

بهینه‌سازی متغیرهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از سوخت دیزل - روغن الکل به کمک روش سطح پاسخ

سید محمد صفی‌الدین اردبیلی^{۱*}، حسن ذکی دیزجی^۲ و محمدجواد شیخ داودی^۳

۱- استادیار، مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، m.safieddin@scu.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، hzakid@scu.ac.ir

۳- استاد، مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، javad1950@yahoo.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۳۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۸/۲۹، پذیرش: ۹۶/۹/۲۳)

چکیده: امروزه، تمایل به تحقیق در زمینه سوخت‌های زیستی برپایه الکل افزایش یافته است. روغن الکل، الکل با زنجیره طولانی بوده که محصول جانبی فرایند تولید بیواتانول به‌شمار می‌رود. در این تحقیق، به بررسی اثر درصد روغن الکل (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪)، بار (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) و سرعت موتور (۱۷۰۰، ۲۰۰۰، ۲۳۰۰، ۲۶۰۰ و ۲۹۰۰ rpm) بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل به کمک روش سطح پاسخ (RSM) و طرح آزمایش مرکب مرکزی (CCD) پرداخته شد. بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور بیشینه‌کردن توان، گشتاور موتور و کمینه‌کردن مصرف سوخت ویژه و آلاینده‌ها شامل CO، CO₂، UHC و NO_x انجام شد. ترکیب بهینه حاصل از نرم‌افزار برای میزان روغن الکل، سرعت و بار موتور به ترتیب ۱۱/۵۷٪، ۲۲۶۴ rpm و ۴۰٪ به‌دست آمد و مقادیر گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه برای این ترکیب بهینه به ترتیب ۱۰/۹۹ Nm، ۱/۹ Kw و ۳۵۴/۵ Kg/Kw.hr و آلاینده‌های NO_x و UHC در این نقطه به ترتیب ۸۷/۷ ppm و ۵۴/۵ ppm و همچنین آلاینده‌های CO₂ و CO به ترتیب برابر ۲/۳۴ و ۰/۱۹ درصد حجمی به‌دست آمدند. نتایج نشان داد، با افزایش میزان نسبت روغن الکل، توان و گشتاور موتور در دوره‌های مختلف موتور افزایش یافته در حالی که میزان NO_x و UHC کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: روغن الکل، عملکرد موتور، آلاینده‌های خروجی، روش سطح پاسخ

مقدمه

منابع پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در آینده انرژی جهان دارند. کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی به‌طور قابل توجهی می‌تواند انتشار آلاینده‌های مضر را کاهش داده و این امر با جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر امکان‌پذیر است [۱]. منابع انرژی نقش مهمی در آینده جهان ایفا می‌کنند. مهم‌ترین منابع تولید انرژی، در موتورهای احتراق داخلی و ماشین‌های حرارتی، سوخت‌های فسیلی‌اند. افزایش غلظت آلاینده‌های خطرناکی نظیر NO_x، SO₂ و CO₂ ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی در موتورهای احتراقی یکی از عوامل اصلی آلودگی جو زمین به‌شمار می‌رود [۲].

نتایج تحقیقات نشان داد که استفاده از الکل در ترکیب با سوخت دیزل در موتور بر برخی خواص سوخت نظیر گرانی، ارزش حرارتی، رطوبت و عدد ستان آن تاثیر می‌گذارد [۳، ۴]. الکل‌ها، به‌دلیل داشتن گروه OH، میزان اکسیژن موجود در محفظه احتراق را افزایش می‌دهند. تحقیقات بسیاری استفاده از افزودنی‌های الکلی را برای افزایش عملکرد و بازده احتراق پیشنهاد داده‌اند [۵، ۶]. همچنین، بسیاری از مطالعه‌ها نشان داد تاخیر در اشتعال هنگام استفاده از ترکیبات الکلی در ترکیب با سوخت دیزل افزایش یافته و کاهش چشمگیری در میزان آلاینده‌ها مشاهده شد [۷]. در تحقیقی، به بررسی اثر ترکیب‌های

مختلف اتانول در موتور دیزل پرداخته شد. میزان افزایش توان ترمزی و میزان آلاینده‌های CO و UHC به ترتیب ۷/۵ درصد، ۵۵ درصد و ۳۶ درصد گزارش شد. میزان بهینه ترکیب دیزل ۸۵ درصد-اتانول ۱۵ درصد گزارش شد. همچنین، میزان آلاینده‌های UHC و CO به ترتیب ۴۳/۳ درصد و ۳۴ درصد افزایش داشت [۸]. مخلوط اتانول تا ۲۰ درصد حجمی به راحتی می‌تواند به همراه دیزل و بیودیزل، بدون نیاز به تغییرات اساسی در موتور اشتعال تراکمی، استفاده شود. مخلوط سوخت‌های اتانول، دیزل و بیودیزل محتوای انرژی تقریباً یکسانی با سوخت‌های فسیلی دارند [۹، ۱۰]. تحقیق دیگری نیز در زمینه کاربرد ترکیب‌های متفاوت اتانول-دیزل-بیودیزل (BDE25 و BDE3، BDE5، BDE15) در شرایط بار مختلف انجام شده است. نتایج تجربی به دست آمده نشان داد میزان آلاینده‌ها وابستگی زیادی به شرایط عملکردی و میزان سوخت ترکیب شده با دیزل دارد. نتایج نشان داد ترکیب اتانول-دیزل میزان CO را نسبت به سوخت دیزل افزایش داده، در حالی که میزان NO_x را کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج تحقیق میزان ۵۰ درصد کاهش در میزان آلاینده HC را نشان داد [۱۱]. در سال‌های اخیر، استفاده از الکل‌های با زنجیره طولانی، به دلیل انرژی بالاتر، عدد ستان بیشتر، ثبات ترکیب بهتر، همچنین، افزایش کیفیت احتراق مولکول‌های الکل نسبت به الکل‌های دیگر نظیر اتانول و متانول، مورد توجه سایر محققان قرار گرفته‌اند [۱۲، ۱۳]. روغن الکل^۱ نمونه‌ای از الکل‌های با زنجیره طولانی است. روغن الکل در حقیقت محصول جانبی فرایند تولید بیواتانول در طی فرایند تخمیر است. خواص فیزیکی و ترکیبات مختلف روغن الکل در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۴]. امروزه، روغن الکل به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی معرفی شده است که می‌تواند مشکل دوفازی شدن مخلوط بنزین-اتانول را برطرف کند [۱۵]. همچنین، افزودن روغن الکل باعث افزایش عدد اکتان شده و در نتیجه از پدیده کوبش^۲ و خوداشتعالی^۳ در موتورهای اشتعال جرقه جلوگیری می‌کند [۱۶].

جدول ۱ - خواص فیزیکی ترکیبات مختلف روغن الکل [۱۴]

Table 1- Physical properties of fusel oil constituent

Component	Boiling point (°C)	Density (g/cm ³)	Volumetrically %
i-amyl alcohol	131.1	0.8104	61.52
i-butyl alcohol	108	0.802	15.87
n-butyl alcohol	117.73	0.8098	0.708
n-propyl alkyl	91.7	0.8034	0.704
Ethanol	78.4	0.789	8.98
Water	100	1	12.23

در مطالعه‌ای ترکیبات مختلف روغن الکل به بنزین اضافه شده و به بررسی عملکرد و میزان آلاینده‌ی موتور بنزینی پرداخته شد. نتایج نشان داد میزان آلاینده‌های CO و HC به ترتیب ۲۱ و ۲۵ درصد افزایش یافته و میزان NO_x، ۳۱ درصد کاهش می‌یابد [۱۷].

متغیرهای زیادی بر توان و گشتاور اثرگذارند. از این رو، یک تحلیل چندمتغیره سیستماتیک^۴ می‌تواند دانش دقیقی درباره ویژگی‌های عملکردی موتور احتراقی در مقایسه با روش یک‌متغیره فراهم آورد. در مسایل چندمتغیره، استفاده از تکنیک‌های غیرخطی روش بسیار مناسب و اقتصادی برای بررسی اثرات متغیرهای مورد آزمون است [۱۸]. امروزه، روش سطح پاسخ^۵ به عنوان روش بسیار مفید در مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای شیمیایی تولید سوخت‌های زیستی و همچنین بهینه‌سازی عملکرد موتور استفاده شده است [۱۹]. تحقیق در زمینه کاربرد روغن الکل در موتورهای دیزل اندک است. در تحقیقی، به بررسی اثر سوخت روغن الکل-دیزل بر عملکرد و آلاینده‌ی موتور دیزل پرداخته شد. در این تحقیق، به بررسی اثر

1. Fusel oil
2. Knock
3. Auto-ignition
4. Systematic multivariate analysis
5. Response surface methodology

ترکیب F₂₀ (دیزل ۸۰٪-روغن الکل ۲۰٪) بر پارامترهای عملکردی، احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی موتور دیزل تک‌سیلندر پرداخته شد. نتایج این تحقیق افزایش در میزان گشتاور و توان موتور در سرعت‌های پایین را نسبت به سوخت دیزل نشان داد. میزان آلاینده CO₂، با افزایش دور و بار موتور، افزایش یافت. همچنین، در سرعت متوسط ۱۸۰۰ rpm، به میزان ۳ تا ۱۰ درصد در میزان CO₂ نسبت به دیزل افزایش مشاهده شد [۲۰].

با بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کاربرد روغن الکل در موتور دیزل، پژوهشی در زمینه اثر ترکیب‌های مختلف سوخت دیزل-روغن الکل بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل مشاهده نشد. لذا، در این مطالعه، به بررسی اثر ترکیب‌های مختلف سوخت دیزل-روغن الکل بر عملکرد و میزان آلایندگی موتور دیزل سبک پرداخته شد. در این تحقیق، روش سطح پاسخ به‌منظور بهینه‌سازی ترکیب سوخت، سرعت و بار موتور، با هدف توان بیشتر و میزان آلاینده و مصرف سوخت ویژه کمتر، استفاده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، به‌منظور بررسی عملکرد موتور دیزل تک‌سیلندر از ترکیب سوخت دیزل-روغن الکل استفاده شد. نقطه اشتعال و چگالی روغن الکل مطابق با استاندارد ASTM D4052 به ترتیب ۴۰ °C و ۸۴۵ kg/m³ به دست آمد. به‌منظور بررسی اثر پارامترهای نسبت سوخت، بار و دور بر عملکرد و میزان آلاینده‌های موتور، از روش سطح پاسخ استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار Design Expert ver.10 استفاده شد.

جدول ۲ متغیرهای مستقل و سطوح مورد استفاده در این کار پژوهشی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، از روش CCD^۱ با ۵ سطح مختلف روغن الکل (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪)، بار (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) و سرعت موتور (۱۴۰۰، ۲۰۰۰، ۱۷۰۰، ۲۳۰۰ و ۲۶۰۰ rpm) استفاده شد.

شکل کلی مدل آماری برای پیش‌بینی عامل y براساس متغیرهای X_1, X_2, \dots, X_k مطابق رابطه (۱)، نشان داده شده است.

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (1)$$

نوع تابع f ، در نهایت، توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی خواهد شد. در این رابطه، ε بیانگر اثر متغیرهای دیگری (میزان خطا) است که ممکن است بر مقدار عامل y تاثیرگذار باشند، اما در تابع f در نظر گرفته نشده‌اند.

جدول ۲- سطوح انتخابی برای متغیرهای مستقل

Table 2- Experimental levels of the independent variables

Independent variable	X _i	Range and levels				
		-α	-1	0	+1	+α
Fusel oil (%)	X ₁	0	5	10	15	20
Speed (rpm)	X ₂	1400	1700	2000	2300	2600
Load (%)	X ₃	0	25	50	75	100

در این تحقیق، از سامانه آزمون موتور در مجموعه آزمایشگاه‌های انرژی تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. در این سامانه، از دینامومتر جریان گردابی^۲ مدل WE400 ساخت شرکت مهندسی مبتکران پارس‌اندیش برای اندازه‌گیری گشتاور، سرعت دورانی و توان موتور دیزل لمباردینی^۳ مدل 3 LD 510 با بیشینه توان ۱۲ اسب بخار استفاده شد. جدول ۳ مشخصات موتور دیزل تک‌سیلندر هواخنک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

1. Central Composite Design
2. Eddy Current
3. Lombardini

جدول ۳- مشخصات موتور دیزل تک‌سیلندر

Table 3- Technical specifications of the single-cylinder diesel engine

Brand	Lombardini
Model	3LD 510
Weight	60 Kg
Type	4stroke
Displacement	510 Cm ³
Bore	85 mm
Stroke	90 mm
Power	9 kW
Torque	33 N.m

برای اندازه‌گیری میزان آلاینده‌گی موتور از دستگاه آلاینده‌سنج AVL DITEST GAS 1000 ساخت شرکت AVL اتریش با قابلیت اندازه‌گیری چهار آلاینده CO₂، CO، UHC و NO_x استفاده شد. طرحواره و تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

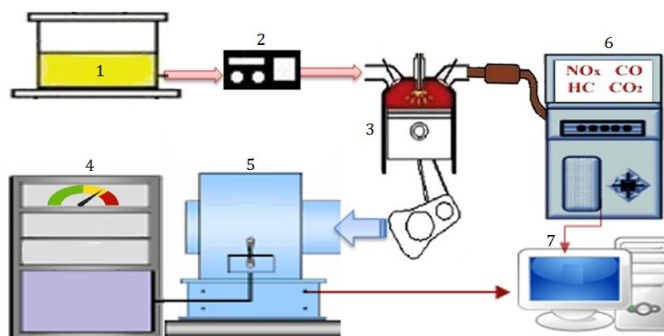


Figure 1- The schematic view of the engine test bed: 1- Fusel, oil 2- Fuel, consumption meter, 3- Diesel engine, 4- Dynamometer control panel, 5- Dynamometer, 6- Gas Analyzer, 7- Computer

شکل ۱- طرحواره تجهیزات مورد استفاده: (۱) روغن الکل (۲) اندازه‌گیری مصرف سوخت (۳) موتور دیزل (۴) سامانه کنترل دینامومتر (۵) دینامومتر (۶) دستگاه آلاینده سنج (۷) رایانه

در دینامومتر، اعمال بار به وسیله عبور جریان از سیم‌پیچ صورت گرفته و میزان بار وارده بر محور موتور توسط نیروسنج متصل به دینامومتر اندازه‌گیری شد. در طول انجام آزمایش، میزان سوخت مصرفی توسط سامانه اندازه‌گیری مصرف سوخت تعیین شد. برای تغییر دور و دستیابی به حالت‌های متفاوت بازبودن در پیچه گاز، از یک سامانه کنترل خودکار دور موتور، که اصلی‌ترین قسمت آن شامل سامانه کنترل و الکتروموتور متصل به سیم گاز بود، استفاده شد. همچنین، سامانه خنک‌کننده دینامومتر در طول آزمایش‌ها، به منظور کنترل دمای دینامومتر، استفاده شد. در این تحقیق، اثر درصد ترکیب سوخت روغن الکل-دیزل، دور موتور و بار وارد شده بر تغییرات توان، گشتاور و میزان مصرف سوخت موتور و همچنین بر میزان انتشار گازهای آلاینده موتور بررسی شد. آزمون‌ها، به منظور دستیابی به ترکیب بهینه سوخت و بار موتور برای داشتن بالاترین بازده، کمترین مصرف سوخت و پایین‌ترین میزان آلاینده‌گی، توسط روش سطح پاسخ انجام شد.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد موتور دیزل تک‌سیلندر

نتایج حاصل از تجزیه آماری برای توان و گشتاور موتور دیزل تک‌سیلندر در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل برای گشتاور و توان موتور در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. پارامترهای دور موتور و بار به ترتیب در

سطح ۵ درصد و ۱ درصد معنی دار شد. اثر نسبت سوخت روغن الکل-دیزل بر توان موتور معنی دار نشد، در حالی که برای گشتاور موتور در سطح ۵ درصد اثر معنی دار مشاهده شد. با وجود این، اثر متقابل نسبت سوخت روغن الکل-دیزل و دور موتور و نیز درصد بار موتور و دور موتور در سطح ۵٪ معنی دار بود. مدل رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و توان به صورت معادله درجه ۲ در رابطه (۲) به دست آمد.

$$P = 2.37 + 1.03X_3 + 0.18X_1X_3 + 0.17X_2X_3 + 0.07X_1^2 - 0.097X_2^2 \quad (2)$$

جدول ۴- نتایج حاصل از تجزیه آماری توان موتور

Table 4- ANOVA table for brake power

Source	df	Sum of square	Mean square	F value	P value
Model	9	19.13	2.13	30.77	<0.0001
X ₁	1	0.037	0.037	0.53	0.481
X ₂	1	0.66	0.66	9.56	0.0114
X ₃	1	17.17	17.17	248.55	<0.0001
X ₂ × X ₁	1	0.0524	0.0524	0.076	0.78
X ₃ × X ₁	1	0.36	0.36	5.18	0.0361
X ₃ × X ₂	1	0.045	0.045	0.663	0.036
X ₁ ²	1	0.18	0.18	2.67	0.013
X ₂ ²	1	0.36	0.36	5.19	0.0451
X ₃ ²	1	0.21	0.21	3.07	0.11
Residual	10	0.69	0.69		
Lack of fit	5	0.39	0.078	1.3	0.39
Pure error	5	0.3			
Total	19	19.93			

جدول ۵- نتایج حاصل از تجزیه آماری گشتاور

Table 5- ANOVA table for Torque

Source	df	Sum of square	Mean square	F value	P value
Model	3	236.57	78.86	10.91	0.0004
X ₁	1	38.90	38.90	5.38	0.0319
X ₂	1	7.49	7.49	1.04	0.0413
X ₃	1	190.17	190.17	26.31	0.0001
X ₂ × X ₁	1	0.21	0.21	0.023	0.88
X ₃ × X ₁	1	0.054	0.054	0.0597	0.0439
X ₃ × X ₂	1	0.67	0.67	0.075	0.7
X ₁ ²	1	0.14	0.14	0.016	0.019
X ₂ ²	1	2.78	2.78	0.31	0.049
X ₃ ²	1	5.94	5.94	0.66	0.0435
Residual	10	89.84	8.98		
Lack of fit	5	72.60	14.52	4.21	0.0703
Pure error	5	17.24			
Total	19	352.54			

با توجه به نتایج به دست آمده، اثر متقابل دوگانه نسبت سوخت و درصد بار بر گشتاور تولیدی موتور در سطح ۵ درصد معنی دار شد. دور موتور در سطح ۵ درصد و بار اعمال شده در سطح ۱ درصد اثر معنی داری بر گشتاور داشتند. مدل برازش شده بین متغیرهای مستقل و گشتاور به صورت معادله درجه ۲ در رابطه (۳) نشان داده شده است. مقدار ضریب اطمینان (R²) مدل برابر ۰/۹۳ به دست آمد.

$$T = 12.88 + 1.56X_2 - 1.16X_3 - 0.082X_1X_3 - 0.075X_1^2 + 0.49X_3^2 \quad (2)$$

با توجه به شکل ۲-a، با افزایش نسبت روغن الکل در دورهای مختلف موتور، توان و گشتاور با شیب ثابتی افزایش می یابد. نتایج نشان داد در دور ۲۰۰۰ rpm و میزان بار ۵۰ درصد در ترکیب D₈₀F₂₀ میزان گشتاور و توان به ترتیب ۶/۵ درصد و ۲ درصد افزایش داشت. علت افزایش توان موتور با افزودن روغن الکل این است که روغن الکل در ساختار شیمیایی خود دارای اتم اکسیژن است. در نتیجه، به دلیل وجود اکسیژن به اندازه کافی، احتراق کامل تر صورت گرفته و میزان بیشتری از انرژی

شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود [۲۱]، در نتیجه، منجر به افزایش توان و گشتاور موتور خواهد شد. نتایج مشابهی در تحقیقات صورت گرفته توسط سایر محققان مشاهده شد [۲۲، ۲۳]. با توجه به شکل ۲-ب، با افزایش دور موتور، زمان تنفس کمتر بوده و در نتیجه سیلندر به خوبی پر نمی‌شود. لذا، فشار تراکم و فشار احتراق کمتر شده و نیروهای اینرسی بخش های متحرک موتور افزایش یافته و در نهایت منجر به کاهش گشتاور واقعی موتور می‌شود [۱۵].

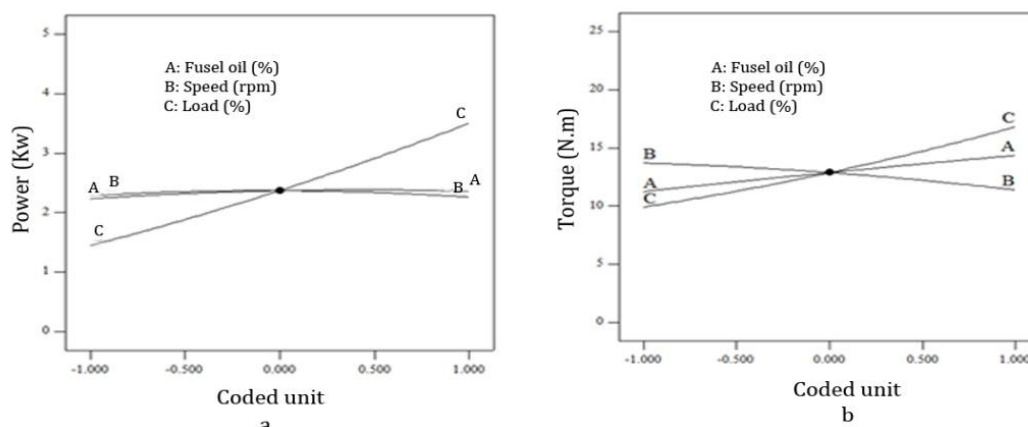


Figure 2- Deviation from Reference Point (a: power, b: Torque)

شکل ۲- فاصله از نقطه مرجع کدگذاری (a: توان، b: گشتاور)

شکل ۳ نمودار دوبعدی و سه‌بعدی مصرف سوخت ویژه را به‌ازای تغییرات نسبت روغن الکل (درصد) و دور موتور (rpm) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای تمام مخلوط‌های روغن الکل، با افزایش بار موتور، به‌دلیل افزایش گشتاور، میزان مصرف سوخت افزایش یافت. برای ترکیب $D_{90}F_{10}$ افزایش بار موتور از ۲۵ درصد به ۷۵ درصد در دور ۲۰۰۰ rpm باعث افزایش ۳۵ درصدی در میزان مصرف سوخت ویژه شد. با توجه به اینکه موادی که در ساختار آن‌ها مولکول اکسیژن وجود دارد ارزش حرارتی کمتری دارند، لذا، سوخت بیشتری برای تولید همان مقدار توان مورد نیاز است و در نتیجه مصرف سوخت افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه افزایش سرعت موتور توان اصطکاکی موتور را افزایش می‌دهد، لذا، مصرف سوخت در دورهای بیشتر افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، در این حالت مصرف سوخت بیشتر صرف افزایش توان خواهد شد. با افزایش درصد روغن الکل، میزان مصرف سوخت نیز افزایش داشت.

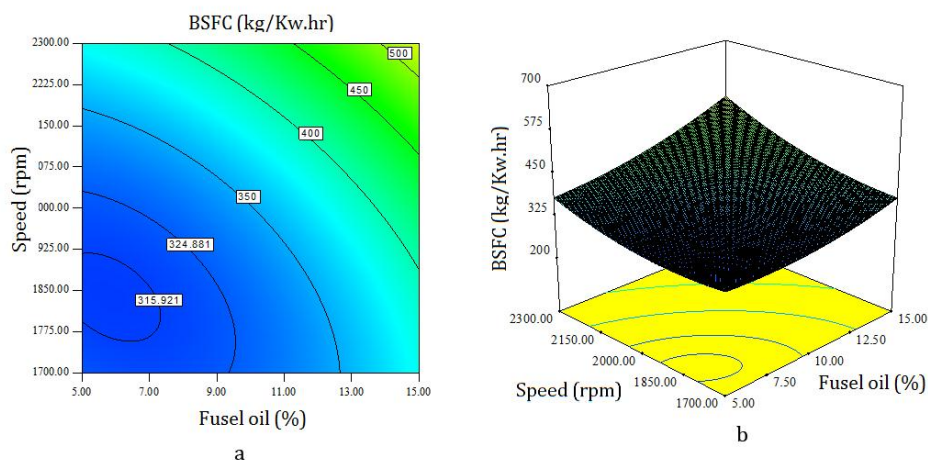


Figure 3- Interaction effect of fusel oil and speed on BSFC (a: 2D, b: 3D)

شکل ۳- خطوط تراز (a) و نمودار سه‌بعدی (b)، اثر متقابل نسبت روغن الکل و دور بر مصرف سوخت ویژه

با توجه به شکل ۳، در دور ۲۰۰۰rpm و بار ۵۰ درصد، افزایش ۶۰ درصد در مصرف سوخت نسبت به دیزل خالص مشاهده شد. همچنین، نتایج گزارش شده توسط محققان دیگر نشان داد در دور ۱۸۰۰rpm و بار ۵۰ درصد، افزایش ۵۴ درصدی در مصرف سوخت ویژه مشاهده شد که با نتایج به دست آمده در این تحقیق همخوانی داشت [۲۵۷،۲۴،۱۷].

بررسی آلاینده‌های ناشی از سوخت دیزل-روغن الکل مونوکسید کربن (CO)

شکل ۴ خطوط تراز دوبعدی و همچنین، نمودار سه‌بعدی تغییرات گاز CO را نشان می‌دهد. میزان CO براساس درصد حجمی (%V) اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۴-a نشان داده شده است، با افزایش میزان روغن الکل در موتور دیزل، روند کاهش در میزان CO مشاهده شد. ترکیب $D_{80}F_{20}$ نسبت به دیزل خالص کاهش ۳۵ درصد در میزان آلاینده CO به همراه داشت. کاهش در میزان CO به دلیل وجود مولکول اکسیژن در ساختار سوخت روغن الکل و در نتیجه احتراق کامل‌تر است. همچنین، با توجه به اینکه گرمای نهان تبخیر الکل‌ها بیشتر از سوخت دیزل است، لذا دمای هوای ورودی به محفظه احتراق کاهش یافته و در نتیجه بازده حجمی افزایش می‌یابد [۲۵]. همچنین، با توجه به شکل ۴-b، می‌توان دریافت، با افزایش میزان بار، با توجه به اینکه زمان کافی برای تبدیل اکسیژن به CO_2 وجود ندارد و مقداری از سوخت به‌طور کامل نمی‌سوزد، انتشار CO خروجی از موتور افزایش می‌یابد [۲۵]. با توجه به اینکه با افزایش میزان بار مقداری از سوخت به‌طور کامل نمی‌سوزد، لذا میزان انتشار CO خروجی از موتور افزایش می‌یابد (شکل ۴-b). در دور ۲۰۰۰rpm، با افزایش بار از ۲۵٪ به ۷۵٪ برای ترکیب $D_{95}F_5$ ، افزایش ۳۳٪ در میزان آلاینده CO گزارش شد. در تحقیق‌های مشابه، افزایش ۳۵٪ و ۲۰٪ در میزان CO به ترتیب برای بارهای ۵۰٪ و ۷۵٪ گزارش شد [۲۱].

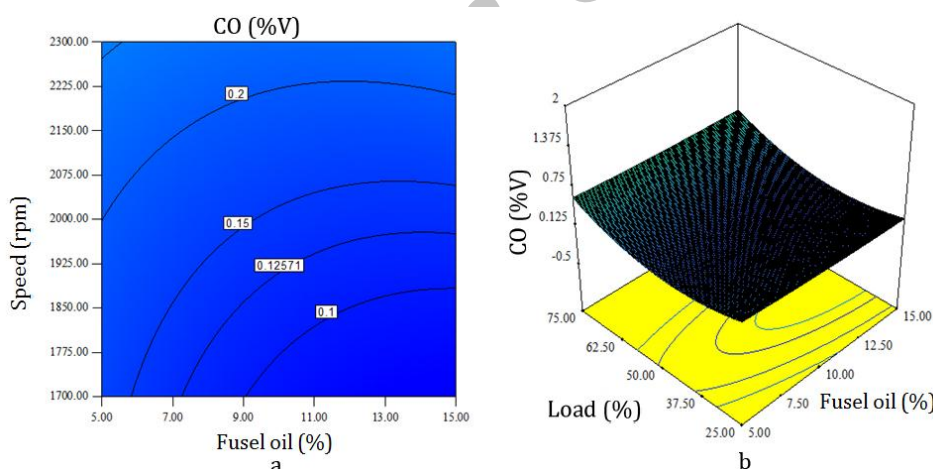


Fig. 4- Interaction effect of fusel oil and speed on CO (a: 2D, b: 3D)

شکل ۴- خطوط تراز (a) و نمودار سه‌بعدی (b)، اثر متقابل نسبت روغن الکل، دور و بار موتور بر آلاینده مونوکسید کربن

اکسید نیتروژن (NO_x)

شکل ۵ خطوط تراز و نمودار سه‌بعدی اثر متقابل تغییرات آلاینده NO_x برای نسبت‌های مختلف روغن الکل و دور موتور را نشان می‌دهد. میزان اکسیژن بالای موجود در مولکول‌های روغن الکل می‌تواند دمای محفظه احتراق را به دلیل احتراق کامل‌تر افزایش داده و در نتیجه بر میزان NO_x افزوده می‌شود. اما، با وجود این، میزان آب موجود در روغن الکل مانع احتراق کامل شده و لذا دمای محفظه سیلندر کاهش یافته و در نتیجه میزان NO_x کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد، با افزایش ۱۰٪ در میزان ترکیب روغن الکل، در دور ۲۳۰۰rpm و بار ۷۵٪، NO_x به میزان ۲۹ درصد کاهش یافت. نتایج تحقیق‌هایی که در زمینه

ترکیب سوخت روغن الکل با بنزین و دیزل در موتورهای احتراق جرقه‌ای و احتراق تراکمی صورت گرفت همواره کاهش چشمگیر میزان آلاینده NO_x را نشان داد. در تحقیق مشابهی، کاهش ۲۵٪ درمیزان NO_x در دور ۱۵۰۰ rpm و بار ۷۵٪ درصد گزارش شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق مطابق یافته‌های به دست آمده توسط سایر پژوهش‌های صورت گرفته بود [۲۷، ۲۶، ۱۷]. با توجه به شکل‌های a-۵ و b-۵، با افزایش دور، میزان NO_x خروجی اگزوز برای تمام مخلوط‌های سوخت کاهش یافت. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش بار موتور مقدار NO_x برای تمام مخلوط‌های سوخت روغن الکل-دیزل افزایش می‌یابد. افزایش دمای محفظه احتراق و فشار درون سیلندر با افزایش بار اعمال شده بر موتور می‌تواند عامل افزایش تشکیل NO_x باشد [۲۸].

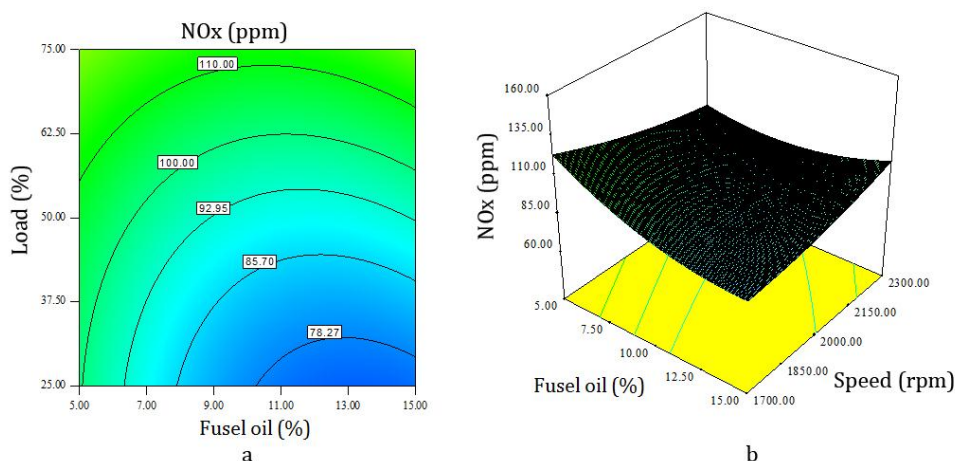


Figure 5- Interaction effect of fusel oil, speed and load on NO_x (a: 2D, b: 3D)

شکل ۵- خطوط تراز (a) و نمودار سه بعدی (b)، اثر متقابل نسبت روغن الکل، دور و درصد بار بر آلاینده اکسید نیتروژن

هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)

تغییرات هیدروکربن‌های نسوخته بر اساس درصد روغن الکل، بار اعمال شده و سرعت موتور در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در تمام نسبت‌های ترکیب شده سوخت روغن الکل-دیزل، با افزایش در میزان درصد سوخت، میزان آلاینده UHC خروجی اگزوز کاهش داشت.

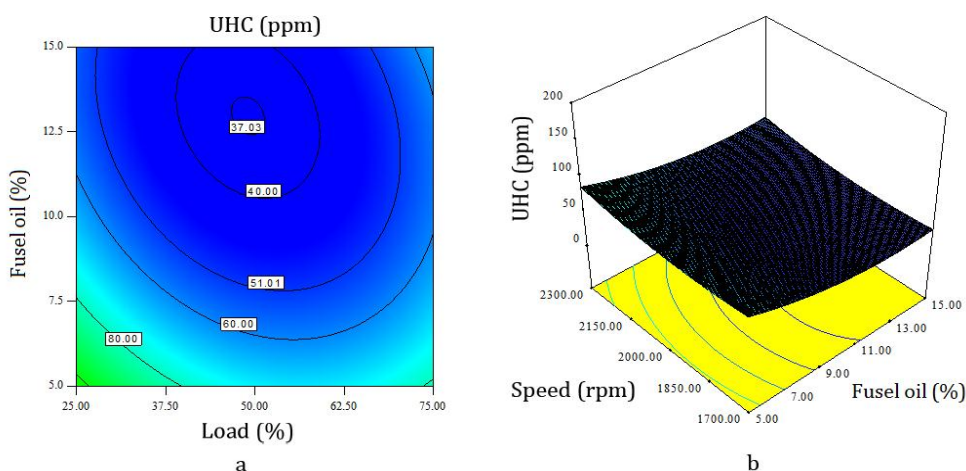


Figure 6- Interaction effect of fusel oil, speed and load on UHC (a: 2D, b: 3D)

شکل ۶- خطوط تراز (a) و نمودار سه بعدی (b)، اثر متقابل نسبت روغن الکل، دور و درصد بار بر آلاینده هیدروکربن نسوخته

نتایج حاصل از مدل‌سازی روش سطح پاسخ نشان داد با افزایش نسبت روغن الکل-دیزل به دلیل احتراق کامل‌تر، میزان هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد. در دور ۲۰۰۰ rpm ترکیب $D_{90}F_{10}$ نسبت به ترکیب $D_{80}F_{20}$ کاهش ۱۵ درصدی در میزان آلاینده UHC مشاهده شد. همچنین، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۶-a و ۶-b، به موازات افزایش در دور موتور، حرکت اغتشاشی هوا در محفظه احتراق، دما و فشار دورن سیلندر افزایش می‌یابد که این پدیده باعث احتراق کامل‌تر سوخت و در نتیجه کاهش آلاینده UHC می‌شود [۳۰، ۲۹]. نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق نشان داد، با افزایش در میزان بار اعمال شده بر موتور، میزان آلاینده UHC افزایش می‌یابد. همچنین، در دور ۲۳۰۰ rpm، با افزایش بار از ۲۵ درصد به ۷۵ درصد، میزان آلاینده UHC به میزان ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. در موتورهای احتراق داخلی، با افزایش میزان بار اعمال شده بر موتور، نسبت سوخت-هوا بیشتر از نسبت استوکیومتری بوده و در نتیجه زمان بیشتری برای سوختن کامل سوخت مورد نیاز است. لذا، در زمانی که پیستون پایین می‌رود، سوخت به‌طور کامل نسوخته و در نتیجه مقداری هیدروکربن تولید می‌شود [۳۱].

دی‌اکسید کربن (CO_2)

شکل ۷ خطوط تراز دوبعدی و نمودار سه‌بعدی مدل‌سازی شده توسط روش سطح پاسخ، برای میزان خروجی گاز دی‌اکسید کربن، در نسبت‌های مختلف روغن الکل-دیزل و دور موتور را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، با افزایش میزان بار موتور، میزان CO_2 برای تمام مخلوط‌های سوخت افزایش می‌یابد. مصرف سوخت بیشتر و حضور اکسیژن کافی در ساختار روغن الکل برای سوختن کامل سوخت، موجب افزایش تشکیل CO_2 به همراه افزایش بار موتور شد. با افزایش در میزان سرعت از ۲۰۰۰ rpm به ۲۶۰۰ rpm، افزایش ۳۱ درصدی در میزان CO_2 به دست آمد. این امر می‌تواند به دلیل وجود مولکول اکسیژن در ساختار این سوخت باشد. نتایج گزارش شده توسط تحقیق‌های مشابه نشان داد افزایش دور از ۱۲۰۰ rpm به ۲۴۰۰ rpm، میزان CO_2 خروجی اگزوز را ۴۵ درصد افزایش می‌دهد [۲۷، ۱۷].

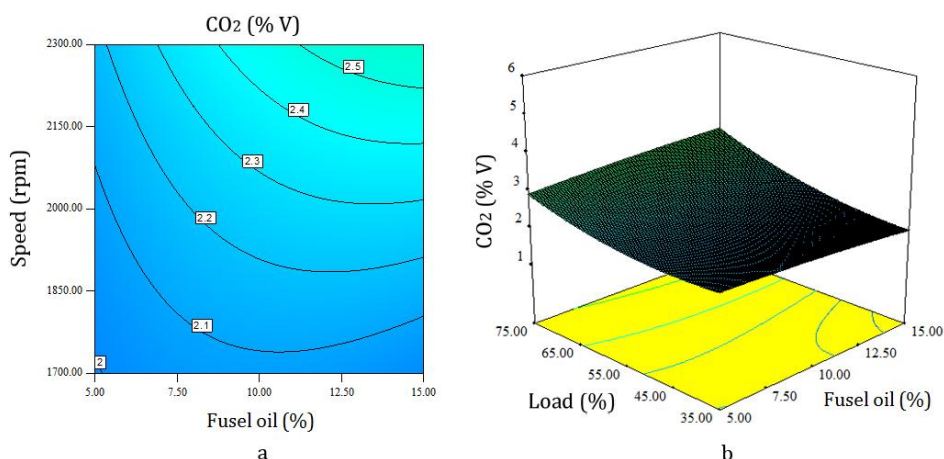


Figure 7- Interaction effect of fusel oil, speed and load on UHC (a: 2D, b: 3D)

شکل ۷- خطوط تراز (a) و نمودار سه‌بعدی (b)، اثر متقابل نسبت روغن الکل، دور و درصد بار بر دی‌اکسید کربن خروجی اگزوز

بهینه‌سازی روش سطح پاسخ

از نرم‌افزار Design Expert 10 به منظور بهینه‌سازی اثر ترکیب سوخت، سرعت و بار موتور بر عملکرد و میزان آلاینده‌های موتور دیزل تک‌سیلندر استفاده شد. شرایط مرزی پارامترهای ورودی شامل ترکیب سوخت، دور موتور و بار موتور به ترتیب در محدوده نشان داده شده در جدول ۲ تعیین شد. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از تابع مطلوبیت برای کلیه

متغیرهای پاسخ انجام شد. هرچه توان و گشتاور موتور به بیشینه مقدار خود و مصرف سوخت ویژه و میزان آلاینده‌ها به کمینه مقدار خود نزدیک‌تر باشند، به همان میزان مطلوبیت بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، با هدف یافتن بیشینه تابع مطلوبیت، برای تمامی پارامترها وزن‌دهی یکسان ($w=1:1:1$) و میزان اهمیت کلیه پارامترها ۳ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی، میزان روغن الکل $11/57\%$ ، سرعت 2264 rpm و بار 40% را به‌عنوان شرایط بهینه انتخاب کرد. میزان تابع مطلوبیت برابر $0/73$ به‌دست آمد. آلاینده‌های NO_x و UHC در این نقطه به ترتیب $87/7$ و $54/5$ ppm و همچنین آلاینده‌های CO_2 و CO به ترتیب برابر $2/34$ و $0/19$ درصد حجمی به‌دست آمدند. مقادیر گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه در این نقطه به ترتیب $10/9$ N.m، $1/9$ kW، و $354/5$ Kg/Kw.hr به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی، به بررسی اثر ترکیبات مختلف روغن الکل-دیزل در ۵ سطح مختلف سوخت (0% ، 5% ، 10% ، 15% و 20%)، بار (0% ، 25% ، 50% ، 75% و 100%) و سرعت موتور (1400 ، 1700 ، 2000 ، 2300 و 2600 rpm) پرداخته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که می‌توان میزان روغن الکل $11/57\%$ ، سرعت 2264 rpm و بار 40% را به‌عنوان شرایط بهینه به‌منظور استفاده از سوخت روغن الکل-دیزل انتخاب کرد. میزان آلاینده‌های NO_x و UHC برای شرایط بهینه به ترتیب $87/7$ و $54/5$ ppm و همچنین مقادیر آلاینده‌های CO_2 و CO به ترتیب برابر $2/34$ و $0/19$ درصد حجمی به‌دست آمدند. گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه در این نقطه، به ترتیب $10/9$ N.m، $1/9$ kW، و $354/5$ Kg/Kw.hr به‌دست آمد. نتایج نشان داد، در موتور احتراق تراکمی تک‌سیلندر، با افزایش میزان روغن الکل در ترکیب با سوخت دیزل، توان و گشتاور موتور افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش بار اعمال شده بر موتور، میزان مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده‌های CO و CO_2 خروجی آگروز افزایش یافت. با افزایش دور موتور، میزان NO_x خروجی آگروز برای تمام مخلوط‌های سوخت دیزل-روغن الکل کاهش یافت. نتایج نشان داد میزان آلاینده‌های UHC با افزایش درصد روغن الکل در ترکیب با سوخت دیزل کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

هزینه اجرای این طرح به شماره 1303 ، از محل اعتبارات پژوهانه واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تامین شده است.

منابع

1. S. H. Hosseini, A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, and A. Abbaszadeh-Mayvan, "Modeling the effects of Carbon nanotubes added to diesel-biodiesel fuel blends on performance and emissions of a diesel engine using artificial neural network," *Fuel and Combustion*, 10, 2016, pp. 1-16. (in Persian).
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, 2011, pp. 1-11. (in Persian).
3. M. A. Rajaeifar, M. Tabatabaei, H. Ghanavati, B. Khoshnevisan and S. Rafiee, "Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 51, 2015, pp. 886-898.
4. B. Ghobadian, "Liquid biofuels potential and outlook in Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16, 2012, pp. 4379-4384.
5. M. A. Ghadikolaie, "Effect of alcohol blend and fumigation on regulated and unregulated emissions of IC engines - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 57, 2016, pp. 1440-1495.
6. A. Sharma and S. Murugan, "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fuelled with non-petroleum fuel: a study on the role of fuel injection timing," *J. Energy Inst.*, 88, 2015, pp. 364-375.
7. D. Hulwan and S. Joshi, "Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content," *Appl. Energy*, 88, 2011, pp. 5042-5055.
8. M. Abu-Qudais, O. Haddad and M. Qudaisat, "The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions," *Energy Convers. Manag.*, 41, No. 3, 2000, pp. 389-399.
9. Y. Noorollahi, M. Azadbakht, and B. Ghobadian, "The effect of different diesterol (diesel-biodiesel-ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases," *Energy*, 142, 2018, pp. 196-200.
10. G. Labeckas, S. Slavinskas and M. Mažeika, "The effect of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion, performance

- and emissions of a direct injection diesel engine," *Energy Convers.*, 79, 2014, pp. 698-220.
11. N. Yilmaz, F. M. Vigil, A. Burl Donaldson, T. Darabseh, "Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration," *Fuel*, 115, 2014, pp. 790-793.
 12. E. Dogan, T. Dunaev, T. H. Erguder and G. N. Demirer, "Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and alcohols," *Chemosphere*, 74, 2009, pp. 797-803.
 13. F. Welsh and R. Williams, "Lipase mediated production of flavor and fragrance esters from fusel oil," *J. Food Sci.*, 54, 1989, pp. 1565-1568.
 14. A. Calam, H. Solmaz, A. Uyumaz, S. Polat, E. Yilmaz and Y. İçingür, "Investigation of usability of the fusel oil in a single cylinder spark ignition engine," *J. Energy Inst.*, 88, 2015, pp. 258-265.
 15. O. I. Awad, O. M. Ali, R. Mamat, A. A. Abdullah, G. Najafi, M. K. Kamarulzaman, I. M. Yusri and M. M. Noor, "Using fusel oil as a blend in gasoline to improve SI engine efficiencies: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 69, 2017, pp. 1232-1242.
 16. H. Solmaz, Combustion, "performance and emission characteristics of fusel oil in a spark ignition engine," *Fuel Process Technol.*, 2015, 133, pp. 20-8.
 17. A. Calam, Y. İçingür, H. Solmaz and H. Yamık, "A comparison of engine performance and the emission of fusel oil and gasoline mixtures at different ignition timings," *International Journal of Green Energy*, 12, No. 8, 2015, pp. 767-772.
 18. G. Najafi, B. Ghobadian, T. Yusaf, S. M. Safieddin Ardebili and R. Mamat, "Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology," *Energy*, 90, 2015, pp. 1815-1829.
 19. S. M. Safieddin Ardebili, T. T. Hashjin, B. Ghobadian, G. Najafi, S. Mantegna and G. Cravotto, "Optimization of biodiesel synthesis under simultaneous ultrasound-microwave irradiation using response surface methodology (RSM)," *Green Process. Synth.*, 4, 2015, pp. 259-267.
 20. O. I. Awad, R. Mamat, O. M. Ali, I. M. Yusri, A. A. Abdullah, A. F. Yusop and M. M. Noor, "The effect of adding fusel oil to diesel on the performance and the emissions characteristics in a single cylinder CI engine," *J. Energy Inst.*, 90, 2017, pp. 382-396.
 21. O. Awad, R. Mamat, O. Ali and W. Azmi, "Response Surface Methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil-gasoline blends at different water content in SI engine," *Energy Convers.*, 15, 2017, pp. 222-241.
 22. M. Kiani, D. E. H. Kiani, B. Ghobadian and G. Najafi, "Application of Genetic programming to predict an SI engine brake power and torque using ethanol- gasoline fuel blends," 7, 2013, pp. 7-15.
 23. A. Jamrozik, "The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends, *Energy Convers. Manag.*" 148, 2017, pp. 461-476.
 24. A. Bilgin, O. Durgun and Z. Sahin, "The effects of diesel-ethanol blends on diesel engine performance," *Energy Sources*, 24, 2002, pp. 431-440.
 25. O. I. Awad, R. Bin Mamat, O. M. Ali and I. M. Yusri, "Effect of fuel oil - gasoline fusel blends on the performance and emission characteristics of spark ignition engine: A review," 3, 2016, pp. 31-36.
 26. O. I. Awad, R. Mamat, T. K. Ibrahim, F. Y. Hagos, M. M. Noor, I. M. Yusri and A. M. Leman, "Calorific value enhancement of fusel oil by moisture removal and its effect on the performance and combustion of a spark ignition engine," *Energy Convers. Manag.*, 137, 2017, pp. 86-96.
 27. M. Dorado, E. Ballesteros, J. Arnal and J. Gomez, "Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil," *Fuel*, 82, 2003, pp. 1311-1315.
 28. M. S. M. Zaharin, N. R. Abdullah, G. Naja, H. Sharudin and T. Yusaf, "Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review," 79, 2017, pp. 475-493.
 29. G. Najafi, B. Ghobadian, A. Moosavian, T. Yusaf, R. Mamat, M. Kettner and W. H. Azmi, "SVM and ANFIS for prediction of performance and exhaust emissions of a SI engine with gasoline-ethanol blended fuels," *Appl. Therm. Eng.*, 95, 2016, pp. 186-203.
 30. B. Rajesh Kumar, S. Saravanan, D. Rana, V. Anish, A. Nagendran, "Effect of a sustainable biofuel-N-octanol-on the combustion, performance and emissions of a di diesel engine under naturally aspirated and exhaust gas recirculation (EGR) modes," *Energy Convers. Manag.*, 118, 2016, pp. 275-286.
 31. D. H. Qi, K. Yang, D. Zhang and B. Chen, "Combustion and emission characteristics of diesel-tung oil-ethanol blended fuels used in a CRDI diesel engine with different injection strategies," *Appl. Therm. Eng.*, 111, 2017, pp. 927-935.

English Abstract

Optimization of performance and emission characteristic of fusel oil-diesel blends using response surface methodology

Seyed Mohammad Safieddin Ardebili^{1*}, Hasan Zaki Dizaji², Mohammad Javad Sheikh Davoodi³

1- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, m.safieddin@scu.ac.ir

2- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, hzakid@scu.ac.ir.

3- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, javad1950@yahoo.com

*Corresponding author

(Received: 2017.10.22, Received in revised form: 2017.11.20, Accepted: 2017.12.14)

The alcohol-based fuels have attracted the attention of alternative fuel researchers. Fusel oil is an alcohol-based fuel collected as a by-product during bioethanol production. The main objective of this study is to determine the optimal blending ratio of fusel oil–diesel regarding the performance and emissions of spark ignition engine using response surface methodology based on CCD design. In this research, experimental investigations have been performed with different fusel oil–diesel blends (0%, 5%, 10%, 15% and 20%), different loads (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and different engine speeds (1400, 1700, 2000, 2300 and 2600 rpm). The multi-objective optimization was performed to maximize the power and torque, and minimize BSFC, NO_x, UHC and CO emissions. The best combination of engine parameters was found to be 11.57% fusel oil, 40% load and 2264 rpm engine speed. The optimal values were 1.9 kW, 10.9 N.m, 354.5 g/kWh, 0.19, 54.5, 2.34 and 87.7(V%) for power, torque, BSFC, CO, UHC, CO₂ and NO_x emissions, respectively. The results showed that fusel oil usage increased power and torque. It was also found that both NO_x and UHC emissions decreased.

Keywords: Fusel oil, Engine Performance, Exhaust Emissions, Response surface methodology