

تأثیر اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل بر عملکرد موتور دیزل

بهمن نجفی*

دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی
(دریافت: ۱۳۹۱/۳/۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۷/۲۳، پذیرش: ۹۱/۱۰/۷)

منواسترهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) خواص ترموفیزیکی سوخت را تحت تأثیر قرار می‌دهند که آن هم مستقیماً بر فرایند احتراق و عملکرد موتور تأثیر می‌گذارد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر هر یک از منواسترهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل بر توان ترمزی موتور دیزل است. سوخت بیودیزل مورد استفاده اتیل استر اسیدهای چرب حاصل از روغن آفتاب‌گردان، سویا، ذرت، کلزا و روغن پسماند و مخلوط‌های آن‌ها با یکدیگر است. سوخت‌های بیودیزل در شرایط بار کامل و دور بیشینه توان (2000 rpm) بر روی موتور دیزل MT4-244 مورد آزمون قرار گرفتند. سپس، توان ترمزی موتور به صورت مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه برحسب تابعی از درصد منواسترهای اسید چرب مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که اسیدهای چرب اشباع با زنجیره هیدروکربنی کوتاه، یعنی استئارات ($C16=0$) و پالمیتات ($C18=0$) با ضرایب تأثیر $+0.0977$ و $+0.042526$ ، تأثیر بیشتری بر تولید توان موتور دارند و اسیدهای چرب غیراشباع با زنجیره هیدروکربنی بلند، یعنی اولئات ($C18=1$)، لینولئات ($C18=2$) و لینولئات ($C18=3$) با ضرایب تأثیر $+0.0684$ ، $+0.0375$ و -0.0558 ، تأثیر کمتری بر تولید توان موتور دارند. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش مقدار اشباع‌نشده‌گی اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل تولید توان موتور کاهش می‌یابد، به نحوی که وجود اتیل استر لینولئات ($C18=3$)، که دارای سه پیوند غیراشباع کربن-کربن است، تأثیر منفی (-0.0558) بر تولید توان دارد. لذا تولید سوخت بیودیزل از روغن‌هایی که دارای اسیدهای چرب اشباع بیشتر و اسیدهای چرب غیراشباع کمتری هستند، می‌تواند موجب افزایش تولید توان موتور شود.

کلیدواژگان: بیودیزل، اتیل استر اسیدهای چرب، عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل، مدل‌سازی

مقدمه

بحران فزاینده انرژی و آلودگی محیط زیست با شتاب تندی همه کشورهای جهان را کم‌وبیش به چالشی عظیم کشانده است. آلاینده‌گی، کمبود، تجدیدنابپذیری و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی اندیشمندان و محققان حوزه‌های مختلف علوم را واداشته تا به دنبال راهکارهای عملی برای فایده‌آمدن بر مشکلات و تبعات بحران انرژی باشند. بیوگاز، بیواتانول، بیوبنزین و بیودیزل به‌عنوان مهم‌ترین سوخت‌های جایگزین مطرح‌اند. از آنجا که قسمت اعظم آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن و دوده از گازهای خروجی موتورهای دیزلی ناشی می‌شوند، لذا در میان سوخت‌های زیستی موجود، تحقیق در راستای یافتن سوختی جایگزین و مناسب برای سوخت گازوییل سهم وسیع‌تری از تحقیقات را به خود اختصاص داده است [۱-۴]. از مهم‌ترین دلایل انتخاب بیودیزل‌ها می‌توان به تجدیدپذیری، مقادیر کمتر آلاینده‌های حاصل از احتراق و عدم نیاز به تغییر در ساختار موتور اشاره کرد [۵]. خواص سوخت بیودیزل به‌طور انکارناپذیری تحت تأثیر نوع اسیدهای چرب تشکیل‌دهنده آن است. شناسایی این اسیدها می‌تواند در به‌دست آوردن خواص سوخت‌های بیودیزل بسیار مؤثر باشد [۶]. همچنین، عملکرد موتور نیز وابسته به خواص سوخت بیودیزل است. سوخت بیودیزل به‌دست آمده از روغن‌های گیاهی متفاوت، که در نتیجه منابع اولیه متفاوت می‌شوند، دارای خواص ترموفیزیکی متفاوتی است [۷].

* استادیار (ایمیل: najafib@uma.ac.ir)

سوخت بیودیزل از مخلوط تعدادی از منوآستر اسیدهای چرب تشکیل یافته است که وجود درصد وزنی هر یک از آن‌ها در سوخت بیودیزل بر خواص ترموفیزیکی آن مؤثر است. به عبارت دیگر، خواص سوخت بیودیزل وابسته به منوآستر اسیدهای چرب تشکیل‌دهنده آن است، که عمده‌ترین آن‌ها اِستر اسیدهای چرب پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولئیک‌اند. تحقیقات انجام‌شده بر روی سوخت‌های بیودیزل به‌دست آمده از روغن‌های گیاهی متفاوت نشان می‌دهد که درصد وزنی هر یک از این منوآسترهای اسید چرب در سوخت بیودیزل دارای محدوده‌ای است که در جدول ۱ آورده شده است [۸-۱۲].

جدول ۱- محدوده درصد وزنی اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل

پالمیتیک (C16=0)	استئاریک (C18=0)	اولئیک (C18=1)	لینولئیک (C18=2)	لینولئیک (C18=3)
۱۴/۲ تا ۳/۹	۵/۷ تا ۳/۲	۴۸/۲ تا ۱۱/۶	۷۷/۹ تا ۲۲/۲	۰ تا ۸/۶

روش تحلیل داده‌ها و مدلسازی رگرسیونی

مهم‌ترین خواص سوخت بیودیزل که می‌تواند بر عملکرد موتور تاثیر بگذارد جرم مخصوص، ارزش حرارتی، گرانی، نقطه ابری‌شدن و نقطه اشتعال است. جرم مخصوص یکی از خواص بسیار مهم سوخت است که بر PM و NOx و میزان سوخت‌دهی^۱ تاثیر می‌گذارد [۱۳-۱۵]. ارزش حرارتی سوخت عامل مهمی در ارزیابی کیفیت و کارایی آن است. سوخت بیودیزل، به‌دلیل داشتن اکسیژن در ساختار مولکولی خود، نسبت هیدروژن به کربن پایینی داشته و در نتیجه ارزش حرارتی پایینی دارد، ولی سوخت گازوییل فاقد اکسیژن است. همچنین، بیودیزل دارای اِستر اسیدهای چرب غیراشباع با سطوح مختلف اشباع‌نشده است که همین امر دلیل دیگری بر پایین‌بودن سطح انرژی آن نسبت به گازوییل است [۱۶]. گرانی سوخت بر فشار پاشش، قطر ذرات پاشیده‌شده و نفوذ آن‌ها در محفظه احتراق و روان‌سازی قطعات موتور تأثیرگذار است [۱۷، ۱۸]. نقطه ابری‌شدن سوخت، تعیین‌کننده محدودیت دمایی در استفاده از سوخت است [۱۹] و نقطه اشتعال یک سوخت فاکتور ایمنی محسوب می‌شود و به ایمنی نگهداری و حمل سوخت اشاره می‌کند [۲۰].

در اینجا، تنها به ادبیات فن در ارتباط با تاثیر بیودیزل بر توان و گشتاور تولیدشده اشاره می‌شود. مطالعه بر روی ۲۷ مقاله منتشرشده در نشریات معتبر بین‌المللی انجام گرفت و نتایج به صورت زیر دسته‌بندی شد:

- نتایج ۷۰/۴ درصد تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل (به صورت خالص)، به‌علت پایین‌بودن ارزش حرارتی آن، موجب کاهش توان تولیدشده می‌شود [۲۱-۳۵]. اتولو و کوچاک نشان دادند که گشتاور و قدرت موتور با استفاده از بیودیزل حاصل از متیل اِستر روغن پسماند به طور متوسط در حدود ۴/۳ و ۵/۴ درصد نسبت به گازوییل خالص کاهش دارد که علت آن را گرانی بالا و ارزش حرارتی پایین بیودیزل (۸/۸ درصد کمتر از گازوییل) می‌دانند [۳۳]. هانسن و همکاران تصریح کردند که گشتاور ترمزی در حدود ۹/۱ درصد در بیودیزل خالص نسبت به گازوییل خالص، در سرعت ۱۹۰۰ rpm کاهش دارد (ارزش حرارتی بیودیزل استفاده‌شده ۱۳/۳ درصد کمتر از گازوییل بود) [۲۷]. موریلو و همکاران نشان دادند که کاهش قدرت تولیدشده برابر ۷/۱۴ درصد برای سوخت بیودیزل در بار کامل^۲ است (ارزش حرارتی سوخت بیودیزل استفاده‌شده ۱۳/۵ درصد کمتر از گازوییل بود) [۲۹]. نتایج مشابهی توسط اوجاسو و جمیل منتشر شده است که نشان‌دهنده کاهش قدرت تولیدشده با سوخت بیودیزل و پایین‌بودن ارزش حرارتی آن است. آن‌ها بیان داشتند که گشتاور و توان تولیدشده در حدود ۳ تا ۶ درصد برای بیودیزل خالص پنبه‌دانه نسبت به گازوییل کاهش می‌یابد (ارزش حرارتی بیودیزل استفاده‌شده ۵ درصد کمتر از گازوییل بود) [۳۵].

1. Over-fueling
2. Full load

- حدود ۲۲/۲ درصد از محققان بیان داشتند که تفاوت معناداری بین توان تولیدی موتور با استفاده از سوخت بیودیزل (به صورت خالص) و گازوییل وجود ندارد [۳۷-۴۲]. لین و همکاران نشان دادند که تفاوت توان و گشتاور موتور در بار کامل، بین گازوییل و هشت نوع متیل استر روغن گیاهی (سوخت بیودیزل) به ترتیب در حدود ۱/۴۹ تا ۰/۶۴ درصد و ۱/۳۹ تا ۱/۲۵ درصد است [۴۰]. کی و همکاران گزارش دادند با توجه به این که ارسال سوخت به موتور به صورت حجمی انجام می‌گیرد و چگالی سوخت بیودیزل بالاتر از گازوییل است، لذا ارزش حرارتی پایین سوخت بیودیزل جبران می‌شود و در نتیجه تفاوت معناداری در توان تولیدی موتور ایجاد نمی‌شود [۴۲]. نجفی و همکاران در تحقیقی تاثیر سوخت بیودیزل حاصل از روغن آفتاب‌گردان را بر روی یک موتور دیزل پاشش غیرمستقیم بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در بار کامل دینامومتر، استفاده از سوخت بیودیزل خالص باعث می‌شود تا موتور زودتر به حالت دود برسد و در نتیجه توان ترمزی موتور در حد ۰/۴ درصد کمتر از سوخت گازوییل است [۳۶].

- در حدود ۷/۴ درصد از محققان افزایش توان تولید شده توسط موتور را با سوخت بیودیزل خالص نسبت به گازوییل تایید کردند، که در منابع [۴۳] و [۴۴] منتشر شده است. سونگ و ژانگ تصریح کرده‌اند که توان ترمزی موتور و گشتاور آن، با افزایش درصد بیودیزل، افزایش می‌یابد. آن‌ها دلیل افزایش توان موتور را محتوای اکسیژن بیشتر سوخت بیودیزل، مصرف بالاتر سوخت بیودیزل و زمان تاخیر در اشتعال کوتاه سوخت بیودیزل بیان کردند [۴۳]. الوداین و همکارانش در مقاله‌ای ادعا داشته‌اند که توان تولید شده با استفاده از سوخت بیودیزل خالص نسبت به سوخت گازوییل در حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد [۴۴].

از مطالعه ادبیات فن می‌توان دریافت که میزان منواستر اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) خواص منحصر به فردی را به سوخت تحمیل می‌کند که مستقیماً بر فرایند احتراق و عملکرد موتور تاثیر می‌گذارد. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر هر یک از منواسترهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل بر توان ترمزی موتور دیزل است.

مواد و روش‌ها

روش تولید و اندازه‌گیری خواص سوخت بیودیزل

سوخت بیودیزل مورد آزمون اتیل استرهای اسید چرب است که به روش ترنس‌استریفیکاسیون و با استفاده از الکل اتانول و کاتالیزور سود از پنج نوع روغن گیاهی (آفتاب‌گردان، سویا، ذرت، کلزا و روغن پسماند) تولید شد. مطالعات نشان می‌دهد که سوخت بیودیزل به دست آمده از این روغن‌های گیاهی دارای استر اسیدهای چرب (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) با درصد‌های وزنی متفاوتی است [۷]. سوخت بیودیزل از مخلوط تعدادی از منواسترهای اسید چرب تشکیل یافته است که درصد هر یک از آن‌ها می‌تواند بر خواص ترموفیزیکی مانند گرانشی، چگالی، عدد ستان، ارزش حرارتی، نقطه اشتعال و نقطه ابری شدن تاثیر بگذارد که مستقیماً فرایند احتراق و عملکرد موتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، عملکرد موتور دیزل وابسته به درصد منواسترهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل است.

خواص ترموفیزیکی پنج نمونه سوخت بیودیزل، مطابق استاندارد ASTM، اندازه‌گیری شد. چگالی سوخت‌ها مطابق با استاندارد ASTM D4052 با استفاده از دستگاه چگالی‌سنج دیجیتال مدل DA-130N در دمای ۱۵°C اندازه‌گیری شد. گرانشی نیز مطابق استاندارد ASTM D445 به کمک ویسکومتر بروکفیلد مدل DV-II Prime، دارای آداپتور UAL در دمای ۴۰°C اندازه‌گیری شد. ارزش حرارتی سوخت، مطابق استاندارد ASTM D240، به وسیله بمب کالریمتر ساخت شرکت پار (Parr) آمریکا اندازه‌گیری شد. نقطه ابری شدن مطابق استاندارد ASTM D5773، با مشاهده شفافیت سوخت، در شرایط محیط سرد کنترل شده، به صورت دستی تعیین شد و دمای نقطه اشتعال مطابق با استاندارد ASTM D93 اندازه‌گیری شد. میزان درصد

وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل به روش کروماتوگرافی گازی در ترکیب با اسپکتروسکوپی جرمی با استفاده از دستگاه GC-Mass براساس استاندارد ASTM D6584 اندازه‌گیری شد.

به‌منظور بررسی تأثیر میزان درصد وزنی هر یک از این منوسترهای موجود در سوخت بیودیزل بر عملکرد موتور دیزل، لازم است تا آزمایش‌هایی به‌صورت تجربی با استفاده از منوسترهای اسید چرب انجام گیرد. جداسازی منوستر اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل کار بسیار مشکلی بوده و عملاً امکان‌پذیر نیست. ولی در صورتی که تأثیر چندین نوع سوخت بیودیزل (با درصدهای مختلف منوسترهای اسید چرب) بر عملکرد موتور مورد مطالعه قرار گیرند، می‌توان تأثیر هر منوستر اسید چرب را تعیین کرد. در این تحقیق، ابتدا پنج نوع سوخت بیودیزل از پنج نوع روغن گیاهی تولید شد و سپس پنج نوع سوخت بیودیزل اولیه با نسبت‌های ۵۰ درصد وزنی دوبه‌دو با هم مخلوط شدند و در نتیجه تعداد ۱۵ نمونه سوخت بیودیزل به‌دست آمد.

روش انجام آزمون موتور

سوخت‌های بیودیزل بر روی موتور دیزل MT4-244 مورد آزمون قرار گرفتند (جدول ۲). آزمون‌های موتور بر مبنای استاندارد ۸ مد ECER-96 صورت گرفت. با این تفاوت که آزمون‌ها فقط در شرایط بار کامل و دور ۲۰۰۰rpm (دور متناظر با حداکثر توان ترمزی موتور) انجام گرفت. برای اندازه‌گیری پارامترهای عملکرد و آلاینده‌ها، از دینامومتر مغناطیسی مدل E400 ساخت شرکت PMIDCO، زاویه‌سنج AVL333 و آلاینده‌سنج AVL Dicom4000 مدل A-8020 استفاده شد. در هر یک از آزمون‌ها، ابتدا موتور دیزل با سوخت گازوییل به مدت ۱۰ دقیقه شروع به کار می‌کرد، سپس موتور تحت بار کامل قرار می‌گرفت. در این حالت، دور موتور در ۲۰۰۰rpm ثابت نگاه‌داشته می‌شد. سپس نمونه سوخت بیودیزل از یک مسیر دیگری وارد موتور شده و موتور به مدت ۱۰ دقیقه با سوخت بیودیزل کار می‌کرد تا تأثیر سوخت قبلی به طور کلی از بین برود. دوباره موتور در شرایط بار کامل و دور ۲۰۰۰rpm، به‌کمک شانه سوخت‌رسانی، ثابت نگاه‌داشته می‌شد. وقتی دور موتور با سوخت بیودیزل در همان مقدار قبلی تثبیت می‌شد، مقدار توان و گشتاور تولیدشده اندازه‌گیری می‌شد. برای کاهش خطا، هر یک از ۱۵ نمونه مخلوط سوخت بیودیزل در سه تکرار مورد آزمون قرار گرفت.

جدول ۲- مشخصات فنی موتور دیزل استفاده‌شده در آزمون

مدل موتور	MT4-244	طول شاتون	۲۱۹ mm
نوع موتور	دیزلی پرخوران، پاشش مستقیم	کورس پیستون	۱۲۷ mm
تعداد سیلندر	۴ سیلندر و خطی	حداکثر توان ترمزی در ۲۰۰۰rpm	۶۱ KW
قطر پیستون	۱۰۰ mm	حداکثر گشتاور در ۱۴۰۰rpm	۳۶۰ N.m

روش تحلیل داده‌ها و مدلسازی رگرسیونی

ابتدا خطای داده‌های حاصل از آزمون‌های موتور تحلیل شد و سپس آزمون همبستگی متغیرها و آزمون خطی بودن تأثیر درصد اتیل استرهای موجود در سوخت بر عملکرد موتور انجام گرفت و در نهایت یک مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی برحسب ۵ متغیر مستقل اتیل استرهای اسیدچرب خالص موجود در سوخت بیودیزل (اسید پالمیتیک، اسید استتاریک، اسید اولئیک، اسیدلینولئیک و اسیدلینولئیک) و متغیر وابسته (توان موتور) به‌صورت زیر ارائه شد.

$$bp = c_1x_p + c_2x_s + c_3x_o + c_4x_{Le} + c_5x_{Ln} \quad (1)$$

که در آن bp توان ترمزی موتور بر حسب kW، x_p درصد اسید پالمیتیک، x_s درصد اسید استتاریک، x_o درصد اسید اولئیک، x_{Le} درصد اسید لینولئیک و x_{Ln} درصد اسید لینولئیک موجود در سوخت بیودیزل است. مقادیر c_1, c_2, c_3, c_4 و

C₅ ضرایب ثابتی اند که به صورت تجربی به دست می‌آیند و نشان‌دهنده تاثیر هر یک از منو اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل بر توان ترمزی موتور است.

نتایج و بحث

درصد وزنی اتیل استرها موجود در بیودیزل

با تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون GC-Mass مربوط به سوخت‌های تولید شده از روغن‌های گیاهی آفتاب‌گردان، سویا، ذرت، کلزا و روغن پسماند، درصد ترکیبات موجود در هریک از آنها مشخص شد (جدول ۳). بیشترین اسید چرب مربوط به اولئیک با مقدار ۶۶ درصد (روغن کلزا) و کمترین اسید چرب مربوط به لینولئیک با صفر درصد (روغن ذرت) است.

جدول ۳- درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل

درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب					منبع تولید
پالمیتیک (C16=0)	استئاریک (C18=0)	اولئیک (C18=1)	لینولئیک (C18=2)	لینولنیک (C18=3)	سوخت
۴/۹	۲/۳	۳۲/۶	۵۹/۴	۰/۸	آفتاب‌گردان
۱۱/۴	۱/۳	۲۷/۱	۶۰/۲	۰	ذرت
۱۱/۷	۳/۹۷	۲۱/۲۷	۵۳/۷	۹/۳۶	سویا
۵/۲	۱/۴	۶۶	۱۸/۹	۸/۵	کلزا
۳۰/۴	۴/۹	۳۶/۱	۲۵/۷	۱/۹	روغن پسماند

خواص ترموفیزیکی سوخت‌های بیودیزل

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی سوخت‌های بیودیزل در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ارزش حرارتی مربوط به سوخت بیودیزل حاصل از روغن ذرت است و بیشترین مقدار جرم مخصوص و گرانیوی مربوط به بیودیزل حاصل از روغن آفتابگردان است.

جدول ۴- خواص ترموفیزیکی سوخت‌های بیودیزل تولید شده از پنج نوع روغن گیاهی

خواص اندازه‌گیری شده					
منبع تولید سوخت	جرم مخصوص (kg/m ³)	ارزش حرارتی (Mj/kg)	گرانیوی (Cst)	عدد ستان	نقطه اشتعال (°C)
روغن آفتاب‌گردان	۸۸۵/۶	۳۹/۹۵	۴/۳۸	۵۱/۶	۱۸۳
روغن سویا	۸۸۵/۲	۳۹/۶۶	۴/۰۶	۵۱/۳	۱۷۳
روغن ذرت	۸۸۵/۸	۳۹/۸۷	۴/۳۶	۵۵/۴	۱۶۷
روغن کلزا	۸۸۴/۹	۳۹/۹	۴/۵۸	۵۴/۵	۱۷۷
روغن پسماند	۸۷۹	۳۸/۴۳	۴/۲۵	۵۵	۱۶۷

تاثیر بیودیزل بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل

نتایج اندازه‌گیری تجربی توان ترمزی موتور در بار کامل و دور ۲۰۰۰ rpm با استفاده از سوخت‌های بیودیزل مختلف در جدول ۵ آورده شده است. نتایج حاکی از این واقعیت است که با افزایش ارزش حرارتی سوخت و کاهش گرانیوی آن، توان ترمزی موتور افزایش می‌یابد. بیشترین توان ترمزی تولید شده مربوط به استفاده از سوخت بیودیزل آفتابگردان (۵۸/۸۲ kW) است،

زیرا از طرفی گرانروی آن پایین بوده و نسبت به سایر سوخت‌ها بهتر پودر^۱ می‌شود و از طرف دیگر ارزش حرارتی بالاتری دارد و موجب می‌شود تا هنگام احتراق انرژی بیشتری آزاد می‌کند. همچنین، کمترین توان ترمزی تولیدشده مربوط به استفاده از سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران (۵۷/۳۵ kW) است که علت آن ارزش حرارتی پایین سوخت است. بیشترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران است، زیرا این سوخت دارای ارزش حرارتی و چگالی پایین‌تری نسبت به دیگر سوخت‌های بیودیزل است. همچنین این سوخت، به دلیل داشتن عدد ستان بالاتر، دارای تاخیر در اشتعال کمتری است و قسمت عمده سوخت در مرحله احتراق پیش‌آمیخته محترق می‌شود و در نتیجه حداکثر فشار داخل محفظه احتراق کمتر از سایر سوخت‌ها خواهد بود. پایین بودن دمای آگزوز و انتشار آلاینده NOx دلیل خوبی بر این مدعاست.

جدول ۵- پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور MT4-244 با استفاده از سوخت‌های بیودیزل (دور ۲۰۰۰rpm)

انتشار آلاینده‌ها			پارامترهای عملکرد				منبع تولید سوخت
UHC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	دمای آگزوز (°C)	BSFC (g/kW.h)	گشتاور (N.m)	توان ترمزی (kW)	
۹	۸۵۰	۲۰۰	۴۰۲	۲۵۰	۲۸۱	۵۸/۸۲	روغن آفتاب‌گردان
۹	۸۴۴	۲۰۳	۳۹۷	۲۵۸	۲۷۵	۵۷/۶۷	روغن سویا
۱۰	۸۴۱	۲۰۴	۴۰۱	۲۵۲	۲۷۲	۵۷/۸	روغن ذرت
۱۰	۸۷۵	۲۰۹	۴۰۱	۲۵۶	۲۷۹	۵۸/۵۵	روغن کلزا
۱۱	۸۲۷	۲۰۷	۳۹۴	۲۵۹	۲۷۴	۵۷/۳۵	روغن پسماند

تحلیل خطای داده‌های حاصل از آزمون توان ترمزی موتور

برای مدلسازی، از داده‌های مربوط به ۱۰ نمونه مخلوط سوخت‌های بیودیزل استفاده شد. برای کاهش خطا، آزمون‌ها در سه تکرار انجام گرفت. جدول ۶ نشان می‌دهد خطای ابزار اندازه‌گیری اثر معناداری روی نتایج ندارد.

جدول ۶- درصد خطای اندازه‌گیری توان ترمزی موتور دور ۲۰۰۰rpm

منبع تولید سوخت بیودیزل	درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب	توان ترمزی موتور (kW)			متوسط توان (kW)	درصد خطای اندازه‌گیری
		تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم		
آفتاب‌گردان و ذرت	۱/۸	۵۹/۸	۵۸/۱۴	۵۸/۱۳	۵۸/۱۵	± ۰/۰۵
آفتاب‌گردان و سویا	۳/۱۳۵	۵۶/۵۵	۵۸/۲۷	۵۸/۲۳	۵۸/۲۵	± ۰/۰۳
آفتاب‌گردان و کلزا	۱/۸۵	۳۹/۱۵	۵۸/۵۳	۵۸/۴۸	۵۸/۵۲	± ۰/۰۷
آفتاب‌گردان و پسماند	۳/۶	۴۲/۵۵	۵۸/۲	۵۸/۲۳	۵۸/۲۱	± ۰/۰۰۳
ذرت و سویا	۲/۶۳	۵۶/۹۵	۵۷/۶۸	۵۷/۷۳	۵۷/۷۱	± ۰/۰۷
ذرت و کلزا	۱/۳۵	۳۹/۵۵	۵۸/۳۱	۵۸/۳۰	۵۸/۳۱	± ۰/۰۲
ذرت و پسماند	۳/۱	۴۲/۹۵	۵۸/۶۵	۵۸/۶۲	۵۷/۶۲	± ۰/۰۵
سویا و کلزا	۲/۶۸	۳۶/۳	۵۸/۲۰	۵۸/۲۲	۵۸/۲۱	± ۰/۰۲
سویا و پسماند	۴/۴۳	۳۹/۷	۵۸/۶۰	۵۸/۶۰	۵۷/۶۱	± ۰/۰۳
کلزا و پسماند	۴/۳	۲۲/۳	۵۸/۸۳	۵۸/۸۱	۵۷/۸۲	± ۰/۰۲

مدلسازی توان ترمزی موتور بر اساس اتیل استرهای موجود در بیودیزل

با توجه به داده‌های تجربی مربوط به آزمون GC mass مبنی بر اندازه‌گیری منواستر اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل و آزمون موتور برای اندازه‌گیری توان ترمزی موتور، ضرایب ثابت C_1, C_2, C_3, C_4 و C_5 به صورت یک مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه^۱ با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17 محاسبه شدند. مقادیر اولیه پارامترها C_1, C_2, C_3, C_4 و C_5 برابر ۱ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه نشان داد که الگوریتم برآورد پارامترهای مدل بعد از برآورد ۱۱ نوع مدل به جواب مناسبی رسیده و در آخرین مرحله تکرار، مجموع مربعات مانده‌ها برابر ۰/۱۰۲ شده است. در نتیجه مقادیر پارامترها برابر $C_1 = 0/977, C_2 = 4/252, C_3 = 0/684, C_4 = 0/375, C_5 = -0/558$ محاسبه شد. در جدول ۷، به دلیل طولانی بودن محاسبات، تنها بخشی از نتایج تکرار الگوریتم آورده شده است.

جدول ۷- برآورد متغیرهای مدل رگرسیونی

برآورد متغیرها					مجموع مربعات	تعداد تکرار
C_5	C_4	C_3	C_2	C_1	باقی مانده	
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۳۶۷۰/۳۰۶	۱
-۰/۵۵۸	۰/۳۷۵	۰/۶۸۴	۴/۲۵۲	۰/۹۷۷	۰/۱۰۲	۱۱

همبستگی مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه به صورت (جمع کل تصحیح‌شده/ مجموع مربعات مانده‌ها- $R^2=1$) محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات تحلیل واریانس برای برآورد پارامترهای مدل نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده دارای همبستگی بسیار بالایی در حد $R^2=0/96$ است (جدول ۸).

جدول ۸- تحلیل واریانس (ANOVA) مدل رگرسیونی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	کل مربعات
رگرسیون	۳۳۶۸۰/۳۲۴	۵	۶۷۳۶۱/۰۶۵
باقی مانده	۰/۱۰۲	۵	۰/۰۲۰
جمع کل تصحیح‌نشده	۳۳۶۸۰/۴۲۶	۱۰	-
جمع کل تصحیح‌شده	۲/۵۹۴	۹	-

در نتیجه مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه برای پیش‌بینی توان ترمزی موتور بر حسب تابعی از منواسترهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل را می‌توان به صورت زیر بیان داشت:

$$bp = 0.977x_p + 4.2526x_s + 0.684x_o + 0.375x_{Le} - 0.558x_{Ln} \quad (2)$$

در این رابطه محدوده تغییرات متغیرها برابر است با: x_p ، اسید پالمیتیک بین ۴/۹ تا ۳۰/۴ درصد، x_s ، اسید استئاریک بین ۱/۳ تا ۴۴/۹ درصد، x_o ، اسید اولئیک بین ۲۱/۲۷ تا ۶۶ درصد، x_{Le} ، اسید لینولئیک بین ۱۸/۹ تا ۶۰/۲ درصد و x_{Ln} ، اسید لینولنیک بین ۰ تا ۳۶/۶ درصد.

اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده

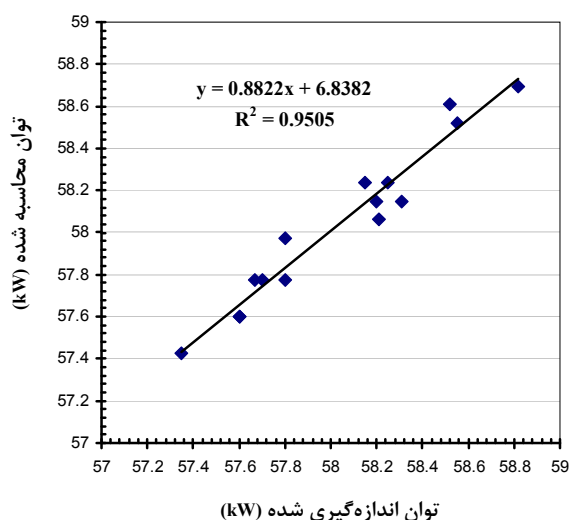
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای مدلسازی، از داده‌های مربوط به ۱۰ نمونه سوخت بیودیزل مخلوط استفاده شد و برای اعتباردهی به مدل، از داده‌های ۵ نوع سوخت بیودیزل خالص استفاده شد. مقایسه مقادیر توان ترمزی موتور اندازه‌گیری‌شده با

مقادیر محاسبه شده، در جدول ۹، نشان می‌دهد که مدل رگرسیون ارائه شده (معادله ۲) می‌تواند، با خطایی در حدود ± 0.2 ، توان ترمزی موتور را بر اساس درصد منواسرهای اسید چرب موجود در داخل سوخت بیودیزل پیش‌گویی کند.

جدول ۹- اعتبار مدل در پیش‌بینی توان ترمزی بر اساس منواسر اسیدهای چرب موجود در بیودیزل

منبع تولید سوخت بیودیزل					توان ترمزی موتور
روغن آفتاب‌گردان	روغن سویا	روغن ذرت	روغن کلزا	روغن پسماند	
۵۸/۸۲	۵۷/۶۷	۵۷/۸	۵۸/۵۵	۵۷/۳۵	اندازه‌گیری شده
۵۸/۶۹۳۹	۵۷/۷۷۶۸	۵۷/۷۷۴۶۴	۵۸/۵۲۱۷	۵۷/۴۲۶۳	محاسبه شده
-۰/۲۱۴	+۰/۱۸۵	-۰/۰۴۳	-۰/۰۴۸	+۰/۱۳۳	درصد خطا

شکل ۱ نشان می‌دهد که بین داده‌های واقعی توان (اندازه‌گیری شده) و پیش‌بینی شده (از طریق مدل) رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی بالایی ($R^2 = 0.95$) وجود دارد و اعداد پیش‌بینی شده برای توان ترمزی (از طریق مدل) دارای اعتبار است.



شکل ۱- مقایسه مقادیر توان پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی برای پیش‌بینی توان ترمزی موتور بر اساس درصد اسید چرب موجود در بیودیزل نشان می‌دهد که توان ترمزی تولید شده موتور، کاملاً وابسته به منواسرهای اسید چرب (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) موجود در سوخت بیودیزل است. اسیدهای چرب اشباع با زنجیره هیدروکربنی کوتاه، یعنی استئارات ($C16=0$) و پالمیتات ($C18=0$) با ضرایب تاثیر $+4/2526$ و $+0/977$ ، تاثیر بیشتری بر تولید توان موتور دارند، ولی اسیدهای چرب غیراشباع با زنجیره‌ی هیدروکربنی بلند، یعنی اولئات ($C18=1$)، لینولئات ($C18=2$) و لینولنات ($C18=3$) با ضرایب تاثیر $+0/375$ ، $+0/684$ و $-0/558$ ، تاثیر کمتری بر تولید توان دارند. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش مقدار اشباع‌نشده‌ی اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل، تولید توان موتور کاهش می‌یابد، به‌نحوی که وجود اتیل استر لینولنات ($C18=3$)، که دارای سه پیوند غیراشباع کربن-کربن است، تاثیر منفی ($-0/558$) بر تولید توان دارد. لذا تولید سوخت بیودیزل از روغن‌هایی که اسیدهای چرب اشباع بیشتر و اسیدهای چرب غیراشباع کمتری دارند، می‌تواند موجب افزایش توان ترمزی تولید شده موتور شود.

منابع

- [1] C. M. Caruana, "Pollution Control Drives New Interest in Biodiesel," *Chemical Engineering Process*, 84, 2000, pp. 14-18.
- [2] B. Najafi, and M. Khani, "Study of the Effect of Ethyl Ester of Sunflower Oil and Its Different Mixtures with Diesel on Performance and Emission Parameters of a Turbocharged Direct Injection Diesel Engine," *Fuel and Combustion*, 4, No. 4, 2011, pp. 45-55, (in Farsi).
- [3] Najafi, B., "Experimental Investigation of the Effect of Using Biodiesel and Biogas on Dual Fuel Diesel Engine", *Fuel and Combustion*, 4, No. 4, 2009, pp. 73-85, (in Farsi).
- [4] Saidi M., Ghobadian B., Tavakoli T. and Khoshbakhti R., "An Experimental Investigation of a Diesel Engine Ignition Delay using Biodiesel and Diesel Fuels", *Fuel and Combustion*, 2, No. 2, 2009, pp. 55-68, (in Farsi).
- [5] Zanchi, M., "Development of Experiments with Vegetable Oils as a Diesel Substitute," *Applied Engineering in Agriculture*, 9, No. 9, 1998, pp. 103-117.
- [6] Knothe, G., and Steidley, K. R., "Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures," *Fuel*, 86, 2007, pp. 2560-2567.
- [7] Ma, F., and Hanna, M. A., "Biodiesel Production: a Review," *Bioresource Tech*, 70, 1998, pp. 1-15.
- [8] Diwani, G., Attia, N. K., and Havash, S. I., "Development and Evaluation of Biodiesel Fuel and Byproducts from Jatropha Oil", *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 6, No. 2, 2009, pp. 219-224.
- [9] Hu, J., Du, Z., Li, C., and Min, E., "Study on the Lubrication Properties of Biodiesel as Fuel Lubricity Enhancers," *Fuel*, 84, 2004, pp. 1601-1606.
- [10] Imahara, H., Minami, E., and Saka, Sh., "Thermodynamic Study on Cloud Point of Biodiesel with its Fatty Acid Composition," *Fuel*, 85, 2006, pp. 1666-1670.
- [11] Rashid, O., Anwar, F., Moser, R. B., and Knothe, G., "Moringa Oleifera Oil: Possible Source of Biodiesel," *Bioresource Tech*, 99, 2008, pp. 8175-8179.
- [12] Reyes J. F., and Sepúlveda, M. A., "PM-10 Emissions and Power of a Diesel Engine Fueled with Crude and Refined Biodiesel from Salmon Oil," *Fuel*, 85, 2006, pp. 1714-1719.
- [13] Baroutian, S., Aroua, M. K., Raman, A. A., and Sulaiman, N. M., "Estimation of Vegetable Oil-Based Ethyl Esters Biodiesel Density using Artificial Neural Network," *Journal of Applied Sciences*, 8, No. 17, 2008, pp. 3005-3011.
- [14] Tate, R. A., Watts, K. C., Allen, C. A. W., and Wilkie, K. I., "The Densities of Three Biodiesel Fuels at Temperature up to 300°C," *Fuel*, 85, 2006, pp. 1004-1009.
- [15] Watts, K. C., and Tate, R. E., "Experimental Determination of the Density, Viscosity and Surface Tension of Three Commercial Biodiesel Fuels up to 300°C," *CSAE/SCGR*, Paper No. 05-083, 2005.
- [16] Sheng, Ch., and Azevedo, J. L. T., "Estimating the Higher Heating Value of Biomass Fuels from Basic Analysis Data," *Biomass and Bioenergy*, 28, 2005, pp. 499-507.
- [17] Alptekin, E., and Canakci, M. "Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel-Diesel Fuel Blends," *Renewable Energy*, 33, 2008, pp. 2623-2630.
- [18] Canakci, M., Ozsezen, A. N., Arcaklioglu, E., and Erdil, A., "Prediction of Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel Produced from Waste Frying Palm Oil," *Expert Systems with Applications*, 36, 2009, pp. 9268-9280.
- [19] Mirante, F. I. C., and Coutinho, J. A. P., "Cloud Point Prediction of Fuels And Fuel Blends," *Fluid Phase Equilibria*, 180, 2001, pp. 247-255.
- [20] Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, d., and Knothe, G., "Biodiesel Analytical Methods," NREL/SR-510-36240, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [21] Aydin, H. and Bayindir, H., "Performance and Emission Analysis of Cottonseed Oil Methyl Ester in a Diesel Engine," *Renew Energy*, 35, 2010, pp. 588-592.
- [22] Buyukkaya, E. "Effects of Biodiesel on a DI Diesel Engine Performance, Emission and Combustion Characteristics," *Fuel*, 89, 2010, pp. 3099-3105.
- [23] Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., and Tonon, S. "Biodiesel as Alternative Fuel: Experimental Analysis," *Energetic Evaluations, Energy*, 29, 2004, pp. 2195-2211.
- [24] Cetinkaya, M., Ulusoy, Y., Tekin, Y., and Kapaosmanoğlu, F., "Engine and Winter Road Test Performances of Used Cooking Oil Originated Biodiesel," *Energ Convers Manage*, 46, 2005, pp. 1279-1291.
- [25] Choi, S. H. and Oh, Y., "The Emission Effects by the Use of Biodiesel Fuel," *Int J Mod Phys B*, 20, 2006, pp. 4481-4486.
- [26] Da Silva Fernando, N., António, S. P., and Jorge, R. T., "Technical Feasibility Assessment of Oleic Sunflower Methyl Ester Utilization in Diesel Bus Engines," *Energ Convers Manage*, 44, 2003, pp. 2857-2878.
- [27] Hansen, A. C., Gratton, M. R., and Yuan, W., "Diesel Engine Performance and NO_x Emissions from Oxygenated Biofuels and Blends with Diesel Fuel," *Trans ASABE*, 49, 2006, pp. 589-595.
- [28] Hazar, H., "Effects of Biodiesel on a Low Heat Loss Diesel Engine", *Renew Energy*, 34, 2009, pp. 1533-1537.
- [29] Murillo, S., Miguez, J. L., Porteiro, J., Granada, E., and Moran, J. C., "Performance and Exhaust Emissions in the Use of Biodiesel in Outboard Diesel Engines," *Fuel*, 86, 2007, pp. 1765-1771.

- [30] Özgünay, H., Çolak, S., Zengin, G., Sari, Ö., Sarikahya H., and Yüceer, L., "Performance and Emission Study of Biodiesel from Leather Industry Pre-Fleshings," *Waste Manage*, 27, 2007, pp. 1897-1901.
- [31] Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan A., and Sayin, C., "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.
- [32] Raheman, H. and Phadatare, A. G., "Diesel Engine Emissions and Performance from Blends of Karanja Methyl Ester and Diesel," *Biomass Bioenerg*, 27, 2004, pp. 393-397.
- [33] Utlu, Z. and Koçak, M. S. "The Effect of Biodiesel Fuel Obtained from Waste Frying Oil on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions," *Renew Energ*, 33, 2008, pp.1936-1941.
- [34] Ulusoy, Y., Tekin, Y., Çetinkaya, M., Kapaosmanoğlu, F., "The Engine Tests of Biodiesel from Used Frying Oil," *Energ Source Part A*, 26, 2004, pp. 927-932.
- [35] Yucesu, H. S. and Cumali, I., "Effect of Cotton Seed Oil Methyl Ester on the Performance and Exhaust Emission of a Diesel Engine," *Energ Source Part A*, 28, 2006, pp. 389-398.
- [36] Najafi B., Piroozpanah V., and Ghobadian B., "Experimental Investigation of Diesel Engine Performance Parameters and Pollution using Biodiesel," *Modares Thechnical and Engineering*, Special Issue on Mechanical Engineering, 28, 2007, pp. 78-101.
- [37] Ghobadian, B. Rahimi, H., and Nikbakht, A. M., "Diesel Engine Performance and Exhaust Emission Analysis using Waste Cooking Biodiesel Fuel with an Artificial Neural Network," *Renew Energ*, 34, 2009, pp. 976-982.
- [38] Keskin, A., Guru M., and Altıparmak, D., "Influence of Tall Oil Biodiesel with Mg and Mo Based Fuel Additives on Diesel Engine Performance and Emission," *Bioresource Technology*, 99, 2008, pp. 6434-6438.
- [39] Lapuerta, M., Herreros, J. M., Lyons, L. L., García-Contreras, R. and Brice, Y., "Effect of the Alcohol Type used in the Production of Waste Cooking Oil Biodiesel on Diesel Performance and Emissions," *Fuel*, 87, 2008, pp.3161-3169.
- [40] Lin, B. F., Huang, J. H., and Huang, D. Y., "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.
- [41] Oguz, H., Ogut, H., and Eryilmaz, T., "Investigation of Biodiesel Production, Quality and Performance in Turkey," *Energ Source Part A*, 29, 2007, pp.1529-1535.
- [42] Qi, D. H., Geng, L. M., Chen, H., Bian, Y. Z. H., Liu J., Ren, and X. C. H., "Combustion and Performance Evaluation of a Diesel Engine Fueled with biodiesel Produced from Soybean Crude Oil," *Renew Energy*, 34, 2009, pp. 2706-2713.
- [43] Song, J. T., Zhang, C. H., "An Experimental Study on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Soybean Oil Methyl Ester," *P I Mech Eng D-J Aut*, 222, 2008, pp.2487-2496.
- [44] Al-Widyan, M. I., Tashtoush, G. and Abu-Qudais, M., "Utilization of Ethyl Ester of Waste Vegetable Oils as Fuel in Diesel Engines," *Fuel Process Technol*, 76, 2002, pp. 91-103.

English Abstract

Effect of Fatty Acid Ethyl Esters in Biodiesel Fuel on Diesel Engine Performance

B. Najafi

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

(Received: 2012.5.27, Received in revised form: 2012.10.14, Accepted: 2012.12.27)

Mono Fatty Acid Esters (MFAE) in biodiesel fuel (Palmitic, Stearic, Oleic, Linoleic and Linolenic), imposes unique properties that directly affect the combustion process and engine performance. In this study, the effects of each MFAE in biodiesel fuel on diesel engine brake power were studied. Biodiesel fuel, fatty acid ethyl esters from sunflower oil, soybean oil, corn oil, rapeseed oil, waste oil and their blendings were used in this research. The biodiesel fuels were tested on MT4-244 diesel engine under full load and 2000 rpm. Then, engine brake power was modeled as a non-linear regression function based on percentage of mono fatty acid ethyl ester (MFAEE). Modeling results showed that the saturated fatty acids with short chain hydrocarbons Stearic (C16=0) and Palmitic (C18=0) have the greatest effect on engine power. Unsaturated fatty acids Oleic (C18=1), Linoleic (C18=2) and Linolenic(C18=3) have the least effect on engine power output. Also, Engine power is reduced by increasing the percentage of unsaturated fatty acids in biodiesel fuel. Ethyl ester of Linolenic, which has three unsaturated carbon bond, reduced engine power. Thus, The biodiesel fuel produced from saturated oils, has ability to increase engine brake power.

Keywords: Biodiesel, Fatty Acid Ethyl Ester, Diesel Engine Performance and Emission, Modeling