

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

بهمن نجفی^{*۱}

دانشگاه محقق اردبیلی، صندوق پستی ۱۷۹

Email: Najafib@uma.ac.ir

چکیده

منو استرهای 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 فرآیند احتراق و عملکرد موتور تأثیر می‌گذارد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر هر یک از منو استرهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل، بر توان ترمزی موتور دیزل می‌باشد. سوخت بیودیزل مورد استفاده، اتیل استر اسیدهای چرب حاصل از روغن آفتاب‌گردان، سویا، ذرت، کلزا و روغن پسماند و مخلوهای آنها با یکدیگر می‌باشد. سوخت‌های بیودیزل در شرایط بار کامل (Full Load) و دور بیشینه توان (۲۰۰۰rpm) بر روی موتور دیزل MT4-244 مورد آزمون قرار گرفتند. سپس، توان ترمزی موتور به صورت مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه برحسب تابعی از درصد منو استرهای اسید چرب مدل‌سازی گردید. نتایج مدل‌سازی نشان داد که اسیدهای چرب اشباع با زنجیره هیدروکربنی کوتاه یعنی استئارات (C16=0) و پالمیتات (C18=0) بیشترین تأثیر را بر تولید توان موتور دارند و اسیدهای چرب غیراشباع با زنجیره هیدروکربنی بلند یعنی اولئات (C18=1)، لینولئات (C18=2) و لینولئات (C18=3) کمترین تأثیر را بر تولید توان موتور دارند. همچنین، با افزایش مقدار اشباع نشدگی اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل، تولید توان موتور کاهش می‌یابد به نحوی که وجود اتیل استر لینولئات که دارای سه پیوند غیر اشباع کربن-کربن است، تأثیر منفی بر تولید توان دارد. لذا تولید سوخت بیودیزل از روغن‌هایی که دارای درجه اشباع شدگی بالایی هستند، می‌تواند موجب افزایش توان ترمزی تولید شده موتور گردد.

واژه‌های کلیدی: بیودیزل، اتیل استر اسیدهای چرب، عملکرد و الابدگی موتور دیزل، مدل‌سازی

۱- مقدمه

بحران فزاینده انرژی و آلودگی محیط زیست، با شتاب تندی همه کشورهای جهان را کم و بیش به چالشی عظیم کشانده است. آلاینده‌گی، کمبود، تجدید ناپذیری و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی، اندیشمندان و محققان حوزه‌های مختلف علوم را واداشته تا به دنبال راهکارهای عملی برای فایق آمدن بر مشکلات و تبعات بحران انرژی باشند. بیوگاز، بیواتانول، بیوبنزین و بیودیزل به عنوان مهم‌ترین سوخت‌های جایگزین مطرح می‌باشند. از آن‌جا که قسمت اعظم آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن و دوده، از گازهای خروجی آگروز موتورهای دیزلی ناشی می‌شوند، لذا در میان سوخت‌های زیستی موجود، تحقیق در راستای یافتن سوختن جایگزین و مناسب برای سوخت گازوییل، سهم وسیع تری از تحقیقات را به خود اختصاص داده است [۱]. از مهم ترین دلایل انتخاب بیودیزل‌ها می‌توان به تجدیدپذیری، مقادیر کمتر آلاینده‌های حاصل از احتراق، عدم نیاز به تغییر در ساختار موتور اشاره کرد [۲]. خواص سوخت بیودیزل به طور انکار ناپذیری تحت تأثیر نوع اسیدهای چرب تشکیل دهنده آن می‌باشد. شناسایی این اسیدها می‌تواند در به‌دست آوردن خواص سوخت‌های بیودیزل بسیار مؤثر باشد [۳]. همچنین عملکرد موتور نیز وابسته به خواص سوخت بیودیزل می‌باشد. سوخت بیودیزل بدست آمده از روغن‌های گیاهی متفاوت، دارای خواص ترموفیزیکی متفاوتی می‌باشد که در نتیجه منابع اولیه متفاوت می‌باشد [۴].

۱- دانشیار، دانشگاه محقق اردبیلی

سوخت بیودیزل از مخلوط تعدادی از منواستر اسیدهای چرب تشکیل یافته است که وجود درصد وزنی هر یک از آن‌ها در سوخت بیودیزل، بر خواص ترموفیزیکی آن مؤثر می‌باشد. به عبارت دیگر خواص سوخت بیودیزل وابسته به منواستر اسیدهای چرب تشکیل دهنده آن می‌باشد، که عمده‌ترین آن‌ها استر اسیدهای چرب پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولئیک می‌باشند. تحقیقات انجام شده بر روی سوخت های بیودیزل بدست آمده از روغن‌های گیاهی متفاوت نشان می‌دهد که درصد وزنی هر یک از این منواسترهای اسید چرب در سوخت بیودیزل دارای محدوده‌ای می‌باشد [۵-۹].

مهمترین خواص سوخت بیودیزل که می‌تواند بر عملکرد موتور تاثیر بگذارد، چگالی، ارزش حرارتی، گرانشی، نقطه ابری شدن و نقطه اشتعال می‌باشد. چگالی یکی از خواص بسیار مهم سوخت بیودیزل می‌باشد که بر اتمیزه شدن سوخت در محفظه احتراق و فرآیند احتراق به شدت تاثیر می‌گذارد [۱۰-۱۲]. ارزش حرارتی سوخت، عامل مهمی در ارزیابی کیفیت و کارایی آن می‌باشد. سوخت گازوئیل به دلیل داشتن ترکیبات آروماتیک، سطح انرژی بالایی دارد ولی سوخت بیودیزل، فاقد ترکیبات آروماتیک می‌باشد. بیودیزل دارای استر اسیدهای چرب غیراشباع با سطوح مختلف اشباع نشدگی است و به همین دلیل سطح انرژی آن، اندکی پایین‌تر از گازوئیل می‌باشد [۱۳]. گرانشی سوخت بر فشار پاشش، قطر ذرات پاشیده شده و نفوذ آنها در محفظه احتراق و روان‌سازی قطعات موتور تأثیر گذار است [۱۴-۱۵]. نقطه ابری شدن سوخت، تعیین کننده محدودیت دمایی در استفاده از سوخت می‌باشد [۱۶] و نقطه اشتعال به ایمنی نگهداری و حمل سوخت اشاره می‌کند [۱۷].

در اینجا، تنها به ادبیات فن در ارتباط با تاثیر بیودیزل بر توان و گشتاور تولید شده اشاره می‌شود. مطالعه بر روی ۲۷ مقاله منتشر شده در سایت Elsevier انجام گرفت و نتایج به صورت زیر دسته‌بندی گردید:

- نتایج ۷۰/۴ درصد تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل (بصورت خالص) به علت پایین بودن ارزش حرارتی آن، موجب کاهش توان تولید شده می‌شود [۱۸-۳۲]. اتولو و کوچاک نشان دادند که کاهش گشتاور و قدرت موتور با استفاده از بیودیزل حاصل از متیل استر روغن پسماند به طور متوسط در حدود ۴/۳٪ و ۵/۴٪ نسبت به گازوئیل خالص کاهش دارد که علت آن را ویسکوزیته بالا و ارزش حرارت پایین بیودیزل (۸/۸٪ کمتر از گازوئیل) می‌دانند [۳۰]. هانسن و همکاران. تصریح کردند که کاهش گشتاور ترمزی در حدود ۹/۱٪ در بیودیزل خالص نسبت به گازوئیل خالص، در سرعت ۱۹۰۰ rpm کاهش دارد، ارزش حرارتی بیودیزل استفاده شده ۱۳/۳٪ کمتر از گازوئیل بود [۲۴]. موریللو و همکاران، نشان دادند که کاهش قدرت تولید شده برابر ۷/۱۴٪ برای سوخت بیودیزل در بار کامل است، ارزش حرارتی سوخت بیودیزل استفاده شده ۱۳/۵٪ کمتر از گازوئیل بود [۲۶]. نتایج مشابهی توسط اوجاسو و جمیل منتشر شده است که نشان دهنده کاهش قدرت تولید شده با سوخت بیودیزل و پایین بودن ارزش حرارتی آن است، آنها بیان داشتند که گشتاور و توان تولید شده در حدود ۳ تا ۶٪ برای بیودیزل خالص پنبه دانه نسبت به گازوئیل کاهش می‌یابد، ارزش حرارتی بیودیزل استفاده شده ۵٪ کمتر از گازوئیل بود [۳۲]. نجفی و همکاران، در تحقیقی تاثیر سوخت بیودیزل حاصل از روغن آفتاب‌گردان را بر روی یک موتور دیزل پاشش غیر مستقیم مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در بار کامل دینامومتر، استفاده از سوخت بیودیزل خالص، باعث می‌شود تا موتور زودتر به حال دود برسد و در نتیجه توان ترمزی موتور در حد ۴/۰ درصد کمتر از سوخت گازوئیل می‌باشد [۳۳].

- حدود ۲۲/۲ درصد از محققین بیان داشتند که تفاوت معنی‌داری بین توان تولیدی موتور با استفاده از سوخت بیودیزل (بصورت خالص) و گازوئیل وجود ندارد [۳۴-۳۹]. لین و همکارانشان نشان دادند که تفاوت توان و گشتاور موتور در بار کامل، بین گازوئیل و هشت نوع متیل استر روغن گیاهی (سوخت بیودیزل) در حدود ۱/۴۹٪ تا ۰/۶۴٪ و ۱/۳۹٪ تا ۱/۲۵٪ می‌باشد [۳۷]. 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 گازوئیل است، لذا ارزش حرارتی پایین سوخت بیودیزل جبران می‌شود و در نتیجه تفاوت معنی‌داری در توان تولیدی موتور ایجاد نمی‌شود [۳۹].

- در حدود ۷/۴ درصد از محققین، افزایش توان تولید شده توسط موتور را با سوخت بیودیزل خالص نسبت گازوئیل تایید کردند، که در منابع [۴۰-۴۱] 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 [۴۰]. الویداین و همکارانشان در مقاله‌ای ادعا داشته‌اند که توان تولید شده با استفاده از سوخت بیودیزل خالص نسبت به سوخت گازوئیل در حدود ۷۰٪ افزایش می‌یابد [۴۱].

از مطالعه ادبیات فن می‌توان دریافت که میزان منو استر اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک)، خواص منحصر به فردی را به سوخت تحمیل می‌کند که مستقیماً بر فرآیند احتراق و عملکرد موتور تاثیر می‌گذارد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- تولید سوخت بیودیزل و اندازه‌گیری خواص آن

سوخت بیودیزل مورد آزمون، اتیل استرهای اسید چرب می‌باشد 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 گردید. سوخت بیودیزل بدست آمده از روغن‌های گیاهی متفاوت، دارای خواص ترموفیزیکی متفاوتی می‌باشند [۴]. سوخت بیودیزل از مخلوط تعدادی از منو استرهای اسید چرب تشکیل یافته است که درصد هر یک از آنها می‌تواند بر خواص ترموفیزیکی مانند گرانیروی، چگالی، عدد ستان، ارزش حرارتی، نقطه اشتعال و نقطه ابری تاثیر گذارد که مستقیماً فرآیند احتراق و عملکرد موتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، عملکرد موتور دیزل وابسته به درصد منو استرهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل می‌باشد. خواص ترموفیزیکی پنج نمونه سوخت بیودیزل که شامل چگالی، ارزش حرارتی، نقطه ابری شدن، گرانیروی و نقطه اشتعال می‌باشد، مطابق استاندارد ASTM مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. 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 و ستون قطبی تعیین گردید.

به منظور بررسی تاثیر میزان درصد وزنی هر یک از این منو استرهای موجود در سوخت بیودیزل بر عملکرد موتور دیزل، لازم است تا آزمایش‌هایی به صورت تجربی با استفاده از منو استرهای اسید چرب انجام گیرد. جداسازی منو استرهای اسید چرب موجود در سوخت بیودیزل کار بسیار مشکلی بوده و عملاً امکان‌پذیر نیست. ولی در صورتی که تاثیر چندین نوع سوخت بیودیزل (با درصدهای مختلف منو استرهای اسید چرب)، بر عملکرد موتور مورد مطالعه قرار گیرند، می‌توان تاثیر هر منو استر 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 دو به دو با هم مخلوط شدند و در نتیجه تعداد نمونه‌های سوخت بیودیزل به ۱۵ مورد رسید.

۲-۲- موتور تحت آزمایش و روش انجام آزمون

سوخت‌های بیودیزل بر روی موتور دیزل MT4-244 مورد آزمون قرار گرفتند (جدول ۱). آزمون موتور بر مبنای استاندارد ۸ مد ECER-96 با استفاده از دینامومتر مغناطیسی مدل E400 ساخت شرکت PMIDCO، زاویه سنج AVL333 و آلاینده سنج AVL Dicom4000 مدل A-8020 انجام گرفت. در تمام آزمایش‌ها، همه ۱۵ نمونه مخلوط سوخت بیودیزل در شرایط بار کامل (Full Load) و دور کاری موتور (۲۰۰۰rpm) با ۳ بار تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. در هر یک از آزمون‌ها، ابتدا موتور دیزل با سوخت گازوئیل به مدت ۱۰ دقیقه شروع به کار می‌کند، سپس موتور تحت بار کامل قرار می‌گرفت. در این حالت دور موتور در ۲۰۰۰rpm ثابت نگه‌داشته می‌شد. سپس نمونه سوخت بیودیزل از یک مسیر دیگری وارد موتور شده و موتور به مدت ۱۰ دقیقه با سوخت بیودیزل کار می‌کرد تا تاثیر سوخت قبلی به طور کلی از بین برود. دوباره موتور در شرایط بار کامل و دور

۲۰۰۰ rpm به کمک شانه سوخت‌رسانی، ثابت نگه‌داشته می‌شد. وقتی دور موتور با سوخت بیودیزل در همان مقدار قبلی تثبیت شد، مقدار توان و گشتاور تولید شده اندازه‌گیری می‌گردد. این کار برای هر کدام از نمونه‌های سوخت ۳ بار تکرار می‌شود.

جدول ۱- مشخصات فنی موتور دیزل MT4-244

مشخصات موتور	مقدار	واحد
تعداد سیلندر	۴	-
قطر پیستون	۱۰۰	mm
کورس پیستون	۱۲۷	mm
طول شاتون	۲۱۹	mm
حجم جابجایی	۳/۹۹	L
نسبت تراکم	۱۷/۵ : ۱	-

۳-۲- روش تحلیل داده‌ها و مدلسازی رگرسیونی

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

$$bp = c_1 \cdot x_p + c_2 \cdot x_s + c_3 \cdot x_o + c_4 \cdot x_{Le} + c_5 \cdot x_{Ln} \quad (1)$$

که در آن bp = توان ترمزی موتور بر حسب (kW)، x_p = درصد اسید پالمیتیک، x_s = درصد اسید استئاریک، x_o = درصد اسید اولئیک، x_{Le} = درصد اسید لینولئیک و x_{Ln} = درصد اسید لینولئیک موجود در سوخت بیودیزل می‌باشد. مقادیر c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 ضرایب ثابتی هستند که بصورت تجربی بدست می‌آیند و نشان دهنده تاثیر هر یک از منو اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل بر توان ترمزی موتور می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل و خواص ترموفیزیکی آنها

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 گردید (جدول ۲).

جدول ۲- درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل

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

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی سوخت‌های بیودیزل در جدول (۳) آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود، بیشترین ارزش حرارتی مربوط به سوخت بیودیزل حاصل از روغن ذرت می‌باشد و بیشترین مقدار چگالی و گرانشی مربوط به بیودیزل حاصل از روغن آفتابگردان می‌باشد.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی سوخت‌های بیودیزل تولید شده از پنج نوع روغن گیاهی

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

۳-۳- نتایج تجربی آزمون سوخت‌های بیودیزل در موتور دیزل

نتایج اندازه‌گیری تجربی توان ترمزی موتور در بار کامل و دور ۲۰۰۰ rpm با استفاده از سوخت‌های بیودیزل مختلف، حاکی از این واقعیت است که با افزایش ارزش حرارتی سوخت و کاهش گرانشی آن، توان ترمزی موتور افزایش می‌یابد. بیشترین توان ترمزی تولید شده مربوط به سوخت بیودیزل آفتابگردان (۵۸/۸۲ kW) می‌باشد زیرا از طرفی گرانشی آن پایین بوده و نسبت به سایر سوختها بهتر اتمیزه می‌شود و در ثانی ارزش حرارتی بالاتری دارد و موجب می‌شود تا هنگام احتراق انرژی بیشتری آزاد کند. همچنین کمترین توان ترمزی تولید شده، مربوط به سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران (۵۷/۳۵ kW) می‌باشد که علت آن ارزش حرارتی پایین سوخت می‌باشد.

بیشترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران است زیرا این سوخت دارای ارزش حرارتی و چگالی پایینی نسبت به دیگر سوخت‌های بیودیزل است. همچنین این سوخت به دلیل داشتن عدد ستان بالاتر، دارای تاخیر در اشتعال کمتری می‌باشد و قسمت عمده سوخت در مرحله احتراق پیش‌امیخته 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 مدعا است.

جدول ۴- پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور MT4-244 با استفاده از سوخت‌های بیودیزل در ۲۰۰۰ rpm

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

۳-۴- نتایج مدلسازی تاثیر اتیل استرهاي موجود در سوخت بیودیزل بر توان ترمزی موتور

با توجه به داده‌های تجربی مربوط به آزمون GC mass مبنی بر اندازه‌گیری منواستراسیدهای چرب موجود در ۱۰ نمونه سوخت بیودیزل مخلوط و آزمون موتور برای اندازه‌گیری توان ترمزی موتور، مقادیر ضرایب ثابت C_1, C_2, C_3, C_4 و C_5 ، به صورت یک مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه^۱ با استفاده از نرم افزار SPSS 17 محاسبه شدند. نتایج حاصل از مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه نشان می‌دهد 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 و در نتیجه مقادیر پارامترها برابر $C_1 = ۰/۹۷۷$ ، $C_2 = ۴/۲۵۲$ ، $C_3 = ۰/۶۸۴$ ، $C_4 = ۰/۳۷۵$ و $C_5 = -۰/۵۵۸$ محاسبه شده است. در جدول ۵ به دلیل طولانی بودن محاسبات تنها بخشی از نتایج تکرار الگوریتم آورده شده است

جدول ۵- برآورد متغیرهای مدل رگرسیونی

برآورد متغیرها					مجموع مربعات باقیمانده	تعداد تکرار
C_5	C_4	C_3	C_2	C_1		
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
-۰/۵۵۸	۰/۳۷۵	۰/۶۸۴	۴/۲۵۲	۰/۹۷۷	۰/۱۰۲	۲۱

همبستگی مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه بصورت (جمع کل تصحیح شده/مجموع مربعات مانده‌ها- $R^2=۱$) محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات آنالیز واریانس برای برآورد پارامترهای مدل، نشان می‌دهد که مدل ارائه شده دارای همبستگی بسیار بالایی در حد $R^2=۰/۸۹۶$ می‌باشد (جدول ۶).

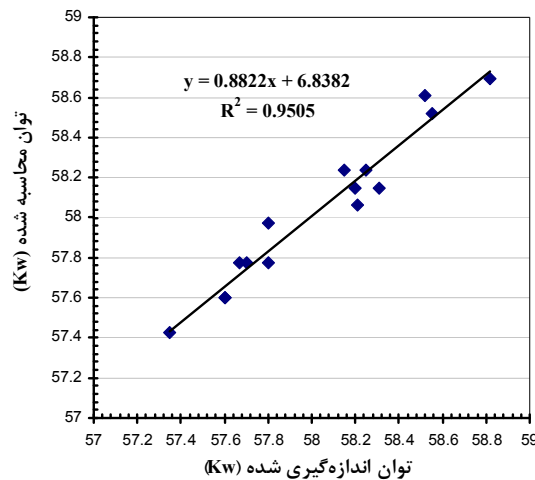
جدول ۶- آنالیز واریانس (ANOVA) مدل رگرسیونی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	کل مربعات
رگرسیون	۳۳۶۸۰/۳۲۴	۵	۶۷۳۶۱/۰۶۵
باقیمانده	۰/۱۰۲	۵	۰/۰۲۰
جمع کل تصحیح نشده	۳۳۶۸۰/۴۲۶	۱۰	-
جمع کل تصحیح شده	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:

$$bp = 0.977x_p + 4.2526x_s + 0.684x_o + 0.375x_{Le} - 0.558x_{Ln} \quad (۲)$$

¹- Nonlinear Regression Analysis



شکل ۱- مقایسه مقادیر توان پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

لازم به یادآوری است که برای مدلسازی از داده‌های مربوط به ۱۰ نمونه سوخت بیودیزل مخلوط استفاده گردید و برای اعتبار دهی به مدل، از داده‌های ۵ نوع سوخت بیودیزل خالص استفاده شد. مقایسه مقادیر توان ترمزی موتور اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده از طریق مدل نشان می‌دهد که مدل رگرسیون ارائه شده (معادله ۲) می‌تواند با خطایی در حدود ± 0.2 ، توان ترمزی موتور را پیش‌گویی نماید.

جدول ۷- اعتبار مدل در پیش‌بینی توان ترمزی بر اساس منواستراسیدهای چرب موجود در بیودیزل

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

۴- نتیجه‌گیری

نتایج مدلسازی برای پیش‌بینی توان ترمزی موتور بر اساس درصد استرهای اسید چرب موجود در بیودیزل نشان می‌دهد که توان ترمزی تولید شده موتور، کاملاً وابسته به منو استرهای اسید چرب (پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) موجود در سوخت بیودیزل می‌باشد. اسیدهای چرب اشباع با زنجیره هییدروکربنی کوتاه یعنی استئارات (C16=0) و پالمیتات (C18=0) بیشترین تاثیر را بر تولید توان موتور دارند و اسیدهای چرب غیراشباع با زنجیره هییدروکربنی بلند یعنی اولنات (C18=1)، لینولنات (C18=2) و لینولنات (C18=3) کمترین تاثیر را بر تولید توان موتور دارند. همچنین، با افزایش مقدار اشباع نشدگی اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل، تولید توان موتور کاهش می‌یابد به نحوی که وجود اتیل استر لینولنات که دارای سه پیوند غیر اشباع کربن-کربن است، تاثیر منفی بر تولید توان دارد. لذا تولید سوخت بیودیزل از روغن‌هایی که دارای درجه اشباع شدگی بالایی هستند، می‌تواند موجب افزایش توان ترمزی تولید شده موتور گردد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از کمک‌ها و مساعدت‌های واحد تحقیقات مهندسی شرکت موتورسازان تبریز، سپاسگذاری می‌نمایم.

مراجع

- 1- Caruana, C. M. 2000. "Pollution control drives new interest in biodiesel", Chemical Engineering Process, 84, 14-18.
- 2- Zanchi, M. 1998. "Development of experiments with vegetable oils as a diesel substitute". Applied engineering in agriculture, 9(9):103-117.
- 3- Knothe, G., Steidley, K. R. 2007. "Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures", Fuel, 86, 2560-2567.
- 4- Ma, F., Hanna, M., A. 1998. "Biodiesel production: a review", Bioresource Tech, 70, 1-15.
- 5- Diwani, G., Attia, N. K., Havash, S. I. 2009. "Development and evaluation of biodiesel fuel and byproducts from jatropha oil", Int. J. Environ. Sci. Tech., 6 (2), 219-224.
- 6- Hu, J., Du, Z., Li, C., Min, E. 2004. "Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers", Fuel, 84, 1601-1606.
- 7- Imahara, H., Minami, E., Saka, Sh. 2006. "Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition", Fuel, 85, 1666-1670.
- 8- Rashid, O., Anwar, F., Moser, R. B., Knothe, G. 2008. "Moringa oleifera oil: possible source of biodiesel". Bioresource Tech, 99, 8175-8179.
- 9 Reyes J.F. and Sepúlveda, M.A. 2006. "PM-10 emissions and power of a diesel engine fueled with crude and refined biodiesel from salmon oil", Fuel 85, 1714-1719.
- 10- Baroutian, S., Aroua, M. K., Raman, A. A., Sulaiman, N. M. 2008. "Estimation of vegetable oil-based ethyl esters biodiesel density using artificial neural network", Journal of Applied Sciences, 8(17): 3005-3011.
- 11- Tate, R. A., Watts, K. C., Allen, C. A.W., Wilkie, K.I. 2006. "The densities of three biodiesel fuels at temperature up to 300°C", Fuel. 85: 1004-1009.
- 12- Watts, K.C., Tate, R.E. 2005. "Experimental determination of the density, viscosity and Surface Tension of Three Commercial Biodiesel Fuels up to 300°C", CSAE/SCGR, Paper No. 05-083.
- 13- Sheng, Ch., Azevedo, J.L.T. 2005. "Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data", Biomass and Bioenergy, 28, 499-507.
- 14- Alptekin, E. , Canakci, M. 2008. "Determination of the density and the viscosities of biodiesel- diesel fuel blends", Renewable Energy, 33, 2623- 2630.
- 15- 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, 9268-9280.
- 16- Mirante, F. I. C., Coutinho, J. A. P. 2001. "Cloud point prediction of fuels and fuel blends", Fluid Phase Equilibria, 180, 247-255.
- 17- Van Gerpen, J. , Shanks, B. , Pruszko, R. , Clements, d. , Knothe, G. 2004. "Biodiesel analytical methods", National Renewable Energy Laboratory.
- 18- Aydin, H. and Bayindir, H. 2010. "Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine", Renew Energ, 35, 588-592.
- 19- Buyukkaya, E. 2010. "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics", Fuel, 89, 3099-3105.
- 20- Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., Tonon, S. 2004. "Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis", energetic evaluations, Energy 29, 2195-2211.
- 21- Çetinkaya, M., Ulusoy, Y., Tekin, Y., Kapaosmanoğlu, F., 2005. "Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel", Energ Convers Manage 46, 1279-1291.
- 22- Choi, S.-H. and Oh, Y. 2006. "The emission effects by the use of biodiesel fuel", Int J Mod Phys B 20, 4481-4486.
- 23- Da Silva Fernando, N., António, S.P. and Jorge, R.T. 2003. "Technical feasibility assessment of oleic sunflower methyl ester utilization in diesel bus engines", Energ Convers Manage 44, 2857-2878.
- 24- Hansen, A.C., Gratton, M.R., Yuan, W. 2006. "Diesel engine performance and NO_x emissions from oxygenated biofuels and blends with diesel fuel", Trans ASABE 49, 589-595.
- 25- Hazar, H. 2009. "Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine", Renew Energ 34, 1533-1537.
- 26- Murillo, S., Miguez, J.L., Porteiro, J., Granada, E. and Moran, J.C. 2007. "Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines", Fuel 86, 1765-1771.
- 27- Özgünay, H., Çolak, S., Zengin, G., Sari, Ö., Sarikahya H., Yüceer, L. 2007. "Performance and emission study of biodiesel from leather industry pre-fleshings", Waste Manage 27, 1897-1901.
- 28- 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, 629-636. Article.

- 29- Raheman, H. and Phadatare, A.G. 2004. "Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel", Biomass Bioenerg 27, 393-397.
- 30- Utlu, Z. and Koçak, M.S. 2008. "The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions", Renew Energ 33, 1936-1941.
- 31- Ulusoy, Y., Tekin, Y., Çetinkaya, M., Kapaosmanoğlu, F. 2004. "The engine tests of biodiesel from used frying oil", Energ Source Part A 26, 927-932.
- 32- Yücesu, H.S. and Cumali, İ. 2006. "Effect of cotton seed oil methyl ester on the performance and exhaust emission of a diesel engine", Energ Source Part A 28, 389-398.
- 33- Najafi B., Piroozpanah V., Ghobadian B., 2007. "Experimental Investigation of Diesel Engine Performance Parameters and Pollution Using Biodiesel", Modares Thechnical And Engineering, Special Issue on Mechanical Engineering, 28, 78-101.
- 34- Ghobadian, B. Rahimi, H., Nikbakht, A.M. 2009. "Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network", Renew Energ 34, 976-982.
- 35- Keskin, A., Gürü M., Altıparmak, D. 2008. "Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission", Bioresource Technol 99, 6434-6438
- 36- Lapuerta, M., Herreros, J.M., Lyons, L.L., García-Contreras, R. and Brice, Y. 2008. "Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions", Fuel 87, 3161-3169.
- 37- Lin, B.-F., Huang, J.-H., Huang, D.-Y. 2009. "Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions", Fuel 88, 1779-1785.
- 38- Oğuz, H., Ögüt, H., Eryılmaz, T. 2007. "Investigation of biodiesel production, quality and performance in Turkey", Energ Source Part A 29, 1529-1535.
- 39- Qi, D.H., Geng, L.M., Chen, H., Bian, Y.Z.H., Liu J., Ren, X.C.H. 2009. "Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil", Renew Energ 34, 2706-2713.
- 40- Song, J.-T., Zhang, C.-H. 2008. "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, 2487-2496.
- 41- Al-Widyan, M.I., Tashtoush, G. and Abu-Qudais, M. 2002. "Utilization of ethyl ester of waste vegetable oils as fuel in diesel engines", Fuel Process Technol, 76, 91-103.