

بهینه‌سازی نسبت EGR، نسبت سوخت بیودیزل و شرایط کاری یک موتور دیزل با روش RSM

فرزاد جلیلیان تبار^۱، برات قبادیان^{۲*} و غلامحسن نجفی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، farzad.jaliliantabar@modares.ac.ir

۲- استاد، مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ghobadib@modares.ac.ir

۳- دانشیار، مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، g.najafi@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۱۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۷/۱۹، پذیرش: ۹۶/۸/۸)

چکیده: در این پژوهش، تاثیر بار و سرعت موتور و همچنین نسبت EGR و نسبت سوخت بیودیزل بر متغیرهای عملکردی و آلاینده‌های یک موتور دیزل تک‌سیلندر چهارزمانه بررسی شد. همچنین، با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM)، عوامل در نظر گرفته شده بهینه‌سازی شد. با استفاده از سامانه EGR، آلاینده NO_x کاهش یافت، به گونه‌ای که بالاترین مقدار کاهش آلاینده NO_x برابر با ۶۳/۷ درصد برای سوخت B10 و نسبت ۳۰ درصد EGR بوده است. استفاده همزمان از سامانه EGR و سوخت بیودیزل موجب کاهش آلاینده CO به ترتیب برابر با ۴/۰۴، ۱۲ و ۱/۷۳ درصد برای دوره‌های موتور ۱۸۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه شد. بالاترین میزان کاهش آلاینده UHC برابر با ۵۴/۰۵ درصد بوده است. نقطه بهینه‌شده توسط روش بهینه‌سازی RSM بدین صورت بود که اگر موتور در بار ۴۵/۳ درصد و دور موتور ۲۰۸۰ rpm کار کند، برای داشتن حداکثر کارایی و حداقل آلاینده‌گی باید نسبت EGR ۱۴/۹۷ درصد و مقدار بیودیزل مخلوط شده با سوخت دیزل برابر با ۵/۴۳ درصد باشد.

کلیدواژگان: آلاینده، بیودیزل، بهینه‌سازی، EGR، RSM

مقدمه

در سال‌های اخیر، آلاینده‌های NO_x توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا این آلاینده‌ها مهم‌ترین عامل تشکیل دوده^۱ است که بیشتر در مراکز شهرهای صنعتی تشکیل می‌شود. بسیاری از مضرات مرتبط با آلاینده‌های خروجی خودروها تا دهه ۱۹۴۰ آشکار نشده بود. در این دهه، در ایالت کالیفرنیا آمریکا، خودروها به‌عنوان مهم‌ترین منبع آلاینده هوا شناخته شدند. اگر چه نگرانی‌ها در مورد مخاطرات احتمالی ناشی از آلاینده‌های خودروها مدتی قبل از آن مشخص شده بود، اما تا زمانی که به‌وسیله آزمایش‌های متعدد ارتباط بین آلاینده‌های خودروها و پدیده دوده اثبات نشده بود، این امر تایید نشد. آسیب‌های ناشی از این آلاینده‌ها (آلاینده‌های اولیه) انواع مختلفی دارد (اثرات ناچیزی همچون آسیب به برگ و کاهش رشد گیاهان تا اثرات منفی جدی برای سلامتی انسان همچون آسیب به سامانه ریوی و تنفسی). در برخی موارد، اثرات آلاینده‌های ثانویه، از قبیل تولید دوده، از اثرات سایر آلاینده‌ها مضرتر است. علاوه بر مضرات و آسیب‌های فیزیکی مستقیم، هزینه‌های اقتصادی نامحسوس مربوط به کاهش توانایی فعالیت انسان، از بین رفتن منابع طبیعی و مشکلات اجتماعی نیز قابل توجه است [۱].

در تلاش برای تحقق اهداف توسعه پایدار بیان شده در کنفرانس زمین در ریودوژانیرو در سال ۱۹۹۲ و کاهش غلظت دوده‌ای که در بسیاری از شهرهای صنعتی وجود دارد، کاهش قابل توجه در آلاینده‌های این خودروها، به‌ویژه در مورد آلاینده

1. Smog

NO_x ، بیشترین اهمیت را پیدا کرده است. در پاسخ به این نیاز و افزایش نگرانی‌ها در رابطه با آلودگی هوای ناشی از گازهای خروجی خودروها، نهادهای دولتی و بین‌المللی سخت‌گیری در مورد آلاینده‌ها را افزایش دادند. محدودیت‌هایی که در مورد آلاینده NO_x بوده با سخت‌گیری بیشتری همراه بوده است تا اثرات این آلاینده‌ها را به سلامتی انسان به کمترین مقدار ممکن برساند. از زمان وضع این قوانین مربوط به آلاینده‌های خودروها در دهه ۱۹۶۰، تعداد آلاینده‌های محدودشده در حال افزایش بوده است، محدودیت‌های قانونی شدیدتر شده‌اند و تعداد کشورهای که قوانین مشابهی را استفاده کرده‌اند افزایش یافته‌اند. آلاینده‌های خروجی از خودروهای شهری، امروزه، شامل مونوکسیدکربن (CO)، هیدروکربن‌های نسوخته (UHC^1)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و ذرات معلق (PM^2) است [۲]. تا چند سال اخیر، موتورهای اشتعال تراکمی با برخی تغییرات کوچک قابلیت سازگاری با قوانین مربوط در مورد آلاینده‌های NO_x را داشته‌اند. از جمله این تغییرات به‌تأخیر انداختن زمان پاشش سوخت و خنک‌سازی هوای ورودی بوده است. با این وجود، برای برآورده‌ساختن نیازها و الزامات جدید در قوانینی که در سال‌های اخیر وضع شده‌اند، تلاش‌ها، تحقیقات و مطالعات متعددی برای ایجاد و کاربرد تکنولوژی‌های کاهش NO_x این موتورها انجام گرفته است. کاهش بیشتر، یعنی بیشتر از آنچه برای آینده پیش‌بینی شده است، در آلاینده‌های NO_x موتورهای اشتعال تراکمی با افزایش کاربرد این موتورها در خودروهای شهری و کامیون‌های سبک الزامی به‌نظر می‌رسد. همچنین، گسترش استفاده از این موتورها در خودروهای سنگین به دلایل زیر ادامه خواهد داشت [۲]:

- مصرف سوخت کمتر نسبت به موتورهای بنزینی که در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش هزینه‌های سوخت و گازهای گلخانه‌ای اهمیت بیشتری یافته است.
- آلاینده‌های CO، CO_2 ، HC کمتر

روش‌های کاهش آلاینده نباید باعث کاهش بیش از حد توان و قابلیت اطمینان موتور شوند و یا مقدار تولید سایر آلاینده‌ها را، همانند آلاینده ذرات معلق، افزایش دهند. در این روش‌ها، اولویت کاهش NO_x در درون سیلندر است. چندین ترکیب مختلف از نیتروژن و اکسیژن به‌عنوان اکسیدهای نیتروژن قابل دسته‌بندی است. به هر حال در موتورهای درونسوز عبارت NO_x در مورد ترکیب نیتریک اکسید (NO) و محصولات اکسایش آن (NO_2) به‌کار می‌رود. آگاروال و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر استفاده از سامانه EGR بر عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استفاده از EGR موجب افزایش بازده گرمایی و کاهش مصرف ویژه سوخت ترمزی در بارهای کم می‌شود، اما در بارهای بالا مقدار بازده گرمایی و مصرف ویژه سوخت ترمزی در حالت با EGR و بدون EGR یکسان بود [۳]. ابدلال و هگاب (۲۰۱۲)، در تحقیقی، متغیرهای آلاینده‌گی و احتراق یک موتور دیزل دوگانه‌سوز (گاز طبیعی و دیزل)، که مجهز به سامانه EGR بود، را بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که استفاده از سامانه EGR در حالت دوگانه‌سوز بودن موتور باعث کاهش قابل توجه آلاینده NO_x شده و با افزایش نسبت EGR مقدار NO_x کاهش می‌یابد. همچنین، به‌طور کلی، استفاده از سامانه EGR به همراه موتور دوگانه‌سوز موجب می‌شود که تغییر چندانی در مقدار بازده گرمایی ایجاد نشود [۴]. سیکس و همکاران (۲۰۱۲) یک سامانه EGR برای موتورهای دیزل ساخته و آزمایش کردند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که با استفاده از سامانه EGR طراحی‌شده مقدار آلاینده NO_x را می‌توان تا حد زیادی کاهش داد، اما مقدار آلاینده CO و همچنین مصرف سوخت افزایش خواهد یافت. در حالتی که نسبت EGR کم بوده (کمتر از ۱۰ درصد) مقدار آلاینده NO_x تا ۲۰ درصد کاهش یافت. با وجود این، آلاینده CO نیز دوبرابر افزایش یافت. برای نرخ‌های بالای EGR بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، مقدار CO بیشتر نیز خواهد بود [۵].

فنگ و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر استفاده از EGR را بر احتراق دمای پایین یک موتور دیزل بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که برای یک سوخت یکسان، با افزایش نسبت EGR، فشار درون سیلندر تقریباً ثابت باقی می‌ماند. هنگامی که

1. Unburned hydrocarbon
2. Particulate matter

نسبت EGR کم است، مقدار آلاینده‌های HC و CO کم بود، اما با افزایش مقدار نسبت EGR مقدار این آلاینده‌ها به سرعت افزایش پیدا می‌کند. آلاینده NO_x با افزایش مقدار نسبت EGR کاهش می‌یافت [۶].

پاگاناکیس (۲۰۱۳) اثر پیش گرمایش هوای ورودی و همچنین استفاده از EGR را بر عملکرد و آلاینده‌های یک موتور دیزل دوگانه‌سوز بررسی کرد. دوگانه‌سوز کردن موتور دیزل با سوخت گاز طبیعی و دیزل می‌تواند یک روش مناسب برای سازگار کردن موتورهای دیزل موجود با قوانین سخت‌گیرانه زیست‌محیطی باشد. با مطالعه نتایج به دست آمده مشخص شد که افزایش همزمان دمای گازهای ورودی و نسبت EGR می‌تواند موجب بهبود کارایی موتور (تا ۵ درصد) و کاهش آلاینده CO (تا ۱۰ درصد) شود. در نهایت نیز، نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌های پیش گرمایش هوای ورودی و EGR می‌تواند از روش‌های مناسب برای افزایش قابلیت موتور دیزل باشد [۷].

دول و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل ریاضی برای بررسی همبستگی میان میزان آلاینده‌ها و عملکرد موتور دیزل و عوامل عملکردی آن همچون بار و دور موتور و میزان سوخت دیزل جایگزین شده با هیدروژن ارائه کردند. آن‌ها از روش سطح پاسخ (RSM)^۱ برای ایجاد این مدل استفاده کردند. مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های به دست آمده از مدل ضریب همبستگی (R²) بالایی میان عوامل مورد بررسی و متغیرها را نشان داد [۸].

بررسی منابع نشان داد که بهینه‌سازی سامانه EGR^۲ به همراه متغیرهای دیگر کاهش آلاینده NO_x در سال‌های اخیر یک امر مهم و اساسی بوده است [۹]. بهینه‌سازی مقدار گازهای بازخورنده شده روش‌های نوین می‌تواند اثر استفاده از این سامانه را بیش از پیش بهبود دهد. همچنین، برای مخلوط‌های مختلف سوخت بیودیزل نسبت مناسب EGR بدون استفاده از یک سامانه پسخور می‌تواند هزینه‌های این سامانه را تا حد زیادی کاهش دهد. لذا، هدف اصلی از این تحقیق بهینه‌سازی سامانه EGR یک موتور دیزل کوچک با استفاده از روش RSM و نسبت‌های مختلف سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند و دیزل است. هدف کلی این پژوهش مطالعه تاثیر سامانه EGR بر کارایی و آلاینده‌های موتور اشتعال تراکمی و بهینه‌سازی شرایط کاری موتور (نسبت EGR، بار روی موتور، دور موتور و میزان سوخت بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل) است. در نهایت نیز، بهینه‌سازی آن با استفاده از روش RSM انجام خواهد شد.

مواد و روش‌ها

بیودیزل مورد استفاده در این تحقیق از پسماند روغن خوراکی و در آزمایشگاه بیودیزل پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس تهیه شده است. برخی از ویژگی‌های سوخت‌های بیودیزل و دیزل استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

در این تحقیق از یک موتور دیزل تک‌سیلندر هواخنک با بیشینه توان ۱۲ اسب بخار ساخت شرکت Lombardini ایتالیا مدل 3LD 510 استفاده شد (شکل ۱). مشخصات این موتور در جدول ۲ نشان داده شده است.

Table 1- The characteristics of the biodiesel and diesel fuels

جدول ۱- ویژگی‌های سوخت‌های دیزل و بیودیزل

Characteristic	Standard	limit	Biodiesel	Diesel	Unit
Kinematic viscosity	EN 14214	3.5-5	4.72	3.5	mm ² /s
Density	EN 14214	-	0.862	0.837	g/cm ³
Cloud point	ASTM D-2500	-	-1	-	°C
Pour point	ASTM-D97	-	-4	-	°C
Water and sediment	ASTM D-2709	0.05>	0.05	0.05	% vol
Free glycerides	ASTM D-6584	0.02>	0.016	-	% mass
Flash point	ASTM D-92	130>	176	>55	°C

1. Response Surface Methodology
2. Exhaust gas recirculation

Table 2- The characteristics of the engine
جدول ۲- مشخصات موتور دیزل تحت آزمایش

Model	3LD 510
Manufacturer	Lombardini, Italy
NO. Cylinder	1
Piston stroke	90 mm
Cylinder diameter	85 mm
Cylinder volume	510 cm ³
Maximum power (at 3000 rpm)	12.2 hp (9 kW)
Maximum torque (at 1800 rpm)	33 N.m

از دینامومتر جریان گردابی^۱ مدل WE400 ساخت شرکت مهندسی مبتکران پارس اندیش برای اندازه‌گیری گشتاور، سرعت دورانی و توان موتور دیزل لمباردینی مدل 3LD 510 با بیشینه توان ۱۲ اسب بخار استفاده شد (شکل ۱). این دینامومتر قابلیت اندازه‌گیری بیشینه توان ۲۱ اسب بخار، دور ۱۰۰۰۰ rpm و گشتاور ۸۰ N.m را داراست. سامانه اندازه‌گیری مصرف سوخت شامل باک، اتصالات، لوله‌های انتقال سوخت، حسگر اندازه‌گیری حجم مصرف سوخت، مبدل‌های خنک‌کننده سوخت برگشتی از موتور، مبدل‌های کنترل فشار سوخت، حسگر فشار سوخت و حسگر اندازه‌گیری دمای سوخت است.

برای اندازه‌گیری میزان آلاینده‌گی موتور از دستگاه آلاینده‌سنج AVL DITEST GAS 1000 ساخت شرکت AVL اتریش، که قابلیت اندازه‌گیری چهار آلاینده CO، CO₂، HC و NO_x و همچنین گاز O₂ و مقدار لامبدا (ضریب نسبت هوا به سوخت) را دارد، استفاده شد. علاوه بر این، در مورد موتورهای دیزل دوده یا ذرات معلق ناشی از احتراق و خروجی از اگزوز نیز مهم هستند. بنابراین، دستگاه کدری‌سنج AVL DISmoke 480 BT ساخت شرکت AVL اتریش برای اندازه‌گیری این آلاینده به کار گرفته شد (شکل ۱).

مصرف ویژه سوخت^۲ عبارت است از جرم سوخت بر حسب گرم که برای تولید یک کیلووات ساعت کار واقعی در موتور مصرف می‌شود. مقدار مصرف ویژه سوخت از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه، M برابر با میزان مصرف سوخت بر حسب گرم بر ساعت (g/h) و P توان تولیدی بر حسب کیلووات است.

$$SFC(g/kW.h) = \frac{M}{P} \quad (1)$$

دو نوع از مهم‌ترین انواع سامانه EGR عبارت‌اند از نوع مسیر کوتاه (SR)^۳ و نوع مسیر بلند (LR)^۴. در این تحقیق، براساس مطالعات صورت‌گرفته و نوع موتور مورد مطالعه EGR نوع SR انتخاب شد.

نکته مهم در مورد اضافه کردن سامانه خنک‌کننده EGR این است که در این نوع سامانه EGR، گازهای برگشتی، به‌وسیله آبی که در رادیاتور موتور وجود دارد، خنک می‌شود. با توجه به این که در این تحقیق موتور مورد مطالعه یک موتور هواخنک است و لذا امکان استفاده از رادیاتور آن برای استفاده در سامانه EGR و خنک‌کاری گازهای برگشتی وجود ندارد، لذا یک رادیاتور و سامانه خنک‌کاری جدا برای خنک‌کردن گازهای برگشتی در سامانه خنک‌کننده EGR در نظر گرفته شد. این سامانه شامل یک پمپ، رادیاتور، فن و لوله‌های لازم است. طرحواره سامانه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

هدف اصلی در این تحقیق بهینه‌سازی نسبت EGR و درصد بیودیزل در مخلوط سوخت‌های دیزل و بیودیزل است. بنابراین، برای داشتن یک بهینه‌سازی مناسب باید مهم‌ترین عوامل موثر بر این دو متغیر بررسی شوند. عوامل انتخاب‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از: بار روی موتور (g/h)، سرعت دورانی موتور (rpm)، نسبت بیودیزل در مخلوط سوخت‌های دیزل و بیودیزل و نسبت EGR (%). سطوح انتخاب‌شده برای این عوامل و ماتریس آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

1. Eddy Current
2. Specific fuel consumption (SFC)
3. Short Route
4. Long Route

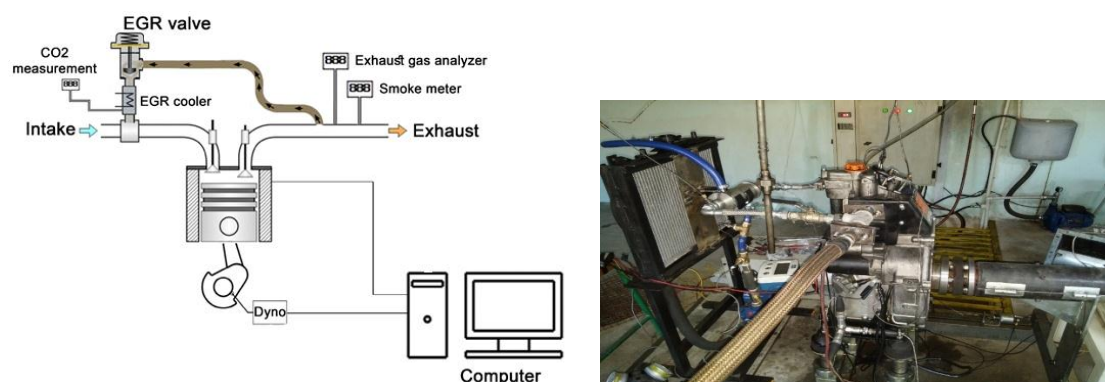


Figure 1- Schematic of the experimental setup

شکل ۱- طرحواره سامانه آزمایش

Table 3- Experiments matrix

جدول ۳- ماتریس آزمایش‌ها

Parameter	Symbol	Unit	Range
EGR percent	x_1	%	[0-30]
Engine load	x_2	%	[25-75]
Engine speed	x_3	rpm	[1800-2400]
Biodiesel percent	x_4	%	[0-15]

از آنجایی که کاربرد سامانه EGR در حالت بارگذاری جزئی منطقی است، لذا بارهای انتخاب شده برای آزمایش در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درصد هستند. پاسخ‌ها یا متغیرهای وابسته، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند، شامل متغیرهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور بودند. این متغیرها در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

Table 4- Dependent variables of the experiments

جدول ۴- متغیرهای وابسته آزمایش

Response	Unit
NO _x	ppm
HC	ppm
CO	%
Smoke	l/m
BSFC	g/kWh
Power	kW

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای ایجاد، توسعه و بهینه‌سازی فرایندها مفید است. مهم‌ترین کاربرد RSM در شرایط خاصی است که در آن متغیرهایی بر متغیرها یا ویژگی‌های یک فرایند تاثیرگذارند. این متغیرها یا ویژگی‌های فرایند پاسخ نامیده می‌شود. متغیرهای تاثیرگذار متغیرهای مستقل یا عوامل نامیده می‌شوند و به وسیله محقق تعیین می‌شوند. در روش سطح پاسخ مدل‌های آماری برای بررسی دامنه تغییر عوامل ایجاد می‌شود. این مدل‌ها تقریبی برای ایجاد ارتباط بین عوامل و متغیرها فراهم می‌سازند. به عبارت دیگر، مدل‌های آماری همچون معادله (۲) برای پیش‌بینی عامل y براساس متغیرهای x_1, x_2, \dots, x_k ایجاد می‌شود.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (2)$$

شکل تابع f مشخص نیست و ممکن است بسیار پیچیده باشد و ε نیز بیانگر متغیرهایی است که ممکن است بر مقدار عامل y تاثیر گذار باشند، اما در تابع f در نظر گرفته نشده‌اند. به طور کلی، ε ناشی از خطا در اندازه‌گیری، اغتشاش در زمان اندازه‌گیری و تاثیر متغیرهای بررسی نشده است [۱۰].

در این تحقیق، عوامل یا متغیرهای مستقل عبارت‌اند از: بار روی موتور، سرعت موتور، نسبت EGR و مقدار بیودیزل در مخلوط دیزل و بیودیزل. پاسخ‌ها یا متغیرهای وابسته نیز شامل HC (ppm)، CO (%)، NO_x(ppm)، توان^۱(kW)، مصرف ویژه سوخت ترمزی^۲ (g/kWh) و دوده (1/m) است. بنابراین شکل کلی مدل مورد نظر به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \text{CO (\%)} \\ \text{NO}_x \text{ (ppm)} \\ \text{HC (ppm)} \\ \text{power (kW)} \\ \text{BSFC (g/kWh)} \\ \text{smoke (1/m)} \end{bmatrix} = f(\text{engine load (\%), engine speed (rpm), EGR rate (\%), biodiesel percent}) + \varepsilon \quad (3)$$

مدل‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار Design expert 8.0 ایجاد شد.

منظور از بهینه‌سازی یک تابع، کمینه یا بیشینه‌سازی متغیرهای وابسته است. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی قابل استفاده است. در این تحقیق، بار روی موتور، سرعت موتور، نسبت EGR و میزان بیودیزل در مخلوط دیزل و بیودیزل متغیرهای فرایندند که باید با بیشینه‌سازی توان موتور و کمینه‌سازی مقادیر NO_x، HC، CO، BSFC و دوده بهینه شوند. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی در این تحقیق از نوع چندهدفه است که در آن به صورت همزمان برخی متغیرها باید کمینه و برخی دیگر بیشینه شوند. در اغلب مسایل بهینه‌سازی، رسیدن به یک تعادل بین توابع هدف مختلف، که باید بهینه‌سازی شوند، لازم است. به عبارت دیگر، کمینه‌سازی یک متغیر ممکن است که باعث بهینه‌سازی یک تابع هدف شود، اما در عین حال نیز ممکن است باعث تغییرات نامطلوب در سایر توابع هدف شود. متغیرهای توابع هدف را به صورت جدول ۵ می‌توان بیان کرد:

Table 5- The variables of the objective function of the optimization.

جدول ۵- متغیرهای توابع هدف بهینه‌سازی

Goal	Parameter	Objective function
Minimum	NO _x	f_1
Minimum	CO	f_2
Minimum	Smoke	f_3
Minimum	HC	f_4
Minimum	BSFC	f_5
Maximum	Power	f_6

نتایج و بحث

داده‌های آزمایش توسط تحلیل واریانس (ANOVA) ارزیابی شدند. از نرم‌افزارهای EXCEL2010 و SPSS 22.0 در تحلیل داده‌ها و رسم نمودارهای مرتبط استفاده شد. پس از اطمینان از معناداری اثرات اصلی دور، بار، نوع سوخت و نسبت EGR در تیمارهای مورد نظر و همچنین معناداری اثرات متقابل آن‌ها، مقایسه میانگین اثرات متقابل معنادار به روش دانکن^۳ و توسط نرم‌افزار SPSS انجام گرفت و نتایج حاصل تحلیل شد.

در جدول ۶، نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل بررسی شده بر آلاینده‌ها و عملکرد موتور مورد مطالعه آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، تمامی عوامل اصلی تأثیر معناداری در سطح ۵ درصد بر متغیرهای عملکردی و آلاینده‌های موتور داشته‌اند، اما اثر متقابل این متغیرها تأثیر معناداری در سطح ۵ درصد بر متغیرهای عملکردی و آلاینده‌های موتور نداشته‌اند.

مقایسه میانگین متغیرهای بررسی شده برای توان موتور تحت آزمایش (جدول ۷) نشان داد که بیشترین توان مربوط به سوخت B0 است. با افزایش مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل، توان موتور کاهش یافته است که ممکن است

1. Power
2. BSFC
3. Duncan

ناشی از کمتر بودن ارزش حرارتی سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل باشد. همچنین، افزایش نسبت EGR موجب افزایش توان موتور گشته است. افزایش توان موتور با استفاده از سامانه EGR داغ در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است. افزایش سرعت احتراق ناشی از ورود هوای گرم تر و همچنین کاهش تلفات پمپی در حالت استفاده از EGR نسبت به حالت بدون EGR به عنوان دلایل فیزیکی این پدیده بیان شده است [۱۱]. از دلایل شیمیایی این پدیده نیز می توان به تفکیک دی اکسید کربن و تشکیل رادیکال های آزاد و در نتیجه بهبود احتراق اشاره کرد [۱۲]. از لحاظ شرایط کاری موتور، هرچقدر توان موتور بیشتر باشد، مطلوب تر است و لذا در هنگام بهینه سازی شرایط کاری موتور باید تلاش شود که این متغیر بیشینه مقدار خود را داشته باشد. توان موتور مورد مطالعه با افزایش بار موتور به صورت خطی افزایش یافته است. با وجود افزایش کلی توان، با افزایش نسبت EGR در برخی حالات آزمایش نیز توان موتور با افزایش نسبت EGR کاهش یافته است. این کاهش توان موتور با افزایش نسبت EGR ممکن است ناشی از کاهش اکسیژن در دسترس برای احتراق و کاهش کیفیت اختلاط سوخت و هوا باشد که این موارد موجب کاهش کیفیت احتراق و در نتیجه کاهش توان موتور می شود. بیشترین کاهش در توان موتور به دلیل استفاده از سامانه EGR مربوط به سوخت B5، دور موتور ۲۱۰۰ rpm، بار ۲۵ درصد و نسبت EGR ۳۰ درصد و برابر با ۲۷/۸۷ درصد در مقایسه با حالت بدون EGR و سوخت دیزل خالص بوده است. در بارهای ۲۵ و ۷۵ درصد (بار کم و زیاد) تفاوت توان موتور برای نسبت های مختلف EGR، نسبت به حالتی که موتور تحت بار ۵۰ درصد کار می کند، کمتر است. به طور کلی، می توان گفت که استفاده از سامانه EGR، به ویژه در حالت استفاده از سوخت با درصد بیودیزل بیشتر (B15)، تاثیر قابل توجهی بر توان موتور نداشته است. این امر می تواند به دلیل عدم تاثیر سامانه EGR بر کیفیت احتراق درون سیلندر باشد. زیرا، از یک طرف، EGR موجب کاهش اکسیژن درون سیلندر شده و از طرف دیگر، استفاده از سوخت بیودیزل که دارای اکسیژن است موجب افزایش اکسیژن درون سیلندر شده است.

Table 6- Analysis of the variance of the considered parameters

جدول ۶- تجزیه واریانس (ANOVA) متغیرهای بررسی شده

df	F- Value	Mean square error	
6	167.2**	0.000004	Fuel type (A)
6	38.3**	0.000074	(B) EGR rate
4	44.0*	0.000127	(C)(rpm) Engine speed
4	15.3*	0.000998	(D) (%) Engine load
18	20.3*	0.000029	A*B
12	9.1 ^{ns}	0.000326	A*C
12	3.6 ^{ns}	0.001924	A*D
12	8.8 ^{ns}	0.000342	B*C
12	11.6 ^{ns}	0.000202	B*D
8	2.2 ^{ns}	0.010745	C*D
36	5.9 ^{ns}	0.000088	A*B*C
36	6.0 ^{ns}	0.000083	A*B*D
24	2.1 ^{ns}	0.001496	A*C*D
24	2.3 ^{ns}	0.001181	A*B*C*D

**Significant at 1% level, * Significant at 5% level, ^{ns} Not significant

Table 7- Duncan multiple range test of the engine power (kWh)

جدول ۷- مقایسه میانگین توان موتور با استفاده از روش دانکن (kWh)

Group	Mean value	ER	Group	Mean value	EL	Group	Mean value	ES	Group	Mean value	BP
	°k	%		°k	%		°k	rpm		°k	%
A	2.15	0	A	1.00	25	A	2.04	2100	A	2.16	15
B	2.17	10	B	2.18	50	B	2.16	1800	B	2.17	10
C	2.19	20	C	3.28	75	C	2.33	2400	B	2.17	5
C	2.19	30	-	-	-	-	-	-	B	2.18	0

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

توان موتور با افزایش دور موتور ابتدا افزایش و سپس با افزایش بیشتر دور موتور کاهش یافته است. این روند در تمامی انواع سوخت مشابه بوده است. در سوخت B5 توان خروجی موتور به مقدار ناچیزی افزایش یافته است. از طرف دیگر، افزایش نسبت EGR موجب کاهش توان موتور شده است. بیشترین مقدار کاهش توان موتور نسبت به حالت بدون EGR و سوخت دیزل خالص برابر با ۳۱/۹۷ درصد و در دور ۲۱۰۰ rpm، بار ۲۵ درصد، نسبت EGR ۳۰ درصد و سوخت B15 بوده است. از جمله دلایل افزایش توان موتور در زمان استفاده از سوخت بیودیزل می‌تواند ناشی از محتوای اکسیژن آن باشد. این اکسیژن اضافی در ساختار سوخت بیودیزل می‌تواند کیفیت احتراق را، به‌ویژه در نواحی غنی درون سیلندر که مقدار اکسیژن بیشتری برای داشتن احتراق کامل نیاز است، افزایش دهد. چگالی و گرانیوی بالاتر بیودیزل موجب افزایش نرخ جریان جرمی سوخت و همچنین کاهش ناشی سوخت ارسالی از پمپ انژکتور به انژکتورها می‌شود [۱۳]. توان موتور در زمان استفاده از سوخت B5 افزایش یافت، در حالی که در حالت استفاده از سوخت‌های B10 و B15 توان موتور کاهش یافته است. روند کاهش توان در سوخت B10 شدت بیشتری نسبت به سوخت B15 داشته است. نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است [۱۳، ۱۴]. در جدول ۸ مقایسه میانگین BSFC برای متغیرهای مختلف نشان داده شده است. بیشترین مقدار BSFC مربوط به سوخت B15 بوده است. کم‌تر بودن ارزش حرارتی سوخت بیودیزل و در نتیجه کاهش توان موتور می‌تواند از دلایل کاهش توان موتور با افزایش درصد سوخت بیودیزل باشد. همچنین، کاهش کیفیت احتراق به دلیل بالاتر بودن گرانیوی سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل کاهش توان موتور با افزایش درصد سوخت بیودیزل باشد [۱۵]. BSFC موتور با تغییر EGR تغییر چندانی نکرده است، به‌نحوی که تفاوت معناداری بین میانگین BSFC برای نسبت‌های مختلف EGR دیده نمی‌شود. دلیل این امر نیز این است که هم‌زمان با افزایش مصرف سوخت، به دلیل کم‌تر بودن ارزش حرارتی سوخت بیودیزل، توان موتور به دلایلی که ذکر شد افزایش یافته است و در نتیجه مقدار BSFC تقریباً ثابت مانده است.

Table 8- Duncan multiple range test of the engine BSFC (gr/kWh)

جدول ۸- مقایسه میانگین BSFC با استفاده از روش دانکن (gr/kWh)

Group	Mean value	ER	Group	Mean value	EL	Group	Mean value	ES	Group	Mean value	BP
	°k	%		°k	%		°k	rpm		°k	%
A	1105.3	10	A	380.06	50	A	489.5	2100	A	879.6	5
AB	1327.3	20	A	392.8	75	A	514.8	2400	B	1287.0	0
AB	1342.5	0	B	3205.1	25	B	2862.1	1800	B	1359.5	10
B	1425.7	30	-	-	-	-	-	-	C	1694.6	15

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

مصرف ویژه سوخت ترمزی متغیری است که میزان مصرف سوخت را نشان می‌دهد و لذا هر چقدر مقدار آن کمتر باشد از لحاظ بهینه‌سازی شرایط کاری موتور مطلوب‌تر است. مقدار BSFC با افزایش بار روی موتور کاهش یافت. کاهش مقدار BSFC از بار ۲۵ تا ۵۰ درصد شدت بیشتری نسبت به کاهش آن از بار ۵۰ تا ۷۵ درصد داشته است. علاوه بر این، افزایش مقدار درصد بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل مقدار BSFC را افزایش داده است. بیشترین مقدار افزایش BSFC برابر با ۴۷/۵۳ درصد در بار ۷۵ درصد، دور موتور ۲۴۰۰ rpm، سوخت B15 و نسبت EGR ۳۰ درصد بوده است. تمامی مخلوط‌های سوخت روند مشابهی را برای تغییرات مقدار BSFC در مقایسه با سوخت دیزل و بدون EGR از خود نشان دادند.

کمینه مقدار BSFC برای سوخت B5 بوده است (۲۰/۶۴ درصد کمتر از حالت بدون EGR و سوخت دیزل خالص در شرایط بار و دور یکسان) که این امر به دلیل افزایش توان ناشی از استفاده از سوخت B5 بوده است. چگالی سوخت بیودیزل اضافه‌شده در این تحقیق ۲/۹۹ درصد بیشتر از سوخت دیزل استفاده‌شده بوده و باید مقدار سوخت بیودیزل بیشتری برای تولید توان یکسان به سیلندر وارد شود. این افزایش جریان سوخت به معنی افزایش BSFC است. مهم‌ترین متغیر موثر بر مقدار BSFC موتور مقدار ارزش حرارتی آن است. کاهش مقدار BSFC با استفاده از سوخت بیودیزل ممکن است به دلیل پایین‌تر بودن ارزش حرارتی آن باشد. با وجود این، در تحقیقات دیگر، مقدار کمی افزایش در مقدار BSFC گزارش شده است [۱۴].

در جدول ۹ مقایسه میانگین دوده برای متغیرهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت معناداری برای همه سطوح متغیرهای بررسی شده وجود دارد. بیشترین دوده مربوط به سوخت B0 بوده است. محتوای اکسیژن بیودیزل دلیل کاهش مقدار دوده خروجی موتور است [۱۶]. با افزایش دور و بار روی موتور مقدار دوده خروجی موتور افزایش یافته است. استفاده از EGR دمای احتراق را کاهش داده که این امر ناشی از رقیق‌سازی و کاهش مقدار اکسیژن در سیلندر و همچنین افزایش ظرفیت گاز درون سیلندر است. کاهش دمای احتراق و محتوای اکسیژن با افزایش نسبت EGR موجب افزایش نرخ تشکیل هسته‌های کربن و همچنین اکسایش کربن و افزایش دوده می‌شود [۱۷].

Table 9- Duncan multiple range test of the engine soot (l/m)

جدول ۹- مقایسه میانگین دوده (l/m) با استفاده از روش دانکن

Group	Mean value	ER	Group	Mean value	EL	Group	Mean value	ES	Group	Mean value	BP
	°k	%		°k	%		°k	rpm		°k	%
A	6.80	10	A	3.33	25	A	6.39	1800	A	6.60	10
B	7.22	0	B	5.59	50	B	6.92	2100	B	7.01	15
C	7.53	30	C	12.86	75	C	8.69	2400	C	7.67	5
D	7.72	20	-	-	-	-	-	-	D	7.95	0

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

در جدول ۱۰ مقایسه میانگین آلایند CO برای متغیرهای مختلف نشان داده شده است. با افزایش بار و دور موتور مقدار آلایند CO خروجی موتور افزایش یافته است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت معناداری برای همه سطوح متغیرهای بررسی شده وجود دارد. با افزایش نسبت EGR نیز مقدار آلایند CO خروجی موتور نسبت به حالت بدون EGR تفاوت معناداری دارد. اضافه کردن سوخت بیودیزل به سوخت دیزل، به جز در حالت استفاده از سوخت B5، موجب کاهش آلایند CO موتور شده است. کاهش آلایند CO با افزودن سوخت بیودیزل به سوخت دیزل می‌تواند ناشی از وجود اکسیژن در ساختار سوخت بیودیزل باشد که موجب بهبود کیفیت احتراق و کامل‌تر شدن آن می‌شود [۱۸].

Table 10- Duncan multiple range test of the engine CO emission (% vol)

جدول ۱۰- مقایسه میانگین CO (درصد حجمی) با استفاده از روش دانکن

Group	Mean value	ER	Group	Mean value	EL	Group	Mean value	ES	Group	Mean value	BP
	°k	%		°k	%		°k	rpm		°k	%
A	0.76	0	A	0.25	25	A	0.49	1800	A	0.63	10
B	0.78	30	B	0.52	50	B	0.71	2100	B	0.67	15
C	0.79	10	C	1.56	75	C	1.17	2400	C	0.88	0
D	0.81	20	-	-	-	-	-	-	D	0.96	5

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

یکی از محصولات احتراق ناقص در سیلندر کربن مونوکسید یا CO است. گاز CO یکی از گازهای آلایند خروجی آگزوز است و در زمان بهینه‌سازی شرایط کاری موتور باید تلاش شود که تولید این گاز کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. در تمامی دوره‌های موتور، مقدار CO خروجی موتور حین استفاده از سوخت‌های بیودیزل کمتر از مقدار آن در سوخت دیزل بوده است. این کاهش مقدار CO به دلیل وجود اکسیژن در ساختار سوخت بیودیزل بوده است [۱۹]. این اکسیژن موجود در سوخت بیودیزل به کامل‌تر شدن احتراق و بنابراین کاهش مقدار تولید آلایند CO کمک می‌کند [۱۸]. همچنین، با افزایش دور موتور، مقدار CO کاهش یافته و با افزایش بار روی موتور مقدار CO افزایش یافته است. بیشترین مقدار کاهش CO برابر با ۵۲/۳۸ درصد بوده و برای سوخت B10 دور ۱۸۰۰ rpm و بار ۷۵ درصد مشاهده شده است. چندین متغیر مختلف بر مقدار CO تولیدی موتور تأثیر می‌گذارد. اکسیژن اضافی در ساختار سوخت بیودیزل موجب کامل‌تر شدن احتراق به‌ویژه در بارهای بالا

می‌شود. با وجود این، در بارهای بالا، به دلیل بالاتر بودن گرانیوی بیودیزل، پاشش و پودرشدن^۱ سوخت ممکن است کیفیت پایین‌تری داشته باشد و مقدار CO افزایش یابد، زیرا سامانه سوخت‌رسانی برای سوخت دیزل خالص طراحی و بهینه‌سازی شده است. افزایش دمای درون سیلندر در بارهای بالا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مقدار تشکیل سوخت دیزل به دلیل بهبود پودرشدن و اختلاط سوخت داشته باشد. اصلاح سامانه تزریق سوخت می‌تواند موجب مرتفع شدن این مشکل و افزایش کیفیت احتراق در بارهای بالا شود [۱۸].

علاوه بر این، مقدار CO با افزایش EGR افزایش می‌یابد. روند مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است [۲۱،۲۰]. این امر به دلیل کاهش مقدار CO درون سیلندر و همچنین کاهش دمای احتراق است. علاوه بر این، استفاده از EGR موجب کاهش کیفیت اختلاط مخلوط سوخت و هوا می‌شود. تمامی این موارد می‌توانند موجب کاهش کیفیت احتراق و در نتیجه افزایش آلایندگی CO شوند. از طرف دیگر، افزودن بیودیزل به سوخت دیزل موجب کاهش آلایندگی CO می‌شود. لذا، مقدار CO با استفاده از سوخت B15، ۳۰ درصد کاهش یافته است. مقدار متوسط کاهش مقدار CO در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۴/۰۴، ۱۲ و ۱/۷۳ درصد است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، در بار بالا مقدار کاهش آلایندگی CO کمترین مقدار است. علاوه بر این، بیشترین میانگین CO در بار متوسط است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که نقطه بهینه کاری موتور در بار متوسط است. کاهش آلایندگی CO در دروهای کم و زیاد به ترتیب برابر با ۲۳/۳۵ و ۸/۰۹ درصد است. در دور متوسط مقدار CO افزایش یافته است. به طور کلی، استفاده همزمان از سامانه EGR و سوخت بیودیزل مقدار آلایندگی CO را کاهش داده است. در جدول ۱۱، مقایسه میانگین آلایندگی UHC برای متغیرهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت معناداری برای همه سطوح متغیرهای بررسی شده وجود دارد. با افزایش دور موتور، بار روی موتور و نسبت EGR مقدار آلایندگی UHC افزایش یافته است. کاهش اکسیژن موجود در سیلندر و کاهش کیفیت احتراق دلیل افزایش آلایندگی UHC در حالت استفاده از سامانه EGR است [۲۳،۲۲]. با افزودن سوخت بیودیزل به سوخت دیزل مقدار آلایندگی UHC کاهش یافته است. محتوای اکسیژن سوخت بیودیزل دلیل اصلی کاهش UHC عنوان شده است [۲۴].

Table 11- Duncan multiple range test of the engine UHC emission (ppm)

جدول ۱۱- مقایسه میانگین UHC (ppm) با استفاده از روش دانکن

Group	Mean value °k	ER %	Group	Mean value °k	EL %	Group	Mean value °k	ES rpm	Group	Mean value °k	BP %
A	86.69	0	A	49.45	25	A	62.94	1800	A	75.38	10
B	99.19	10	B	72.99	50	B	96.76	2100	B	83.22	15
C	102.46	30	C	169	75	C	135.33	2400	C	114.64	0
D	102.77	20		-	-		-	-	D	117.22	5

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

گاز UHC یکی از گازهای آلایندگی خروجی آگروز است و برای بهینه‌سازی موتور، تشکیل و تولید این گاز باید تا حد امکان کاهش یابد. آلایندگی UHC با افزایش بار روی موتور افزایش می‌یابد. روند یکسانی برای مقدار آلایندگی UHC در تمامی دوره‌های موتور مشاهده می‌شود، اما در دوره‌های بالا مقدار آلایندگی UHC بیشتر است. آلایندگی UHC با افزایش دور موتور افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار آلایندگی UHC با افزایش نسبت EGR افزایش می‌یابد.

می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل (تا B10)، کیفیت احتراق کاهش یافته است. این افزایش چگالی و گرانیوی موجب کاهش کیفیت پاشش و مخلوط شدن سوخت با هوای درون سیلندر شده است. نتایج مشابهی در تحقیقات دیگر گزارش شده است و وجود محتوای اکسیژن در سوخت بیودیزل به عنوان دلیل اصلی کاهش UHC بیان شده است [۲۴].

استفاده از EGR مقدار آلایند UHC را افزایش داده است. جالب توجه‌ترین ویژگی آلایند UHC کاهش مقدار این آلایند حین استفاده همزمان از سامانه EGR و سوخت بیودیزل است. محتوای اکسیژن سوخت بیودیزل مقدار آلایند UHC را کاهش داده است و مقدار این کاهش به حدی بوده است که افزایش UHC ناشی از استفاده از سامانه EGR را مرتفع می‌سازد [۲۵]. بیشینه کاهش آلایند UHC برابر با ۳۴/۱۰ درصد برای سوخت B10 و نسبت EGR ۳۰ درصد بوده است. آلایند UHC در بار ۲۵٪ افزایش یافته است (۱/۴۳ درصد) و در بارهای ۵۰٪ و ۷۵٪ افزایش یافته است (به ترتیب برابر با ۳/۲۲ و ۱/۸۹ درصد). همان‌گونه که دیده می‌شود، تغییرات آلایند UHC در زمان استفاده همزمان سامانه EGR و سوخت بیودیزل ناچیز بوده است.

مقدار آلایند UHC، با افزایش مقدار بیودیزل تا B10، کاهش یافت. مقدار UHC با افزایش نسبت EGR افزایش یافته است. افزایش آلایند UHC در حالت استفاده از سامانه EGR به دلیل کاهش اکسیژن موجود در سیلندر و کاهش کیفیت احتراق است [۱۸،۱۷]. بیشترین مقدار افزایش آلایند UHC مربوط به سوخت B0، نسبت EGR ۳۰ درصد، بار ۲۵ درصد و دور ۲۱۰۰rpm و برابر با ۶۳/۳۳ درصد بوده است (نسبت به حالت بدون EGR، سوخت دیزل خالص، در دور ۱۸۰۰rpm و بار ۲۵ درصد).

در جدول ۱۲، مقایسه میانگین آلایند NO_x برای متغیرهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت معناداری برای همه سطوح متغیرهای بررسی شده وجود دارد. با افزایش بار روی موتور مقدار آلایند NO_x افزایش یافته است. با افزایش مقدار نسبت EGR آلایند NO_x کاهش یافته است که این امر با نتایج سایر تحقیقات مطابقت دارد [۲۶]. کاهش مقدار آلایند NO_x با استفاده از سامانه EGR در بخش‌های قبلی به طور مفصل توضیح داده شد. همچنین، با افزایش مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل آلایند NO_x کاهش یافته است. این روند در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۲۷]. دلیل کاهش آلایند NO_x موتور اشتعال تراکمی با افزودن سوخت بیودیزل به سوخت دیزل افزایش آلایند NO_2 و کاهش آلایند NO، به دلیل وجود اکسیژن در سوخت بیودیزل و در نتیجه کاهش یا ثابت ماندن مجموع این دو آلایند، بیان شده است [۲۷].

Table 12- Duncan multiple range test of the engine NO_x emission (ppm)

جدول ۱۲- مقایسه میانگین NO_x (ppm) با استفاده از روش دانکن

Group	Mean value	ER	Group	Mean value	EL	Group	Mean value	ES	Group	Mean value	BP
	°k	%		°k	%		°k	rpm		°k	%
A	205.98	3	A	134.14	25	A	197.73	2100	A	208.61	15
B	213.77	20	B	258.25	50	B	213.57	2400	B	211.17	10
C	232.14	10	C	277.09	75	C	261.49	2800	C	234.67	5
D	246.07	0	-	-	-	-	-	-	D	242.33	0

ES: Engine Speed, ER: Ratio EGR, BP: Biodiesel Percent, EL: Engine Load

مهم‌ترین آلایند‌ای که در این تحقیق سعی بر کاهش آن بوده آلایند NO_x است، لذا، در زمان بهینه‌سازی کار موتور این آلایند باید تا بیشینه مقدار ممکن کاهش یابد. آلایند NO_x با افزایش دور موتور افزایش یافته است، اما با افزایش بیشتر دور موتور مقدار آن کاهش یافته است. علاوه بر این، در دوره‌های پایین موتور مقدار آلایند NO_x با افزایش نسبت بیودیزل افزایش یافته است. آلایند NO_x با افزایش نسبت EGR کاهش یافته است.

در مجموع، افزودن بیودیزل به سوخت دیزل مقدار آلایند NO_x خروجی موتور را برای سوخت‌های B10 و B15 کاهش داده است. بیش‌ترین افزایش در آلایند NO_x خروجی موتور برای سوخت B5 بوده است. مقدار آلایند در این حالت به میزان ۳۹/۵۷ بیشتر از سوخت B0 بوده است. با استفاده از سامانه EGR مقدار آلایند تنها ۱۲/۹۵ درصد برای سوخت B10 افزایش یافته است.

لذا، می‌توان گفت که استفاده از سامانه EGR افزایش NO_x ناشی از سوخت بیودیزل را تا حدود زیادی خنثی می‌سازد. مقدار متوسط کاهش آلاینده NO_x برای بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۸/۷۳، ۱۵/۳۴ و ۵/۷۲ بوده است. همان‌گونه که در مورد بار متوسط دیده می‌شود، کاهش آلاینده NO_x از بارهای ۲۵ و ۷۵ درصد بیشتر بوده است. روند کاهش آلاینده NO_x برای دور موتورهای کم، متوسط و زیاد همانند کاهش آن در بارهای ۲۵ تا ۷۵ درصد است. آلاینده NO_x برای بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۳/۶۸، ۲۱/۲۵ و ۲۹ درصد کاهش یافته است.

استفاده از کمینه مقدار سوخت بیودیزل در این تحقیق (B5) تأثیر چندانی بر دوده خروجی موتور نداشته است، در حالی که در مورد سوخت‌های B10 و B15 مقدار دوده خروجی کاهش یافته است. تشکیل دوده خروجی موتور ناشی از احتراق ناقص سوخت مایع و واکنش ناقص کربن در ساختار سوخت هیدروکربنی است [۲۸]. کاهش مقدار دوده خروجی موتور در زمان استفاده از سوخت بیودیزل ناشی از محتوای اکسیژن بیودیزل است [۲۹]. این اکسیژن اضافی موجب افزایش واکنش‌ها و بهبود کیفیت احتراق می‌شود. علاوه بر این، کم‌تر بودن کربن در ساختار مولکولی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل می‌تواند یکی دیگر از دلایل کاهش دوده خروجی موتور باشد [۲۳]. کاهش دمای احتراق و محتوای اکسیژن با افزایش نسبت EGR موجب افزایش نرخ تشکیل هسته‌های کربن و همچنین اکسایش کربن و در نتیجه افزایش دوده خروجی موتور می‌شود [۲۳].

بیشترین افزایش در دوده خروجی موتور ناشی از EGR برای سوخت B10، بار ۵۰ درصد، نسبت EGR ۳۰ درصد و دور موتور ۱۸۰۰ rpm بوده است (۳۶/۸۷ درصد). در بار ۲۵ درصد، افزایش دوده خروجی موتور ناشی از استفاده از EGR بیشتر از آن در بارهای ۵۰ و ۷۵ درصد است. این امر ممکن است ناشی از محتوای اکسیژن سوخت بیودیزل باشد [۲۳]. آلاینده دوده موتور با افزایش نسبت EGR افزایش یافته است. از طرف دیگر، این آلاینده با افزایش نسبت بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل کاهش یافته است. بدون استفاده از سامانه EGR آلاینده دوده موتور برای سوخت‌های B5، B10 و B15 به ترتیب به میزان ۳۳/۳۳، ۴۲/۶۳ و ۳۵/۲۶ درصد نسبت به سوخت دیزل خالص در دور موتور ۱۸۰۰ rpm کاهش یافته است. به‌طور کلی، قابل توجه است که مجموع مقدار دوده خروجی موتور در زمان استفاده همزمان از سامانه EGR و سوخت بیودیزل کاهش یافته است. دوده خروجی موتور در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۳/۷۹، ۷/۲۲ و ۰/۶۷ درصد نسبت به سوخت B0 کاهش یافته است.

در شکل ۲ تأثیر نسبت‌های مختلف EGR بر مقدار آلاینده NO_x و دوده خروجی موتور برای سوخت B15 در دور موتور ۱۸۰۰ rpm و بارهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است، کاهش آلاینده NO_x به‌وسیله سامانه EGR یک اشکال دارد و آن افزایش دوده خروجی موتور است. اما، با افزایش نسبت سوخت بیودیزل اضافه‌شده به سوخت دیزل، به‌دلیل ویژگی‌های خاص سوخت بیودیزل از جمله محتوای اکسیژن آن، مقدار دوده خروجی موتور کاهش یافته است.

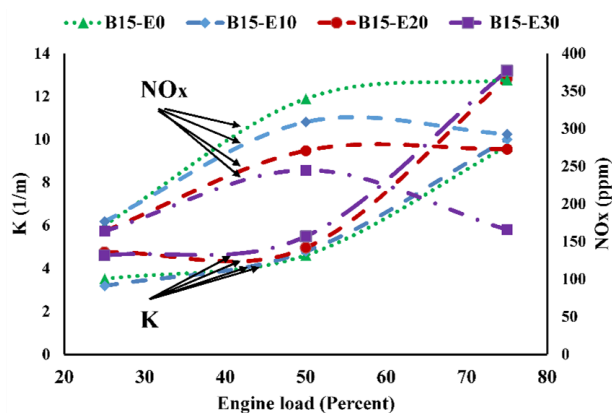


Figure 2- Effect of the engine load and EGR rate on the NO_x emission and soot in 1800 rpm and B15 fuel

شکل ۲- تأثیر بار موتور و نسبت EGR بر NO_x و دوده در دور ۱۸۰۰rpm و سوخت B15

مدل‌های ریاضی مختلف برای متغیرهای اندازه‌گیری شده (توان، CO، NO_x، UHC، BSFC و دوده) با استفاده از نرم‌افزار Dsign expert 8.0 ایجاد شد. این مدل‌ها در معادلات (۴) تا (۹) نشان داده شده است. مقادیر ذکر شده در این معادلات از جنس همان متغیرهای اندازه‌گیری شده و دارای واحد مشابه با آن‌ها هستند. مقدار P-value برای مدل‌های ایجاد شده کمتر از ۰/۰۱ بوده است (جدول ۱۳). این امر نشان‌دهنده معتربودن این روابط در سطح اطمینان ۹۹ درصد بوده است.

Table 13- Analysis of the variance of the models

جدول ۱۳- تجزیه واریانس مدل‌ها

F-value	Mean square	Degree of freedom	Sum of square	Model
42.81**	7.77	14	108.77	Power
27.14**	3.14	14	43.99	CO
16.37**	4444.28	14	6222219.9	NO _x
18.51**	28081.47	14	393140.5	UHC
7.89**	41675198	14	5.83e08	BSFC
28.90**	153.64	14	2151.0	Smoke

**Significant at 1% level

در جدول ۱۴، برخی از متغیرهای آماری مدل‌های ایجاد شده نشان داده شده است. علاوه بر این، مشخص شد که ضرایب برای متغیرهای موجود در معادلات آورده شده در سطح ۵ درصد معنادار است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ضریب تبیین^۱ و ضریب تبیین تعدیل شده^۲ برای کلیه مدل‌های ایجاد شده در حد قابل قبول و نزدیک به یک بوده است. این متغیر صحت و دقت مدل را در پیش‌بینی مقادیر واقعی هر متغیر نشان می‌دهد [۱۰]. تفاوت‌های ناچیز بین مقادیر واقعی ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل‌هاست. همان‌گونه که در جدول ۱۴ قابل مشاهده است، بالاترین مقدار ضریب تبیین تعدیل شده برابر با ۰/۹۵ است. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقادیر واقعی آلاینده‌ها و متغیرهای عملکردی موتور مورد مطالعه بررسی شد و در نهایت بهترین نتایج، یعنی مدل‌هایی که بیشترین ضریب تبیین را داشتند، مربوط به مدل‌های درجه دوم بود. در شکل ۳، ضریب برازش^۳ بین مقدار پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی متغیرهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها نشان داده شده است، خط برازش بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده به خط ۴۵ درجه نزدیک است. این بدان معنی است که همبستگی بالایی میان داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده وجود دارد. براساس مقادیر به دست آمده برای ضریب برازش و متغیرهای مختلف (جدول ۱۴)، می‌توان گفت که این مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی مقادیر واقعی گازهای خروجی موتور و متغیرهای عملکردی آن قابل قبول است.

Table 14- Statistical parameters of the mathematical models

جدول ۱۴- متغیرهای آماری مدل‌های ریاضی

Parameter	R-Squared	Adj R-Squared	Std. Dev.	C. V. %
CO	0.95	0.94	0.135856	19.6
HC	0.92	0.91	16.22	18.83
NO _x	0.90	0.88	26.98	12.0
Power	0.96	0.95	0.21	9.92
BSFC	0.90	0.89	39.34	8.93
Smoke	0.95	0.94	1.13	15.12

$$\begin{aligned} \text{Power} = & (0.04 \cdot \text{EL}) + (-7.33 \cdot 10^{-3} \cdot \text{ES}) - 0.01 \cdot \text{ER} + (0.11 \cdot \text{BP}) + (4.73 \cdot 10^{-6} \cdot \text{EL} \cdot \text{ES}) + 3.7 \cdot 10^{-5} \cdot \text{EL} \cdot \text{ER} - \\ & 1.13 \cdot 10^{-4} \cdot \text{EL} \cdot \text{BP} + 5.87 \cdot 10^{-6} \cdot \text{ES} \cdot \text{ER} - 4.77 \cdot 10^{-5} \cdot \text{ES} \cdot \text{BP} + 6.69 \cdot 10^{-5} \cdot \text{ER} \cdot \text{BP} - 7.88 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{EL}^2) + 1.80 \cdot 10^{-6} \cdot \text{ES}^2 \\ & + 5.90 \cdot 10^{-5} \cdot \text{ER}^2 - 7.93 \cdot 10^{-5} \cdot \text{BP}^2 + 7.08; \end{aligned} \quad (۴)$$

1. R square
2. Adjusted - R square
3. Fitness coefficient

$$CO = -0.08*EL - 4.3e-3*ES - 0.02*ER - 1.36e-3*BP + 2.59e-5*EL*ES + 5.48e-5*EL*ER - 6.2e-4*EL*BP + 9.2e-6*ES*ER + 3.66e-6*ES*BP - 2.35e-4*ER*BP + 5.2e-4*EL^2 + 9.02e-7*ES^2 - 4.28e-5*ER^2 + 6.08e-4*BP^2 + 5.55 \quad (5)$$

$$NO_x = 17.21*EL - 1.61*ES + 0.51*ER + 3.73*BP - 1.55e-3*EL*ES - 0.05*EL*ER - 8.8e-3*EL*BP + 4.73e-5*ES*ER - 1.48e-3*ES*BP - 0.07*ER*BP - 0.1*EL^2 + 3.86e-4*(ES^2) + 0.03*ER^2 - 0.07*BP^2 + 1514.26 \quad (6)$$

$$UHC = (-7.49*EL) + (.096*ES) - 0.17*ER - (0.18*BP) + (2.33e-3*EL*ES) + 0.01*EL*ER - 0.06*EL*BP + 4.69e-4*ES*ER - 1.61e-4*ES*BP - 0.03*ER*BP + 0.05*(EL^2) - 2.8e-5*ES^2 - 0.02*ER^2 + 0.09*BP^2 + 8.76 \quad (7)$$

$$BSFC = (-28.02*EL) + (1.5*ES) + 2.92*ER - 2.12*BP + (2.5e-3*EL*ES) + 7.07e-3*EL*ER - 0.02*EL*BP - 2.02e-3*ES*ER - 1.6e-3*ES*BP - 4.17e-3*ER*BP + 0.19*(EL^2) - 3.38e-4*ES^2 + 0.03*ER^2 + 0.37*BP^2 - 631.23 \quad (8)$$

$$Smoke = (-0.36*EL) + (-8.69e-3*ES) - 0.05*ER + (6.72e-3*BP) + (8.06e-5*EL*ES) - 1.45e-4*EL*ER - (3.8e-3*EL)*BP + 5.57e-5*ES*ER - 2.74e-6*ES*BP - 5.06e-4*ER*BP + 4.17e-3*(EL^2) + 1.90e-6*ES^2 - 1.04e-3*ER^2 + 5.2e-3*BP^2 + 15.09 \quad (9)$$

که در این روابط، EL بار روی موتور (./)، ES دور موتور (rpm)، ER نسبت EGR (./) و BP مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل (./) است.

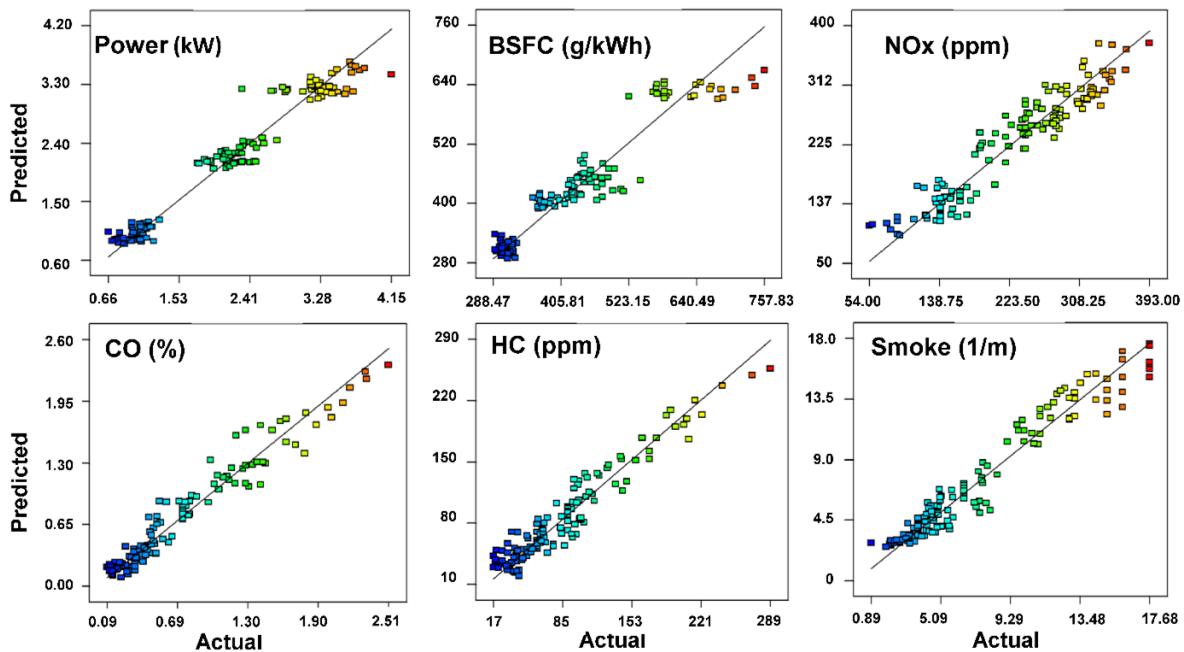


Figure 3- Experimental vs. predicted values of the parameters
 شکل ۳- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای متغیرهای مختلف

نقطه بهینه‌شده توسط روش بهینه‌سازی RSM بدین صورت بود که موتور در بار ۴۵/۳ درصد و دور موتور ۲۰۸۰ rpm کار کند. برای داشتن حداکثر کارایی و حداقل آلاینده‌گی باید نسبت EGR ۱۴/۹۷ درصد و مقدار بیودیزل مخلوط‌شده با سوخت دیزل برابر با ۵/۴۳ درصد باشد (جدول ۱۵). در این حالت، مقدار CO، NO_x، UHC، توان، BSFC، و دوده به ترتیب برابر با ۰/۳۳ درصد، ۱۹۸/۸۹ppm، ۶۲/۹۹ppm، ۱/۸۵kw، ۴۹۴/۴۶g/kWh و ۴/۵۳ l/m است. برای بررسی نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی، نقاط بهینه پیشنهادشده به وسیله روش RSM جدول ۱۶ به صورت عملی در موتور بررسی شد. نتایج واقعی نقاط بهینه پیشنهادشده با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه شد و نتایج آن در جدول ۱۶ آورده شده است. با مقایسه مقادیر خطای

به دست آمده با سایر تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه سازی پارامترهای موتور، مشخص شد که دقت بهینه سازی در حد قابل قبول بوده است [۳۰]. با مقایسه مقادیر تجربی و مقادیر پیشنهاد شده توسط نرم افزار، مشخص شد که مدل های ارائه شده و روش بهینه سازی استفاده شده در مورد متغیرهای NO_x و BSFC کارایی خوبی از خود نشان داده است (به ترتیب دارای ۱/۳۵ و ۱/۵۲ درصد خطا). در مورد سایر متغیرهای بررسی شده، مقدار خطا افزایش یافته است (به ویژه آلایندگی دوده با ۱۱/۱۸ درصد خطا). این افزایش مقدار خطا می تواند به دلیل نوع متغیر بررسی شده باشد. به دلیل نوع اندازه گیری آلایندگی دوده و بازه تغییرات بیشتر آن نسبت به سایر آلایندگی ها، روش بهینه سازی کارایی کمتری در بهینه سازی این متغیر داشته است. با این حال، مقادیر بالاتر خطا در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۳۰].

Table 15- The optimized values derived by RSM method

جدول ۱۵- مقادیر بهینه پیشنهاد شده توسط روش RSM

BP (%)	EGR (%)	ES (rpm)	(%) EL	Factor
5.43	14.97	2080.70	45.3	RSM

Table 16- The experimental values of the responses in comparison with suggested valued by the RSM method

جدول ۱۶- پاسخ های به دست آمده از روش بهینه سازی RSM و مقایسه با مقادیر واقعی

Soot (1/m)		BSFC (g/kWh)		Power (kW)		UHC(ppm)		NO_x (ppm)		CO (ppm)		Response
Real	RSM	Real	RSM	Real	RSM	Real	RSM	Real	RSM	Real	RSM	Source
5.1	4.53	487.05	494.46	1.94	1.85	60.78	62.99	196.25	198.89	0.35	0.33	Value
11.18		1.52		4.64		3.64		1.35		5.71		Error (%)

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق عبارتند از:

- مقدار آلایندگی NO_x با افزایش بیودیزل در مخلوط دیزل و بیودیزل افزایش می یابد و با افزایش نسبت EGR کاهش می یابد. تاثیر EGR بر کاهش مقدار آلایندگی NO_x در مقادیر بالاتر بیودیزل (B15) کمتر بود. مقدار متوسط کاهش آلایندگی NO_x برای بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۸/۷۳، ۱۵/۳۴ و ۵/۷۲ بوده است.
- دوده خروجی موتور با استفاده از سوخت B5 کاهش و با استفاده از سوخت های B10 و B15 افزایش می یابد. همچنین، با افزایش نسبت EGR مقدار دوده خروجی موتور، به ویژه در نسبت های بالای بیودیزل، افزایش می یابد. بیشترین افزایش در دوده خروجی موتور ناشی از EGR برای سوخت B10، بار ۵۰ درصد، نسبت EGR ۳۰ درصد و دور موتور ۱۸۰۰ rpm بوده است (۳۶/۸۷ درصد).
- آلایندگی های CO و UHC برای سوخت های B5 و B10 کاهش یافت، اما با استفاده از سوخت B15 مقدار این آلایندگی ها افزایش یافت. علاوه بر این، با افزایش مقدار نسبت EGR این دو آلایندگی افزایش یافتند و مقدار این افزایش، به ویژه در سوخت B15، بیشتر بود. بیشترین مقدار کاهش CO برابر با ۵۲/۳۸ درصد بوده و برای سوخت B10، دور ۱۸۰۰ rpm و بار ۷۵ درصد مشاهده شده است. بیشترین مقدار افزایش آلایندگی UHC مربوط به سوخت B0، نسبت EGR ۳۰ درصد، بار ۲۵ درصد و دور ۲۱۰۰ rpm و برابر با ۶۳/۳۳ درصد بوده است (نسبت به حالت بدون EGR، سوخت دیزل خالص، در دور ۱۸۰۰ rpm و بار ۲۵ درصد).
- BSFC موتور برای سوخت B5 کاهش یافت و برای سوخت های B10 و B15 افزایش یافت. افزایش نسبت EGR موجب افزایش مقدار BSFC موتور شد. این افزایش، به ویژه در سوخت B15، بیشتر قابل مشاهده است. بیشترین مقدار افزایش BSFC برابر با ۴۷/۵۳ درصد در بار ۷۵ درصد، دور موتور ۲۴۰۰ rpm و سوخت B15 و نسبت EGR ۳۰ درصد بوده است.

- توان موتور برای سوخت B5 به صورت تقریبی برابر با سوخت دیزل استاندارد (B0) بود، اما با استفاده از سوخت‌های B10 و B15، با افزایش سرعت موتور، توان ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. استفاده از EGR موجب کاهش توان موتور، به‌ویژه در بارهای پایین، شد. بیشترین کاهش در توان موتور، به‌دلیل استفاده از سامانه EGR مربوط به سوخت B5، دور موتور ۲۱۰۰ rpm، بار ۲۵ درصد و نسبت EGR ۳۰ درصد و برابر با ۲۷/۸۷ درصد در مقایسه با حالت بدون EGR و سوخت دیزل خالص بوده است.
- برای کلیه شرایط کاری موتور، با استفاده از نسبت EGR ۱۰ تا ۲۰ درصد، می‌توان به یک موازنه مناسب بین متغیرهای آلایندگی و عملکردی موتور دست یافت.
- با افزایش مقدار نسبت EGR، بیشینه دمای احتراق کاهش یافت. در بارهای بالا، از شدت کاهش نرخ آزادسازی گرما کاسته شد. مقدار بیشینه این کاهش ۲/۳۳ درصد نسبت به حالت بدون EGR و برابر با ۹/۹ درصد بود.
- مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی متغیرهای عملکردی و آلایندگی موتور ایجاد شد. مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده برای متغیرهای CO، UHC، NO_x، توان، BSFC و دوده به‌ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۹۱، ۰/۸۸، ۰/۹۵، ۰/۸۹ و ۰/۹۴ بود.
- نقطه بهینه‌شده توسط روش بهینه‌سازی RSM نیز بدین صورت بود که اگر موتور در بار ۴۵/۳ درصد، دور موتور ۲۰۸۰ rpm کار کند، برای داشتن حداکثر کارایی و حداقل آلایندگی باید نسبت EGR ۱۴/۹۷ درصد و مقدار بیودیزل مخلوط‌شده با سوخت دیزل برابر با ۵/۴۳ درصد باشد. در این حالت، مقدار CO، NO_x، UHC، توان، BSFC و دوده به‌ترتیب برابر با ۰/۳۳ درصد، ۱۹۸/۸۹ppm، ۶۲/۹۹ppm، ۱/۸۵kw، ۴۹۴/۴۶g/kWh و ۴/۵۳ l/m است.

منابع

1. C. E. Bowen, *An experimental investigation into the use of exhaust gas recirculation for diesel engine NOx control*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Calgary, Canada, 1998.
2. J. C. Houghton, *Royal commission on environmental pollution*, Report 18, Transport and the environment, 1994.
3. D. Agarwal, S. K. Singh, and A. K. Agarwal, "Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine," *Applied Energy*, 88, 2011, pp. 2900-2907.
4. M. M. Abdelaal and A. H. Hegab, "Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR," *Energy Conversion and Management*, 64, 2012, pp. 301-312.
5. D. Six, T. Van Herzele, L. Vervaeke, M. Bastiaen, J. Galle, R. Sierens and et al., "Development and testing of an EGR system for medium speed diesel engines," *SAE Technical Paper*, 1, No. 680, 2012.
6. F. Yan and J. Wang, "Control of diesel engine dual-loop EGR air-path systems by a singular perturbation method," *Control Engineering Practice*, 21, 2013, pp. 981-988.
7. R. G. Papagiannakis, "Study of air inlet preheating and EGR impacts for improving the operation of compression ignition engine running under dual fuel mode," *Energy Conversion and Management*, 68, 2013, pp. 40-53.
8. A. E. Dhole, R. B. Yarasu, D. B. Lata, and S. S. Baraskar, "Mathematical modeling for the performance and emission parameters of dual fuel diesel engine using hydrogen as secondary fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 2014, pp. 12991-13001.
9. S. N. Shahangian and S. A. Jazayeri, "Effect of Initial Temperature and EGR on Combustion and Performance Characteristics of Homogenous Charge Compression Ignition Engine Fueled with Dimethyl Ether," *The Journal of Engine Research*, 14, 2009, pp. 63-70.
10. A. I. Khuri and S. Mukhopadhyay, "Response surface methodology," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2, No. 2, 2010, pp. 128-149.
11. V. Pradeep and R. P. Sharma, "Use of HOT EGR for NOx control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from Jatropa oil," *Renewable Energy*, 32, 2007, pp. 1136-1154.
12. M. Y. Selim, "Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine," *Energy Conversion and Management*, 44, 2003, pp. 707-721.
13. E. Buyukkaya, S. Benli, S. Karaaslan, and M. Guru, "Effects of trout-oil methyl ester on a diesel engine performance and emission characteristics," *Energy Conversion and Management*, 69, 2013, pp. 41-48.
14. E. Buyukkaya, "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Fuel*, 89, 2010, pp. 3099-3105.
15. C. Solaimuthu, V. Ganesan, D. Senthilkumar, and K. K. Ramasamy, "Emission reductions studies of a biodiesel engine using EGR and SCR for agriculture operations in developing countries," *Applied Energy*, 138, 2015, pp. 91-98.

16. Z. Wang, L. Li, J. Wang, and R. D. Reitz, "Effect of biodiesel saturation on soot formation in diesel engines," *Fuel*, 175, 2016, pp. 240-248.
17. Ö. Can, E. Öztürk, H. Solmaz, F. Aksoy, C. Çınar, and H. S. Yücesu, "Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine," *Applied Thermal Engineering*, 95, 2016, pp. 115-124.
18. A. Sanjid, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, M. Varman, N. W. B. M. Zulkifli, and M. J. Abedin, "Performance and emission of multi-cylinder diesel engine using biodiesel blends obtained from mixed inedible feedstocks," *Journal of Cleaner Production*, 112, 2016, pp. 4114-4122.
19. M. Gumus and S. Kasifoglu, "Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel," *Biomass and bioenergy*, 34, 2010, pp. 134-139.
20. H. Feng, Z. Zheng, M. Yao, G. Cheng, M. Wang, and X. Wang, "Effects of exhaust gas recirculation on low temperature combustion using wide distillation range diesel," *Energy*, 51, 2013, pp. 291-296.
21. M. Talei, S. Jafarmadar, S. h. Khalilarya, and M. Mansury, "Investigation On The Influence Of Exhaust Gas Recirculation On Performance Of Homogeneous Charge Compression Ignition (Hcci) Engine," *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32, No. 2, 2016, pp. 13-19. (In Persian)
22. M. Mani, G. Nagarajan, and S. Sampath, "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine," *Energy*, 36, 2011, pp. 212-219.
23. H. E. Saleh, "Effect of exhaust gas recirculation on diesel engine nitrogen oxide reduction operating with jojoba methyl ester," *Renewable Energy*, 34, 2009, pp. 2178-2186.
24. B. Aliyu, D. Shitanda, S. Walker, B. Agnew, S. Masheiti, and R. Atan, "Performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with Croton megalocarpus (musine) methyl ester," *Applied Thermal Engineering*, 31, 2011, pp. 36-41.
25. H. E. Saleh, "Experimental study on diesel engine nitrogen oxide reduction running with jojoba methyl ester by exhaust gas recirculation," *Fuel*, 88, 2009, pp. 1357-1364.
26. M. fallah, "Experimental investigation of effects of engine cooling temperature, EGR and injection timing to reduce NOx emissions in the diesel engines," *Modares Mechanical Engineering*, 11, 2012, pp. 1-9. (In Persian)
27. M. Dorado, "Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil," *Fuel*, 82, 2003, pp. 1311-1315.
28. O. Özener, L. Yüksek, A. T. Ergenç, and M. Özkan, "Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Fuel*, 115, 2014, pp. 875-883.
29. D. Wang, Z. C. Liu, J. Tian, J. W. Liu, and J. R. Zhang, "Investigation of particle emission characteristics from a diesel engine with a diesel particulate filter for alternative fuels," *International Journal of Automotive Technology*, 13, 2012, pp. 1023-1032.
30. Z. Zhu, F. Zhang, C. Li, T. Wu, K. Han, J. Lv, *et al.*, "Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau," *Applied Energy*, 157, 2015, pp. 789-797.

English Abstract

Optimizing the EGR rate, biodiesel fuel ratio and engine working mode using RSM method

Farzad Jaliliantabar¹, Barat Ghobadian^{2*} and Gholamhassan Najafi³

1-Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, farzad.jaliliantabar@modares.ac.ir

2- Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, ghobadib@modares.ac.ir

3- Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, g.najafi@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2017.09.10, Received in revised form: 2017.10.11, Accepted: 2017.10.30)

In this work, the effects of various engine loads, engine speeds, EGR rates and biodiesel ratio in biodiesel-diesel fuel blends on the emissions and performance of a 4-stroke single cylinder diesel engine have been investigated. The RSM method has been used to optimize the EGR rate, biodiesel percent and engine working mode. The highest decrease in NO_x emissions while using biodiesel and EGR has been 63.76% with B10 fuel blend and 30% EGR rate. Simultaneously using EGR and biodiesel reduced CO emission by 4.04, 12 and 1.73% for low, medium and high engine speed. Using biodiesel decreased the HC emissions, so it compensated the increase of HC due to EGR. The highest reduction in HC emission levels while simultaneously using EGR and biodiesel has been 54.05%. It is noticeable that the total amount of the smoke emission levels while using EGR and biodiesel did not change considerably. The optimized condition proposed by the RSM method has been 45.3% engine load, 2080 rpm engine speed, 14.97 % EGR rate and 5.43% biodiesel blend with diesel fuel.

Keywords: Emission, Biodiesel, Optimization, EGR, RSM.