

تجزیه و تحلیل بازده گرمایی و بازده اکسرژی از احتراق سوخت دیزل و بیودیزل

سوده شقاقی^{۱*}، محمد قهدریجانی^۲، محمد هادی دهرویه^۳

^{۱*} دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه علوم تحقیقات، تهران، ایران

(Soodeh.Shaghaghi@srbiau.ac.ir)

^۲ استادیار، دانشگاه علوم تحقیقات، تهران، ایران

(Ghahderijani2005@yahoo.com)

^۳ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، تهران، ایران

(Dehrouyeh@yahoo.com)

چکیده

شیبه‌سازی مدل موتور احتراق داخلی یک ابزار موفق برای مطالعه عملکرد موتور و کمک به ارزیابی و پیشرفت‌های جدید می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تأثیر بار و سرعت موتور و همچنین درصدهای مختلف اختلاط سوخت بر روی مشخصه‌های عملکردی موتور دیزل OM314 به منظور تحلیل بازده گرمایی و بازده اکسرژی پرداخته شد. در طراحی آزمایش‌ها نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور کمینه و یا بیشینه کردن سطوح پاسخ، به وسیله نرم افزار آماری Design expert 11 به دست آمد. مدل‌های درجه دوم به دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ به منظور پیش‌بینی تأثیر متغیرهای ورودی بر روی سطوح پاسخ از لحاظ آماری (در سطح یک درصد) معنی‌دار بودند. از بین متغیرهای مستقل مشخصه‌های بار و سرعت موتور بیشترین میزان تأثیر را بر روی بازده گرمایی داشتند. سوخت بیودیزل خالص بیشترین میزان بازده گرمایی و بازده اکسرژی را نسبت به بقیه ترکیبات سوختی داشت. بیشترین مقدار بازده اکسرژی ۳۳/۴۶ درصد در سرعت دورانی ۱۹۰۳ دور بر دقیقه دربار اعمالی ۸۲ درصد و برای ترکیب سوختی بیودیزل خالص (D₀B₁₀₀) رخ داد. همچنین دربار اعمالی ۲۰ درصد و سرعت دورانی ۲۷۸۱ دور بر دقیقه و برای سوخت بیودیزل خالص، کمترین میزان بازده اکسرژی ۲۷/۷۳ درصد اتفاق افتاد. بیشترین بازده گرمایی برابر با ۳۷/۰۰۶ درصد بود که در سرعت ۲۲۶۳ دور بر دقیقه و بار ۹۷ درصد برای سوخت بیودیزل خالص (D₀B₁₀₀) به دست آمد. درصدهای بالای بیودیزل، دربارهای بالا و سرعت میانی موتور بیشترین مقدار بازده گرمایی را دارد.

کلیدواژه‌ها: بیودیزل، دیزل، بازده گرمایی، بازده اکسرژی، طرح مرکب مرکزی.

* نویسنده مسئول: Soodeh.Shaghaghi@srbiau.ac.ir



تجزیه و تحلیل بازده گرمایی و بازده اکسرژی از احتراق سوخت دیزل و بیودیزل

مقدمه

مفهوم اکسرژی در بدو امر، توسط گیبس به عنوان انرژی در دسترس گیبس تعریف شد. او به این موضوع بدین شرح اشاره می‌کند: انرژی در دسترس مجموعه و محیط، هنگامی که مجموعه توسط یک محیط در دما و فشار ثابت احاطه شده باشد. در عمل، تغییر و انتقال منابع در طی یک فرآیند، منجر به کار، گرما، محصولات و مواد زائد می‌شود که بخشی از اکسرژی ورودی را در برمی‌گیرد. اکسرژی نهایی موجود در کار تحویلی، گرما و محصولات اولیه و ثانویه و مواد زائد، با اکسرژی اولیه منابع برابر نیست. این تفاوت به دلیل تولید آنتروپی بازگشت‌ناپذیر ناپدید شده است [۱۱].

گوی و استودولا، به‌طور مستقل نشان داده‌اند که مقدار خالص این افت اکسرژی با آنتروپی تولیدی ضربدر دمای محیط برابر است [۴].

هنگامی که اصطلاحاتی مانند "مصرف انرژی"، "صرفه‌جویی انرژی" و حتی "بقای انرژی" به کار برده می‌شود، به‌وضوح به انرژی، به عنوان انرژی در دسترس از سوخت‌های فسیلی یا اورانیوم کندانس شده رجوع می‌کنیم. ولی در حقیقت به کارگیری عبارت انرژی به عنوان "بقا" و "مصرف" به‌طور هم‌زمان، گیج‌کننده می‌باشد. تمامی پدیده‌های طبیعی ماکروسکوپی که اطراف ما اتفاق می‌افتند، شامل تغییر حالت‌هایی بین ماده و انرژی هستند، ولی مقدار کلی انرژی و ماده در گیر، هرگز مصرف نمی‌شود و لزوماً ثابت باقی می‌ماند. این موضوع به‌وضوح توسط قانون اول ترمودینامیک بیان شده است. بدین دلیل است که به اکسرژی به عنوان یک مفهوم ترمودینامیکی نیاز است تا مشخص شود که چقدر اکسرژی به سامانه مورد نظر وارد و کجا و چگونه مصرف می‌شود و سپس آنتروپی تولید شده به دلیل مصرف اکسرژی، چگونه به فضای محیط زیست رها می‌گردد [۱۳].

موتورهای احتراق تراکمی که هم در وسایل نقلیه و هم برای تولید توان الکتریکی به کار گرفته می‌شوند، انرژی زیادی مصرف می‌کنند. امروزه موتورهای احتراق تراکمی نه تنها با سوخت‌های فسیلی بلکه با سوخت‌های جایگزین از قبیل بیودیزل، بیواتانول، بیوگاز، هیدروژن و با اختلاط شان به کار می‌روند. عملکرد و بازده موتورهای احتراق داخلی را می‌توان با فناوری‌های جدید از قبیل سامانه کنترل احتراق، عایق حرارتی و بهبود خروجی افزایش داد. از این بابت بازده انرژی و اکسرژی موتورهای احتراق داخلی که با سوخت‌های جایگزین تغذیه می‌شوند بسیار مهم است [۱۵].

کاناکسی و هوساز^۱ (۲۰۰۶) تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی را بر روی یک موتور دیزل جاندر ۴۲۷۶ توربوشارژدار انجام دادند. موتور مورد آزمایش با سوخت‌های متیل استر سویا (SME)، متیل استر پسماند روغن (YGME)، سوخت گازوییل و اختلاط ۲۰ درصدی هر یک از بیودیزل‌ها با سوخت گازوییل تغذیه شد و توزیع بازده گرمایی متغیرهای انرژی و اکسرژی ارائه شد. به عنوان مثال از ۱۰۰ درصد اکسرژی سوخت متیل استر سویا در حدود ۴۵/۴ درصد آن تخریب شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سوخت‌های مورد آزمایش بازدهی انرژی و اکسرژی نزدیک به هم دارند و کمترین سهم بازدهی مربوط به سامانه احتراق بود [۲].

کالیسکان^۲ و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اکسرژی بیودیزل حاصل از سویا در یک موتور دیزل پرداختند و بازده انرژی و اکسرژی سوخت بیودیزل سویا و دیزل متداول را محاسبه کردند و بازده گرمایی بین ۳۹/۹۳ و ۴۱/۳۱ درصد و بازده اکسرژی بین ۳۷/۴۶ و ۳۸/۴۸ درصد گزارش شد و تفاوت معنی‌داری بین نوع سوخت‌ها وجود نداشت.

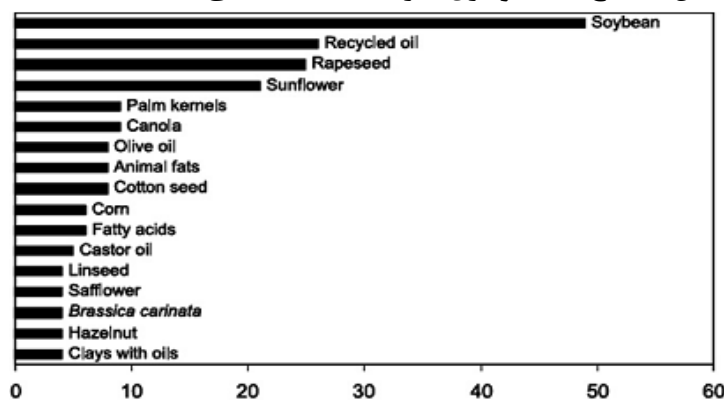
1 Canakci and Hosoz

2 Caliskan

یاسر^۳ (۲۰۰۸) تأثیر عایق گرمایی را بر روی بازده اکسرژی و انرژی یک موتور توربوشارژدار مورد مطالعه قرارداد که بیانگر موتوری با عدم اتلاف گرما بود. بازده اکسرژی این موتور ۲/۸۵ درصد بالاتر از موتور بدون عایق بود. انرژی خروجی این موتور نیز ۱۲ درصد بالاتر از نوع معمولی بود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با بهبود سامانه خروجی گاز می‌توان عملکرد این نوع موتور را بهبود بخشید [۱۶].

بیودیزل یک سوخت دیزل اکسیژن‌دار می‌باشد که از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی به وسیله تبدیل تری‌گلیسریدهای چرب به استرها در طی فرایند ترانس استریفیکاسیون تولید می‌شود. این سوخت خصوصیات شیمی سوخت دیزل فسیلی دارد، به طوری که می‌توان آن را جایگزین سوخت دیزل با کمی یا بدون تغییر در موتور به کار برد. بسیاری از مطالعات به وضوح به این نتیجه رسیدند که بیودیزل به طور قابل توجهی می‌تواند نشر $PM^{۴}$ و CO را کاهش دهد [۱۵].

شکل ۱: منابع عمده بیودیزل ذکر شده در مقالات علمی (Pinto et al., 2005).



در این تحقیق سوخت بیودیزل مورد آزمایش از روغن پسماند تهیه شده بود. نسبت‌های مختلف مخلوط این سه نوع سوخت، مطابق با طرح انتخاب شده برای آزمایش (طرح مرکب مرکزی) با یکدیگر مخلوط گردید. تأثیر اختلاط‌های مختلف بار، سرعت موتور روی بازده گرمایی و بازده اکسرژی مدل خواهد شد و نقاط بهینه متغیری‌های مستقل به منظور بیشینه کردن شاخص مورد بررسی تعیین خواهد شد.

تحلیل انرژی

برای تحلیل انرژی و اکسرژی، موتور در یک شرایط سامانه حجم کنترل یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. سوخت و هوای ورودی، کار مکانیکی، گرمای اتلافی و گازهای خروجی که با یک نرخ ثابت وارد و خارج می‌شوند علاوه بر این پیش‌فرض‌های ذیل در نظر گرفته می‌شود:

الف) هوای احتراق و گازهای خروجی، مخلوط گاز ایده آل هستند.

ب) اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل احتراق هوا، گازهای خروجی و جریان سوخت نادیده گرفته می‌شوند [۱۳].

ج) شرایط محیطی، فشار یک اتمسفر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود [۹].

^۳ Yasar

^۴ particulate matter

توان خروجی از حجم کنترل با استفاده از معادله محاسبه می‌شود که در آن ω سرعت زاویه‌ای (rad/s) و T گشتاور (kNm) می‌باشد.

$$\dot{W} = \omega T \quad (1)$$

از فرضیات روشن است که تنها انرژی ورودی در یک سامانه حجم کنترل از ارزش گرمایی سوخت تأثیر می‌پذیرد. بنابراین نرخ انرژی ورودی، \dot{E}_{fuel} ، در یک حجم کنترل با ارزش گرمایی پایین (H_u) بر حسب kJ/kg و دبی جرمی سوخت (\dot{m}_{fuel}) بر حسب kg/s متناسب است.

$$\dot{E}_{fuel} = \dot{m}_{fuel} H_u \quad (2)$$

بازده گرمایی (بازده گرمایی ترمزی) در یک سامانه حجم کنترل برابر است با نسبت کار خالص خروجی به انرژی سوخت:

$$BTE = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_{fuel}} \quad (3)$$

اکسرژی

موتور به‌عنوان یک سامانه باز یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. توازن اکسرژی برای یک سامانه حجم کنترل در شرایط حالت پایا را می‌توان به صورت رابطه زیر در نظر گرفت [۹].

$$\dot{E}x_w - \dot{E}x_{heat} = \sum \dot{m}_{in} \varepsilon_{in} - \sum \dot{m}_{out} \varepsilon_{out} - \dot{E}x_{dest} \quad (4)$$

که در آن:

$\dot{E}x_{heat}$: نرخ انتقال اکسرژی مربوط به گرمای اتلافی به محیط بر حسب کیلووات (انتقال از طریق سامانه خنک‌کننده).

$\dot{E}x_w$: نرخ اکسرژی کار که برابر توان ترمزی یا نرخ کار مفید موتور می‌باشد (kW).

\dot{m} : دبی جرمی (kg/s).

ε : اکسرژی ویژه (kJ/kg).

$\dot{E}x_{dest}$: نرخ تخریب اکسرژی (kW).

در انجام تحلیل اکسرژی، اکسرژی گرمای اتلافی به مقداری از اتلاف اکسرژی اتلاق می‌شود که از حجم کنترل به محیط انتقال می‌یابد و نرخ هدر رفت اکسرژی به تمام گرمای اتلافی که از سامانه خنک‌کننده در دمای مربوطه (T_{cw}) به دمای تعادل با محیط که برابر با 298 درجه کلونین ($T_o = 298 K$) انتقال می‌یابد گفته می‌شود.

$$\dot{E}x_{heat} = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_{cw}}\right) \dot{Q}_{loss} \quad (5)$$

نرخ اکسرژی کار خالص برابر با نرخ انرژی خالص (توان ترمزی) می‌باشد.

$$\dot{E}x_w = \dot{W} \quad (6)$$

از آنجایی که اکسرژی هوا برابر صفر می‌باشد بنابراین اکسرژی ورودی تنها شامل اکسرژی شیمیایی سوخت می‌باشد که با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_{fuel} \varepsilon_{fuel} \quad (7)$$

که در آن \dot{m}_{fuel} برابر با آهنگ مصرف سوخت (kg/s) و ε_{fuel} اکسرژی ویژه سوخت (kJ/kg) می‌باشد. اکسرژی شیمیایی سوخت را می‌توان با استفاده از رابطه محاسبه کرد [۷].

$$\varepsilon_{fuel} = H_u \varphi \quad (8)$$

که در آن H_u ارزش گرمایی پایین و φ ضریب اکسرژی شیمیایی می‌باشد.

برای سوخت‌های مایع، ضریب اکسرژی شیمیایی (φ) برابر است با:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{\alpha}{c} \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c}\right) \quad (9)$$

که در آن h, c, o, α به ترتیب نسبت جرمی هیدروژن، کربن، اکسیژن و سولفور سوخت می‌باشند (Kotas, 1995). اکسرژی خروجی شامل اکسرژی شیمیایی و ترمومکانیکی گاز خروجی می‌باشد. اکسرژی ترمومکانیکی عبارت است از:

$$\varepsilon_{tm} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (10)$$

که در آن s ، آنتروپی ویژه (kJ/kgK) و h ، آنتالپی ویژه (kJ/kg) گازهای خروجی می‌باشد. زیر نویس "0" بیانگر مقادیر متغیرها در شرایط تعادل با محیط یا محیط مرجع می‌باشد. مقادیر h و s را می‌توان به آسانی در مرجع [۹]، با استفاده از دمای خروجی و محیط مرجع به دست آورد. دمای خروجی گازها در این تحقیق به وسیله سنسور حرارتی که در آگزوز موتور قرار داشت اندازه‌گیری شد و با توجه به دمای محیط مورد آزمایش آنتروپی و آنتالپی گازها در این دو دما به دست آمد. اکسرژی شیمیایی گازهای خروجی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید. نسبت مولی گازهای خروجی با موازنه معادله واقعی احتراق سوخت به وسیله دستگاه آلاینده سنج محاسبه می‌شود [۴].

$$\varepsilon_{chem} = \bar{R} T_0 \ln \frac{y}{y^e} \quad (11)$$

که در آن \bar{R} ثابت گاز کامل، T_0 دمای محیط، y درصد مولی اختلاط گاز خروجی و y^e درصد مولی گاز در محیط بیرون می‌باشد [۹].

نرخ اکسرژی خروجی را می‌توان با استفاده از رابطه ذیل به دست آورد.

$$\dot{E}x_{ex} = \sum \dot{m}_i (\varepsilon_{tm} + \varepsilon_{chem})_i \quad (12)$$

که در آن \dot{m}_i دبی جرمی تولیدات حاصل از احتراق (kg/s) و ε_{chem} و ε_{tm} به ترتیب اکسرژی شیمیایی و اکسرژی ترمومکانیکی حاصل از گازهای خروجی (kJ/kg) می‌باشد.

اکسرژی مفهومی است که توسط دما، آنتروپی را با شرایط محیط مرتبط می‌سازد و اکسرژی تلف شده در خلال فرآیند، برابر با دمای محیط ضرب در نرخ آنتروپی تولیدی می‌باشد. به عبارت دیگر نرخ آنتروپی تولیدی (\dot{S}_{gen}) برابر با نسبت اکسرژی تخریب شده به دمای محیط می‌باشد و اعتبار این نسبت بسیار مهم است. زیرا کاربرد نسبت آنتروپی تشکیل برای تحلیل اتلاف انرژی نسبتاً روش جدیدی است که برای ارزیابی عملکرد سامانه کاربرد دارد [۶].

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{E}x_{dest}}{T_0} \quad (13)$$

بازده اکسرژی که تنها توان مفید موتور مدنظر می‌باشد برابر است با: [۵].

$$BEE = \frac{\dot{E}x_w}{\dot{E}x_{in}} \quad (14)$$

که در آن $\dot{E}x_w$ برابر است با نرخ اکسرژی کار و $\dot{E}x_{in}$ ، نرخ اکسرژی سوخت می‌باشد. همچنین، بازده اکسرژی که تمام مقادیر اکسرژی خروجی سامانه موتور مدنظر می‌باشد از رابطه زیر قابل محاسبه است که در آن اکسرژی خروجی برابر با مجموع اکسرژی حاصل از اکسرژی گرمای انتقالی، اکسرژی کار و اکسرژی گازهای خروجی می‌باشد.

$$\psi_T = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{E}x_{heat} + \dot{E}x_w + \dot{E}x_{ex}}{\dot{E}x_{in}} \quad (15)$$

مواد و روش‌ها

موتور تحت آزمایش در این تحقیق، موتور چهار سیلندر دیزلی پاشش مستقیم مدل OM314 می‌باشد. این موتور مجهز به سامانه پمپ واحد و نازل‌های ۵ تا ۹ سوراخه و سیستم کنترل الکترونیکی و دارای توربوشارژر و اینتر کولر و سیستم ترمز خفه کن می‌باشد. برای مصارف مختلف از جمله کامیونت، مینی‌بوس، دیزل ژنراتور، جرثقیل‌های متحرک، ماشین‌های صنعتی، کشاورزی و راه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایش‌ها باهدف ارائه مقایسه بازده گرمایی و بازده اکسرژی بین مخلوط‌های مختلف سوخت انجام می‌گیرد. متغیرهای تحت کنترل بار اعمالی از طرف دینامومتر، سرعت موتور و نوع سوخت می‌باشد. روش انجام این آزمایش طبق جدول آزمایش‌ها با استفاده از طرح مرکب مرکزی تدوین گردیده است بار و سرعت موردنظر به وسیله پانل کنترل دینامومتر اعمال گردید. روش‌های آماری متفاوتی برای طراحی آزمایش از جمله، طراحی آزمایش عاملی 2^k ، طراحی آزمایش عاملی با سطوح آمیخته، روش تاگوچی، روش آمیزه‌ای و روش سطح پاسخ وجود دارد. بسته به نوع فرآیند، منابع مالی در دسترس، تعداد سطوح موردنیاز، اطلاعات موردنیاز و نوع پارامترهای متغیر ورودی طرح مناسب جهت انجام آزمایش در تحقیقات انتخاب و طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. در طراحی آزمایش، مطابق با رابطه زیر که در آن x_1, x_2, x_3, \dots پارامترهای مختلف، ϵ خطای آماری که از منابع دیگر به دست می‌آید و y خروجی می‌باشد، هدف آن است که با تغییر دادن پارامترهای در نظر گرفته شده از یک مقدار به مقدار دیگر، شرایطی به وجود آورده شود که در خروجی تغییراتی مشاهده شود. سپس با استفاده از روش‌های تحلیل داده‌های آزمایش، میزان تأثیر هر یک از پارامترها را بررسی کرده و برای مقادیر جدید پارامترها، خروجی پیش‌بینی شود و در صورت نیاز فرآیند بهینه‌سازی گردد [۱۰].

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) + \epsilon \quad (۱۶)$$

روش سطح پاسخ شامل گروهی از روش‌های آماری و ریاضی است که می‌توانند برای تعیین روابط بین پاسخ (متغیر وابسته) و متغیرهای مستقل استفاده شوند. این روش، اثر متغیرها را چه به صورت تنها و چه به صورت ترکیبی بر روی فرایندها مشخص می‌کند و علاوه بر تجزیه و تحلیل متغیرها، یک مدل ریاضی غالباً از مرتبه دوم نیز ارائه می‌دهد و در نهایت فرآیند را بهینه می‌کند. شمای گرافیکی این روش سبب تعریف واژه سطح پاسخ شده است [۱۰].

در این تحقیق، از نرم‌افزارهای Design Expert 11، جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها، بهینه‌سازی نتایج، رسم نمودارها و شکل‌های گرافیکی استفاده گردید.

طرح مورد استفاده به نام طرح مرکب مرکزی می‌باشد که بیشترین کاربرد در میان طرح‌های روش سطح پاسخ را به خود اختصاص داده است [۳]. متغیرهای مستقل در این تحقیق عبارت‌اند از نسبت‌های مختلف سوخت‌های بیودیزل و دیزل، بار و سرعت موتور و پاسخ‌های موردنظر نیز شامل بازده گرمایی، بازده اکسرژی می‌باشد. بر اساس طرح مرکب مرکزی سطوح متغیرهای مستقل بر اساس مقادیر کد شده ۰، ± 1 و $\pm \alpha$ انتخاب می‌شود. α برابر مجذور تعداد متغیرهای مستقل می‌باشد [۳]. مقادیر کمینه و بیشینه موردنظر در آزمایش برای هر متغیر مطابق با کدهای ± 1 قرارداد می‌شود و با استفاده از معادله زیر سه مقدار کد شده دیگر (۰ و $\pm \alpha$) به دست خواهد آمد.

$$X = \frac{x - x_{ave}}{\Delta x} \quad (۱۷)$$

که در آن x متغیر مستقل کد نشده و X متغیر مستقل کد شده می‌باشد.

معادله مدلی که از طرح مورد اجرا به دست خواهد آمد برای هر یک از پاسخ‌ها به شکل زیر است [۳]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 a_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

که در آن y ، پاسخ پیش‌بینی شده (بازده گرمایی، بازده اکسرژی)، x_i و x_j متغیرهای مستقل کد شده، a_0 ، a_i و a_{ij} ضرایب مدل می‌باشند. پیش‌بینی معادلات مربوط روش سطح پاسخ با استفاده از روش حداقل مربعات حل می‌شود. این روش یک روش رگرسیونی چندگانه است.

نتایج و بحث

مدل ریاضی و اعتبار سنجی بازده گرمایی ترمزی

مشخصه بازده گرمایی موتور مدلی ریاضی از مرتبه دوم و بر اساس سه متغیر مستقل (درصد بیودیزل، سرعت و بار موتور) به صورت رابطه زیر ارائه می‌گردد.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 \quad (19)$$

جدول تجزیه واریانس برای مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار برای مشخصه بازده گرمایی موتور به صورت جدول زیر می‌باشد. مقادیر P-value برای مدل پیش‌بینی کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد و این نشان می‌دهد که این مدل از لحاظ آماری قابلیت پیش‌بینی تأثیرات متغیرهای مستقل را با خطای کمتر از یک درصد روی بازده گرمایی دارند. عبارات خطی، درجه دوم و متقابل مدل کلی بازده گرمایی نیز با P-value کمتر از ۰/۰۵ از لحاظ آماری اعتبار لازم در مدل را دارد.

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، تمام جملات خطی و درجه دوم تأثیر معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ بر روی بازده گرمایی دارند بنابراین وارد مدل پیش‌بینی می‌شوند. با توجه به ضرایب این جملات به جز عبارت خطی سرعت موتور که تأثیر معکوس بر روی بازده گرمایی دارد بقیه جملات اثر مستقیم بر روی بازده گرمایی دارند. تمام عبارات درجه دوم از لحاظ آماری معنی دارند و با تأثیر معکوس بر روی بازده گرمایی، وارد مدل می‌شوند. از میان جملات اثر متقابل تنها بین متغیرهای بیودیزل \times بار اثر متقابل معنی‌داری وجود دارد. بنابراین این جملات نیز با تأثیری هم‌جهت بر روی بازده گرمایی وارد مدل می‌شوند. بقیه جملات از لحاظ آماری اعتبار لازم را برای حضور در معادله پیش‌بینی ندارند.

مقادیر R^2 و R^2 تعدیل شده برای مدل پیش‌بینی به ترتیب ۷۵/۶۴ و ۷۰/۱۴ درصد بود. معادله زیر مربوط به مدل پیش‌بینی بازده گرمایی بر اساس اعداد واقعی (کد نشده) می‌باشد که در آن BTE بیانگر بازده گرمایی ترمزی موتور برحسب درصد، B نشان‌دهنده درصد بیودیزل در مخلوط سوخت، S سرعت موتور برحسب دور بر دقیقه و L بار موتور برحسب درصد می‌باشد. مقدار ثابت مدل پیش‌بینی بر اساس طرح کد شده بازده گرمایی برابر با ۳۲/۶۸ می‌باشد.

(۲۰)

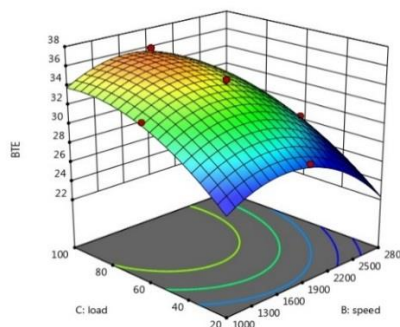
$$BTE(\%) = 9.54 + 0.01658S + 0.2237L + 0.0566B - 0.000005S^2 - 0.001487L^2 - 0.000716B^2 + 0.000884LB$$

جدول ۱: تجزیه واریانس عبارات مدل بازده گرمایی موتور

منبع	درجه آزادی	ضریب	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P-value
مدل	۳		۱۰۲/۲۰	۳۴/۰۷	۱۲/۸۴	۰/۰۰۰۲
عبارت خطی	۳		۱۰۲/۲۰	۳۴/۰۷	۱۲/۸۴	۰/۰۰۰۲
عبارت درجه دوم	۳		۳۹/۳۴	۱۳/۱۱	۲۴/۴۲	۰/۰۰۱
سرعت	۱	-۲/۱۸	۲۲/۹۰	۲۲/۹۰	۸/۶۳	۰/۰۰۹
بار	۱	۳/۵۸	۶۱/۸۳	۶۱/۸۳	۲۳/۲۹	۰/۰۰۲
بیودیزل	۱	۱/۹۰	۱۷/۴۷	۱۷/۴۷	۶/۵۸	۰/۰۰۲
بیودیزل×بار	۱	۳/۵۳	۱۲۵/۳	۱۲۵/۳	۲۳/۵	۰/۰۰۳
اثر متقابل	۳		۳/۳۲	۱/۰۴	۰/۳۴	۰/۷۹
خطا	۱۱		۴/۴۷	۳/۸۶	-	-
کل	۱۹		۱۴۴/۶۷			

تأثیر بار و سرعت بر روی بازده گرمایی ترمزی در سوخت اختلاط یافته

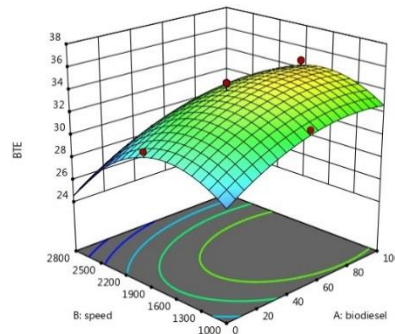
بازده گرمایی ترمزی بیانگر درصدی از انرژی سوخت می‌باشد که می‌تواند به توان مفید تبدیل شود. شکل زیر رابطه بین بار و سرعت موتور را برای سوخت حاصل از اختلاط ۵۰ درصد حجمی بیودیزل در ۵۰ درصد حجمی گازوییل را نشان می‌دهد (D₅₀B₅₀). همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش بار موتور به دلیل افزایش نسبت سوخت به هوا و دمای محفظه احتراق بازده گرمایی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت موتور بازده گرمایی تحت تمام شرایط کاری، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۱]. کاهش بازده گرمایی در سرعت‌های نسبتاً بالا به دلیل نبود زمان کافی برای پر شدن سیلندر و کاهش بازده حجمی موتور می‌باشد.



شکل ۲. نقشه رویه تأثیر متغیرهای بار و سرعت موتور بر روی بازده گرمایی برای سوخت D₅₀B₅₀

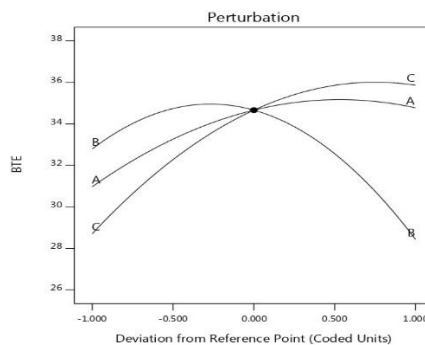
تأثیر سوخت بیودیزل بر روی بازده گرمایی ترمزی در سوخت اختلاط یافته

شکل رابطه بین بازده گرمایی و اختلاط سوخت‌های دیزل - بیودیزل را دربار کامل و سرعت ۲۸۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش میزان غلظت سوخت بیودیزل در مخلوط، بازده گرمایی افزایش می‌یابد. افزایش بازده گرمایی به خاطر افزایش میزان اکسیژن موجود در سوخت ترکیبی می‌باشد.



شکل ۳. نقشه رویه تأثیر متغیرهای درصد بیودیزل و سرعت بر روی بازده گرمایی دربار کامل.

نمودار پرشیدگی، مقایسه اثر همه پارامترها در یک نقطه خاص را امکان‌پذیر می‌کند. نقطه مرجع در نقطه میانی تمام عوامل که با کد صفر مشخص گردیده است. شیب یا انحنای تند یک پارامتر نشان می‌دهد که پاسخ به این پارامتر حساس است. خط نسبتاً صاف، غیر حساس بودن پاسخ را به تغییر در آن عامل خاص نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار پرشیدگی بازده گرمایی

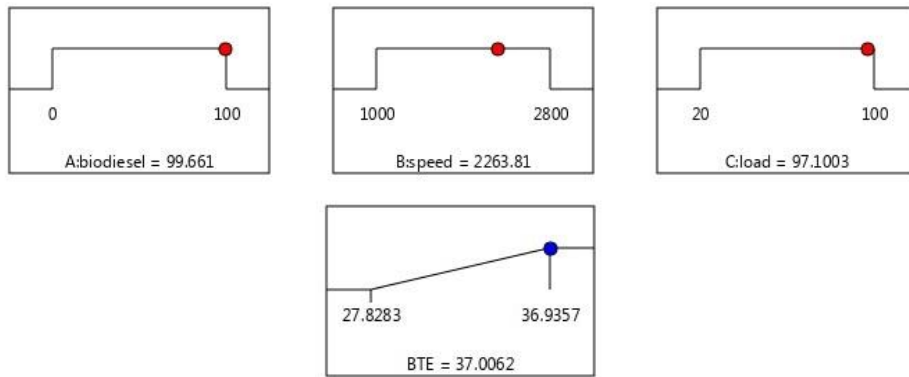
با توجه به نمودار بین متغیرهای بیودیزل، سرعت و بار، متغیر B سرعت شیب اش از همه بیشتر است و بیشترین حساسیت را برای خروجی ما ایجاد می‌کند.

بهینه‌سازی بازده گرمایی ترمزی موتور برای متغیرهای بیودیزل، سرعت و بار موتور

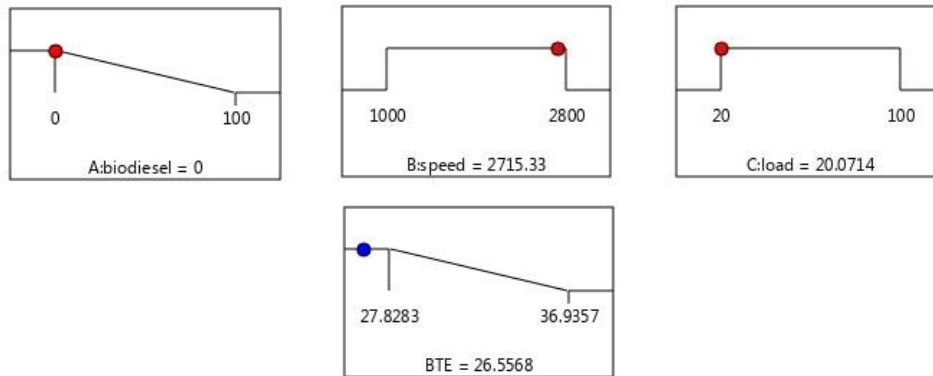
بیشترین بازده گرمایی برابر با ۳۷/۰۰۶ درصد بود که در سرعت ۲۲۶۳/۸۱ دور بر دقیقه و بار ۹۷/۱۰ درصد برای سوخت بیودیزل خالص (D₀B₁₀₀) به دست آمد. همچنین کمترین میزان بازده گرمایی ۲۶/۵۵ درصد بود که دربار اعمالی ۲۰ درصد و

سرعت دورانی ۲۷۱۵ دور بر دقیقه و برای سوخت دیزل خالص (D_{100B0}) رخ داد. با توجه به شکل درصد‌های بالای بیودیزل، دربارهای بالا و سرعت میانی موتور بیشترین مقدار بازده گرمایی را دارد.

(الف)



(ب)



شکل ۵: نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور بیشینه کردن بازده گرمایی ترمزی موتور (شکل الف) و کمینه کردن این مشخصه (شکل ب).

مدل ریاضی و اعتبار سنجی برای مشخصه بازده اکسرژی ترمزی موتور

جدول زیر تجزیه واریانس مدل‌های پیش‌بینی و درجه دوم مشخصه بازده اکسرژی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، P-value مدل پیش‌بینی کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد و این نشان می‌دهد که از لحاظ آماری این متغیرها با خطای کمتر از ۰/۰۱ توانایی برآورد تأثیرات متغیرهای مستقل را روی بازده اکسرژی موتور دارند. عبارات خطی، درجه دوم و اثر متقابل نیز از لحاظ آماری در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار می‌باشند و از لحاظ آماری اعتبار لازم را برای ورود به معادله پیش‌بینی بازده اکسرژی دارند. در جدول تجزیه واریانس ضرایب مختلف عبارات خطی، درجه دوم و اثر متقابل مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری که آن دسته از ضرایب که از لحاظ آماری معنی‌دار باشند (در سطح ۵ درصد) وارد مدل پیش‌بینی می‌شوند. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود کلیه ضرایب عبارات خطی در سطح یک درصد معنی‌دار بوده و اعتبار لازم را برای ورود به معادله پیش‌بینی بازده اکسرژی دارند. ضرایب خطی بار و سرعت موتور رابطه مستقیم و درصد بیودیزل رابطه معکوس با بازده اکسرژی دارد. جملات درجه دوم به جز بیودیزل و بیودیزل، قادرند با خطای کمتر از ۰/۰۵ تغییرات بازده اکسرژی را پیش‌بینی کنند و با

یک تأثیر معکوس بر روی بازده اکسرژی وارد مدل پیش‌بینی می‌شوند. از بین عبارات متقابل، بین متغیرهای بار و سرعت، بیودیزل و سرعت رابطه متقابل معنی‌دار وجود دارد به طوری که اثر متقابل بین متغیرهای بار و سرعت، رابطه مستقیم و سرعت و بیودیزل رابطه معکوس با بازده اکسرژی دارند. ضرایب جملات دیگر به خاطر اینکه P-value آنها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد از لحاظ آماری در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نبوده، بنابراین وارد مدل پیش‌بینی بازده اکسرژی نمی‌شوند.

جدول ۲: تجزیه واریانس عبارات مدل بازده اکسرژی موتور

منبع	درجه آزادی	ضریب	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	p-value
مدل	۶		۱۱۰/۰۹	۱۸/۳۵	۵۵/۶۷	۰/۰۰۰۱
عبارت خطی	۳		۷۲/۴۸	۲۴/۱۶	۹/۲۳	۰/۰۰۰۹
سرعت	۱	-۰/۰۸	۱۱/۴۰	۱۱/۴۰	۱۳/۴	۰/۰۰۳
بار	۱	۳/۵۰	۵۹/۰۷	۵۹/۰۷	۱۶۵/۴۲	۰/۰۰۰۱
بیودیزل	۱	۱/۶۷	۱۳/۳۹	۱۳/۳۹	۴۰/۶۱	۰/۰۰۱
عبارت درجه دوم	۳		۳۳/۳۹	۱۱/۱۳		
سرعت × سرعت	۱	-۴/۰۵	۲۹/۵۵	۲۹/۵۵	۸۲/۷۵	۰/۰۰۰۱
بار × بار	۱	-۱/۷۵	۵/۵۶	۵/۵۶	۱۵/۵۷	۰/۰۱۹
اثر متقابل	۳		۸/۵۰	۲/۸۳	۱/۱۰	۰/۰۳۸
سرعت × بیودیزل	۱	-۲/۰۷	۴/۲۰۵	۴/۲۰۵	۴/۹۴	۰/۰۴۵
خطا	۱۳		۴/۲۸	۰/۳۲۹		-
کل	۱۹		۱۱۴/۳۷			-

مقادیر R^2 و R^2 تعدیل شده برای مدل پیش‌بینی به ترتیب ۷۵/۸۴٪ و ۸۸/۶۹٪ می‌باشد که نشان می‌دهد همبستگی نسبتاً خوبی بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی بازده اکسرژی وجود دارد به طوری که مدل پیش‌بینی قادر است ۷۵/۲۶ درصد کل تغییرات بازده اکسرژی را در شرایط مورد آزمایش تشریح و پیش‌بینی کند. مدل به دست آمده بر اساس داده‌های کد نشده عبارت است از:

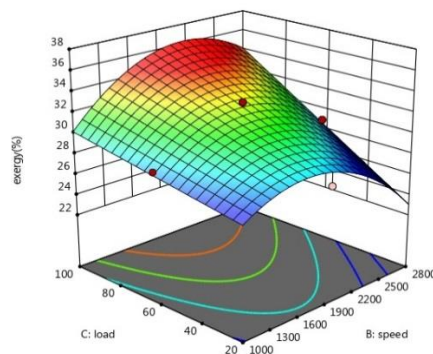
$$BEE = 6.42 + 0.01779S + 0.1109L + 0.1207B - 0.000005S^2 - 0.001098L^2 + 0.000057SL - 0.000046SB \quad (21)$$

که در آن BEE بیانگر بازده اکسرژی ترمزی موتور برحسب درصد، B نشان‌دهنده درصد بیودیزل در مخلوط سوخت، S سرعت موتور برحسب دور بر دقیقه و L بار موتور برحسب درصد می‌باشد. مقدار ضریب ثابت مدل کد شده برابر با ۳۱/۵۳۹ می‌باشد.

تأثیر بار و سرعت موتور بر روی بازده اکسرژی در سوخت اختلاط یافته

شکل زیر رابطه بین بار و سرعت موتور را به صورت نمودار کانتور و رویه برای سوخت $D_{50}B_{50}$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل همانند بازده گرمایی، با افزایش بار موتور بازده اکسرژی نیز افزایش می‌یابد. علت این افزایش ممکن است به این خاطر باشد که چون با افزایش بار موتور توان ترمزی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر توان ترمزی رابطه مستقیم با بازده اکسرژی دارد بنابراین

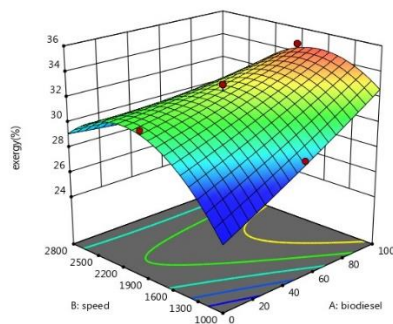
بازده اکسرژی افزایش می‌یابد. اگرچه با افزایش بار موتور مصرف سوخت افزایش می‌یابد ولی افزایش توان ترمزی بسیار بیشتر از افزایش مصرف سوخت می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش بار موتور دمای محفظه احتراق نیز افزایش پیدا می‌کند که شرایط را برای ایجاد یک احتراق مناسب فراهم می‌کند و همچنین موجب افزایش فشار داخل سیلندر می‌گردد. با افزایش سرعت موتور بازده گرمایی تحت تمام شرایط کاری موتور ابتدا افزایش و در سرعت‌های میانه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. افزایش اولیه بازده گرمایی ممکن است به خاطر افزایش نسبت هوا به سوخت و همچنین افزایش گشتاور موتور باشد که موجب افزایش توان ترمزی می‌گردد. کاهش بازده گرمایی در سرعت‌های بالا ممکن است به دلیل کاهش بازده حجمی محفظه احتراق باشد چون که در سرعت‌های بالا زمان کافی برای پر شدن سیلندر وجود ندارد.



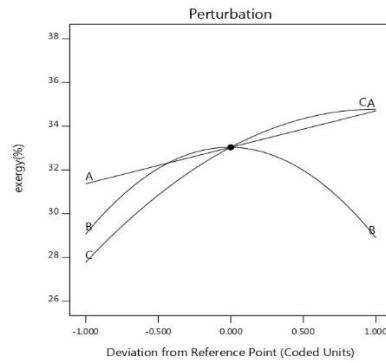
شکل ۶. نقشه رویه تأثیر متغیرهای درصد بار و سرعت بر روی اکسرژی دربار کامل.

تأثیر سوخت بیودیزل بر روی بازده اکسرژی در سوخت اختلاط یافته

با توجه به شکل با افزایش غلظت بیودیزل بازده اکسرژی افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر ممکن است به خاطر بهبود شرایط احتراق به واسطه افزایش میزان اکسیژن موجود در مخلوط سوخت باشد.



شکل ۷. نقشه رویه تأثیر متغیر درصد بیودیزل بر روی بازده اکسرژی در سرعت‌های مختلف و بار کامل.



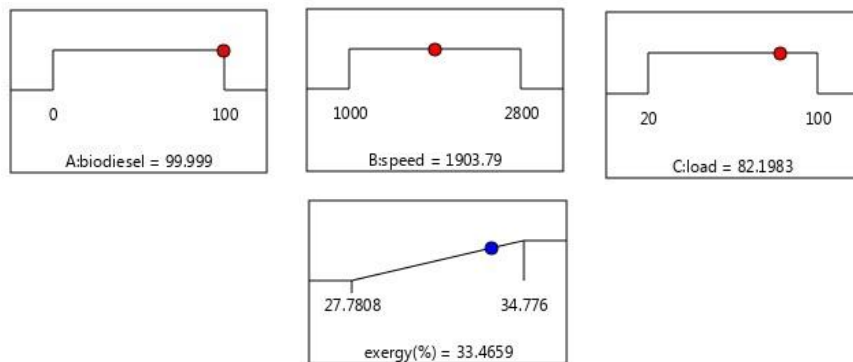
شکل ۸: نمودار پرتیبدگی بازده اکسرژی

با توجه به نمودار، A بیودیزل، B سرعت و C بار می‌باشد که این نمودار اثر تمامی متغیرها را در نقطه مرکزی به ما نمایش می‌دهد.

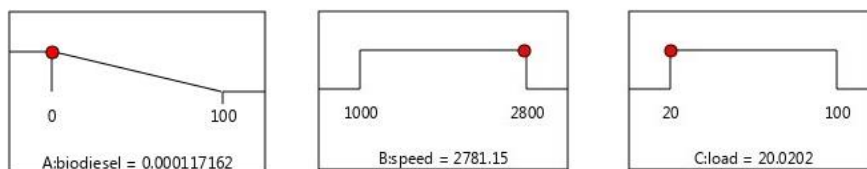
بهینه‌سازی بازده اکسرژی موتور برای متغیرهای بیودیزل، سرعت و بار موتور

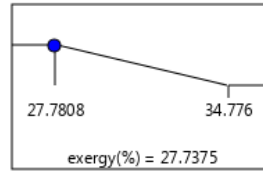
نمودار زیر بهینه‌سازی متغیرهای درصد بیودیزل و همچنین بار و سرعت موتور را به منظور بیشینه کردن و کمینه کردن بازده اکسرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشترین مقدار بازده اکسرژی ۳۳/۴۶ در سرعت دورانی ۱۹۰۳ دور بر دقیقه دربار اعمالی ۸۲ درصد و برای ترکیب سوختی بیودیزل خالص (D_0B_{100}) رخ می‌دهد. همچنین دربار اعمالی ۲۰ درصد و سرعت دورانی ۲۷۸۱ دور بر دقیقه و برای سوخت بیودیزل خالص، کمترین میزان بازده اکسرژی (۲۷/۷۳ درصد) اتفاق می‌افتد.

(الف)



(ب)

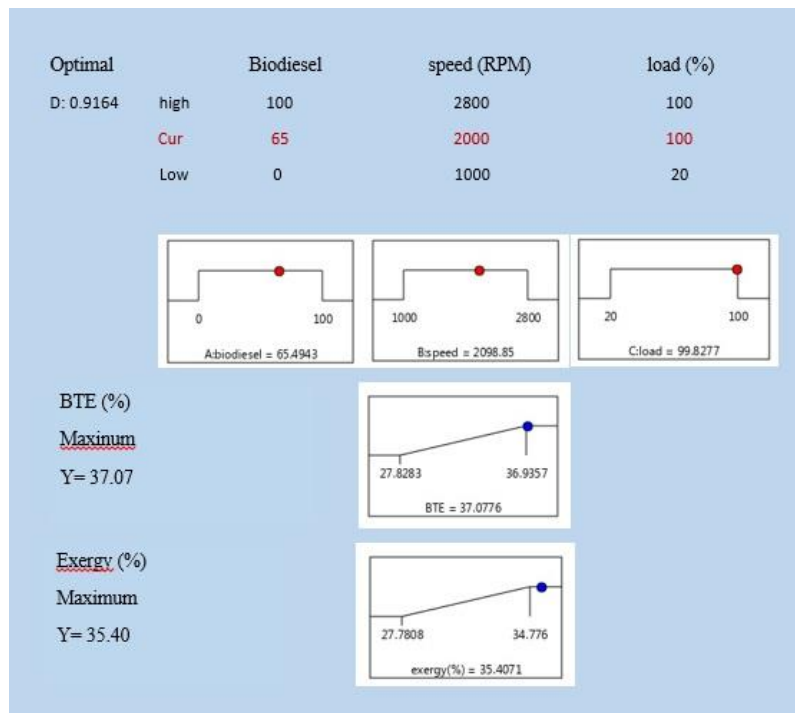




شکل ۹: نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور بیشینه کردن بازده اکسرژی موتور (شکل الف) و کمینه کردن این مشخصه (شکل ب)

بیشینه کردن پارامترهای عملکردی

بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ را برای پیدا کردن نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور بیشینه کردن مشخصه‌های بازده گرمایی و اکسرژی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و بار اعمالی ۱۰۰ درصد موتور و برای ترکیب سوختی $D_{35} B_{65}$ ، حالت بهینه موردنظر و با مطلوبیت ۹۱ درصد اتفاق می‌افتد که در این شرایط بهینه میزان بازده گرمایی و بازده اکسرژی به ترتیب ۳۷/۰۷ و ۳۵/۴۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰. نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور بیشینه کردن پارامترهای عملکردی BTE و Exergy

نتیجه‌گیری

مدل‌های درجه دوم پیش‌بینی، برای مشخصه‌های عملکردی از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شناخته شد، به طوری که متغیرهای مستقل بار، سرعت موتور و نسبت‌های حجمی مختلف بیودیزل در سوخت اختلاط یافته به خوبی توانستند تغییرات متغیرهای وابسته (سطوح پاسخ) را پیش‌بینی کنند.

با افزایش میزان غلظت سوخت بیودیزل در مخلوط، بازده گرمایی افزایش می‌یابد. افزایش بازده گرمایی به خاطر افزایش میزان اکسیژن موجود در سوخت ترکیبی می‌باشد میزان اکسیژن در سوخت افزایش پیدا کند احتراق بیشتر و سوخت بهتر مشتعل می‌شود

. پس با افزایش درصد سوخت بیودیزل میزان اکسیژن موجود در سوخت اختلاط یافته افزایش می‌یابد که باعث بهبود فرایند احتراق می‌گردد در نتیجه بازده گرمایی افزایش می‌یابد.

بازده گرمایی ترمزی با افزایش بار موتور افزایش یافت. همچنین با افزایش سرعت موتور تحت تمام شرایط کاری موتور این مشخصه ابتدا افزایش و در سرعت‌های میانی به بیشترین مقدار خود رسید و سپس کاهش پیدا کرد. با افزایش غلظت بیودیزل در سوخت اختلاط یافته بازده گرمایی نسبت به سوخت دیزل افزایش پیدا کرد. بیشترین بازده گرمایی برابر با ۳۷/۰۰۶ درصد بود که در سرعت ۲۲۶۳ دور بر دقیقه و بار ۹۷ درصد برای سوخت بیودیزل خالص ($D_{0}B_{100}$) به دست آمد.

با افزایش درصد بیودیزل در سوخت‌های اختلاط یافته بازده اکسرژی نسبت به سوخت دیزل افزایش پیدا کرد دلیل این امر ممکن است به خاطر بهبود شرایط احتراق به واسطه افزایش میزان اکسیژن موجود در مخلوط سوخت باشد به طوری که بیشترین مقدار بازده اکسرژی به میزان ۳۳/۴۶ درصد، در سرعت دورانی ۱۹۰۳ دور بر دقیقه دربار اعمالی ۸۲ درصد و برای سوخت بیودیزل خالص اتفاق افتاد.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه به منظور پیشینه کردن مشخصه‌های بازده گرمایی و اکسرژی نشان داد که در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و بار اعمالی ۱۰۰ درصد موتور و برای ترکیب سوختی $D_{35} B_{65}$ ، حالت بهینه مورد نظر و با مطلوبیت ۹۱ درصد اتفاق افتاد.

منابع

1. Canakci M, Ozsezen AN, Arcaklioglu E, 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* 2009;36:9268–80.
2. Canakci M. Performance and emissions characteristics of biodiesel from soybean oil. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automobile Engineering* 2006;219:915–22.
3. Castillo ED. *PROCESS OPTIMIZATION: A Statistical Approach*. New York: Springer; 2007.
4. Dincer I, cengel YA. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Journal of entropy* 2001; 3: 116-149.
5. Dewulf J, Langenhove HV, Muys B, Bruers S, Bakshi, BR, Grubb GF, Paulus DM, Sciubba E. Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. *Journal of environmental science and technology* . 2007;42: 2221-2232.
6. Ebiana AB, Savadekar RT, Patel KV. Entropy Generation/Availability EnergyLoss Analysis Inside MIT Gas Spring and “Two-Space” Test Rigs, NASA/CR—2006- 214339, <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2006/CR-2006-214339.pdf>, (2006)
7. Lin Y, Wu YG, Chang CT. Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends. *Fuel* 2007;86:1772–80.
8. Montgomer DC. *Design and Analysis of Experiments*, fifth ed. John Wiley and Sons Inc 2001, New York; pp. 427–500.
9. Moran MJ, Shapiro HN. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York; 2000, pp: 1572–8943, doi:10.1023/A: 10101855083208, 1388–6150 (Print).
10. Myers RH, Montgomery DC. *Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 2nd ed.; John Wiley & Sons 2002: New York.



11. Ozkan M, Ergenc AT, Deniz O. Experimental performance analysis of biodiesel, traditional diesel and biodiesel with glycerine. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 2005;29:89-94.
12. Pereira PA, Santos ETS, Ferreira TF, de Andrade JB. Determination of methanol and ethanol by gas chromatography following air sampling onto florasil cartridges and their concentrations at urban sites in the three largest cities in Brazil. *Talanta* 1999; 49: 245-252.
13. Sayin C, Hosoz M, Canakci M, Kilicaslan I. Exergy and energy analysis of a gasoline engine, *Int. J. Energy Res* 2007;31: 259-273.
14. Shukuya M. Exergy concept and its application to the built environment. *Journal of buiding and environment* 2008; 17: 36-42.
15. Wang WG, Lyons DW, Clark NN, Gautam M, Norton PM. Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. *Environmental Science and Technology* 2000; 34: 933-939.
16. Yasar H. First and second law analysis of low heat rejection diesel engine. *J. Energy Inst* 2008; 81: 48-53



Analysis of thermal and exergy efficiency of diesel & biodiesel combustion process

^{1*}Soudeh Shaghaghi , Mohammad Ghahderijani , Mohammad hadi Dehrouyeh

1. PhD student of Agricultural Mechanization, Research University of Science, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Research University of Science, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Islamic Azad University of Roudehen, Tehran, Iran

Abstract

Internal combustion engine (ICE) simulation is a well-known, prosperous technique to study the engine's performance, and help to launch new evaluation plans and achieve remarkable developments. This study was intended to evaluate the effects of the engine's load and speed as well as various fuel blending on the performance characteristics of the OM314 diesel engine, aiming to analyze thermal and exergy efficiency. When designing experiments, the optimal points of the independent variables were estimated using Design expert 11 to minimize and/or maximize the response levels. Second-order models obtained using Response surface methodology (RSM) to predict the effect of input variables on response levels were significant at the 1%. Among the independent variables, the engine's load and speed had the highest impact on thermal efficiency. The highest thermal and exergy efficiency was observed when utilizing pure biodiesel compared to other fuel components. The highest exergy efficiency (33.46%) was observed at the 1903 rpm, under applying 82% load, and when using pure biodiesel (D₀B₁₀₀). The least exergy efficiency (27.73%) was observed under applying the 20% load, at 2781 rpm, and when using pure biodiesel. The highest thermal efficiency (37.006%) was observed at 2263 rpm, under applying the 97% load, and when using pure biodiesel (D₀B₁₀₀). The highest thermal efficiency was observed at high percentages of biodiesel, under high loading and at the engine's intermediate speeds.

Keywords: Biodiesel, Diesel, Thermal Efficiency, Exergy efficiency, central composite design.

*Corresponding author
Soodeh.shaghaghi@srbiau.ac.ir