این تحقیق از طریق کارخانجات روغن کشتی و تصفیه شرکت ناز در اصفهان تهیه شد. نمونه روغن تصفیه شده با این خاک، که از نوع روغن سویاست، نیز از کارخانه شرکت ناز در اصفهان تهیه شد. به منظور محاسبه درصد اسید چرب آزاد این روغن، باید عمل تیتراسیون بازی انجام گیرد. نتیجه تیتراسیون حاکی از آن بود که این روغن حاوی ۱۰ درصد اسید چرب آزاد است که مانع تشکیل بیودیزل می شود. بدین منظور، یک مرحله اضافی برای خنثی کردن اسیدهای چرب آزاد انجام شد.

طی واکنشی ۳۰ درصد حجمی روغن، متانول، با ۱ درصد وزنی روغن، اسید سولفوریک مخلوط شد و به مدت ۱۵ دقیقه و در دمای ۶۰°C در راکتور همزن دار هم زده شد. مخلوط حاصل به مدت ۶۰ دقیقه در قیف جداکننده ساکن ماند و دو فاز تشکیل شد (فاز فوقانی آب و متانول اضافی و فاز تحتانی روغن با اسید چرب پایین). فاز پایینی جدا شد و دوباره درصد اسید چرب آزاد آن با تیتراسیون تعیین شد. برای واکنش ترانس استریفیکاسیون اسید چرب آزاد باید کمتر از ۲/۵ درصد باشد. چون اسید چرب آزاد این روغن بعد از واکنش فوق در این محدوده قرار داشت، این روغن هم مشابه روغن پسماند و طی واکنش ترانس استریفیکاسیون به بیودیزل تبدیل شد.

### آزمون موتور

نمونه‌ها از بیودیزل تولیدی از روغن پسماند و روغن خاک رنگبر به نسبت ۵ درصد حجمی با سوخت دیزل برای تهیه سوخت B5 مخلوط شدند. نمونه‌های سوخت حاوی بیودیزل به همراه سوخت دیزل (به عنوان نمونه شاهد) در موتور دیزل OM314 در شرکت ایدم (IDEM)<sup>۲</sup> تبریز، به منظور ارزیابی عملکرد و انتشار آلاینده‌ها حاصل از احتراق، آزمایش شد. این تحقیق می تواند راه کاری برای مدیریت پسماند و گامی برای تقلیل مشکلات ناشی از چالش پسماند و مدیریت آن باشد. مشخصات موتور مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است و دقت دستگاه‌های اندازه گیری در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات موتور OM314

سیستم ورود هوا	پرخوران (Supercharge)
توان بیشینه	۸۱ کیلو وات در سرعت ۲۸۰۰
گشتاور بیشینه	۳۴۰ نیوتون متر در سرعت ۱۶۰۰
قطر داخلی سیلندر	۹۷ میلی متر
کورس پیستون	۱۲۸ میلی متر
نسبت تراکم	۱۷ به ۱
سیستم احتراق	۴ زمانه- پاشش مستقیم
تعداد سیلندرها	۴ - خطی

1. Batch Stirred Tank Reactor
2. Iranian Diesel Engine Manufacture

جدول ۲- دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری

دقت	شرکت سازنده	دستگاه اندازه‌گیری
توان ۱ hp، گشتاور ۱ N.M، سرعت ۱ rpm	شرکت pmid (مدل E400)	دینامومتر
۰/۰۱ kg/h	شرکت pmid	سنجش جریان سوخت
۰/۳ kg/h	ABB Sensyflow	سنجش سوخت
٪ ۰/۰۱	AVL Digas 4000	آلاینده‌سنج CO
٪ ۰/۰۱	AVL Digas 4000 light	آلاینده‌سنج CO <sub>2</sub>
۱ ppm	AVL Digas 4000	آلاینده‌سنج NO <sub>x</sub>
۱ mg/m <sup>3</sup>	AVL 4155 smoke meter	آلاینده‌سنج دوده
٪ ۰/۰۱	AVL Dicom 4000	آلاینده‌سنج O <sub>2</sub>

متغیرهای مشخصه‌های عملکرد موتور، که در آزمون موتور اندازه‌گیری شد، در زیر توضیح داده می‌شود.

### توان ترمزی

توان به صورت نرخ کار موتور تعریف می‌شود و برابر است با کار انجام‌شده در واحد زمان یا گشتاور اعمال‌شده در سرعت زاویه‌ای، که معمولاً برحسب کیلووات (kW) اندازه‌گیری می‌شود، ولی استفاده از اسب‌بخار (hp) نیز هنوز رایج است. توان ترمزی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$P_b = \frac{2\pi\omega T}{1000} \quad (1)$$

که در آن  $\omega$  سرعت زاویه‌ای برحسب rev/s و  $T$  گشتاور ترمزی برحسب N.m است.

### بازده حرارتی ترمزی

یک متغیر بدون بعد است که در ترمودینامیک برای اندازه‌گیری عملکرد یک وسیله که از انرژی گرمایی استفاده می‌کند، تعریف می‌شود و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$bte = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \times 3600 \quad (2)$$

در این رابطه  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت بر حسب kg/h است و  $Q_{LHV}$  به عنوان حداقل ارزش حرارتی سوخت تعریف شده است.

### مصرف سوخت ویژه ترمزی

مصرف سوخت ویژه به صورت مقدار سوختی که در ازای حصول توان در یک مدت زمان مشخص مصرف می‌شود تعریف شده و یکای آن g/kW.h است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \times 10^3 \quad (3)$$

### بازده تبدیل سوخت ترمزی

معمولاً به صورت نسبت انرژی مفید خروجی به انرژی ورودی تعریف می‌شود. رابطه (۴) تعریف این متغیر را مختص موتور احتراق داخلی بیان می‌کند.

$$bfce = \frac{P_b}{\dot{m}_f \times Q_{HV}} \quad (4)$$

$Q_{HV}$  مقدار ارزش حرارتی به صورت ناخالص است.

### فشار موثر میانگین ترمزی

فشار داخل سیلندر یک موتور، در طی یک چرخه، به طور پیوسته در حال تغییر است. به همین دلیل فشار موثر میانگین تعریف می شود و با فرمول زیر محاسبه می شود:

$$bmep = \frac{P_b n_r}{v_d \omega} \times 10^3 \quad (5)$$

که در این رابطه  $n_r$  تعداد دور میل لنگ برای یک سیکل کامل در موتور است که برای موتورهای چهارمانه ۲ است و  $V_d$  حجم کل یا حجم جابه جایی سیلندرهاست.

### نتایج و بحث

جهت بررسی و ارزیابی کیفیت سوخت بیودیزل تولیدی از روغن خاک رنگبر و بیودیزل روغن پسماند، خصوصیات و ویژگی های مهم آن ها را با استاندارد ASTM D6751 آمریکا مورد مقایسه قرار دادیم که در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- خصوصیات بیودیزل خاک رنگبر و پسماند و مقایسه آن ها با استانداردهای بیودیزل

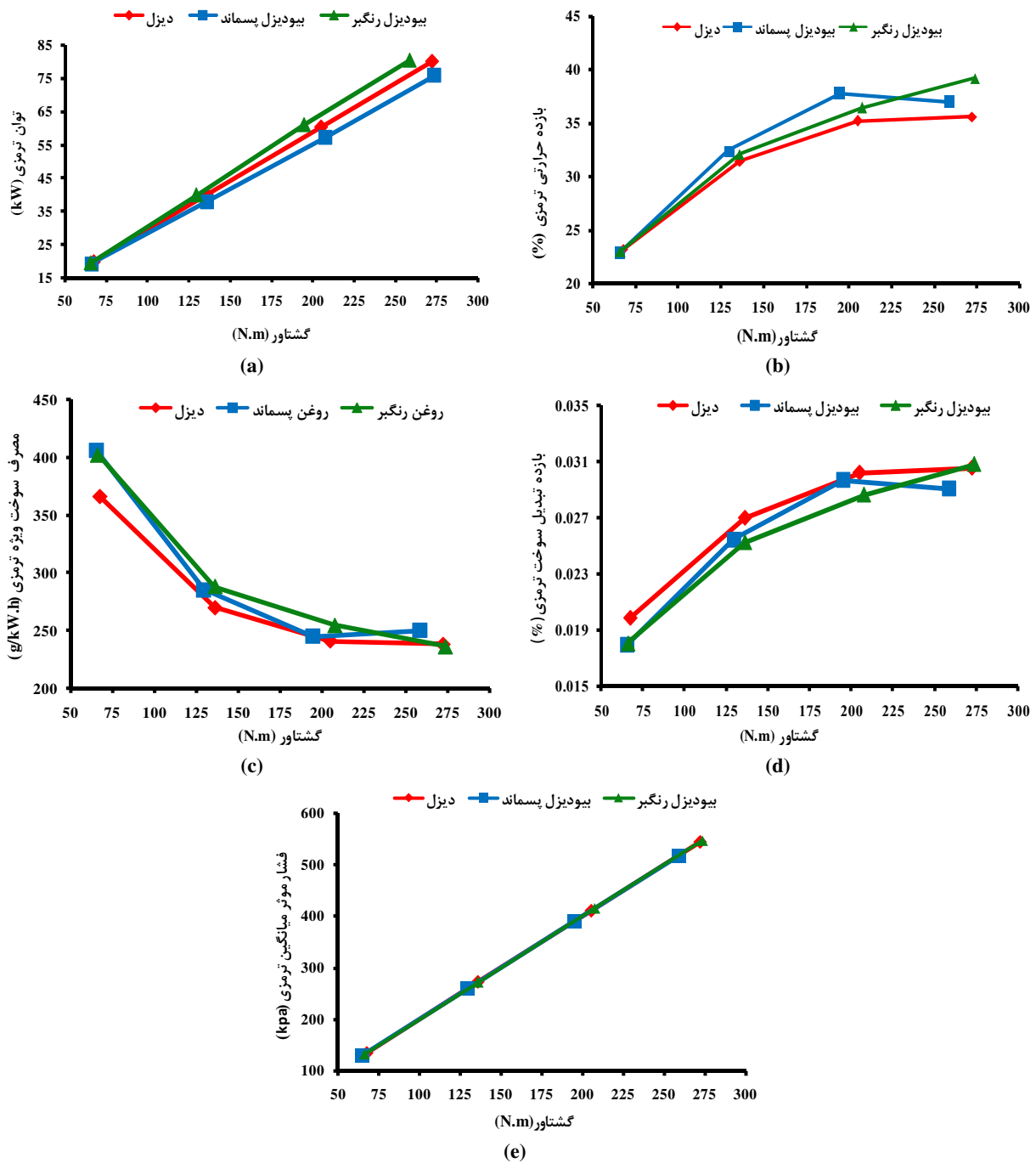
ویژگی سوخت	آزمون استاندارد	حدود مجاز	بیودیزل خاک رنگبر	بیودیزل پسماند	واحد
نقطه اشتعال	ASTM D93	>130	175	180	°C
گرانروی دینامیکی	ASTM D445	5/191-1/643	4/955	4/876	mPa.S در 40°C
دانسیته	ASTM D941	-	0/8652	0/9010	g/cm <sup>3</sup> در 40 °C
باقی مانده آب و رسوبات	ASTM D2709	0/05	0/0195	0/0234	%Vol/ppm
عدد اسیدی	ASTM D664	0/8	0/412	0/378	mg KOH/gr
باقی مانده کربن	ASTM D4530	0/05	-	-	%wt
گلیسیرین آزاد	ASTM D6584	0/2	0/011	0/010	%wt

### مشخصه های عملکرد موتور

تأثیر سه نوع سوخت بیودیزل روغن خاک رنگبر (SBE)، بیودیزل پسماند روغن خوراکی (WCO) و دیزل و مقایسه آن ها در مشخصه های عملکرد موتور (توان ترمزی، بازده حرارتی ترمزی، بازده تبدیل سوخت ترمزی، مصرف سوخت ترمزی و فشار موثر میانگین ترمزی)، آلاینده های آن (CO<sub>2</sub>، NO<sub>x</sub>، CO، O<sub>2</sub> و دوده) و مشخصه احتراق (دمای گازهای خروجی) در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات مشخصه های عملکرد سوخت ها در دور بیشینه 2800 rpm در شکل ۱ نشان داده شده است.

### توان ترمزی

شکل ۱(a) تغییرات توان ترمزی در دور 2800 rpm با گشتاور برای هر سه نوع سوخت را نشان می دهد. نتایج نشان داد که تفاوت قابل توجهی بین بیودیزل SBE با دیزل در قدرت خروجی وجود ندارد و در بار کامل حدود 0/5 درصد در مقایسه با دیزل توان بیشتری تولید می کند، در حالی که در بار کامل برای WCO نسبت به دیزل 5/2 درصد کاهش توان مشاهده می شود. دلیل افزایش توان در بیودیزل SBE وجود محتوای اکسیژن آن و مصرف زیاد سوخت و همچنین علت کاهش توان می تواند ارزش حرارتی پایین بیودیزل روغن پسماند باشد [9]. موریلو و همکاران در سال 2007 گزارش کردند که در بار کامل 7/14 درصد توان برای بیودیزل نسبت به دیزل کاهش می یابد و همچنین آن ها نتیجه گرفتند که ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به دیزل 13/5 درصد کمتر است [12]. خو و همکاران نیز در یک مطالعه مروری اشاره کردند که در استفاده از ترکیب سوختی بیودیزل با دیزل با درصد کم، توان اندکی کاهش می یابد و این کاهش برای راننده محسوس نیست [11].



شکل ۱- (a) تغییرات قدرت خروجی، (b) بازده حرارتی ترمزی، (c) مصرف سوخت ویژه ترمزی، (d) بازده تبدیل سوخت ترمزی، (e) فشار موثر میانگین ترمزی با تغییرات گشتاور در سرعت ۲۸۰۰ rpm

### بازده حرارتی ترمزی

شکل ۱(b) تغییرات بازده حرارتی ترمزی (bte) را با گشتاور نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مشخص است که با افزایش گشتاور، bte برای هر دو نوع سوخت بیودیزل در مقایسه با دیزل کاهش یافته است. در دور ۲۸۰۰ rpm و بار کامل، بیودیزل

SBE نسبت به دیزل ۳/۶ درصد افزایش در bte نشان می‌دهد. طی مطالعه‌ای بویوکایا در سال ۲۰۱۰ ترکیبات بیودیزل کلزا را با دیزل در موتور آزمایش کرد و نتیجه گرفت که bte با افزایش مقدار بیودیزل در ترکیب سوخت افزایش می‌یابد و دلیل احتمالی افزایش bte بیودیزل خاک رنگبر در بار کامل حالت روان‌کنندگی و اکسیژن بیشتر آن است [۳]. همچنین، کارابکتاس بیان کرد که bte بیودیزل اندکی بیشتر از سوخت دیزل در هر دو شرایط معمولی و با پرخوران است [۲۰].

### مصرف سوخت ویژه ترمزی

مقادیر مصرف سوخت ویژه ترمزی (bsfc)<sup>۱</sup> در سرعت بیشینه و تغییرات گشتاور برای سوخت‌ها در شکل (c) نشان داده شده است. بدیهی است که با افزایش گشتاور bsfc کاهش می‌یابد. در بار کامل بیودیزل SBE کمترین bsfc را دارد که ممکن است به‌خاطر توان بیشتر نسبت به سایر سوخت‌ها باشد. ولی لایکاس و اسلاوینسکاس مدعی شدند که bsfc برای ترکیبات بیودیزل بیشتر از دیزل است و گزارش کردند که این افزایش می‌تواند مربوط به کم‌تر بودن حدود ۱۲/۵ درصد ارزش گرمایی بیودیزل روغن کلزا نسبت به دیزل باشد [۱۷]. همچنین، لوژان و همکاران معتقدند که دلیل افزایش bsfc پایین بودن ارزش حرارتی بیودیزل و گرانی و چگالی بالای آن است [۱۰].

### بازده تبدیل سوخت ترمزی

در شکل (d) تغییرات بازده تبدیل سوخت ترمزی (bfce)<sup>۲</sup> با گشتاور مشاهده می‌شود. با افزایش گشتاور، bfce برای سوخت‌ها تا ۷۵ درصد بار کامل افزایش می‌یابد و در بار کامل برای بیودیزل SBE در مقایسه با دیزل حدود ۱ درصد افزایش bfce به دست آمده است. ممکن است دلیل این افزایش وجود اکسیژن زیاد بیودیزل نسبت به دیزل و احتراق کامل‌تر باشد. با افزایش سرعت موتور bfce ترکیبات بیودیزل در مقایسه با دیزل کاهش می‌یابد که دلیل محتمل بر این اتفاق احتراق ناقص و کامل نبودن عمل احتراق می‌تواند باشد [۱۱].

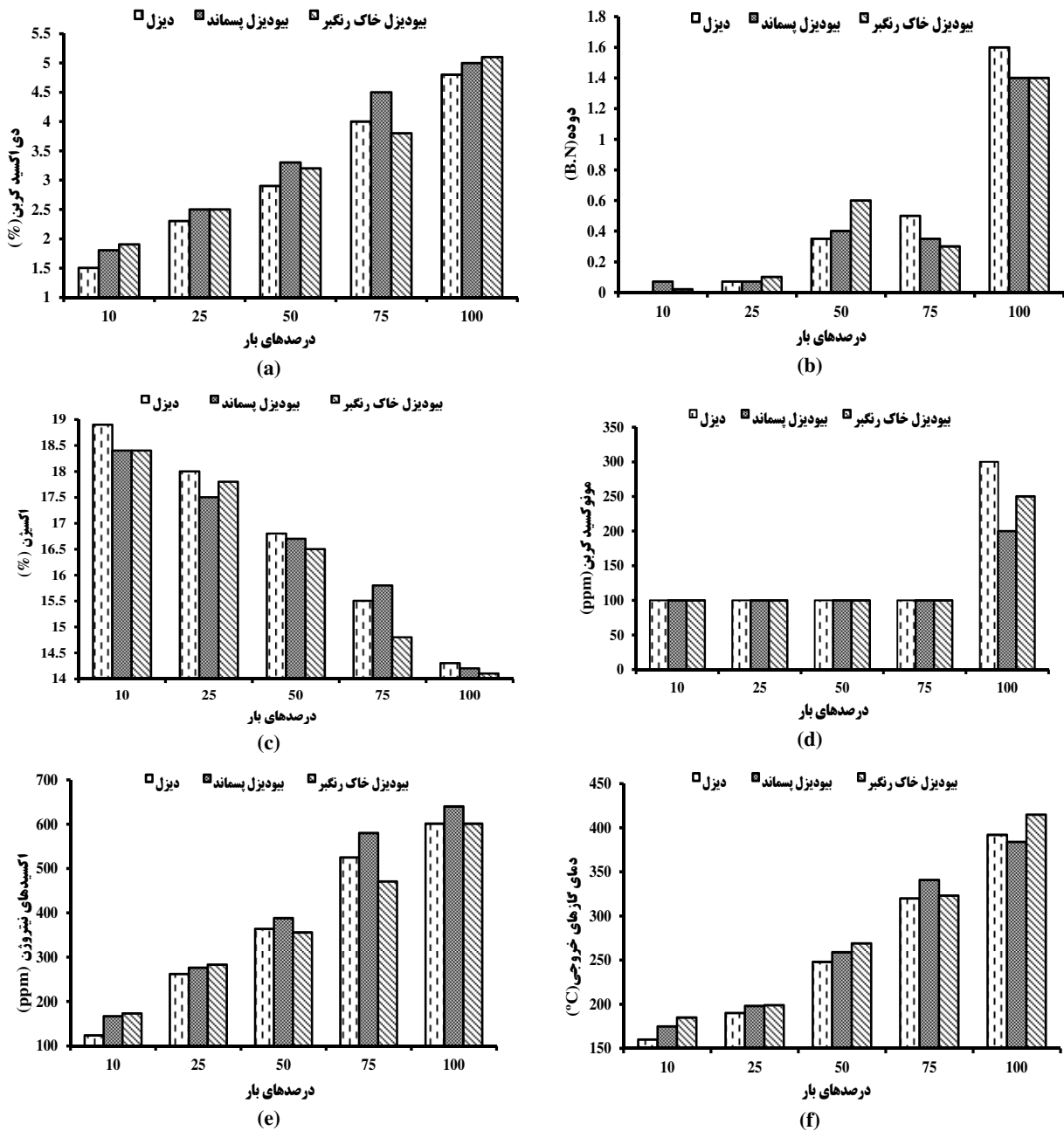
### فشار موثر میانگین ترمزی

فشار موثر میانگین ترمزی (bmep)<sup>۳</sup> با افزایش گشتاور در دور ۲۸۰۰ rpm برای تمام سوخت‌ها افزایش می‌یابد که در شکل (e) مشخص است. در همین دور و بیشینه گشتاور، bmep برای بیودیزل SBE، بیودیزل Wco و دیزل به ترتیب ۵۴۶/۹۳، ۵۱۶/۳۲ و ۵۴۴/۲۱ کیلوپاسکال است. نتایج نشان می‌دهد که bmep برای بیودیزل روغن پسماند در مقایسه با دیزل معمولی در حدود ۵/۱۲ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که برای بیودیزل روغن خاک رنگبر تقریباً ۰/۴ درصد افزایش نشان می‌دهد. هوزابین و همکاران در سال ۲۰۰۴ روغن جاتروفا و ترکیبات آن با سوخت دیزل به نسبت ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد و سوخت دیزل خالص را در موتور آزمایش کردند و گزارش کردند که bmep با افزایش سرعت موتور افزایش می‌یابد. همچنین، نتیجه گرفتند که مقدار bmep در شرایط استفاده از ترکیب سوختی B20 برای بارهای مختلف و سرعت‌های متفاوت موتور از مقدار مشابه آن برای ترکیب سوختی B100 کمتر است و گزارش کردند که سوخت B20 بیشترین bmep را بین سایر سوخت‌ها دارد [۷].

### آلاینده‌های حاصل از احتراق

شکل ۲ آلاینده‌های خروجی از موتور مانند مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیژن، دوده و اکسیدهای نیتروژن و همچنین دمای گازهای خروجی از اگزوز موتور را در سرعت ۱۶۰۰ rpm و درصدهای مختلف گشتاور نشان می‌دهد.

1. brake specific fuel consumption  
2. brake fuel conversion efficiency  
3. brake mean effective pressure



شکل ۲- تغییرات (a) دی اکسید کربن، (b) دوده، (c) اکسیژن، (d) مونوکسید کربن، (e) اکسیدهای نیتروژن، (f) دمای گازهای خروجی در ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بار کامل و دور ۱۶۰۰ rpm

### دی اکسید کربن

مقدار آلاینده دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) برای سوخت‌های بیودیزل به نسبت سوخت دیزل افزایش یافته است. این تغییرات در شکل (a) نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش گشتاور، CO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد و در بار کامل CO<sub>2</sub> برای بیودیزل خاک رنگبر تقریباً ۴/۲ درصد و برای بیودیزل روغن پسماند ۶/۲۵ درصد در مقایسه با دیزل معمولی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش را می‌توان محتوای زیاد اکسیژن بیودیزل دانست که اکثر ذرات کربن، اکسیژن کافی برای واکنش را یافته و در ترکیب با اکسیژن موجود در مولکول‌های بیودیزل به CO<sub>2</sub> تبدیل می‌گردند.



## دوده

مقادیر مختلف دوده و تغییرات آن با افزایش گشتاور در سرعت ۱۶۰۰ rpm در شکل ۲(b) مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل استنباط می‌شود، در گشتاورهای پایین تغییرات دوده ناچیز است، اما در گشتاور بیشینه سوخت‌های بیودیزل در مقایسه با دیزل ۱۲/۵ درصد دوده را کاهش می‌دهند. محتوای بالای اکسیژن بیودیزل سبب می‌شود که کربن موجود در سوخت با آن واکنش داده و به صورت CO از موتور خارج شود و دوده کاهش می‌یابد [۳]. گوکالپ و همکاران نیز نتایج مشابهی گرفتند. آن‌ها بیودیزل روغن سویا و ترکیبات آن با دیزل معمولی (B50, B20, B100) را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که انتشار دوده برای B50 در حدود ۶۲ درصد و برای بیودیزل خالص ۷۴ درصد در مقایسه با دیزل کاهش می‌یابد [۱۳].

## اکسیژن

شکل ۲(c) تغییرات اکسیژن ( $O_2$ ) را نشان می‌دهد. با افزایش گشتاور،  $O_2$  برای هر دو سوخت بیودیزل به مقدار کمی کاهش می‌یابد. طی مطالعه‌ای هوزایین و همکاران در سال ۲۰۰۴ نتیجه گرفتند که  $O_2$  برای بیودیزل کاهش می‌یابد و دلیل کاهش  $O_2$  را به افزایش دمای موتور و احتراق کامل‌تر در اثر افزایش بار موتور نسبت دادند [۷]. همچنین، کومار و همکاران در سال ۲۰۰۹ نتیجه گرفتند که درصد  $O_2$  با افزایش گشتاور کاهش می‌یابد [۸].

در مطالعه‌ای دیگر لین و لی بیودیزل روغن پسماند و بیودیزل روغن ماهی را در موتور دیزل آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که بیودیزل پسماند  $O_2$  کمتری نسبت به بیودیزل روغن ماهی منتشر می‌کند. آن‌ها معتقدند که دلیل این که بیودیزل روغن ماهی  $O_2$  بیشتری نسبت به بیودیزل پسماند دارد، نسبت هم‌ارزی کم بیودیزل روغن ماهی نسبت به پسماند است [۱۵].

## منوکسید کربن

تغییر مقادیر منوکسید کربن (CO) با شرایط مختلف بار موتور در شکل ۲(d) مشاهده می‌شود. با افزایش گشتاور، CO افزایش می‌یابد، ولی تغییرات در بار کامل شدیدتر است و همان‌طور که از شکل مشخص است، در گشتاور بیشینه، بیودیزل SBE حدود ۳۵ درصد نسبت به دیزل CO کمتری تولید می‌کند. خو و همکاران دلایل متعددی برای کاهش یا افزایش CO ذکر کردند، از جمله:

- ۱) مقدار بیودیزل موجود در ترکیب سوخت، که به‌علت اکسیژن‌دار بودن آن نسبت به دیزل، CO کاهش می‌یابد.
- ۲) مواد اولیه مورد استفاده برای تولید بیودیزل و مشخصات سوخت تولیدی، به طوری که با افزایش طول زنجیر هیدروکربنی مواد اولیه تولید، CO بیشتر کاهش می‌یابد.
- ۳) نوع موتور آزمون و شرایط عملیات. در موتورهایی که در بارهای زیاد کار می‌کنند، به‌علت کاهش نسبت هوا به سوخت ورودی، آلاینده CO افزایش می‌یابد.
- ۴) افزودنی. محققان گزارش کردند که افزودن مواد فلزی مانند منیزیم و مولیبدنم در سوخت بیودیزل موجب کاهش انتشار CO می‌شود و همچنین افزودن الکل (متانول یا اتانول) نیز در افزایش و کاهش آن می‌تواند موثر باشد [۱۱].

## اکسیدهای نیتروژن

در شکل ۲(e) رفتار آلاینده اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) در مقابل تغییر گشتاور نشان داده شده است. در دور موتور ۱۶۰۰ rpm و بار کامل، در مقدار آلاینده  $NO_x$  برای بیودیزل WCO نسبت به دیزل هیچ تغییری مشاهده نمی‌شود، ولی بیودیزل SBE تقریباً ۶/۴ درصد بیشتر از دیزل  $NO_x$  تولید می‌کند. بیشتر محققان دریافتند که افزودن بیودیزل به دیزل باعث افزایش  $NO_x$  شده است و دلیل آن هم وجود اکسیژن زیاد در بیودیزل نسبت به دیزل است [۳، ۱۱]. از طرفی، انتشار  $NO_x$  به بازده حجمی موتور، مدت زمان احتراق و دمای ویژه‌ای که از انرژی فعال‌سازی بالا برای شروع و انجام واکنش احتراق حاصل می‌شود، بستگی

دارد [۳]. اوزسزن و همکاران در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای روی دو نوع بیودیزل پسماند روغن نخل خرما و بیودیزل روغن کانولا انجام دادند و نتیجه گرفتند که انتشار  $\text{NO}_x$  برای این دو بیودیزل به ترتیب ۲۲/۱۳ و ۶/۴۸ درصد نسبت به دیزل افزایش می‌یابد [۱۴].

### دمای گازهای خروجی

مقادیر مختلف دمای گازهای خروجی و تغییرات آن با افزایش گشتاور در سرعت ۱۶۰۰ rpm در شکل ۲(f) مشاهده می‌شود. دمای گازهای خروجی با تغییر تأخیر زمانی احتراق تغییر می‌یابد. تأخیر زمانی طولانی باعث تأخیر در احتراق می‌شود و در نتیجه دمای گازهای خروجی افزایش می‌یابد. به علاوه، کم‌تر بودن عدد ستان نیز باعث طولانی شدن تأخیر زمانی می‌شود. آیدین و بایندر در سال ۲۰۱۰ گزارش کردند که بیشترین مقدار دمای گازهای خروجی در دور ۲۵۰۰ rpm و بار کامل برای سوخت دیزل مشاهده شد که مقدار آن را  $469^\circ\text{C}$  به دست آوردند، در حالی که مقادیر متناظر آن برای B20 در همان شرایط  $395^\circ\text{C}$  به دست آمده است [۱].

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

سوخت بیودیزل SBE و WCO با واکنش ترانس استریفیکاسیون، در حضور متانول و پتاسیم هیدروکسید به‌عنوان کاتالیزور، در راکتور همزن‌دار تولید شد و مشخصه‌های عملکرد و آلاینده‌گی آن‌ها همراه با دیزل مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. آزمون موتور با ترکیب ۵ درصد بیودیزل در سوخت دیزل معمولی انجام گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب ۵ درصد حجمی بیودیزل SBE با دیزل از لحاظ عملکرد مناسب است. این سوخت در دور بیشینه ۲۸۰۰ rpm تأثیر مثبتی روی bsfc داشت و بازده حرارتی را به میزان ۳/۶ درصد در مقایسه با دیزل افزایش داد. در دور ۱۶۰۰ rpm و گشتاور بیشینه، بیودیزل SBE باعث کاهش انتشار دوده نسبت به دیزل در موتور می‌شود و افزایش ناچیزی در آلاینده  $\text{NO}_x$  مشاهده می‌شود و در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که بیودیزل روغن خاک رنگبر و ترکیبات آن با سوخت دیزل معمولی می‌تواند، بدون نیاز به تغییر و اصلاح موتور، به‌عنوان سوخت جایگزین دیزل استفاده شود.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان از کارشناسان انجام‌دهنده آزمون موتور در شرکت موتورسازی ایدم تبریز سپاس‌گزاری می‌کنند.

### منابع

1. H. Aydin and H. Bayindir, "Performance and Emission Analysis of Cottonseed Oil Methyl Ester in a Diesel Engine," *Renewable Energy*, 35, 2010, pp. 588-592.
2. K. Bozbas, "Biodiesel as an Alternative Motor Fuel: Production and Policies in the European Union," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2008, pp. 542-552.
3. E. Buyukkaya, "Effects of Biodiesel on a DI Diesel Engine Performance, Emission and Combustion Characteristics," *Fuel*, 89, 2010, pp. 3099-3105.
4. G. R. Kanna, R. Karvembu and R. Anand, "Effect of Metal Based Additive on Performance Emission and Combustion Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Biodiesel," *Applied Energy*, 88, 2011, pp. 3694-3703.
5. F. Lin, J. Huang and D. Huang, "Experimental Study of the Effects of Vegetable Oil Methyl Ester on DI Diesel Engine Performance Characteristics and Pollutant Emissions," *Fuel*, 88, 2009, pp. 1779-1785.
6. Y. Huang and J. Chang, "Biodiesel Production from Residual Oils Recovered from Spent Bleaching Earth," *Renewable Energy*, 35, 2010, pp. 269-274.
7. A. Huzayyin, A. Bawady, M. Rady and A. Dawood, "Experimental Evaluation of Diesel Engine Performance and Emission using blends of Jojoba Oil and Diesel Fuel," *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, pp. 2093-2112.
8. A. Kumar, D. Maheswar and K. V. K. Reddy, "Comparisons of Diesel Engine Performance and Emissions from Neat and Transesterified Cotton Seed Oil," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 3, 2009, pp. 190-197.

9. M. Lapuerta, O. Armas and J. Rodrı́guez-Fernandez, "Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, 3, 2008, pp. 198-223.
10. J. Lujan, V. Bermudez, B. Tormos and B. Pla, "Comparative Analysis of a DI Diesel Engine Fuelled with biodiesel Blends during the European MVEG-A Cycle: Performance and Emissions (II)," *Biomass and Bioenergy*, 33, 2009, pp. 948-956.
11. J. Xue, T. Grift and A. Hansen, "Effect of Biodiesel on Engine Performances and Emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 1098-1116.
12. S. Murillo, J. L. Miguez, J. Porteiro, E. Granada and J. C. Moran, "Performance and Exhaust Emissions in the use of Biodiesel in Outboard Diesel Engines," *Fuel*, 86, 2007, pp. 1765-1771.
13. B. Gokalp, E. Buyukkaya and H. S. Soyhan, "Performance and Emissions of a Diesel Tractor Engine Fueled with Marine Diesel and Soybean Methyl Ester," *Biomass and bioenergy*, 35, 2011, pp. 3575-3583.
14. A. N. Ozsezen, M. Canakci, A. Turkcan and C. Sayin, "Performance and Combustion Characteristics of a DI Diesel Engine Fueled with Waste Palm Oil and Canola Oil Methyl Esters," *Fuel*, 88, 2009, pp. 629-636.
15. C. Y. Lin and R. J. Li, "Engine Performance and Emission Characteristics of Marine Fish-Oil Biodiesel Produced from the Discarded Parts of Marine Fish," *Fuel Processing Technology*, 90, 2009, pp. 883-888.
16. M. Dorado, E. Ballesteros, J. Arnal, J. Gomez and F. Lopez, "Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil," *Fuel*, 82, 2003, pp. 1311-1315.
17. G. Labeckas and S. Slavinskas, "The Effect of Rapeseed oil Methyl Ester on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions," *Energy Conversion and Management*, 47, 2006, pp. 1954-1967.
18. A. Zenouzi, B. Ghobadian, T. Tavakoli Hashjin, M. Feyzollahnejad and H. Bagherpour. "Effect of the Blends of Diesel and Biodiesel Made From Waste Cooking Oil on Compression-Ignition Engine (CI) Performance," *Combustion and Flame*, 1, 2008, pp. 53-59 (in Farsi).
19. B. Ghobadian and H. Rahimi, "Biofuels-Past, Present and Future Perspective," The 4<sup>th</sup> International Iran and Russia Conference, Shahre kord, Iran, September, 2004.

## English Abstract

### Effect of Waste and Bleaching Earth oil Derived Biodiesel on Diesel Engine Performance and Emissions

N. Porvosogi<sup>1,2</sup>, A. M. Nikbakht<sup>1,2</sup>, S. Jafarmadar<sup>3</sup>, M. Tabatabaei<sup>2</sup>, A. H. Goli<sup>4</sup>, A. Habibnia<sup>5</sup> and M. Pakzad<sup>5</sup>

1- Department of Mechanical Engineering in Farm Machinery, Urmia University, Urmia

2- Biofuel Research Team (BRTEAM), Department of Microbial Biotechnology and Biosafety, ABRII, Karaj

3- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia

4- Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

5- Iran Khodro Diesel Co.

(Received: 2012.7.16, Received in revised form: 2012.11.3, Accepted: 2012.12.16)

*In recent years many researchers have done studies about biodiesel as alternative fuel and renewable diesel fuel and its impact on the performance of compression ignition engines and their pollutions. The application of biodiesel has been limited due to its higher cost compared with petroleum-based diesel. Biodiesel is produced from biological sources such as vegetable oil and animal fat. Nowadays, researchers attempt to find low cost and non-edible resources for biodiesel production. In the current investigation, spent bleaching earth oil biodiesel (SBE) is obtained from spent bleaching earth oil that is Which is a by-product of corn oil refining process. The obtained biodiesel (SBE) sample and waste cooking oil biodiesel (WCO) were evaluated and compared with diesel fuel. The results for engine performance in maximum torque and engine speed of 1600 rpm, both biodiesel fuels decreased the soot emission with % 12.5 and increased the NO<sub>x</sub> with % 6.4 compared with diesel fuel. In the maximum engine speed (i.e. 2800 rpm), SBE biodiesel had positive effect on specific fuel consumption comparing to diesel and shows lower specific fuel consumption comparing to diesel at full load. On the other hand, brake thermal efficiency was approximately % 3.6 improved relative to diesel fuel.*

**Keywords:** Bleaching earth oil, Biodiesel, Waste cooking oil, Engine performance characteristics, Engine emissions