ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران (کرج)
۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹

مدلسازی خواص ترموفیزیکی سوخت بیودیزل بر اساس اتیل استر اسیدهای چرب موجود در آن

محمود عباسی‌فخر، بهمن نجفی
دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی
Ma_758@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق سوخت بیودیزل به روش ترنس‌استریفیکاسیون با استفاده از الکل اتانول و کاتالیزور هیدروکسید سدیم، از هفت نوع روغن گیاهی (آفتاب‌گردان، سویا، کلزا، زیتون، ذرت، سبوس برنج و هسته انگور) تولید شد. سوخت بیودیزل تولید شده عمدتا حاوی چهار نوع اتیل استر اسید چرب (لینولئات، پالمیتات، استئارات و اولئات) می‌باشد. خواص ترموفیزیکی سوخت بیودیزل تابعی از میزان هر یک از این استر اسیدهای چرب می‌باشد، از این رو تعیین میزان درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در این سوخت‌ها، با استفاده از کروماتوگرافی گازی با استفاده از ستون قطبی انجام گرفت. خواص ترموفیزیکی(چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی) نمونه سوخت‌های تولید شده بر اساس استانداردهای ASTM اندازه‌گیری شد. از داده‌های حاصل از آنالیز کروماتوگرافی گازی و اندازه‌گیری خواص چهار نوع سوخت به منظور ایجاد مدل رگرسیونی خطی و بدست آوردن ضرایب معادله و از داده‌های حاصل از اندازه-گیری خواص سه نوع سوخت دیگر به منظور اعتباردهی مدل استفاده گردید. ضرایب همبستگی میان داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل‌های ایجاد شده در پیش‌بینی چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی به ترتیب ۰/۹٤٦، ۰/۹۹۸، ۰/۹۸٦ و ۰/۹۸۱ بدست آمد.

کلمات کلیدی: مدلسازی، سوخت بیودیزل، خواص ترموفیزیکی، اتیل استراسیدهای چرب

مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست محیطی این‌گونه از سوخت‌ها، تحقیقات وسیعی در راستای امکان استفاده از بیودیزل به جای سوخت دیزل انجام گرفته است. بیوگاز، بیواتانول، بیوبنزین و بیودیزل از مهم‌ترین اعضای این خانواده ازسوخت‌ها محسوب می‌شوند. از آنجا که قسمت اعظم آلاینده‌هایی نظیر

ترکیبات نیتروژن، منواکسید کربن، دی اکسید کربن و ذرات جامد معلق از گاز خروجی اگزوز موتورهای دیزلی ناشی می‌شوند، لذا در میان سوخت‌های زیستی موجود، تحقیق در راستای یافتن سوختن جایگزین و مناسب برای سوخت دیزل سهم وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است[۱]. روغن‌های گیاهی یا گلیسیریدها، به دلیل داشتن زنجیره‌های هیدروکربنی طویل، دارای ویسکوزیته و چگالی بالاتری نسبت به گازوئیل می‌باشند لذا استفاده مستقیم از آن در موتور دیزل، موجب کاهش کیفیت احتراق شده و تاثیر نامطلوبی بر تولید توان و انتشار آلاینده‌ها می‌گذارد، لذا برای اصلاح ساختار روغن‌های گیاهی به عنوان سوخت قابل استفاده در موتور دیزل، تری‌گلیسیریدهای موجود در روغن گیاهی با یک الکل ساده و در کنار یک کاتالیزور بازی یا اسیدی در طی فرآیند ترنس‌استریفیکاسیون تبدیل به سوخت بیودیزل می‌شود[۲]. از مهم‌ترین دلایل انتخاب بیودیزل‌ها می‌توان به تجدیدپذیری، مقادیر کمتر آلاینده‌های حاصل از احتراق، عدم نیاز به تغییر در ساختار موتور اشاره کرد [۳].

با توضیحاتی که در بالا ذکر شد، درک و ارزیابی خواص سوخت‌های بیودیزل دارای اهمیت زیادی می‌باشد. خواص سوخت بیودیزل به طور انکار ناپذیری تحت تأثیر نوع اسیدهای چرب تشکیل دهنده آن می‌باشد. شناسایی این اسیدها می‌تواند در بدست آوردن خواص سوخت‌های بیودیزل بسیار مؤثر باشد[٤]. چگالی یکی از خواص بسیار مهم سوخت می‌باشد که در مدلسازی رفتار سوخت، فرآیند احتراق و دیگر فرآیندها دارای اهمیت می‌باشد[٥]. بسیاری از شاخصه-های عملکرد موتور مانند عدد ستان و ارزش حرارتی سوخت در ارتباط با چگالی می‌باشند[٦]. اولین مرحله احتراق در موتورهای دیزل اتمیزه شدن سوخت می‌باشد که به میزان زیادی تحت تاثیر گرانروی سوخت می‌باشد. همچنین در روانسازی پمپ انژکتور، فشار لوله‌های پاشش و مقدار سوخت پاشیده شده موثر است. از این رو گرانروی نقش مهمی در کارایی سوخت بیودیزل دارد [۷]. نقطه ابری شدن از ویژگی‌های سرمایی سوخت می‌باشد که رفتار سوخت را در دماهای پایین تحت تاثیر قرار داده و در جریان یافتن و پاشش سوخت از انژکتور اختلال ایجاد کند. نقطه ابری شدن تنها از طریق تعیین میزان استرهای موجود در سوخت قابل محاسبه می‌باشد[۸]. مطالعاتی در زمینه محاسبه ارزش حرارتی اسیدهای چرب بر اساس خواص فیزیکی آن‌ها(وزن مولکولی، چگالی و تعداد کربن) انجام گرفته است[۹]. تا کنون مطالعات زیادی به منظور پیش‌بینی خواص سوخت بیودیزل حاصل از ترنس‌استریفیکاسیون متانول با اسیدهای چرب انجام گرفته اما مطالعات بر روی پیش‌بینی خواص سوخت بیودیزل حاصل از ترنس‌استریفیکاسیون اتانول با اسیدهای چرب به ندرت صورت گرفته است. از این رو در این تحقیق مدل‌هایی به منظور پیش‌بینی خواص ترموفیزیکی سوخت بیودیزل بر اساس اتیل استراسیدهای چرب موجود در آن ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از هفت نوع روغن گیاهی آفتاب‌گردان، کلزا، ذرت، سویا، زیتون، سبوس برنج و هسته انگور برای تولید سوخت بیودیزل با استفاده از الکل اتانول و به روش ترنس‌استریفیکاسیون استفاده گردید. نسبت مولی الکل(اتانول ۹۹/٦٪) به روغن ٦:۱، دمای واکنش C° ٦٥، میزان کاتالیزگر بازی هیدروکسید سدیم(extra pure) ۱ درصد وزنی، و

شدت همزنی ٦٠٠ دور بر دقیقه مطابق با شرایط بهینه تولید سوخت بیودیزل در نظر گرفته شدند. به منظور خنثی‌سازی کاتالیزگر از اسید کلریدریک استفاده شد. برای حذف الکل و گلیسیرین موجود در سوخت، فرآیند آب‌شویی در سه مرحله و با استفاده از آب مقطر در دمای ٦٠°C انجام گرفت. تعیین میزان درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در این سوخت‌ها به روش کروماتوگرافی گازی در ترکیب با اسپکتروسکوپی جرمی با استفاده از دستگاه GC-Mass براساس استاندارد ASTM D6584 با استفاده از ستون قطبی انجام گرفت.

برای اندازه‌گیری چگالی نمونه سوخت‌های تولید شده از دستگاه چگالی‌سنج دیجیتال DA-130N تحت استاندارد ASTM D4052 متعلق به استانداردهای انجمن آزمون و مواد آمریکا استفاده شد.

گرانروی مطابق با استاندارد ASTM D445 و با استفاده از گرانروی‌سنج موئین اندازه‌گیری شد. در این روش ١٠ میلی‌لیتر از نمونه در داخل گرانروی سنج ریخته شده و کل مجموعه در داخل حمام آب گرم با دمای ٤٠ درجه سانتیگراد قرار داده شد. با مکش، سوخت داخل آن تا یک سانتی‌متر بالاتر از مخزن آورده شد. با رها کردن آن سوخت مایع شروع به عبور از لوله موئین می‌کند. زمان عبور سوخت از میان دو سطح علامت خورده، گرانروی سوخت را بر حسب mm^2/s نشان می‌دهد.

نقطه ابری شدن پایین‌ترین دمایی است که در آن دما در سوخت مایع اولین ذرات کریستال و موم ظاهر می‌شود. نقطه ابری شدن مطابق استاندارد ASTM D5773 بوسیله مشاهده شفافیت سوخت که تحت شرایط کنترل شده سرد می‌شود، تعیین می‌گردد. نمونه در استوانه شیشه‌ای ریخته شد و به منظور ایجاد شرایط همگن در سوخت، دمای آن با استفاده از آون به ٤٠ درجه سانتیگراد رسانده شد. سپس نمونه از آون خارج شده و پس از هم دما شدن با محیط در دستگاه سردکن قرار داده شد. کاهش دمای نمونه کنترل و به محض رویت اولین ذرات کریستال و مومی شکل، دمای نمونه به عنوان نقطه ابری شدن ثبت گردید.

ارزش حرارتی شامل میزان انرژی آزاد شده از جرم مشخص ماده می‌باشد و به صورت خالص و یا ناخالص وجود دارد. در حالت خالص ماده تولیدی به حالت گاز و آب حاصل به صورت مایع می‌باشد ولی در حالت ناخالص آب حاصل نیز بخار می‌شود. این آزمایش بوسیله دستگاه بمب کالریمتر انجام شد. در این روش ارزش حرارتی با سوختن حدود یک گرم از نمونه در بمب کالریمتر در شرایط کنترل شده تعیین گردید. ارزش حرارتی از محاسبه دمای قبل و بعد از احتراق و با در نظر گرفتن انتقال حرارت حاصل از سوخت با تصحیح مقدار گوگرد موجود در نمونه بدست آمد. ارزش حرارتی محاسبه شده توسط دستگاه بصورت ارزش حرارتی خالص بود و می‌توان با توجه به رابطه (١) ارزش حرارتی ناخالص را محاسبه نمود که درآن:

$$Qn= Qg-02122H \qquad (١)$$

Qn= ارزش حرارتی خالص (مگاژول برکیلوگرم)

Qg= ارزش حرارتی ناخالص (مگاژول برکیلوگرم)

H= درصد جرمی هیدروژن در نمونه، می باشند.

ارزش حرارتی در استانداردهای ASTM بوسیله بمب کالریمتر اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق از بمب کالریمتر Parr مدل PM-52 برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی بودیزل استفاده گردید.

چهار نوع از مهم‌ترین اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل مرسوم تولید شده با استفاده از الکل اتانول، اتیل لینولئات، اتیل پالمیتات، اتیل استئارات و اتیل اولئات می‌باشند. هر یک از خصوصیات سوخت بیودیزل را که در بالا شرح داده شد می‌توان به صورت یک تابع خطی از میزان درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در آن به فرم زیر نوشت:

$$property = x_1\%L + x_2\%P + x_3\%S + x_4\%O \qquad (۲)$$

که در این رابطه که %L، %P، %S و %O به ترتیب درصد وزنی اتیل لینولئات، اتیل پالمیتات، اتیل استئارات و اتیل اولئات موجود در نمونه سوخت‌های تولید شده ، property نشان دهنده چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی نمونه سوخت‌های تولید شده و x_1، x_2، x_3 و x_4 ضرایب ثابت می‌باشند. پس از تعیین ترکیبات موجود در سوخت‌ها و اندازه‌گیری خواص آن‌ها از چهار نمونه سوخت به منظور مدلسازی استفاده شد. برای هر یک از خواص سوخت، یک دستگاه چهار معادله چهار مجهول تشکیل گردید که با حل این دستگاه ضرایب ثابت هر معادله بدست آمد. از داده‌های بدست آمده از سه نمونه سوخت دیگر به منظور اعتباردهی مدل‌های ایجاد شده استفاده گردید.

بحث و نتایج

نتایج حاصل از آزمون کروماتوگرافی گازی جهت تعیین ترکیبات اتیل استر اسیدهای چرب موجود در نمونه سوخت-های بیودیزل در جدول(۱) آورده شده است.

جدول۱-درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت‌های بیودیزل تولید شده

منبع تولید	اتیل استر اسیدهای چرب			
سوخت بیودیزل	اتیل لینولئات٪	اتیل پالمیتات٪	اتیل استئارات٪	اتیل اولئات٪
آفتاب‌گردان	٥٤/٦٩٤	٦/١١٢	١٢/٣٩٥	٢٥/٨٧٣
کلزا	٥١/٣٤٤	٦/٢٥	٨/٤٧٣	٣٢/٩٣٥
سویا	٥٣/٦٦٦	٤/٨٠٧	٩/١٢٢	٣٢/١٣٣
ذرت	٥٠/٨٣٤	١٠/٠٣١	٦/٢١٠	٣٢/١٦٦
سبوس برنج	٥٠/٣٤١	١١/٦٥٣	٩/١٤٨	٢٨/٦٩٢
زیتون	٣٥/٧٨٦	١١/٦٥٧	٣/٦٤٤	٤٨/٥٣٧
هسته انگور	٥٣/٨٢٦	٥/٦٨١	٩/٦١٤	٢٩/٩٨

کمتر از ۱٪ از ترکیبات موجود در نمونه سوخت‌ها را سایر اسیدهای چرب تشکیل می‌دهند که به علت تاثیر بسیار اندک آن‌ها در مقایسه با دیگر اسیدهای چرب، در مدلسازی از آن‌ها صرف نظر گردید. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون کروماتوگرافی گازی مربوط به چهار سوخت آفتاب‌گردان، کلزا، سویا و ذرت، رابطه (۲)به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Property} = ۰/۵٤٦۹\ x_1 + ۰/۰٦۱۱\ x_2 + ۰/۱۲۳۹\ x_3 + ۰/۲۵۸۷\ x_4 \qquad (۳)$$

$$\text{Property} = ۰/۵۱۳٤\ x_1 + ۰/۰٦۲۵\ x_2 + ۰/۰۸٤۷\ x_3 + ۰/۳۲۹۳\ x_4 \qquad (٤)$$

$$\text{Property} = ۰/۵۳٦۷\ x_1 + ۰/۰٤۸۱\ x_2 + ۰/۰۹۱۲\ x_3 + ۰/۳۲۱۳\ x_4 \qquad (۵)$$

$$\text{Property} = ۰/۵۰۸۳\ x_1 + ۰/۱۰۰۳\ x_2 + ۰/۰٦۲۱\ x_3 + ۰/۳۲۱۷\ x_4 \qquad (٦)$$

که روابط (۳)، (٤)، (۵) و (٦) به ترتیب مربوط به سوخت‌های حاصل از روغن‌های آفتاب‌گردان، کلزا، سویا و ذرت می‌باشند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی چهار نمونه سوخت تولید شده که جهت مدلسازی از آن‌ها استفاده شد، در جدول(۲) آورده شده‌است.

جدول۲- خواص ترموفیزیکی چهار نمونه از سوخت‌های بیودیزل تولید شده

	چگالی(kg/lit)	گرانروی(mm/s^2)	نقطه ابری شدن(^oC)	ارزش حرارتی (Mj/kg)
آفتاب‌گردان	۰/۸۹۵۹	٤/۵	−۱/۲	۳۹/۲۸٤
کلزا	۰/۸۸۸۱	٤/۹	−۳/۰	۳۹/۰۲۳
سویا	۰/۸۹۱۰	۵/۱	−۳/۷	۳۹/۲۹۱
ذرت	۰/۸۷۹۱	۳/۸	−۱/۵	۳۹/۹٤۳

با قرار دادن داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری چگالی نمونه سوخت‌های بیودیزل تولید شده در روابط ۳ تا ٦ و حل دستگاه چهار معادله چهار مجهول، ضرایب ثابت x و به دنبال آن مدل رگرسیون خطی جهت پیش‌بینی چگالی سوخت به صورت زیر بدست آمد:

$$Density = 0.6701\,L + 1.003\,P + 1.0578\,S + 1.0572\,O \qquad (۷)$$

به همین ترتیب مدل رگرسیون خطی جهت پیش‌بینی گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی سوخت، به صورت زیر بدست آمد:

$$Viscosity = -0.9273\,L - 16.04P + 17.02\,S + 14.99\,O \qquad (۸)$$

$$Cloud\ point = -9.502\,L + 55.15\,P + 32.41\,S - 13.1\,O \qquad (۹)$$

$$Heating\ value = 46.52\,L + 50.52\,P + 23.24\,S + 30.41\,O \qquad (۱۰)$$

در رابطه(۷) اتیل استئارات به دلیل داشتن جرم مولکولی بیشتر نسبت به سایر اتیل استر اسیدهای چرب دارای بیشترین تاثیر بر روی چگالی است. گرانروی اتیل استر اسیدهای چرب به میزان زیادی تحت تاثیر طول زنجیره، موقعیت، تعداد و ماهیت پیوندهای دوگانه می‌باشد. در رابطه (۸) بالاتر بودن ضریب اتیل استئارات نسبت به سایر اتیل استر اسیدهای چرب به دلیل بالاتر بودن گرانروی این ایتل استر نسبت به سایر اتیل استرها بوده و بیشترین تاثیر را بر افزایش گرانروی سوخت دارد. همان‌طور که در رابطه (۹) دیده می‌شود، ضرایب مربوط به اتیل استئارات و اتیل پالمیتات مثبت می‌باشند. استر اسیدهای چرب اشباع مانند اتیل استئارات و اتیل پالمیتات دارای نقطه ابری شدن بالاتری نسبت به استر اسیدهای چرب غیر اشباع می‌باشند که با افزایش درصد وزنی آن‌ها در سوخت، نقطه ابری شدن سوخت افزایش می‌یابد. سوخت‌های حاصل از نفت خام به دلیل داشتن ترکیبات آروماتیک سطح انرژی بالایی دارند. سوخت بیودیزل ترکیبات آروماتیک ندارد اما دارای اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع با سطوح مختلف اشباع نشدگی می‌باشد. سوخت‌های حاوی ترکیبات اشباع نشده، اندکی محتوای انرژی حرارتی پایین‌تری دارند. در حالیکه هرچه درصد اسیدهای چرب اشباع شده در ترکیب سوخت بیشتر باشد، به همان میزان بر ارزش حرارتی سوخت افزوده می‌شود.

از نتایج حاصل از کروماتوگرافی گازی و نیز اندازه‌گیری خواص سه نمونه سوخت تولید شده از روغن‌های گیاهی سبوس برنج، هسته انگور و زیتون به منظور ارزیابی و اعتباردهی مدل‌های ایجاد شده استفاده گردید که نتایج آن در جدول‌های ۳ و ٤ آورده شده است.

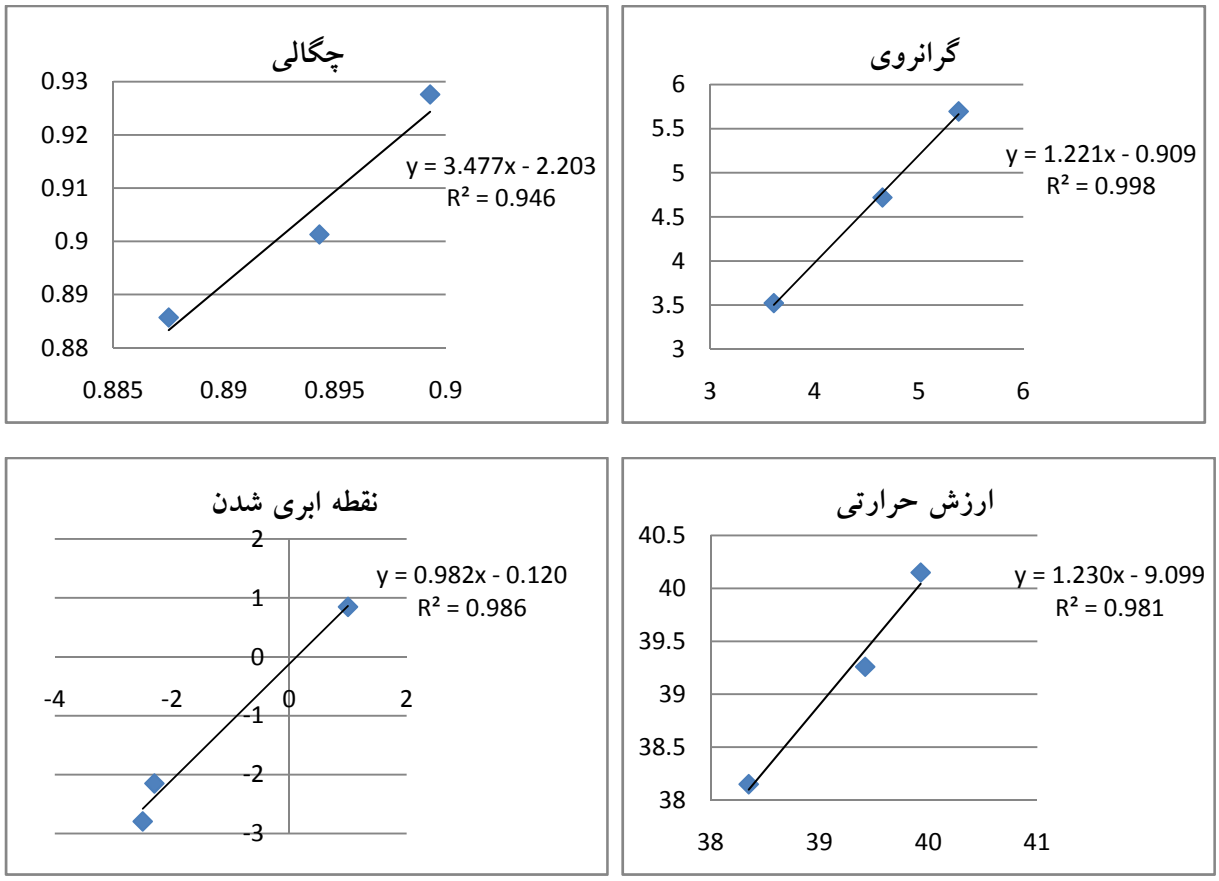
جدول۳- مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی و گرانروی سوخت با نتایج حاصل از مدلسازی

	چگالی (kg/lit)			گرانروی(mm/s^2)		
	مقادیر اندازه‌گیری شده	مقادیر محاسبه شده	درصد خطا	مقادیر اندازه‌گیری شده	مقادیر محاسبه شده	درصد خطا
سبوس برنج	۰/۸۹٤۳	۰/۹۰۱۳	۰/۷۸	۳/٦۱	۳/٥۲۳	۲/٤۱
هسته انگور	۰/۸۸۷٥	۰/۸۸٥۷	۰/۲۰	٤/٦٥	٤/۷۲	۱/٥۰
زیتون	۰/۸۹۹۳	۰/۹۲۷٦	۳/۱٤	٥/۳۸	٥/٦۹٥	٥/۸٥

جدول٤- مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی سوخت با نتایج حاصل از مدلسازی

	نقطه ابری شدن (^oC)			ارزش حرارتی(Mj/kg)		
	مقادیر اندازه‌گیری شده	مقادیر محاسبه شده	درصد خطا	مقادیر اندازه‌گیری شده	مقادیر محاسبه شده	درصد خطا
سبوس برنج	۱	۰/۸٤۸۸	۱٥/۱	۳۹/۹۳	٤۰/۱٥	۰/٥٥
هسته انگور	-۲/٥	-۲/۷۹٥	۱۱/۸	۳۹/٤۲	۳۹/۲٦	۰/٤۰
زیتون	-۲/۳	-۲/۱٥	٦/٥۲	۳۸/۳٥	۳۸/۱٥	۰/٥۲

درصد خطای نتایج بدست آمده از مدلسازی در پیش‌بینی چگالی، گرانروی و ارزش حرارتی در حد قابل قبولی می‌باشد. مدل ایجاد شده در پیش‌بینی نقطه ابری شدن با اینکه نسبت به سایر مدل‌های ایجاد شده دارای خطای بیشتری است اما در عمل قابل کاربرد می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج مدل، آنالیز رگرسیونی میان نتایج بدست آمده از مدل‌های ایجاد شده و داده‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت.



نمودار۱- آنالیز رگرسیون میان نتایج بدست آمده از مدل(محور عرضی) و داده‌های تجربی(محور طولی)

همان‌طور که در نمودار(۱) نیز دیده می‌شود، ضرایب همبستگی در پیش‌بینی چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی به ترتیب ۰/۹٤٦، ۰/۹۹۸، ۰/۹۸٦ و ۰/۹۸۱ بدست آمده که نشان دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز مدل‌های ایجاد شده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

خواص سوخت بیودیزل به طور انکار ناپذیری تحت تأثیر نوع اسیدهای چرب تشکیل دهنده آن می‌باشد. شناسایی این اسیدها می‌تواند در بدست آوردن خواص سوخت‌های بیودیزل بسیار مؤثر باشد. از این رو در این تحقیق مدلسازی

رگرسیونی چهار خاصیت ترموفیزیکی سوخت بیودیزل(چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی) بر اساس درصد وزنی اتیل استر اسیدهای چرب موجود در سوخت بیودیزل، انجام گرفت. به همین منظور سوخت بیودیزل از هفت نوع روغن گیاهی(آفتاب‌گردان، سویا، کلزا، زیتون، ذرت، سبوس برنج و هسته انگور) تولید شد که پس از تعیین ترکیبات موجود در سوخت‌ها و اندازه‌گیری خواص آن‌ها، از داده‌های مربوط به چهار نوع سوخت به منظور مدلسازی و از داده‌های مربوط به سه نوع سوخت دیگر به منظور ارزیابی مدل ایجاد شده استفاده گردید. ضرایب همبستگی مدل-های ایجاد شده در پیش‌بینی چگالی، گرانروی، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی به ترتیب ۰/۹٤٦، ۰/۹۹۸، ۰/۹۸٦ و ۰/۹۸۱ بدست آمد.

منابع

1- Caruana, C. M. 2000. Pollution control drives new interest in biodiesel, Chemical Engineering Process, 84, 14–18.
2- Banerjee, A., Chakraborty R. 2009. Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production,A review, Resources, Conservation and Recycling, 53, 490-497.
3- Zanchi, M. 1998. Development of experiments with vegetable oils as a diesel substitute, Applied Engineering in Agriculture, 9, 103-117.
4- Knothe, G., Steidley, K. R. 2006. Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures, Fuel, 86, 2560–2567.
5- 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, 3005-3011.
6- Alptekin, E., Canakci, M. 2008. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends, Renewable Energy, 33, 2623– 2630.
7- Allen, C. A. W., Watts, K. C., Ackman, R. G., Pegg, M. G. 1998. Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition, Fuel, 78, 1319–1326.
8- Imhara, H., Minami, E., Saka, S. 2005. Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition, Fuel, 85, 1666–1670.
9- Sadrameli, S., M. Seames, W. Mann, M. 2007. Prediction of higher heating values for saturated fatty acids from their physical properties, Fuel, 87, 1776–1780.