

بررسی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از بیودیزل تولید شده از روغن پسماند آشپزخانه و کاتالیست ناهمگن کلسیم اکسید (CaO)

محمدجواد اسلامی^۱، بهرام حسین زاده سامانی^{۲*}، سجاد رستمی^۳، رحیم ابرهیمی^۴ و علی رضا شیرنشان^۵

چکیده

بیودیزل به عنوان یک سوخت شیمیایی اصلاح شده و سازگار با محیط‌زیست، تجدیدپذیر، غیرسمی و ایمن شناخته و عمدتاً در موتورهای احتراق تراکمی استفاده می‌شود. این مطالعه با هدف امکان‌سنجی تولید بیودیزل از روغن پسماند آشپزخانه با استفاده از سامانه فراصوت و در نهایت ارزیابی سوخت تولیدی با استفاده از یک موتور دیزل ژنراتور انجام شد. در این مطالعه، تأثیر نسبت مولی الکل به روغن، درصد وزنی کاتالیزور و زمان واکنش بر بازده تولید متیل استر بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، شرایط بهینه با استفاده از روش سطح پاسخ شامل نسبت مولی ۸/۳۰، درصد وزنی کاتالیزور ۵/۳۲ و زمان واکنش ۳۳/۲۳ دقیقه به دست آمد. همچنین نتایج به دست آمده از ارزیابی سوخت تولیدی نشان داد که با افزایش میزان بیودیزل در سوخت ورودی به موتور، انتشار CO به میزان ۰/۰۲۶٪ و سطح دود خروجی از موتور به میزان ۲۲٪ کاهش و NOx به میزان ۵۱۳ ppm افزایش می‌یابد. همچنین افزایش بیودیزل باعث افزایش توان ویژه ترمزی به میزان ۴۶/۵ کیلو وات و مصرف ویژه سوخت ترمزی به میزان ۹۱ گرم بر کیلو وات ساعت و از طرفی، منجر به کاهش گشتاور ترمزی به میزان ۸۷ نیوتن متر شد.

واژه‌های کلیدی: انتشار آلاینده‌گی، بیودیزل، ترانس استریفیکاسیون، دود خروجی، موتور دیزل.

ارجاع: اسلامی م. ج. حسین زاده سامانی ب. رستمی س. ابرهیمی ر. و شیرنشان ع. ر. ۱۴۰۲. بررسی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از بیودیزل تولید شده از روغن پسماند آشپزخانه و کاتالیست ناهمگن کلسیم اکسید (CaO). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶: ۱۱۱-

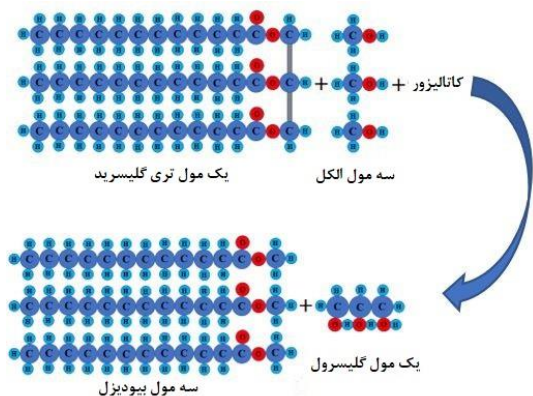
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.13966.601>

۱- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۲- هیات علمی (دانشیار)، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۳- هیات علمی (دانشیار)، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۴- هیات علمی (استاد تمام)، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۵- هیات علمی (دانشیار)، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
۶- مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

* نویسنده مسئول: b.hosseinzadehsamani@agr.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹



شکل ۱- ترانس استریفیکاسیون تری آسیل گلیسرول‌ها برای تولید آلکیل استرهای اسید چرب (بیودیزل)

در واکنش ترانس استریفیکاسیون، تماس بیشتر بین تری گلیسیریدها و متوکسید می‌تواند سرعت واکنش را افزایش دهد و منجر به تولید مقرون به صرفه‌تری شود (Samani *et al.*, 2016). استفاده از فناوری‌های تشدید فرآیند می‌تواند به بهبود افزایش تماس بین فازها و در نتیجه افزایش سرعت انتقال جرم و گرما در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون بینجامد (Samuel & Okwu., 2019). بنابراین، پیشرفت‌های جدیدی در سال‌های اخیر در مورد استفاده از فناوری‌های تشدید فرآیند در صنعت بیودیزل گزارش شده است. یکی از فناوری‌ها، راکتور حفره‌زای فراصوت است. حفره‌زایی مایعات باعث می‌شود که دو مایع غیر قابل امتزاج توسط امواج ضربه‌ای ایجاد شده امولسیون شوند که این کار مرزهای فاز را مختل می‌کند. در نتیجه، اختلاط بهتر، انتقال جرم مایع-مایع و امتزاج پذیری را می‌توان به دست آورد. مشخص شده است که این راکتورها زمان واکنش را نسبت به روش هم زدن مکانیکی (۱۰ تا ۴۰ دقیقه) کوتاه‌تر می‌کنند و راندمان اختلاط را افزایش می‌دهند. همچنین غلظت گلیسرول و نسبت مولی روغن و الکل را تقریباً ۵۰ درصد کاهش می‌دهند (Crudo *et al.*, 2016). عملکرد این راکتورها عمدتاً تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نسبت قطر نفوذکننده به راکتور، ارتفاع و عرض راکتور، عمق نفوذ نفوذ کننده، فرکانس و شدت موج و خواص مایعات است (Leong *et al.*, 2013). (Fayyazi *et al.*, 2014) از یک راکتور فراصوت برای بررسی تشدید فرآیند ترانس استریفیکاسیون استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمان تولید بیودیزل با استفاده از یک راکتور فراصوت تحت شرایط شبیه به روش مرسوم کوتاه‌تر است،

مقدمه

امروزه انرژی یکی از مهم‌ترین منابع برای بشریت و توسعه پایدار به‌شمار می‌رود و بحران اتمام منابع انرژی به یکی از چالش‌های جهانی تبدیل شده است. سوخت‌های فسیلی ۸۰ درصد از انرژی مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند. بخش حمل و نقل، وسایل نقلیه شخصی، اتوبوس‌ها، کامیون‌ها و کشتی‌ها مقادیر قابل توجهی گازوئیل و بنزین مصرف می‌کنند. این وضعیت منجر به وابستگی شدید زندگی روزمره به سوخت‌های فسیلی شده است. با این حال، تولید نفت خام داخلی تأمین کننده رشد جمعیت نیست (Demirbas, 2009a). از این‌رو، سوخت‌های جایگزین تجدیدپذیر و پاک برای استفاده فعلی و آینده مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی موتورهای دیزلی و کاهش منابع انرژی، سوخت بیودیزل به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و پاک، جایگزینی مناسب نسبت به سوخت گازوئیل به‌شمار می‌رود. سوخت بیودیزل به‌دلیل خواص شیمیایی منحصر به‌فرد، قابلیت بالایی برای مخلوط شدن با سوخت دیزل را دارد (Safieddin Ardebili., 2020). استفاده از روغن‌های پسماند آشپزی (WCO) برای تولید بیودیزل، جایگزینی جذاب نسبت به سایر روغن‌های گیاهی خوراکی است، زیرا WCO ها در دسترس هستند و استفاده از آن‌ها می‌تواند هزینه‌های تولید بیودیزل را به شدت کاهش دهد و در نتیجه بیودیزل را به یک سوخت رقابتی تبدیل می‌کند. روش‌های مختلفی برای تولید بیودیزل وجود دارد. رایج‌ترین روش برای تولید بیودیزل استفاده از فرآیند ترانس استریفیکاسیون است (Abbaszadeh *et al.*, 2012). ترانس استریفیکاسیون واکنش شیمیایی بین تری گلیسیرید و الکل با زنجیره کوتاه در حضور یک کاتالیزور برای تولید مونواسترها است. در واقع مولکول‌های تری‌گلیسیرید با زنجیره بلند و شاخه‌دار به مونواسترها و گلیسیرین تبدیل می‌شوند (Moser *et al.*, 2009). الکل‌های مورد استفاده در فرآیند ترانس استریفیکاسیون شامل الکل‌هایی با زنجیره کوتاه است، مانند: متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول. با این حال متانول به دلیل قیمت پایین آن به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ramadhas *et al.*, 2005a). (Asghari *et al.*, 2022) مکانیزم کلی واکنش ترانس استریفیکاسیون را طبق شکل ۱ توصیف کردند.

و همچنین به‌عنوان یک روان‌کننده و شوینده عمل می‌کند. با این حال، شویندگی بالای آن می‌تواند آلودگی‌های رسوب شده در سامانه‌های سوخت‌رسانی که قبلاً از گازوئیل نفتی استفاده می‌کردند را روان کند و در نتیجه منجر به گرفتگی فیلترها و نازل‌های سوخت شود. همچنین در غلظت‌های بالا، می‌تواند قطعات ساخته شده از انواع خاصی از اتصالات پلاستیکی را که معمولاً در وسایل نقلیه ساخته شده قبل از سال ۱۹۹۴ یافت می‌شود، تجزیه کند. با این حال، مردم معمولاً از بیودیزل به عنوان یک افزودنی در گازوئیل نفتی با نسبت ۱۰ درصد (B10) استفاده می‌کنند، که در این سطح از مصرف معایب ذکر شده کم اثر می‌شوند (Demirbas, 2009a).

در این پژوهش در نظر است سوخت بیودیزل با استفاده از کاتالیزور ناهمگن کلسیم اکسید در سامانه فراصوت تولید و به بررسی متغیرهای مستقل در فرآیند تولید پرداخته شود و در نهایت به منظور بررسی کیفیت سوخت تولیدی، شاخص‌های آلاینده‌گی NO_x ، SO_x ، HC ، CO و عملکرد آن در یک موتور دیزل ژنراتور (با توجه به نقطه بهینه به دست آمده از سوخت بیودیزل) بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از ضایعات روغن پخت و پز (روغن‌های پسماند از آشپزخانه دانشگاه شهرکرد)، کاتالیزور CaO ، مرک (Merck) با خلوص (۰.۹۹٪) و متانول (۰.۹۹٪) تولید شده توسط شرکت Merck برای تولید بیودیزل استفاده شد. از واکنش ترانس‌استریفیکاسیون برای تبدیل تری‌گلیسیرید موجود در ضایعات روغن پخت و پز به بیودیزل استفاده گردید. متغیرهای مستقل در تولید بیودیزل به کمک سامانه فراصوت شامل سه سطح نسبت مولی (۱:۶، ۱:۹ و ۱:۱۲)، سه سطح درصد کاتالیزور (۳، ۵ و ۷ درصد) در سه سطح زمان واکنش (۱۰، ۲۵ و ۴۰ دقیقه) برای بررسی بازده تولید و متغیرهای پاسخ برای ارزیابی بیودیزل در موتور شامل بررسی میزان انتشار آلاینده‌های NO_x ، CO ، دود و توان ویژه ترمزی، گشتاور ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور دیزل بودند.

تعیین درصد اسیدهای چرب آزاد

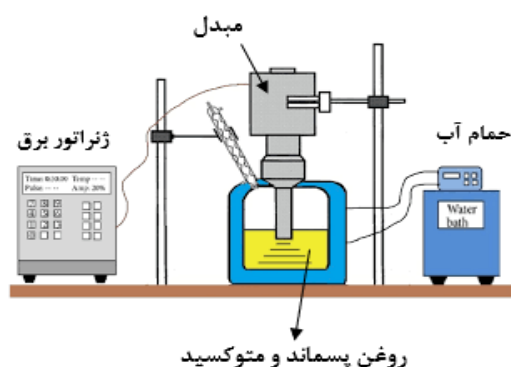
به‌منظور تصفیه، روغن پسماند به مدت چهار روز در محفظه‌ای ساکن نگهداری شد تا ناخالصی‌ها ته‌نشین شوند. سپس با استفاده از یک فیلتر ۵۰۰ میکرونی، باقی

به کمک راکتور فراصوت می‌توان زمان واکنش را تقریباً ۸۷/۵ درصد کاهش داد (Fayyazi et al., 2014).

در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون سه نوع متداول کاتالیزور به کار برده می‌شود که شامل: کاتالیزورهای لیپاز، کاتالیزورهای اسیدی و کاتالیزورهای قلیایی هستند. فرآیند کاتالیز قلیایی به حضور آب و اسیدهای چرب آزاد بسیار حساس است و به مقدار زیادی کریینول نیاز دارد، همچنین همراه با واکنش صابونی‌سازی است که منجر به مشکلات جداسازی بیودیزل و گلیسرین می‌شود. علاوه بر این، از آنجایی که کاتالیزورهای قلیایی در انتها نیاز به خنثی‌سازی دارند، باعث ایجاد فاضلاب می‌شوند. از طرفی کاتالیزورهای همگن قابل بازیابی نیستند (Demirbas, 2009c). اکثر مشکلات ذکر شده را می‌توان با استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن کاهش داد. بنابراین، علاقه فزاینده‌ای به امکان جایگزینی هیدروکسیدهای قلیایی، کربنات‌ها یا آلکوکسیدهای فلزی همگن با کاتالیزورهای جامد ناهمگن نامحلول در متانول وجود دارد که به طور بالقوه می‌تواند منجر به تصفیه آسان‌تر و مقرون به صرفه‌تر بیودیزل و گلیسرول تولید شده شود. این کاتالیزورها قابل استفاده مجدد هستند و منجر به تولید مقادیر کمتری از ضایعات سمی می‌شوند (Ansari Samani et al., 2020).

با توجه به مشکلات زیست محیطی و وجود الزامات سختگیرانه برای موتورهای CI، بررسی کاربرد سوخت‌های جایگزین جدید و مخلوطی از آن‌ها در موتورها ضروری است. مطالعات بسیاری برای بررسی NO_x ، SO_x ، HC و CO به عنوان گازهای آلاینده اصلی ساطع شده از موتورهای احتراق داخلی با سوخت ترکیبی دیزل-بیودیزل انجام شده است (Shirmeshan et al., 2016). اشتعال پذیری بیودیزل بهتر از سوخت دیزل است، زیرا عدد ستان بالایی دارد که شاخص اشتعال پذیری است. همچنین به دلیل نقطه اشتعال بالا که باعث می‌شود به عنوان سوخت ایمن شناخته شود، می‌توان آن را راحت‌تر و ایمن‌تر از سوخت دیزل حمل کرد. بیودیزل از متیل استر اسید چرب غیراشباع تشکیل شده است. به همین دلیل لزجت بالاتری نسبت به سوخت گازوئیل دارد (Park et al., 2008). از این رو روغن کاری مناسبی برای قطعات متحرک در سامانه سوخت‌رسانی فراهم می‌کند. از طرفی، بیودیزل اشتعال تمیزتری نسبت به سوخت گازوئیل دارد

تولید شده و گلیسرین از دکانتور استفاده شد. گلیسرین به دلیل چگالی بیشتر نسبت به بیودیزل در قسمت تحتانی بیودیزل قرار گرفت (Fayyazi *et al.*, 2018). به منظور تصفیه بیودیزل، الکل اضافی ابتدا توسط اوپراتور چرخشی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و ۱۵۰ دور در دقیقه بازیابی و سپس بیودیزل خام ۳ تا ۴ بار توسط آب به همراه ۱٪ اسید فسفریک حجمی شسته شد. سرانجام، بیودیزل تصفیه شده و خالص به دست آمد (Farvardin *et al.*, 2019). نمای سامانه فرآورد مورد استفاده برای تولید بیودیزل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای سامانه فرآیند تولید بیودیزل به کمک فرآورد

محاسبه محتوای متیل استر تولید شده

از کروماتوگراف گازی PerkinElmer-Clarus 580 (ساخت آمریکا) در این مطالعه استفاده شد که بر اساس استاندارد BS EN 14103 تنظیم شده است (Kasim & Harvey, 2011). عملکرد واکنش معیاری است که میزان روغن تبدیل شده به بیودیزل و مقدار روغن واکنش داده نشده را تعیین می‌کند. محتوای متیل استر موجود در نمونه بیودیزل با استفاده از معادله (۳) به دست می‌آید (Rahimi *et al.*, 2016):

$$C = \frac{\sum A - A_{IS}}{A_{IS}} \times \frac{M_{IS}}{M} \times 100 \quad (3)$$

$\sum A$ = مجموع سطح زیر اوج نمودار مربوط به اسیدهای چرب، $\mu V \cdot sec$.

A_{IS} = سطح زیر اوج نمودار متناظر با اینترنال استاندارد (متیل هپتا دکانات)، $\mu V \cdot sec$.

M_{IS} = جرم اینترنال استاندارد استفاده شده (mg).

M = جرم نمونه بیودیزل (mg).

مانده ذرات جامد ریز از روغن جدا شدند. به منظور آبیگری (خشک کردن)، روغن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس حرارت داده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دکانتور نگهداری شد تا آب موجود در نمونه‌ها ته نشین و جدا شود (Farvardin *et al.*, 2019). کیفیت روغن مصرفی در فرآیند، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر موفقیت آمیز بودن واکنش تولید بیودیزل است. معمولاً در تحقیقات متعددی اشاره شده است که میزان اسیدهای چرب آزاد روغن باید کمتر از ۵٪ وزنی روغن مورد استفاده باشد (Asghari *et al.*, 2022). به همین منظور در ابتدا از روش تیتراسیون برای اندازه‌گیری مقدار FFA و اسید نمونه‌ها استفاده شد. مقدار FFA و اسید مواد اولیه با استفاده از معادلات (۱) و (۲) (Joshi *et al.*, 2017) محاسبه می‌شود:

$$FFA = \frac{(v - b) \times N \times 28.2}{w} \quad (1)$$

$$Acidvalue = 1.989 \times FFA \quad (2)$$

که در آن‌ها:

v : حجم در میلی لیتر از محلول تیتراسیون

b : حجم در میلی لیتر ظرف خالی

N : ضریب نرمال بودن محلول تیتراسیون

w : وزن نمونه روغن به گرم مورد استفاده برای اندازه‌گیری این خواص است.

واکنش ترانس استریفیکاسیون

در این بخش از آزمایش، روغن در حضور متوکسید واکنش داده و منجر به تولید بیودیزل و گلیسرین می‌شود و تبدیل روغن به متیل استر (عملکرد واکنش) بررسی شد. متوکسید مخلوط کاتالیزور (CaO) و متانول (CH_3OH) است. برای تهیه متوکسید مقدار الکل مورد نظر با میزان مشخصی از کاتالیزور (CaO) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس مخلوط و سپس به منظور تسریع در واکنش، روغن تا دمای ۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده و با متوکسید تهیه شده ترکیب شد. پس از آن، مخلوط (روغن پسماند و متوکسید) به محفظه واکنش منتقل شد تا تحت امواج فراصوت قرار گیرد. برای انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون از پردازنده فراصوت (مدل تاپسونیک، UP400، ایران) استفاده شد. در تمامی آزمایشات، پردازنده در توان ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تنظیم گردید. در نهایت برای جداسازی بیودیزل

توان ترمزی، گشتاور ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC) بررسی شد. این آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

روش تجزیه و تحلیل نتایج

جدول ۲ محدوده متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی عوامل واکنش تولید بیودیزل از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح Box-Behnken در نرم‌افزار Design Expert 12 با سه متغیر مستقل استفاده شد. مدل مورد استفاده در روش RSM معادله درجه دوم است. در روش RSM، برای هر متغیر وابسته، مدلی تعریف می‌شود که اثرات اصلی عوامل را بر هر متغیر نشان می‌دهد (Rostami *et al.*, 2018). هر یک از متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش سطح پاسخ

متغیرهای مستقل	سطوح هر متغیر		
	۱	۰	-۱
نسبت مولی	۱۲:۱	۹:۱	۶:۱
درصد وزنی کاتالیزور	۷	۵	۳
زمان واکنش (دقیقه)	۴۰	۲۵	۱۰

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از رگرسیون گام به گام (Stepwise) در جدول ۳ گزارش شده است و معیارهایی برای تعیین دقت مدل و ارزیابی معنی‌دار بودن عوامل مستقل بر حداکثر بازده واکنش ارائه شده است. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که در این مدل تأثیر همه متغیرهای زمان واکنش \times نسبت مولی (AB)، زمان واکنش \times درصد کاتالیزور (AC)، درصد کاتالیزور \times نسبت مولی (BC)، زمان واکنش (A)، نسبت مولی (B)، درصد کاتالیزور (C) و مجذورشان (A^2, B^2, C^2) در سطح ۱۰ درصد معنی‌دار است. مقدار F مدل ۵۹۱/۹۷ بود که نشان دهنده قابل توجه بودن مدل مورد استفاده است و بر انتخاب مناسب و اهمیت مدل انتخاب شده تأکید دارد. تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را نیز می‌توان با استفاده از معادله چند جمله‌ای درجه دوم پیش‌بینی کرد.

آزمون بیودیزل در موتور دیزل ژنراتور

موتور دیزل ژنراتور از یک موتور و یک ژنراتور تشکیل شده است. موتور مورد استفاده در این مطالعه یک موتور ۴ زمانه و ۱۲ سیلندر (شرکت CAT3412) و به یک سوپرشاژر مجهز است. این موتور یک موتور پاشش مستقیم با حداکثر توان ۵۳۷ کیلووات در دور ۱۸۰۰ دور بر دقیقه است. ژنراتور متصل به موتور توسط شرکت Caterpillar Inc. US ساخته شده که سه مرحله دارد و با ۳۸۰ ولت با حداکثر مصرف توان ۳۰۰ کیلووات در سرعت نامی تأمین می‌شود. ژنراتور به یک واحد پردازنده مرکزی متصل است که با استفاده از داده‌های نقاط مختلف شروع به پردازش می‌کند و ولتاژ خروجی، توان و سرعت موتور را روی صفحه کنترل نمایش می‌دهد. جدول ۱ مشخصات فنی موتور دیزل ژنراتور را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات موتور دیزل ژنراتور

نوع موتور	دیزل ژنراتور برق CAT3412
شماره سیلندر	۱۲
کورس پیستون (میلی‌متر)	۱۵۴
قطر سیلندر (میلی‌متر)	۱۳۷
نسبت تراکم	۱۳:۰۱
سامانه خنک کننده	آب سرد
دور موتور (دوربردقیقه)	۳۰۰۰
سامانه تنفس	توربوشارژر، پس از خنک شدن
راه‌اندازی موتور	۲۴ ولت / ۷ کیلو وات
گاورنر	مکانیکی

به منظور ارزیابی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل ژنراتور با استفاده از بیودیزل تولید شده از روغن پسماند با کمک روش کاویتاسیون فراصوت و مقایسه آن با سوخت گازوئیل، نسبت‌های مختلفی از بیودیزل تولیدی به عنوان متغیرهای مستقل با گازوئیل به صورت حجمی ترکیب شدند. این ترکیبات حاوی ۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ بیودیزل بر مبنای حجمی بود که به ترتیب B0، B20، B40، B60، B80 و B100 نامی گذاری شد. هر یک از سوخت‌ها در بار کامل دینامومتر و سرعت‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه موتور مورد آزمایش قرار گرفتند و تأثیر آن‌ها بر متغیرهای وابسته از جمله شاخص‌های آلاینده‌گی موتور مانند انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOX)، کربن مونو اکسید (CO) و انتشار آلاینده دود و شاخص‌های عملکردی موتور مانند

علامت جبری در این معادله اثر کاهش یا افزایش و مقادیر عددی ضرایب میزان اهمیت عوامل در سطح درصد تبدیل بیودیزل را نشان می‌دهد. با توجه به ضرایب همبستگی معادله (۴)، می‌توان ادعا کرد که زمان واکنش (A)، نسبت مولی (B) و درصد کاتالیزور (C) به ترتیب بیشترین تأثیر را بر بازده بیودیزل تولید شده دارند. همچنین معادله واقعی بازده بیودیزل به صورت معادله (۵) به دست آمد:

$$Y = -16/10000 + 1/75751 \times A + 11/82901 \times B + 10/33412 \times C - 0/42365 \times AB + 0/18885 \times AC - 0/275854 \times BC - 0/22999 \times A^2 - 0/47432 \times B^2 - 0/796047 \times C^2 \quad (5)$$

از تحلیل داده‌ها معادله (۴) به دست آمده است (این معادله بر اساس فاکتورهای کدگذاری شده ارائه شده است). ضریب تبیین و استاندارد خطا در مدل به دست آمده به ترتیب برابر ۰/۹۹۹۱ و ۰/۲۸ هستند که ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده نشان می‌دهد که مدل به خوبی با داده‌ها تناسب دارد. ضریب تغییرات (C.V) ۰/۳۳ نشان دهنده تطابق زیاد بین داده‌های به دست آمده از آزمایش و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار است.

$$Y = +93/69 + 4/81 \times A + 2/56 \times B + 0/7262 \times C - 1/91 \times AB + 0/5666 \times AC - 1/66 \times BC - 5/17 \times A^2 - 4/27 \times B^2 - 3/18 \times C^2 \quad (4)$$

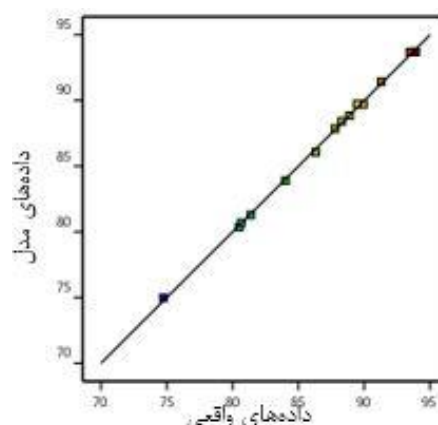
جدول ۳- نتایج مدل عملکرد تولید بیودیزل به روش سطح پاسخ

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموعه مربعات	منبع تغییرات
<۰/۰۰۰۱	۵۹۱/۹۷	۴۹/۶۱	۹	۴۴۶/۵۲	مدل
<۰/۰۰۰۱	۲۲۰۸/۶۴	۱۸۵/۱۱	۱	۱۸۵/۱۱	زمان واکنش (A)
<۰/۰۰۰۱	۶۲۴/۸۷	۵۲/۳۷	۱	۵۲/۳۷	نسبت مولی (B)
۰/۰۰۰۹	۵۰/۳۴	۴/۲۲	۱	۴/۲۲	درصد کاتالیزور (C)
<۰/۰۰۰۱	۱۷۳/۴۶	۱۴/۵۴	۱	۱۴/۵۴	زمان واکنش × نسبت مولی (AB)
۰/۰۱۱۲	۱۵/۳۲	۱/۲۸	۱	۱/۲۸	زمان واکنش × درصد کاتالیزور (AC)
<۰/۰۰۰۱	۱۳۰/۷۴	۱۰/۹۶	۱	۱۰/۹۶	نسبت مولی × درصد کاتالیزور (BC)
<۰/۰۰۰۱	۱۱۷۹/۷۶	۹۸/۸۸	۱	۹۸/۸۸	زمان واکنش 2 (A^2)
<۰/۰۰۰۱	۸۰۲/۸۳	۶۷/۲۹	۱	۶۷/۲۹	نسبت مولی 2 (B^2)
<۰/۰۰۰۱	۴۴۶/۶۸	۳۷/۴۴	۱	۳۷/۴۴	درصد کاتالیزور 2 (C^2)
۰/۳۲۹۷	۲/۱۸	۰/۱۰۷۰	۳	۰/۳۲۱۰	عدم برازش
		۰/۰۴۹۱	۲	۰/۰۹۸۱	خطای خالص
			۱۴	۴۴۶/۹۴	کل

تجزیه و تحلیل اثر اصلی عوامل بر بازده واکنش

در بین متغیرهای مستقل، زمان واکنش مهم‌ترین عامل در بازده واکنش است که تأثیر مثبتی بر محتوای متیل استر دارد (Hosseinzadeh Samani et al., 2019). همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش زمان واکنش از ۱۰ تا ۲۵ دقیقه، درصد تبدیل ابتدا به میزان ۱۹ درصد افزایش یافته و سپس از زمان ۲۵ تا ۴۰ دقیقه مقدار آن به میزان ۵/۶۳ درصد کاهش یافته است. با توجه به برگشت پذیری واکنش فوق و تمایل آن به تولید متانول، زمان واکنش بالاتر منجر به کاهش بازده خواهد شد (Chuah et al., 2017). برخی از مطالعات، این واقعیت را توضیح داده‌اند که گلیسرین و متانول هر دو قطبی و به طور مشترک محلول هستند. بنابراین، با افزایش زمان واکنش با تولید گلیسرین بیشتر، متانول بیشتری در سطح آن حل می‌شود. در نتیجه واکنش به

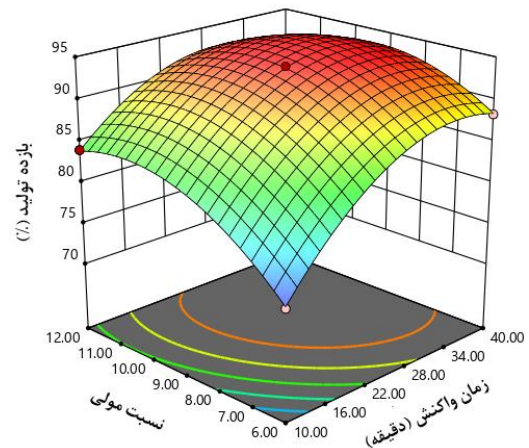
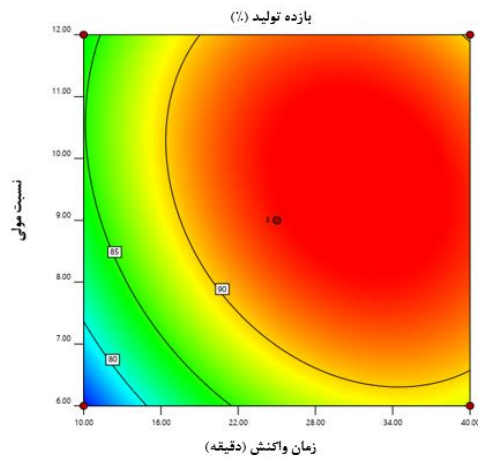
شکل ۳ انطباق داده‌های واقعی را با داده‌های نرم‌افزاری پیش‌بینی شده برای بازده بیودیزل نشان می‌دهد. طبق شکل، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بسیار نزدیک به مقادیر به دست آمده از آزمایش است. بنابراین مدل ارائه شده برای بازده از اعتبار خوبی برخوردار است.



شکل ۳- برازش داده‌های تجربی در مقابل داده‌های مدل

کاهش می‌یابد (Capocelli M, *et al.*, 2014).

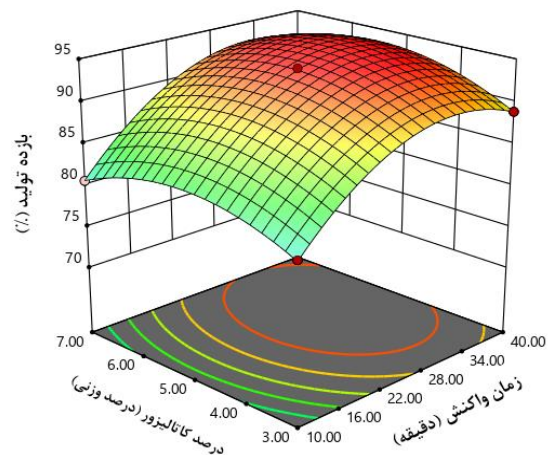
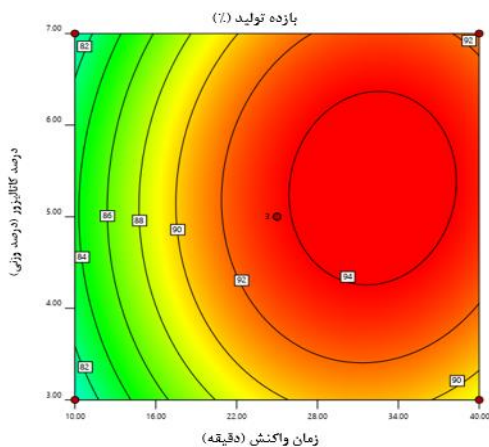
سمت تولید متانول پیش می‌رود و بازده واکنش اصلی



شکل ۴- تأثیر زمان واکنش و نسبت مولی بر بازده تولید بیودیزل

متیل استر (بیودیزل) افزایش می‌یابد (Fayyazi *et al.*, 2015). بعد از رسیدن به حالت تعادل، افزایش درصد تبدیل متیل استر به دلیل افزایش نسبت مولی محدود می‌شود، زیرا اگر این نسبت تا حدی زیاد شود، از خلوص بیودیزل تولید شده کاسته می‌شود. در واقع دلیل افزایش مقدار متانول در مخلوط واکنش منجر به انحلال بیشتر گلیسرین و الکل در بیودیزل می‌شود (Chuah *et al.*, 2015).

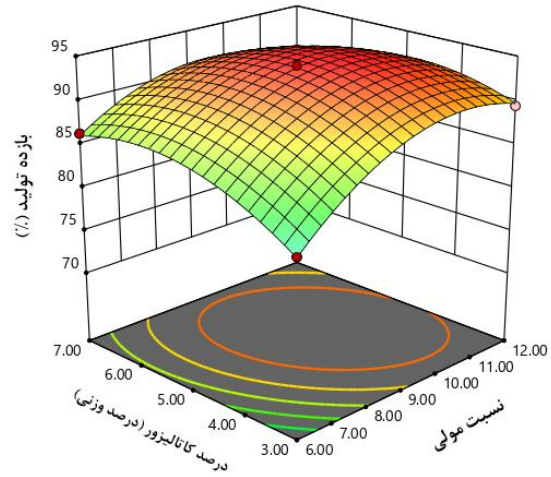
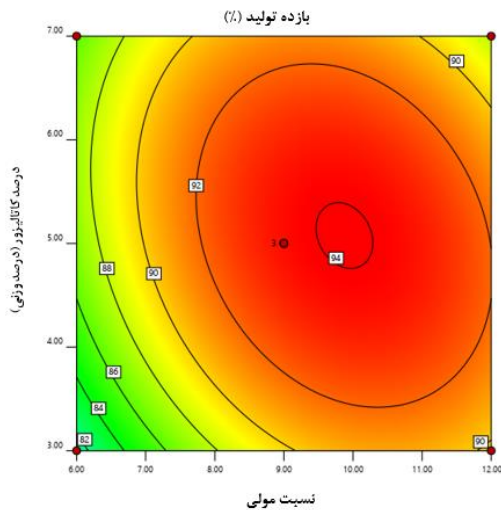
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش نسبت مولی از ۱:۶ تا ۱:۹ درصد تبدیل ابتدا افزایش یافته و سپس از نسبت مولی ۱:۹ تا ۱:۱۲ مقدار آن کاهش می‌یابد. میزان افزایش درصد تبدیل بیودیزل از نسبت مولی ۱:۶ تا ۱:۹ به میزان ۱۹ درصد بوده است. سپس از نسبت مولی ۱:۹ تا ۱:۱۲ درصد تبدیل ۱۰٪ روند نزولی را طی می‌کند. زمانی که واکنش ترانس استریفیکاسیون به تعادل برسد، با افزایش نسبت مولی الکل به روغن، تولید



شکل ۵- تأثیر متقابل زمان واکنش و درصد وزنی کاتالیزور بر بازده تولید بیودیزل

از ۸۰/۵٪ به ۹۳/۷٪ افزایش یافت که نشان دهنده‌ی ۱۳/۲٪ افزایش عملکرد است. سپس با افزایش میزان کاتالیزور از ۵ به ۷ درصد، بازده تبدیل ۱۳ درصد کاهش یافت. دلیل این کاهش بازده را می‌توان صابونی شدن واکنش ترانس استریفیکاسیون دانست (Chitsaz *et al.*, 2018; Hosseinzadeh Samani *et al.*, 2020).

کاتالیزور نیز علاوه بر روغن و الکل به میزان تقریباً چند درصد وزنی روغن به واکنش اضافه می‌شود و سطوح پایین‌تر کاتالیزور منجر به عدم دستیابی به بازده مورد نظر می‌شود (Chitsaz *et al.*, 2018). با توجه به شکل ۶، با افزایش درصد کاتالیزور به حدود ۵ درصد، بازده تبدیل به طور قابل توجهی افزایش یافت. با افزایش درصد کاتالیزور از ۳ به ۵ درصد در سامانه فراصوت درصد تبدیل

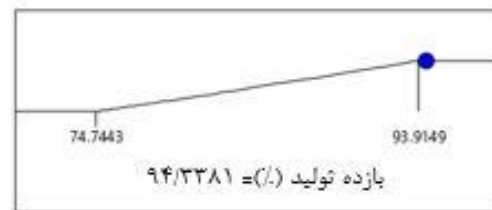
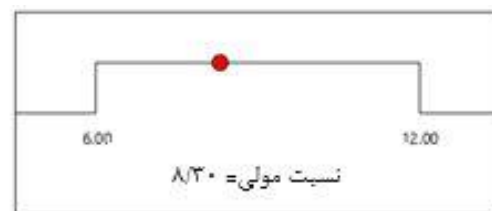
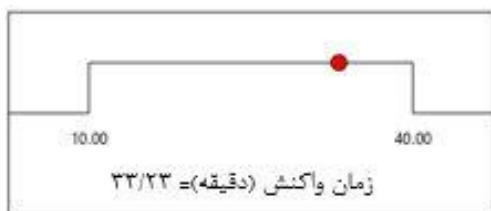


شکل ۶- تأثیر متقابل درصد وزنی کاتالیزور و نسبت مولی بر بازده تولید بیودیزل

شده، بیش‌ترین بازده در ۳۳/۲۳۰ دقیقه، نسبت مولی ۸/۳۰۵ و درصد وزنی کاتالیزور ۵/۳۲۸ برابر با ۹۴/۳۳۸ درصد به دست آمد. برای ارزیابی نتایج بهینه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی، نقاط بهینه به دست آمده مورد آزمایش قرار گرفت و بازده واکنش ۹۵/۱٪ به دست آمد که به دلیل نزدیک بودن به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار قابل قبول است.

بهینه‌سازی فرآیند

در شکل ۷ سه عامل مستقل یعنی زمان واکنش، نسبت مولی و درصد کاتالیزور در محدوده تیمارهای آزمایشی قابل تغییر هستند. با توجه به شرایط مرزی یعنی بیشینه شدن درصد تبدیل متیل‌استر، عمل بهینه‌سازی صورت گرفت. به‌طور کلی هدف از این بهینه‌سازی، به دست آوردن نقاط بهینه‌ی مربوط به عوامل ورودی است که بیش‌ترین عملکرد را دربر داشته باشند. طبق نتایج ارائه



شکل ۷- بهینه‌سازی فرآیند تولید بیودیزل در راکتور حفره زای فراصوت بر اساس مدل RSM

سلسیوس، لزجت در ۴۰ درجه سلسیوس، عدد یدی، عدد اسیدی، نقطه اشتعال، گلیسرین آزاد و عدد ستان اندازه‌گیری و با استاندارد EN 14214 biodiesel مقایسه شد. طبق جدول ۴، نتایج نشان داد که برخی از خصوصیات با این استاندارد مطابقت دارند.

ویژگی‌های بیودیزل تولیدی

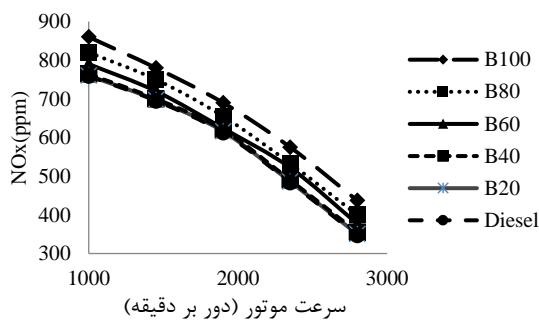
برای اینکه متیل‌استر بتواند به عنوان سوخت بیودیزل معرفی شود، برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن باید مطابق با استانداردهای موجود باشد. خصوصیات عمده بیودیزل به دست آمده از روغن پسماند در یک راکتور کائوچاسیون فراصوت شامل چگالی در دمای ۱۵ درجه

جدول ۴- خواص متیل استر روغن پسماند در مقایسه با استاندارد بیودیزل (EN 14214 biodiesel)

خصوصیت	روش استاندارد آزمون	حدود مجاز	بیودیزل روغن پسماند	دیزل	واحد
متیل استر	EN14103	کمترین ۹۶/۵	۹۵/۵	-	% (m/m)
چگالی 15°C	ASTM D4052	۰/۸۶-۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۶۱	g/cm ³
لزجت سینماتیکی	ASTM D445	۳/۵-۵	۴/۶۹	۲/۹۶	mm ² /s
ارزش اسیدی	ASTM D664	بیشترین ۰/۵۰	۰/۴۲	۰/۱۸	mg KOH/g
ارزش یدی	AOAC CD1-25	بیشترین ۱۲۰	۱۱۹/۴۷	-	g iodine/100 g
نقطه اشتعال	ASTM D93	کمترین ۱۲۰	۱۳۷	۴۸	°C
عدد ستان	ASTM D613	کمترین ۵۱	۴۹	۵۱	-
گلیسرین آزاد	ASTMD6584	۰/۰۲	۰/۰۱۹	-	%mass
کل گلیسرین	ASTMD6584	۰/۲۴	۰/۲۳	-	%mass

انتشار NOx

سوخت، دمای اشتعال کمتر شده و تأخیر زمانی اشتعال نیز کاهش می‌یابد. بنابراین به تولید دمای بالا در اثر احتراق منجر شده که فرصت مناسبی به وجود می‌آید تا اکسیژن و نیتروژن وارد واکنش شوند و مونو اکسید نیتروژن (NO) تولید کنند (Pinto *et al.*, 2005). بیشتر محققان دریافتند که افزودن بیودیزل به دیزل باعث افزایش NOx شده و دلیل آن هم وجود اکسیژن زیاد در بیودیزل نسبت به دیزل است (Xue *et al.*, 2011).



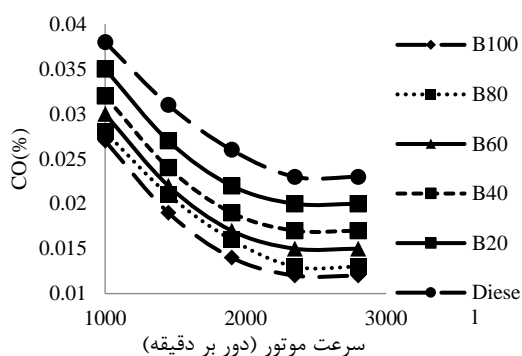
شکل ۸- اثر درصد‌های مختلف بیودیزل بر NOx

انتشار CO

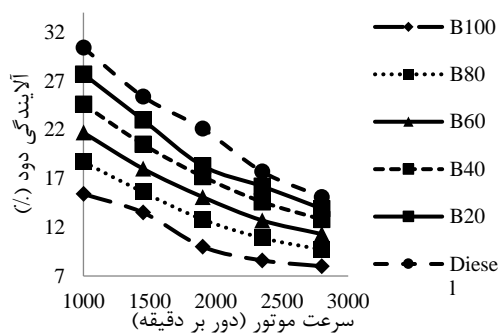
آلاینده کربن مونو اکسید یک گاز بی‌رنگ، بی‌بو، سمی و حاصل احتراق ناقص است که در میان آلاینده‌های خروجی از اگزوز موتور دیزل یافت می‌شود. این آلاینده حتی در تراکم‌های بسیار کم نیز برای انسان و سایر جانوران خطرناک است (Lin *et al.*, 2011). باتوجه به شکل ۹ بیشترین مقدار انتشار آلاینده کربن مونو اکسید مربوط به سوخت دیزل خالص با مقدار ۰/۰۳۸٪ در بار بیشینه و دور ۱۰۰۰ rpm اتفاق افتاد. همچنین کمترین مقدار انتشار آلاینده کربن مونو اکسید مربوط به سوخت بیودیزل خالص (B100) با مقدار ۰/۰۱۲٪ در بار کامل و

اکسیدهای نیتروژن فقط در اگزوز موتور دیزل یافت می‌شوند. دمای بالا و در دسترس بودن اکسیژن مهم‌ترین عوامل در تولید اکسیدهای نیتروژن هستند (Shafii *et al.*, 2011). شکل ۸ تغییرات اکسیدهای نیتروژن را متناسب با نوع سوخت و دور موتور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار انتشار آلاینده NOx مربوط به سوخت دیزل خالص با مقدار ۸۶۰ ppm در سرعت ۱۰۰۰ rpm و در بار حداکثری موتور اتفاق افتاد. همچنین کم‌ترین مقدار انتشار آلاینده NOx مربوط به سوخت دیزل خالص با مقدار ۳۴۷ ppm در سرعت ۲۸۰۰ rpm و در بار کامل بود. اگرچه با افزایش سرعت دورانی موتور، حرارت داخل سیلندر افزایش یافته و این موضوع می‌تواند عاملی برای افزایش انتشار آلاینده NOx باشد، ولی به علت این‌که با افزایش سرعت دورانی، اختلاط مخلوط سوخت و هوا سریع‌تر شده و حرکت جریان گاز احتراق نیز بیشتر می‌شود، در نتیجه دوره واکنش مخلوط سوخت و هوا در هر سیکل موتور کاهش یافته و گاز احتراق در مدت زمان کمتری در بالاترین حد درجه حرارت خود باقی می‌ماند. بنابراین، انتشار آلاینده NOx در سرعت‌های دورانی بالاتر موتور و برای همه مخلوط‌های سوخت کاهش می‌یابد (Lin & Lin, 2006). همچنین با توجه به این‌که سوخت بیودیزل، دارای محتوای ۱۰ تا ۱۲٪ اکسیژن است (Tyson, 2006) لذا از دو جهت موجب افزایش اکسیدهای نیتروژن می‌شود. اولاً اینکه با افزایش سهم بیودیزل در ترکیب، محتوای اکسیژن آن ترکیب نیز بالا رفته و اکسیژن بیشتری در دسترس نیتروژن قرار می‌گیرد که به تولید اکسیدهای نیتروژن می‌انجامد. ثانیاً با افزایش محتوای اکسیژن

کاهش آلاینده دود منتشر شده با افزایش سرعت موتور در همه نمونه‌های سوخت مشاهده شد که علت آن را باید در افزایش اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه افزایش اکسیداسیون سوخت در دوره‌های بالاتر موتور دانست که سبب کاهش سطح دود تولیدی می‌گردد (Lin & Lin., 2007). بیشترین سطح دود تولیدی موتور در بار کامل به مقدار حدودی ۳۰٪ (در مقیاس کدری دوده) و در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برای سوخت دیزل خالص اتفاق افتاد. همچنین کمترین سطح دود تولیدی (۸٪) در مقیاس کدری دوده) از آگروز موتور در بار کامل در سرعت دورانی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه برای بیودیزل خالص رخ داد. با ملاحظه نتایج تحقیق می‌توان گفت که با افزایش درصد بیودیزل در مخلوط سوخت، سطح دود تولیدی موتور کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه عناصر اکسیژن، کربن و گوگرد در ساختار مولکولی سوخت‌ها تأثیر زیاد و قابل توجهی بر تولید دود و پدیده اکسیداسیون سوخت دارند، علت این کاهش را باید وجود مولکول‌های اکسیژن و کم بودن عناصر کربن و گوگرد در ساختار مولکولی بیودیزل و بودن مخلوط‌های سوخت حاوی بیودیزل دانست که سبب اکسیداسیون بیشتر سوخت، احتراق کامل‌تر و با ثبات‌تر می‌گردد (Aydin & Bayindir., 2010).



شکل ۹- اثر درصدهای مختلف بیودیزل بر CO



شکل ۱۰- اثر درصدهای مختلف بیودیزل بر آلاینده‌های دود

دور ۲۸۰۰ rpm بود. شکل ۹ نشان می‌دهد که در دوره‌های پایین‌تر موتور و برای همه مخلوط‌های سوخت، به علت توزیع نامناسب ذرات سوخت، اختلاط کمتر مخلوط سوخت و هوا، شرایط بد اتمی شدن سوخت و همچنین دمای پایین محفظه احتراق، نقصان اکسیژن کافی در نواحی مختلف محفظه احتراق بوجود آمده و در نتیجه احتراق کاملی اتفاق نمی‌افتد و انتشار آلاینده CO افزایش می‌یابد. ولی با افزایش سرعت دورانی، شرایط احتراق بهتر شده و انتشار آلاینده CO کاهش می‌یابد (Kim & Choi, 2010). بیودیزل، دارای درصد زیادی اکسیژن در ساختمان مولکولی خود است و احتراق کامل‌تری را ایجاد می‌کند (Abed et al., 2019). در نتیجه در حین احتراق در همه سرعت‌های دورانی موتور، مونو اکسید کربن کمتری تولید می‌نماید. وجود مولکول‌های بیشتر اکسیژن در ساختار مولکولی بیودیزل به خصوص در سرعت‌های بیشتر موتور که نسبت سوخت به هوا در نواحی مختلف محفظه احتراق بیشتر است، منجر به ایجاد شرایط بهتر احتراق شده و در نتیجه انتشار آلاینده CO کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه نسبت کربن به هیدروژن در سوخت‌های بیودیزل نسبت به دیزل کمتر است (Behçet, 2011)، لذا این واقعیت نیز می‌تواند دلیل دیگری جهت کاهش آلاینده CO باشد. قابل ذکر است که بیودیزل دارای دو ویژگی تراکم‌پذیری کمتر و عدد ستان بیشتر نیز هست. تراکم‌پذیری کمتر سبب شروع زودتر پاشش سوخت و در نتیجه بیشتر شدن دوره احتراق شده و عدد ستان بیشتر نیز سبب تأخیر در احتراق کوتاه‌تر و بیشتر شدن دوره احتراق می‌گردد. به همین منظور، احتراق کامل در نواحی بیشتری از محفظه سیلندر رخ می‌دهد و بنابراین انتشار آلاینده CO کاهش می‌یابد (Canakci et al., 2009). محققان در تحقیقی اثر بیودیزل تولید شده از روغن گلرنگ به کمک امواج فراصوت را بر روی یک موتور دیزل ژنراتور مورد بررسی قرار دادند و گزارش دادند که با افزایش درصدهای بیودیزل در مخلوط‌های سوخت، میزان انتشار CO کاهش می‌یابد (Hosseinzadeh Samani et al., 2020).

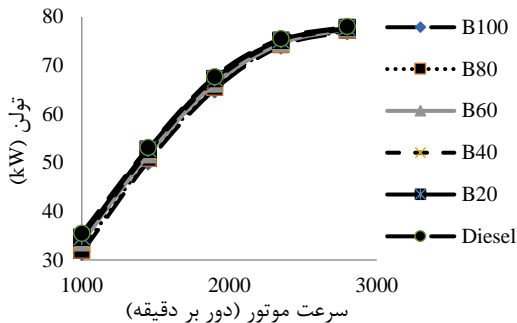
انتشار آلاینده‌های دود

شکل ۱۰ تغییرات مربوط به انتشار آلاینده دود را در سرعت‌های مختلف و بارگذاری بیشینه نمایش می‌دهد.

توان ویژه ترمزی موتور دیزل

توان موتور متناسب با حاصل ضرب گشتاور در سرعت موتور است. بنابراین توان موتور نه تنها به نیروی انفجار، بلکه به سرعت موتور نیز بستگی دارد. با توجه به شرایط آزمون‌ها، تغییر در توان موتور تحت تأثیر گشتاور موتور بود. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، بیش‌ترین مقدار توان ترمزی موتور در بار کامل، برای سوخت دیزل خالص و در سرعت دورانی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه موتور به مقدار ۷۸ کیلووات اتفاق افتاد. همچنین کم‌ترین مقدار توان ترمزی موتور با مقدار ۳۱/۵ کیلووات در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برای مخلوط سوخت B100 رخ داد. همان‌طور که در (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود، مقدار توان ترمزی موتور با افزایش درصد بیودیزل در همه مخلوط‌های سوخت با افزایش سرعت دورانی موتور کاهش می‌یابد. دلیل اصلی کاهش توان، پایین بودن ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل خالص است (Ozsezen et al., 2009). همچنین بیودیزل گرانی بیشتری نسبت به سوخت دیزل خالص دارد که باعث اتمیزاسیون کم‌تر و شکستن نامناسب مولکول‌های بیودیزل هنگام پاشش سوخت می‌شود و منجر به کاهش توان ترمزی موتور می‌گردد (Aydin & Bayindir, 2010). قابل ذکر است که وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل و همچنین چگالی بالای آن باعث می‌شود که جرم بیشتری از سوخت به ازای واحد حجم پاشیده شود که تا حدودی این نقصان را جبران کرده و اختلاف توان ترمزی مخلوط‌های سوخت حاوی بیودیزل بیش‌تر را با سوخت دیزل خالص به حداقل می‌رساند (Shirmeshan, et al., 2014). به طور کلی با افزایش سرعت دورانی موتور، توان ترمزی برای همه مخلوط‌های سوخت افزایش می‌یابد که علت آن افزایش اختلاط هوا و سوخت در سیلندر و شرایط بهتر احتراق است. از طرف دیگر در سرعت‌های دورانی بیشتر موتور، به علت بهبود اختلاط هوا و سوخت در محفظه احتراق و شرایط احتراقی، وجود اکسیژن در ساختار مولکولی بیودیزل و تأخیر در احتراق کم‌تر آن به علت عدد ستان بیشتر، تأثیر مثبتی در نزدیک شدن مقدار توان ترمزی مخلوط‌های سوخت حاوی بیودیزل به مقدار توان ترمزی سوخت دیزل خالص دارد (Xue et al., 2011). برخی محققان گزارش کردند که در بار کامل، ۷/۱۴ درصد توان برای بیودیزل

نسبت به سوخت دیزل کاهش می‌یابد و همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل ۱۳/۵ درصد کمتر است (Murillo et al., 2007).

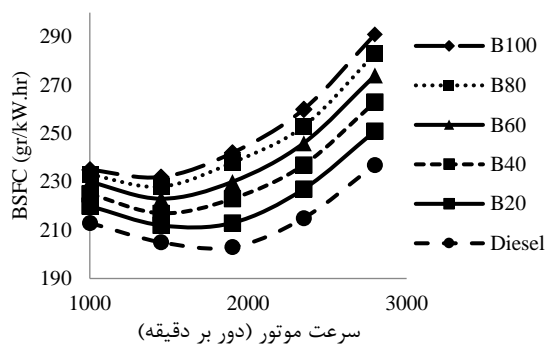


شکل ۱۱- تأثیر درصد‌های مختلف بیودیزل بر قدرت ویژه ترمزی

گشتاوری ترمزی موتور دیزل

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، بیش‌ترین گشتاور ترمزی موتور در بار بیشینه برای سوخت دیزل خالص در دور ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ rpm با مقدار ۳۵۰ N.m اتفاق افتاد. همچنین کم‌ترین گشتاور ترمزی موتور نیز در بار کامل موتور در دور ۲۸۰۰ rpm برای سوخت B100 با مقدار ۲۶۳ N.m اتفاق افتاد. دلیل کاهش گشتاور با افزایش درصد بیودیزل در ترکیب سوخت در تمام دوره‌های موتور، ارزش حرارتی پایین بیودیزل است که این امر موجب کاهش فشار متوسط مؤثر می‌شود. در نتیجه نیروی وارد بر سطح پیستون کاهش یافته و گشتاوری که این نیرو بر سطح میل لنگ اعمال می‌کند نیز کاهش می‌یابد (Ghobadian et al., 2009). البته وجود بیودیزل در مخلوط سوخت، باعث می‌شود تا اکسیژن موجود در ساختار شیمیایی سوخت بیودیزل، فرآیند احتراق را بهبود داده و احتراق کامل‌تری انجام شود و در نتیجه انرژی بیشتری آزاد شده و باعث افزایش فشار متوسط داخل محفظه احتراق می‌شود (Ramadhas et al., 2005a). البته با توجه به نمودارهای شکل ۱۲، مقدار گشتاور ترمزی برای مخلوط‌های سوخت حاوی بیودیزل در دوره‌های بیش از ۲۳۵۰ دور بر دقیقه، مقداری تقریباً برابر با دیزل خالص داشته که علت این موضوع را می‌توان به قابلیت روانکاری و تأثیر وجود مولکول‌های بیشتر اکسیژن در بیودیزل نسبت به دیزل در دوره‌های بالا اشاره کرد که به ترتیب در کاهش تلفات

سوخت ویژه می‌گردد. همچنین در تحقیقات متعددی، افزایش مصرف سوخت ویژه با افزودن بیودیزل به مخلوط سوخت ذکر شده است که علت همگی پایین بودن ارزش حرارتی بیودیزل و بالا بودن چگالی و لزجت آن نسبت به سوخت دیزل است (Hazar & Aydin., 2010). Labeckas & Slavinskas (2006) مدعی شدند که BSFC برای ترکیبات بیودیزل بیشتر از سوخت 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 (Labeckas & Slavinskas, 2006).

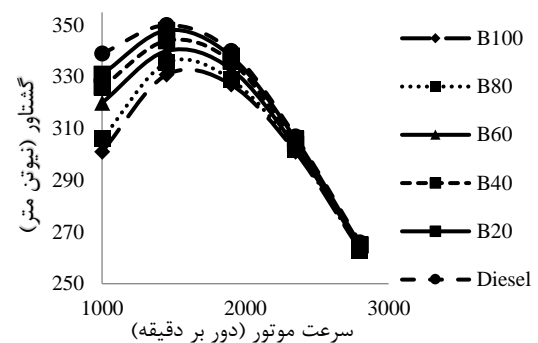


شکل ۱۳- تأثیر درصد‌های مختلف بیودیزل بر مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور دیزل (BSFC)

نتیجه‌گیری

می‌توان ادعا کرد که بیشترین تأثیر در تولید متیل استر در بین متغیرهای مورد مطالعه مربوط به زمان واکنش، نسبت مولی و به دنبال آن درصد کاتالیزور است. با افزایش درصد از ۳ به ۵، عملکرد، ۱۳/۲٪ درصد افزایش یافت. سپس با افزایش بیش‌تر آن از ۵ به ۷ درصد عملکرد کاهش یافت. دلیل این کاهش را می‌توان صابونی شدن فرآیند ترانس استریفیکاسیون دانست. از طرفی، با افزایش نسبت مولی متانول از ۶ به ۹، نرخ تبدیل ابتدا به ۱۹ درصد افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیش‌تر آن از ۹ به ۱۲، منجر به کاهش نرخ تبدیل به میزان ۱۰٪ می‌شود. در نهایت نقطه بهینه در آزمایشات حاضر مربوط به زمان ۳۳/۲۳۰ دقیقه، نسبت مولی ۸/۳۰۵ و درصد وزنی کاتالیزور ۵/۳۲۸ بود که منجر به بازده تولید ۹۴/۳۳۸ درصد شد. نتایج مربوط به ارزیابی سوخت تولیدی نشان داد که با افزایش میزان بیودیزل در سوخت ورودی به موتور، انتشار CO و سطح دود تولیدی کاهش و NOx افزایش یافت. همچنین توان ویژه ترمزی موتور

ناشی از اصطکاک و ایجاد شرایط احتراق بهتر و در نتیجه بیشتر شدن مقدار گشتاور ترمزی تأثیر به‌سزایی دارند (Ramadhas et al., 2005b). محققان دریافتند که بیشترین و کمترین اختلاف در توان و گشتاور (حالت تمام بار) بین دیزل نفتی و هشت نوع سوخت متیل استرهای روغن گیاهی، به ترتیب ۱/۴۹ و ۰/۶۴، ۱/۳۹ و ۱/۲۵ درصد بود. که این به علت لزجت بالا، مصرف سوخت ویژه بالا، بالا بودن مقدار اکسیژن و اشتعال بالای بیودیزل است (Lin et al., 2009).



شکل ۱۲- تأثیر درصد‌های مختلف بیودیزل بر گشتاور ترمزی

مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور دیزل (BSFC)

مفهوم مصرف سوخت ویژه ترمزی، مقدار سوخت مصرف شده برای تولید توان ترمزی موتور در واحد زمان است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور در بار حداکثری و در سرعت دورانی ۲۸۰۰ rpm برای سوخت B100 با مقدار ۲۹۱ g/kW.hr اتفاق افتاد. همچنین کم‌ترین مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور در بار کامل در سرعت دورانی ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ دور بر دقیقه برای سوخت دیزل خالص و به مقدار حدودی ۲۰۰ g/kW.hr رخ داد. با توجه به نمودارها، تا حدودی برای همه مخلوط‌های سوخت، مصرف سوخت ویژه ترمزی تا سرعت‌های متوسط (۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) کاهش یافت و سپس با ثابت ماندن آن در این محدوده، از سرعت دورانی ۲۰۰۰ rpm روندی افزایشی به خود گرفت. علت این افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی در همه سرعت‌های دورانی موتور، ارزش حرارتی کمتر و چگالی بیشتر سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل است. به همین دلیل با افزودن بیودیزل به ترکیب سوخت، حجم بیشتری از سوخت وارد محفظه احتراق شده و در نتیجه منجر به افزایش مصرف

- methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2): 2262-2268.
- Chuah, L. F., Aziz, A. R. A., Yusup, S., Bokhari, A., Klemeš, J. J., & Abdullah, M. Z. (2015). Performance and Emission of diesel engine fuelled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(8): 2229-2241.
- Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., Akbar, M. M., & Chong, Z. K. (2017). Kinetic studies on waste cooking oil into biodiesel via hydrodynamic cavitation. *Journal of cleaner production*, 146: 47-56.
- Crudo D., Bosco V., Cavaglia G., Grillo G., Mantegna S. & Cravotto G. (2016). "Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation." *Ultrasonics Sonochemistry*. (33): 220-225.
- Demirbas, A. (2009a). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*. 50: 2239-2249.
- Demirbas, A. (2009b). Progress and Recent Trends in Biodiesel Fuels. *Energy Conversion and Management*. 50, 14-34.
- Demirbas, A. (2009c). Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*, 50: 923-927.
- Farvardin, M., Hosseinzadeh Samani, B., Rostami, S., Abbaszadeh-Mayvan, A., Najafi, G., & Fayyazi, E. (2019). Enhancement of biodiesel production from waste cooking oil: ultrasonic-hydrodynamic combined cavitation system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-15.
- Fayyazi E, Ghobadian B, Najafi G, & Hosseinzadeh B. (2014). Genetic algorithm approach to optimize biodiesel production by ultrasonic system. *Chem Prod Process Model.*, 9: 59-70.
- Fayyazi, E., Ghobadian, B., Najafi, G., Hosseinzadeh, B., Mamat, R., & Hosseinzadeh, J. (2015). An ultrasound-assisted system for the optimization of biodiesel production from chicken fat oil using a genetic algorithm and response surface methodology. *Ultrasonics sonochemistry*, 26: 312-320.
- Fayyazi, E., Ghobadian, B., van de Bovenkamp, H. H., Najafi, G., Hosseinzadehsamani, B., Heeres, H. J., & Yue, J. (2018). Optimization of biodiesel production over chicken eggshell-derived CaO catalyst in a continuous centrifugal
- دیزل و مصرف ویژه سوخت ترمزی با افزایش میزان بیودیزل، افزایش و گشتاور ترمزی موتور کاهش یافت. نتایج نشان داد که برخی از خواص متیل استر روغن پسماند مطابق با الزامات استاندارد EN 14214 بیودیزل است. بنابراین، روغن پسماند ترانس استری شده می‌تواند جایگزین بالقوه‌ای برای گازوئیل باشد.

منابع

- Abbaszadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhah, M. R., & Najafi, G. (2012). Current biodiesel production technologies: a comparative review. *Energy Convers Manag*, 63: 138-48.
- Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian journal of petroleum*, 28(2): 183-188.
- Ansari Samani, M., Hosseinzadeh Samani, B., Lotfalian, A., Rostami, S., Najafi, G., Fayyazi, E., & Mamat, R. (2020). The feasibility and optimization of biodiesel production from *Celtis australis* L. oil using chicken bone catalyst and ultrasonic waves. *Biofuels*, 11(4): 513-521.
- Asghari, M., Samani, B. H., & Ebrahimi, R. (2022). Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors. *Energy Conversion and Management*, 258: 115514.
- Aydin, H. & H. Bayindir, Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy*, 2010. 35(3): p. 588-592.
- Behçet, R. (2011). Performance and emission study of waste anchovy fish biodiesel in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*. 92(6): 1187-1194.
- Canakci, M., Ozsezen, A. N., Arcaklioglu, E., & Erdil, A. (2009). Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil. *Expert systems with Applications*, 36(5): 9268-9280.
- Capocelli, M., Musmarra, D., Prisciandaro, M., & Lancia, A. (2014). Chemical effect of hydrodynamic cavitation: simulation and experimental comparison. *AIChE Journal*, 60(7): 2566-2572.
- Chitsaz, H., Omidkhah, M., Ghobadian, B., & Ardjmand, M. (2018). Optimization of hydrodynamic cavitation process of biodiesel production by response surface

- a three-phase emulsion of biodiesel produced by peroxidation. *Fuel Processing Technology*, 88(1): 35-41.
- Lin, Y. C., Hsu, K. H. & Chen C. B. (2011). Experimental investigation of the performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel/ultra-low sulfur diesel blends. *Energy*, 36(1): 241-248.
- Moser, B. R. (2009). Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 45: 229-266.
- Murillo, S., Miguez, J. L., Porteiro, J., Granada, E., & Moran, J. C. (2007). Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. *Fuel*, 86(12-13): 1765-1771.
- Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., & Sayin, C. (2009). Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel*, 88(4): 629-636.
- Park, J. Y.; Kim, D. K.; Wang, Z. M.; Lu, P. M.; Park, S. C., & Lee, J. S. (2008). Production and Characterization of Biodiesel from TungOil. *Appl. Biochem. Biotechnol*, 148: 109-117.
- Pinto, A. C., Guarieiro, L. L., Rezende, M. J., Ribeiro, N. M., Torres, E. A., Lopes, W. A., & Andrade, J. B. D. (2005). Biodiesel: an overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 16: 1313-1330.
- Rahimi, M., Mohammadi, F., Basiri, M., Parsamoghadam, M. A., & Masahi, M. M. (2016). Transesterification of soybean oil in four-way micromixers for biodiesel production using a cosolvent. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 64: 203-210.
- Ramadhas, A. S., Muraleedharan, C., & Jayaraj, S. (2005a). Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renewable energy*, 30(12): 1789-1800.
- Ramadhas, A.H.; Jayaraj, S.; Muraleedharan, C. (2005b). Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*, 84: 335-340.
- Rostami, S., Behruzian, M., Samani, B. H., Lorigooini, Z., Hosseinabadi, T., Zareiforush, H., & Behruzian, A. (2018). Study of combined ultrasound-microwave effect on chemical compositions and E. Coli count of rose aromatic water. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 17(Suppl2), 146 p.
- Safieddin Ardebili S. M. (2020). Green electricity generation potential from biogas produced by anaerobic digestion of farm contactor separator. *Industrial & engineering chemistry research*, 57(38): 12742-12755.
- Ghobadian, B., Rahimi, H., Nikbakht, A. M., Najafi, G., & Yusaf, T. F. (2009). Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable energy*, 34(4): 976-982.
- Hazar, H. and H. Aydin. (2010). Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO)-diesel blends. *Applied Energy*, 87(3): 786-790.
- Hosseinzadeh Samani, B., Ansari Samani, M., Shirneshan, A., Fayyazi, E., Najafi, G., & Rostami, S. (2020). Evaluation of an enhanced ultrasonic-assisted biodiesel synthesized using safflower oil in a diesel power generator. *Biofuels*, 11(4): 523-532.
- Joshi, S., Gogate, P. R., Moreira Jr, P. F., & Giudici, R. (2017). Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39: 645-653.
- Kasim, Farizul H., and Adam P. Harvey. (2011). "Influence of various parameters on reactive extraction of *Jatropha curcas* L. for biodiesel production." *Chemical Engineering Journal*, 171(3): 1373-1378.
- Kim, H. and B. Choi. (2010). The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. *Renewable energy*, 35(1): 157-163.
- Labeckas, G. and S. Slavinskas. (2006). The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Energy conversion and Management*, 47(13-14): 1954-1967.
- Leong B. S., M. Rus A. Z. & Hasan S. (2013). Continuous biodiesel production using ultrasound clamp on tubular reactor. *International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER2013)*, 1-3 July. Pahang, Malaysia, 1-10.
- Lin, B. F., Huang, J. H. & D. Y. (2009). Huang, Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. *Fuel*, 88(9): 1779-1785.
- Lin, C. Y., & Lin H. A. (2006). Diesel engine performance and emission characteristics of biodiesel produced by the peroxidation process. *Fuel*, 85(3): 298-305.
- Lin, C. Y. & H. A. (2007). Lin, Engine performance and emission characteristics of

- animal waste and agriculture residues in Iran. *Renew Energy*, 154: 29-37.
- Samani BH, Zareiforoush H, Lorigooini Z, Ghobadian B, Rostami S, Fayyazi E. (2016) Ultrasonic-assisted production of biodiesel from *Pistacia atlantica* Desf. oil. *Fuel*, 168: 22-6.
- Samuel O. D., & Okwu M. O. (2019). Comparison of Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Network (ANN) in modelling of waste coconut oil ethyl esters production. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff.*, 41(9): 1049-61.
- Shafii, M. B., Daneshvar, F., Jahani, N. A., & Mobini, K. (2011). Effect of ferrofluid on the performance and emission patterns of a four-stroke diesel engine. *Advances in Mechanical Engineering*, 3: 529049.
- Shirneshan, A. R., Almassi, M., Ghobadian, B., & Najafi, G. H. (2014). Investigating the effects of biodiesel from waste cooking oil and engine operating conditions on the diesel engine performance by response surface methodology. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Mechanical Engineering*, 38(M2): 289.
- Shirneshan, A., Samani, B. H., & Ghobadian, B. (2016). Optimization of biodiesel percentage in fuel mixture and engine operating conditions for diesel engine performance and emission characteristics by Artificial Bees Colony Algorithm. *Fuel*, 184: 518-526.
- Tyson, K. S. (2006). Biodiesel handling and use guidelines. US Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy*. Vol. 540.
- Xue, J., Grift, T. E. & Hansen A. C. (2011). Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 15(2): 1098-1116.

