

تأثیر اتانول به عنوان افزودنی سوخت بیودیزل در عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل دوگانه‌سوز

امیر هاشمی نژاد^۱، بهمن نجفی^{۲*}، سینا فیض‌الزاده اردبیلی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دکتری، انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۲/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵)

چکیده: بررسی اثرات سوخت پایلوت حاوی درصد‌های پایین اتانول و آب در مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل در یک فرایند احتراق دوگانه‌سوز با گاز طبیعی می‌تواند نتایج مطلوبی بر عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل داشته باشد. در پژوهش حاضر، سه سطح اتانول (۰، ۲ و ۴ درصد)، دو سطح بیودیزل (۰ و ۵ درصد) و چهار سطح آب (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) با سوخت دیزل مخلوط شدند. تمام نمونه سوخت‌ها به عنوان سوخت پایلوت در فرایند احتراق دوسوخته با درصد جایگزینی گاز طبیعی ۸۰ درصد در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج، حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول در کنار گاز طبیعی می‌تواند علاوه بر کاهش آلاینده‌ها، با افزایش فشار درون محفظه احتراق، عملکرد موتور دیزل را به طور نسبی بهبود بخشد. حضور محتوای اکسیژن در اتانول می‌تواند موجب بهبود روند احتراق با سوق دادن احتراق به سمت احتراق کامل انجام گیرد. نتایج بهینه سازی با روش سطح پاسخ نشان داد، نقطه بهینه عملکرد موتور در بار کامل با نمونه سوخت حاوی بیودیزل به مقدار ۲/۵ میلی لیتر، اتانول به مقدار ۱۱/۵ میلی لیتر، آب به میزان ۹/۳ میلی لیتر و سوخت گازی به میزان ۶۵ درصد رخ می‌دهد. در این شرایط، در مقایسه با نمونه شاهد، توان ترمزی در حدود ۷۹ درصد افزایش یافت، و مصرف سوخت ویژه در حدود ۵۸ درصد کاهش یافت. این نمونه سوخت مقادیر مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هزینه تولید انرژی را به ترتیب حدود ۵۴، ۳۳، ۲۹، و ۳۹ درصد کاهش و اکسیدهای گوگرد را حدود ۱۱ درصد افزایش داد.

کلیدواژگان: موتور دیزل دوگانه‌سوز، سوخت دیزل، آب، اتانول، گاز طبیعی

مقدمه

سوخت‌های زیستی به دلیل ردپای کربن کم‌تر، جایگزینی تجدیدپذیر و پاک‌تر برای سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته می‌شوند [۱]. به کارگیری سوخت‌های تجدیدپذیر جزء تلاش‌های حیاتی برای کربن‌زدایی بخش‌های تولید و مصرف انرژی مانند بخش‌های حمل‌ونقل، صنایع و کشاورزی هستند [۲]. بیودیزل، یک سوخت زیستی مایع مشتق شده از تری گلیسیریدهای گیاهی یا حیوانی است. این سوخت می‌تواند نه تنها در حمل‌ونقل، بلکه در تولید انرژی در صنایع و کشاورزی جایگزینی جزئی یا کامل برای سوخت دیزل در نظر گرفته شود [۳]. استفاده از این سوخت به عنوان سوختی جایگزین، می‌تواند به کاهش انتشار آلاینده‌های هوا، مانند مونوکسید کربن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق کمک می‌کند [۴، ۵]. بیودیزل به دلیل غیرسمی بودن، زیست تخریب‌پذیری کمتر و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی می‌تواند در مقایسه با سوخت دیزل مزایای بیشتری را ارائه دهد [۶]. این مزایا باعث شده است، طی پانزده سال گذشته تولید بیودیزل از ۷/۲ به ۴۱ میلیارد لیتر افزایش یابد [۷].

در کنار مزایای عنوان شده برای سوخت بیودیزل، این سوخت تجدیدپذیر معایبی شامل ویسکوزیته بالا، پایداری اکسیداسیون کمتر، و معمولاً انتشار اکسیدهای نیتروژن بالاتری نسبت به سوخت دیزل دارا می‌باشند. انتشار اکسیدهای نیتروژن تأثیر مستقیمی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد [۸]. در این راستا، محققان تلاش‌هایی در به‌کارگیری از افزودنی‌های مختلف برای کاهش معایب بیودیزل انجام داده‌اند. نمونه‌ای از افزودنی‌های جایگزین به کارگیری سوخت‌های گازی جایگزین نظیر گاز طبیعی است. این سوخت در موتورهای دو سوخته به کار گرفته می‌شود [۸]. در این موتورها، یک پیش اختلاط از سوخت هوا-گاز ابتدا از طریق یک میکسر وارد محفظه احتراق می‌شود و با تزریق سوخت آتش زن (پایلوت)، یعنی دیزل یا مخلوط دیزل-بیودیزل مشتعل می‌شود. در موتورهای دیزل دو سوخته، فرآیند احتراق سوخت در حضور فشار و دما بالا با پاشش سوخت آتش زن در محفظه احتراق انجام می‌شود. با این حال، با توجه به عدد ستان بالای گاز طبیعی در مقایسه با سوخت دیزل، نسبت تراکم بالاتری برای بهتر انجام شدن احتراق نیاز است [۸]. بنابراین، وجود سوخت آتش زن برای فرآیند احتراق موفق گاز طبیعی در موتورهای احتراق تراکمی ضروری است.

کاربرد مخلوط سوخت بیودیزل-دیزل در یک موتور دیزلی دو سوخته با کاهش محسوس مصرف سوخت ویژه ترمزی و افزایش توان ترمزی همراه است و نتایج زیست محیطی مطلوبی از جمله کاهش قابل توجه ذرات معلق و انتشار مونوکسید کربن همراه است [۸]. با این حال در مورد انتشار اکسیدهای نیتروژن گزارشات ضد و نقیضی توسط مطالعات مختلف ارائه شده است [۱۲]. به طوری که بخشی از مطالعات کاهش اکسیدهای نیتروژن را به میزان قابل توجهی در حضور سوخت آتش زن بیودیزل-دیزل و سوخت گاز طبیعی در یک موتور دو سوخته گزارش کرده‌اند [۸]. این در حالی است که برخی از مطالعات گزارشی مبنی بر افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن به خصوص در بارهای بالای موتور داشته‌اند [۸].

تلاش‌های تحقیقاتی زیادی برای رفع این کاستی‌ها و تناقضات موجود انجام شده است [۸]. به طوری که به کارگیری افزودنی‌های مختلف در سوخت آتش‌زنه یکی از اصلی‌ترین اقدامات محققان برای کاهش اثرات منفی بیودیزل در سوخت آتش‌زنه است [۸]. حضور افزودنی در سوخت آتش‌زن حاوی بیودیزل و تکمیل اثرات سوخت گاز طبیعی می‌تواند موجب افزایش بازده و کاهش محسوس آلاینده‌های زیست محیطی از آگروز شود [۹]. سهم بزرگی از افزودنی‌ها به انواع اکسیژن‌دار مربوط می‌شود.

افزودنی‌هایی با محتوای اکسیژن می‌توانند نقش مهمی در بهبود شرایط احتراق و کاهش آلاینده‌ها داشته باشند. وجود محتوای اکسیژن در این افزودنی‌ها باعث کاهش انتشارات آلاینده‌ها در آگروز شده و احتراق را به سمت احتراق کامل سوق می‌دهد [۱۰].

احتراق یک فرآیند پیچیده است. آلاینده‌گی موتور می‌تواند متأثر از پارامترهای زیادی باشند. یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای از موتورهای دیزلی، احتراق ناقص سوخت است که عمدتاً ناشی از کمبود اکسیژن است [۱۱].

محتوای اکسیژن موجود در افزودنی‌های اکسیژن دار می‌توانند در بهبود احتراق ناقص ناشی از کمبود اکسیژن نقش مثبتی داشته باشند. با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت احتراق به سمت کامل شدن میل پیدا می‌کند. اثر ترکیبات اکسیژن اضافی بر روی سوخت دیزل به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲، ۱۳]. اتانول یکی از افزودنی‌های اکسیژن دار امیدوارکننده و کم‌هزینه برای نمونه‌های سوخت دیزل-بیودیزل در فرآیند احتراق دوسوخته با گاز طبیعی است [۱۴]. مطالعات محدودی در حضور اتانول به عنوان افزودنی سوخت آتش زن (بیودیزل-دیزل) در یک موتور دوسوخته با گاز طبیعی انجام شده است.

جاتوت و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای برای بررسی تأثیر گاز طبیعی فشرده و مخلوط بیودیزل-دیزل به‌عنوان سوخت اصلی و تری استین به عنوان یک افزودنی در انتشار، احتراق و ویژگی‌های عملکرد یک موتور دیزل تزریق مستقیم، چهار زمانه، و تک سیلندر پرداختند. زمانی که تری استین جای سوخت دیزل استفاده می‌شود، بیشترین انرژی ورودی توسط گاز طبیعی فشرده تامین می‌شود. براساس نتایج با افزودن تری استین، مقادیر آلاینده‌های مضر مانند دود، هیدروکربن، مونوکسید کربن و

اکسیدهای نیتروژن، به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و بهبود قابل توجهی در راندمان حرارتی ترمز به وجود آمده است [۱۵].

گاوالی و سرینیواسولو (۲۰۲۰) به بررسی اثر نرخ‌های جریان جرمی مختلف اتانول در یک موتور HCCI دوگانه‌سوز تحت بارهای مختلف پرداختند. اتانول به عنوان سوخت اولیه در زمان مکش از طریق کاربراتور تامین شد و مخلوط دیزل/بیودیزل به عنوان سوخت ثانویه برای شروع احتراق در پایان تراکم تزریق شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان جرمی اتانول، تاخیر احتراق افزایش می‌یابد و مدت زمان احتراق، فشار درون سیلندر و دما کاهش می‌یابد. این عمل منجر به کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن در مقایسه با سوخت دیزل خالص شد. با این حال، انتشار هیدروکربن و مونوکسیدکربن برای موتورهای HCCI حالت دوگانه‌سوز در مقایسه با موتورهای دیزلی به شدت افزایش یافت [۱۶].

سیواکومار و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تجربی و ارزیابی اثرات سوخت دیزل، اتانول، و بیودیزل در حضور گاز طبیعی فشرده بر عملکرد، انتشار و احتراق موتور دوگانه‌سوز اصلاح شده تک سیلندر، چهار زمانه و آب خنک انجام دادند. آزمایش‌ها با استفاده از ترکیب‌های مختلف سوخت و گاز طبیعی فشرده در حالت تک گانه و دوگانه‌سوز انجام شد. سوخت‌های آزمایشی مخلوطی از دیزل، اتانول و بیودیزل بود. نتایج نشان داد که انتشار اکسیدهای نیتروژن، و دی‌اکسید کربن در تمام بارها برای مخلوط سوخت در حضور گاز طبیعی فشرده کاهش یافت [۱۷].

با توجه به بررسی‌های انجام شده از پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف، مطالعه اثرات سوخت پایلوت حاوی درصد‌های پایین اتانول در مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل در حضور درصد‌های مختلف گاز طبیعی به‌طور موثر انجام نشده است. فقدان گزارش کامل و موثر از حرکت به سمت تولید انرژی پایدار جلوگیری می‌کند و تصمیم‌گیری در مورد اثرات اتانول در فرآیند تولید انرژی دوگانه‌سوز را از نقطه نظر تعادل اقتصادی، زیست محیطی و انرژی مبهم می‌کند. بر این اساس، این فرآیند باید از نقطه نظر پایداری بهینه شود. در نهایت بهترین شرایط با توجه به دو رویکرد دوستدار محیط زیست و توصیف موتور تولید نیرو ارائه خواهد شد.

با توجه به اینکه هزینه تولید سوخت نیز یکی از فاکتورهای اصلی در تهیه نمونه‌های سوخت است، تصمیم بر این شد مطالعه ای با حضور درصد‌های پایین اتانول در مخلوط سوخت بیودیزل-دیزل انجام شود تا با تلفیق درصد‌های بهینه و پایین از اتانول و بیودیزل، ضمن کاهش هزینه سوخت، انتشار آلاینده‌های موتور دیزل دو سوخته را نیز تا حد امکان بهینه شود. این مطالعه شامل چهار مرحله است:

مرحله اول: آماده‌سازی نمونه‌های سوخت، مرحله دوم: نحوه انجام آزمون موتور و اندازه‌گیری خواص سوخت، مرحله سوم: تحلیل نتایج تجربی، مرحله چهارم: بهینه‌سازی نمونه‌های سوخت از نقطه نظر هزینه اقتصادی، انتشار آلاینده‌گی و توان تولیدی

مواد و روش شناسی

آماده سازی نمونه‌های سوخت

بیودیزل از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون به عنوان محبوب ترین و پرکاربردترین روش تولید در حضور هیدروکسید سدیم با ۱/۱ درصد وزنی و متانول با نسبت الکل به روغن ۶ به ۱ و دور اختلاط ۷۰۰ دور در دقیقه تولید شد. دمای تولید در محدوده نقطه جوش متانول ثابت نگه‌داشته شد. این شرایط به عنوان بهترین شرایط تولید بیودیزل براساس گزارش فیض‌اله‌زاده اردبیلی و همکاران (۲۰۱۸) انتخاب شد [۱۸]. جدول ۱ استانداردها و محدوده‌های اندازه‌گیری را برای هر ویژگی سوخت بیودیزل تولید شده نشان می‌دهد. خواص ترموفیزیکی بیودیزل تولیدی شامل وزن مخصوص، گرانی، ارزش حرارتی، نقطه ابری شدن و نقطه اشتعال براساس دستورالعمل استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد.

Table 1- Biodiesel properties according to ASTM standard

جدول ۱- خواص بیودیزل بر اساس استاندارد ASTM

خواص سوخت	نام استاندارد	محدوده استاندارد	مقدار اندازه‌گیری شده	واحد
گرانروی	ASTM D445	1.9-6	2.3	mm ² /s
وزن مخصوص	ASTM 6751-02	0.87-0.90	0.89	g/cm ³
ارزش حرارتی	ASTM D240	39.9	39.1	Mj/kg
نقطه ابری شدن	ASTM2500	<3	1	°C
نقطه اشتعال	ASTM D93	>130	139	°C

در پژوهش حاضر، سه سطح اتانول (۰، ۲ و ۴ درصد)، دو سطح بیودیزل (۰ و ۵ درصد) و چهار سطح آب (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) با سوخت دیزل مخلوط شدند. تمام این نمونه سوخت‌ها به‌عنوان سوخت پایلوت در فرایند احتراق دوسوخته با درصد جایگزینی گاز طبیعی ۸۰ درصد در نظر گرفته شدند. این درصد گاز طبیعی به‌عنوان بهترین و قابل قبول ترین درصد جایگزینی سوخت گاز طبیعی (بر اساس مطالعه ای از فیض اله زاده اردبیلی و همکاران، ۲۰۲۱) انتخاب شد [۱۹]. هموژنایزر Polytron® برای تثبیت نمونه‌های سوخت در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد. سوخت دیزل به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. جدول ۲ جزئیات آماده‌سازی نمونه‌های سوخت را برای ۱۰۰۰ میلی‌لیتر نشان می‌دهد. در این نمونه

Table 2- Fuel Sample compositions

جدول ۲- ترکیبات نمونه سوخت‌ها

نمونه سوخت	آب (میلی‌لیتر)	اتانول (میلی‌لیتر)	بیودیزل (لیترمیلی)	دیزل (لیترمیلی)
D(E0W0)	0	0	0	1000
DE0W0.3	3	0	0	997
DE0W0.6	6	0	0	994
DE0W0.9	9	0	0	991
DE2W0	0	20	0	980
DE2W0.3	3	20	0	977
DE2W0.6	6	20	0	974
DE2W0.9	9	20	0	971
DE4W0	0	40	0	960
DE4W0.3	3	40	0	957
DE4W0.6	6	40	0	954
DE4W0.9	9	40	0	951
B5(E0W0)	0	0	50	950
B5E0W0.3	2.85	0	50	947.15
B5E0W0.6	5.7	0	50	944.3
B5E0W0.9	8.55	0	50	941.45
B5E2W0	0	19	50	931
B5E2W0.3	2.85	19	50	928.15
B5E2W0.6	5.7	19	50	925.3
B5E2W0.9	8.55	19	50	922.45
B5E4W0	0	38	50	912
B5E4W0.3	2.85	38	50	909.15
B5E4W0.6	5.7	38	50	906.3
B5E4W0.9	8.55	38	50	903.45

سوخت‌ها، سوخت دیزل (D) نمونه سوخت شاهد است که عاری از آب، اتانول و بیودیزل است. در این نمونه سوخت‌ها، عدد مقابل B درصد بیودیزل موجود در سوخت دیزل، عدد مقابل E درصد اتانول موجود در بیودیزل، و عدد مقابل W درصد آب موجود در بیودیزل را نشان می‌دهند.

انجام آزمون موتور

در این تحقیق برای انجام آزمون موتور از یک موتور دیزل تک سیلندر چهارزمانه Kirloskar DA10 استفاده شد. مشخصات موتور در جدول ۳ ارائه شده است.

Table 3- Engine specifications

جدول ۳- مشخصات موتور

Manufacturer: Kirloskar Oil Engines Ltd., India
Engine type: Vertical, four-stroke, single-cylinder constant speed, direct injection CI engine
Rated power: 7.4 kW @ 1500 rpm`
Bore/stroke: 102 mm/116mm
Displacement volume: 0.948 l
Compression ratio: 17.5
Start of fuel injection timing: 26° bTDC
Nozzle opening pressure: 200 bar
Cooling type: Water Cooling
Length/width/height: 685/532/850mm
BMEP at 1500 rpm 6.21 bar

تست موتور در دور ثابت (۱۵۰۰ دور در دقیقه) در دو حالت دیزل و سوخت دوگانه پایلوت-گاز طبیعی مورد تست قرار گرفت. شکل ۱ نمایی از ست آپ تست موتور را نمایش می‌دهد.

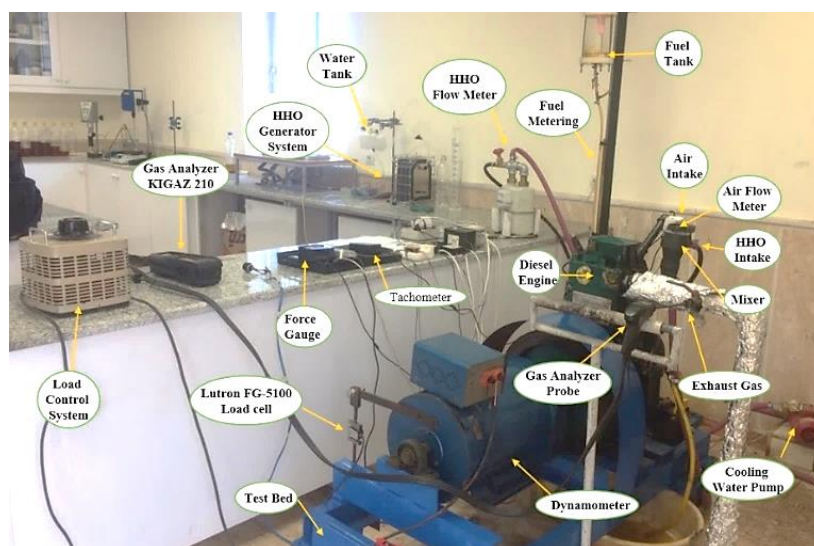


Figure 1- Engine test setup

شکل ۱- نمایی از ست آپ تست موتور

موتور موردنظر با استفاده از یک تنظیم کننده دبی گاز طبیعی و یک میکسر (برای مخلوط کردن هوا و گاز طبیعی، به صورت همگن) در منیفولد ورودی هوا، به یک موتور با سوخت دوگانه دیزل-گاز طبیعی تبدیل شد. بار موردنظر موتور با استفاده از دستگاه بارگذاری مقاومت متغیر (TDGC2-5KVA) متصل به یک ژنراتور برق jbt-200 که به موتور هدف وصل شده است، اعمال شد. این ژنراتور به یک سلول بار ۲۰۰ کیلو نیوتون از طریق بازو به طول ۳۰ سانتی متر مجهز شده بود. از یک لودسل Lutron FG-5100 برای اندازه گیری بار استفاده شد. سوخت دیزل خالص به عنوان سوخت شاهد در درصدهای مختلف سوخت گازی (X) در آزمون موتور به کار گرفته شد. درصد سوخت گازی به عنوان درصدی از انرژی سوخت ورودی به محفظه احتراق در نظر گرفته شد که شامل ۸۰ درصد بود. معادله (۱) برای محاسبه مقدار جایگزینی استفاده شد [۲۰]. این معادله ارزش انرژی سوخت گازی را در کل انرژی مخلوط سوخت (یعنی مجموع انرژی ورودی توسط سوخت گازی و سوخت پایلوت را نشان می دهد).

$$X = \frac{\dot{E}_{NG}}{\dot{E}_{NG} + \dot{E}_{PF}} \quad (1)$$

که در آن \dot{E}_{PF} نرخ انرژی مصرفی سوخت پایلوت و \dot{E}_{NG} نرخ انرژی مصرفی سوخت گازی است. \dot{E}_{PF} می تواند با معادله (۲) محاسبه شود [۱۹]:

$$\dot{E}_P = \dot{V}_{PF} \times \rho_{PF} \times LHV_{PF} \quad (2)$$

که در آن \dot{V}_{PF} دبی حجمی مصرفی سوخت پایلوت، LHV_{PF} ارزش حرارتی سوخت پایلوت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم و ρ_{PF} چگالی سوخت پایلوت بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است. \dot{E}_{NG} می تواند از معادله (۳) محاسبه شود [۱۹]:

$$\dot{E}_{NG} = \dot{V}_{NG} \times \rho_{NG} \times LHV_{NG} \quad (3)$$

که \dot{V}_{NG} میزان جریان حجمی سوخت گاز طبیعی مصرف شده بر حسب متر مکعب بر ثانیه، ρ_{NG} چگالی سوخت گازی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و LHV_{NG} ارزش حرارتی سوخت گازی را بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم می باشند. میزان مصرف سوخت گازی توسط یک جریان سنج گاز طبیعی دیافراگمی مدل GS8404C ثبت شد. دقت اندازه گیری این جریان سنج برابر ۰/۰۰۱ مترمکعب بود. تمام آزمایش ها در دو مقدار تزریق سوخت گازی (صفر و ۸۰ درصد) انجام شدند.

در روش آزمون موتور در فرایند احتراق دوگانه، موتور ابتدا به مدت چند دقیقه با سوخت دیزل روشن شد و تا رسیدن به حالت پایدار در حالت بدون بار و دور ۱۵۰۰ دور در دقیقه کار کرد. سپس پس از رسیدن به شرایط پایدار از نقطه نظر ثابت شدن دور موتور و عدم تغییر داده های مورد آزمون، سوخت پایلوت مورد نظر تزریق شد. در این حالت میزان توان ترمزی موتور با حضور دور موتور و گشتاور اعمال شده به موتور از طریق تغییر بار موتور با فرمول (۵) محاسبه شد. سپس، میزان باز شدن شیر گاز طبیعی بر اساس فرمول ۱، ۲ و ۳، محاسبه شد.

پس از این مرحله که درصد گاز طبیعی تثبیت شد، مقادیر پارامترهای عملکردی موتور شامل، بار و دور و همچنین پارامترهای آلاینده موتور یادداشت شد. این مرحله برای تمام بارها، نمونه های سوخت و حتی درصدهای مختلف سوخت گازی باید تکرار شود. برای اندازه گیری نیرو از نیروسنج LUTRON Digital Force Gauge FG-5100 استفاده شد. جدول ۴، مقادیر دقت تجهیزات اندازه گیری پارامترهای آزمون موتور را ارائه می دهد.

Table 4- Measurement accuracy values

جدول ۴- مقادیر دقت اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش

پارامتر اندازه‌گیری	واحد	دقت	محدوده	قدرت تشخیص
دی اکسیدکربن	Vol. %	±1	0-99	0.1 %
اکسیدهای نیتروژن	ppm	±1	0-5155	1 ppm
مونوکسیدکربن	ppm	±1	0-8000	1 ppm
هیدروکربن‌های نسوخته	ppm	±1	0-20000	1 ppm
بار موتور	N	±1	0-100	0.1 N

برای محاسبه گشتاور از معادله (۴) استفاده شد [۱۹]. بر اساس این رابطه، گشتاور عبارتست از حاصل ضرب نیرو در فاصله عمودی نیروسنج تا مرکز دوران. در این معادله T عبارتست از گشتاور تولید شده توسط موتور در چرخ لنگر (N.m)، F برآیند نیروهای وارده (N) و R فاصله گریز از مرکز میل لنگ (m) می‌باشد.

$$T = F \times R \quad (۴)$$

برای محاسبه توان ترمزی که همان توان موجود در چرخ لنگر است، از معادله (۵) استفاده شد [۱۹]. در این معادله P عبارتست از توان ترمزی برحسب کیلووات، T گشتاور برحسب نیوتون متر و n دور موتور برحسب دور بر دقیقه است.

$$P = \frac{2\pi T n}{60000} = \frac{T n}{9550} \quad (۵)$$

بازدهی حرارتی ترمزی نیز یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد موتور تلقی می‌شود. این پارامتر با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد [۱۹]:

$$BTE(\%) = \frac{3600}{LHV \times BSFC} \times 100 \quad (۶)$$

در این رابطه، BTE بازده حرارتی ترمزی بر حسب درصد، LHV مقدار محتوای انرژی سوخت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم و BSFC مصرف سوخت ویژه ترمزی است. بخش بعدی به ارائه نتایج تجربی به دست آمده از آزمون موتور می‌پردازد.

نتایج و بحث

نتایج خواص فیزیکی - حرارتی نمونه سوخت‌ها

این بخش از نتایج به ارائه ویژگی‌های فیزیکی - حرارتی نمونه سوخت‌های آماده شده می‌پردازد. فیض‌اله‌زاده اردبیلی و همکاران (۲۰۱۹) خواص فیزیکی - حرارتی نمونه‌های سوخت را به عنوان یکی عوامل تأثیرگذار در عملکرد موتورهای احتراق تراکمی مورد بحث قرار دادند [۲۱]. روند تغییرات وزن مخصوص (دانسیته) نمونه‌های سوخت در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه سوخت B0E4W0 کمترین وزن مخصوص سوخت را به خود اختصاص داده است. حضور بیودیزل و آب در نمونه سوخت‌ها موجب افزایش دانسیته سوخت می‌شود. از طرفی دیگر وجود اتانول موجب کاهش وزن مخصوص نمونه سوخت‌ها می‌شود. زیرا دانسیته‌های بیودیزل، آب و اتانول به ترتیب بیشتر، بیشتر و کمتر از سوخت دیزل خالص است [۲۲]. افزودن همزمان بیودیزل و آب شیب افزایش دانسیته را تشدید می‌کند. افزایش دانسیته از مقدار استاندارد می‌تواند موجب اختلال در تیمزه شدن سوخت در محفظه احتراق شود. به تبع آن، کیفیت احتراق و انتشار آلاینده‌های موتور تحت تأثیر قرار گیرد.

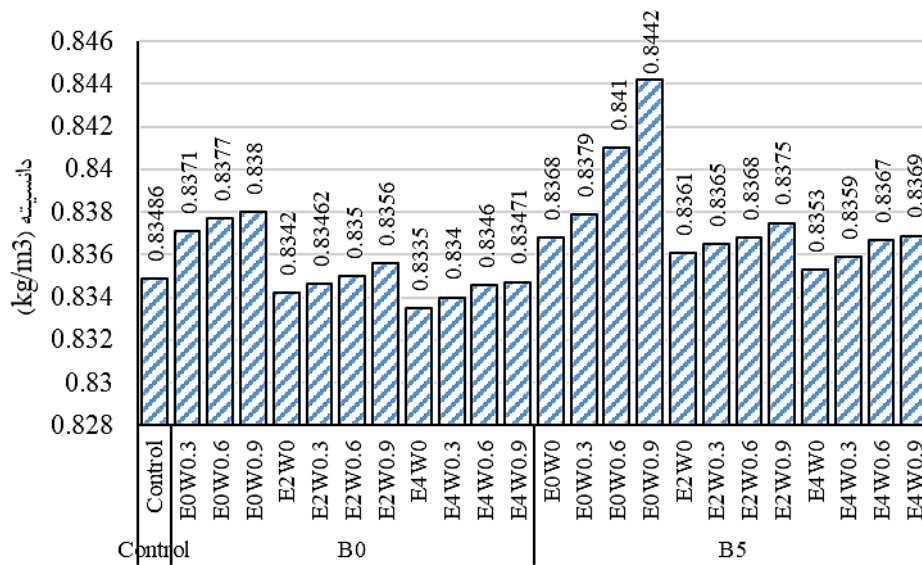


Figure 2- Density variations for fuel samples
 شکل ۲- تغییرات دانسیته سوخت برای نمونه سوخت‌ها

شکل ۳ روند تأثیرگذاری بیودیزل، اتانول و آب بر تغییرات ارزش حرارتی نمونه سوخت‌ها در مقایسه با سوخت دیزل را نشان می‌دهد. نمونه سوخت دیزل به عنوان سوخت شاهد، بالاترین ارزش حرارتی را در میان نمونه سوخت‌ها دارد. حضور ۵ درصد بیودیزل در سوخت دیزل (B5) ارزش حرارتی سوخت را به میزان نسبی تقریباً ۱/۲ درصد در مقایسه با سوخت دیزل خالص، کاهش می‌دهد. بیودیزل دارای ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت دیزل است، بنابراین افزودن بیودیزل در سوخت دیزل، ارزش حرارتی نمونه سوخت را کاهش می‌دهد [۲۳، ۲۴]. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، افزودن آب و اتانول به سوخت‌های دیزل و B5 موجب کاهش ارزش حرارتی نمونه سوخت‌ها می‌شود. زیرا، اتانول و آب ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت‌های دیزل و بیودیزل دارند [۲۵]. نمونه سوخت B5E4W0.9 دارای کمترین ارزش حرارتی سوخت است. زیرا این نمونه سوخت، بیشترین محتوای بیودیزل، اتانول و آب را دارد. ارزش حرارتی سوخت یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان انرژی آزاد شده در داخل محفظه احتراق است. انرژی آزاد شده در محفظه احتراق رابطه مستقیمی با توان ترمزی تولید شده موتور دارد [۲۶]. هرچه ارزش حرارتی نمونه سوخت افزایش یابد، احتمال تولید توان ترمزی نیز افزایش می‌یابد. زیرا ارزش حرارتی فقط یکی از عوامل تأثیرگذار در تولید توان ترمزی است.

شکل ۴ تغییرات نقطه اشتعال نمونه سوخت‌ها را نشان می‌دهد. حضور بیودیزل، آب و اتانول موجب کاهش نقطه اشتعال شده است. شیب کاهش نقطه اشتعال در نمونه‌های حاوی اتانول، بیشتر از نمونه‌های بدون اتانول است. اما روند تغییرات نقطه اشتعال در نمونه سوخت‌های حاوی مخلوطی از بیودیزل و اتانول کمی متفاوت از سایر نمونه سوخت‌ها است. به طوری در نمونه سوخت حاوی ۵ درصد بیودیزل و ۲ درصد اتانول، نقطه اشتعال با افزایش درصد آب، افزایش یافته است. نقطه اشتعال سوخت، یکی از مهمترین پارامترها در خوداشتعالی سوخت در افزایش فشار و دما و همچنین نگهداری و انبار کردن سوخت شناخته می‌شود. کاهش نقطه اشتعال می‌تواند در دماها و فشارهای بالای داخل محفظه احتراق، روند احتراق را مختل کند [۲۰]. بالاترین نقطه اشتعال مربوط به سوخت دیزل (۸۷ درجه سانتی‌گراد) و کمترین نقطه اشتعال (۲۴ درجه سانتی‌گراد) مربوط به نمونه سوخت B5E4W0.6 است.

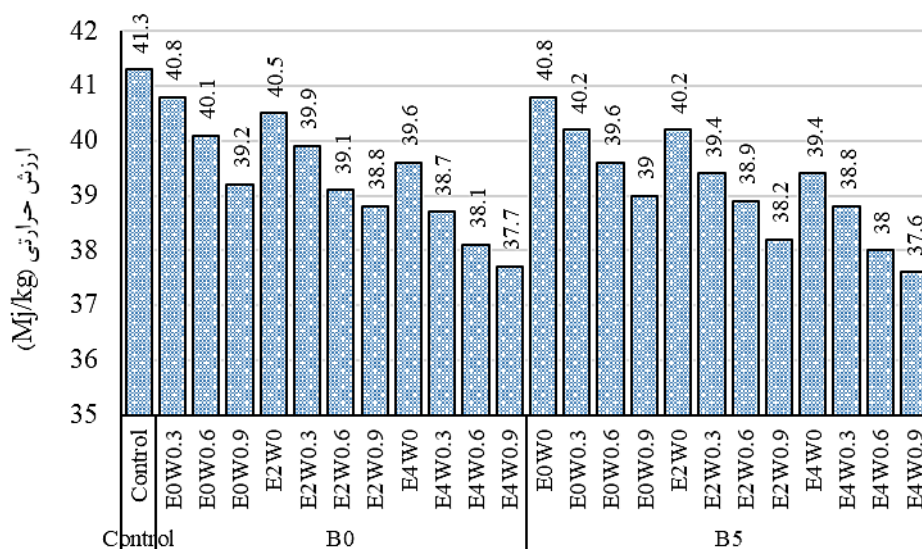


Figure 3- Fuel LHV changes for each sample
 شکل ۳- تغییرات ارزش حرارتی سوخت برای هر نمونه

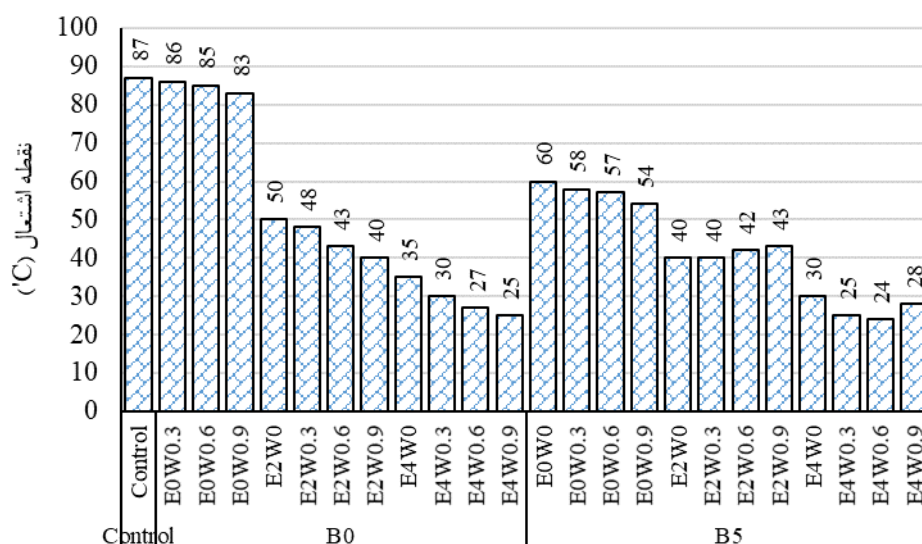


Figure 4- Flash point changes for each sample
 شکل ۴- تغییرات نقطه اشتعال برای هر نمونه

شکل ۵ تغییرات ویسکوزیته نمونه‌های سوخت را نشان می‌دهد. بیودیزل و سکوزیته بالایی نسبت به دیزل دارد [۲۷، ۲۸] بر این اساس حضور بیودیزل در نمونه سوخت‌ها باعث افزایش گرانروی می‌شود. به طوری که حضور ۵ درصد بیودیزل در سوخت دیزل، ویسکوزیته سوخت را در حدود ۱ درصد نسبت به سوخت دیزل خالص افزایش می‌دهد. افزایش محتوای اتانول ویسکوزیته سوخت را کاهش و افزایش محتوای آب ویسکوزیته سوخت را به طور نسبی افزایش داده است. کمترین ویسکوزیته مربوط به سوخت‌های B0E4W0.6 و B5E4W0.9 می‌باشند. بیشترین گرانروی سوخت مربوط به نمونه سوخت B5E2W0.6 است. این نمونه سوخت اختلافی حدوداً ۳ درصدی با نمونه سوخت دیزل دارد. مقادیر آب و بیودیزل می‌تواند نقش موثری در این اختلاف ۳ درصدی داشته باشند. ویسکوزیته سوخت نیز یکی از عواملی است که می‌تواند کیفیت پاشش سوخت در محفظه احتراق را تحت تأثیر قرار دهد و به دنبال آن تأثیر مستقیمی در کیفیت احتراق داشته باشد [۲۱].

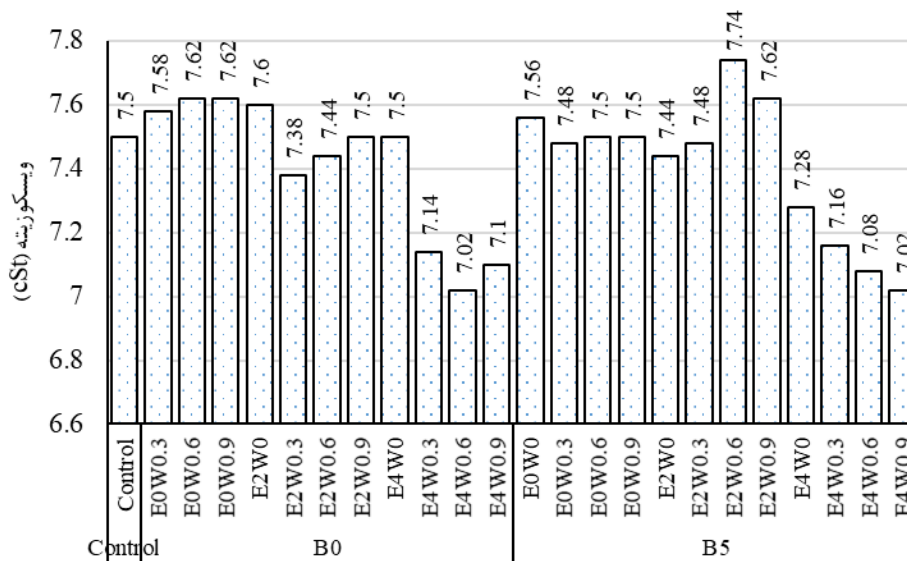


Figure 5- Fuel viscosity changes for each sample

شکل ۵- تغییرات گرانیوی سوخت برای هر نمونه

تأثیر نمونه سوخت‌ها بر عملکرد موتور دیزل

شکل ۶ روند تغییرات توان ترمزی موتور در بار کامل برای هر کدام از نمونه سوخت‌ها نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، سوخت دیزل در حالت دوگانه‌سوز در حضور ۸۰ درصد گاز طبیعی دارای بالاترین میزان تولید توان ترمزی است. زیرا ارزش حرارتی سوخت دیزل در مقایسه با سایر نمونه سوخت‌ها بالاتر است. حضور بیودیزل در نمونه سوخت‌ها موجب کاهش توان ترمزی می‌شود زیرا ارزش حرارتی بیودیزل کمتر از سوخت دیزل است. حضور اتانول و آب در نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل تأثیر مثبتی در بهبود توان ترمزی در مقایسه با نمونه سوخت‌های بدون بیودیزل دارد. تأثیر مثبت اتانول در نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل، به دلیل وجود محتوای اکسیژن در اتانول است که تأثیر مثبتی در فرایند احتراق داشته و احتراق را به سمت کامل شدن سوق می‌دهد و می‌تواند معایب بیودیزل در کاهش توان ترمزی را پوشش دهد [۲۹، ۳۰]. وجود آب در نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل نیز می‌تواند موجب ایجاد پدیده میکرواحتراق شده و اتمیزه شدن سوخت حاوی بیودیزل را بهبود بخشیده و توان تولیدی موتور را افزایش دهد [۱۹]. اما در نمونه سوخت‌های بدون بیودیزل این حدس می‌تواند به دلیل پایین بودن ویسکوزیته و دانسیته سوخت دیزل نسبت به سوخت حاوی بیودیزل، منتفی باشد. دلیل کاهش توان ترمزی با افزایش اتانول و آب در نمونه سوخت‌های دیزل بدون بیودیزل، کم بودن ارزش حرارتی اتانول و آب نسبت به سوخت دیزل می‌تواند باشد.

حضور سوخت گازی در فرایند احتراق، موجب افزایش توان ترمزی به میزان قابل توجهی (به ترتیب حدود ۸۲ و ۸۱ درصد نسبت به حالت تک سوخته برای دیزل و B5) شده است. زیرا با حضور گاز طبیعی در محفظه احتراق فشار داخل سیلندر افزایش یافته و توان تولیدی را افزایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۶ (ج) و شکل ۶ (د) مشخص است، وجود یا عدم وجود بیودیزل، در روند تغییرات توان ترمزی تأثیرگذار است. زیرا بیودیزل، دارای خواص فیزیکی-حرارتی متفاوتی نسبت به سوخت دیزل دارد. خواص فیزیکی-حرارتی متفاوت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل باعث می‌شود، کیفیت احتراق سوخت دیزل در بار کامل بالاتر از کیفیت احتراق سوخت بیودیزل باشد. بر این اساس، حضور گاز طبیعی، اتانول و آب تأثیر مثبتی در روند تغییرات توان ترمزی نسبت به سوخت بدون بیودیزل دارند. بر این اساس می‌تواند نتیجه گرفت، افزودنی‌ها زمانی می‌توانند تأثیر مثبتی در نمونه سوخت‌ها داشته باشند که بیودیزل نیز در محتوای سوخت دیزل باشد.

بر اساس مطالعات انجام شده، استفاده از ترکیبات اتانول و بیودیزل در یک موتور دیزلی دوگانه سوز می‌تواند اثرات متفاوتی بر توان خروجی موتور داشته باشد. به طور کلی، افزودن مخلوط اتانول یا بیودیزل به تنهایی می‌تواند منجر به کاهش اندکی در قدرت موتور در مقایسه با استفاده از سوخت دیزل خالص به تنهایی شود. این مشاهده در مطالعات انجام شده توسط گومز و همکاران به دست آمد [۳۱]. اما در مطالعه انجام شده توسط کومار و همکاران نتیجه متفاوتی را ارائه شد. به طوریکه گزارش کردند اتانول در درصدهای پایین به دلیل محتوای اکسیژن، نسبت به سوخت دیزل می‌تواند به مقدار کمی توان ترمزی موتور دیزل را بهبود بخشد [۳۲]. کاهش قدرت ناشی از افزودن اتانول می‌تواند به دلیل تفاوت در ویژگی‌های احتراق مخلوط‌های سوخت و همچنین تفاوت در ارزش حرارتی و تعداد ستان سوخت‌ها اتفاق بیفتد. به طوریکه مطالعه انجام شده توسط فیض‌اله‌زاده اردبیلی و همکاران نیز به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند [۲۰]. اتانول دارای چگالی انرژی و عدد ستان کمتری نسبت به سوخت دیزل است که می‌تواند منجر به راندمان احتراق و توان خروجی کمتری شود [۲۰].

با این حال، مطالعات همچنین نشان دادند که کاهش قدرت را می‌توان با تنظیم زمان تزریق و سایر پارامترهای موتور کاهش داد [۳۳، ۳۴]. به عنوان مثال، بهینه‌سازی زمان تزریق برای در نظر گرفتن ویژگی‌های احتراق مختلف ترکیب‌های سوخت می‌تواند به حفظ یا حتی افزایش توان خروجی موتور و در عین حال دستیابی به آلاینده‌گی کمتر کمک کند [۳۵].

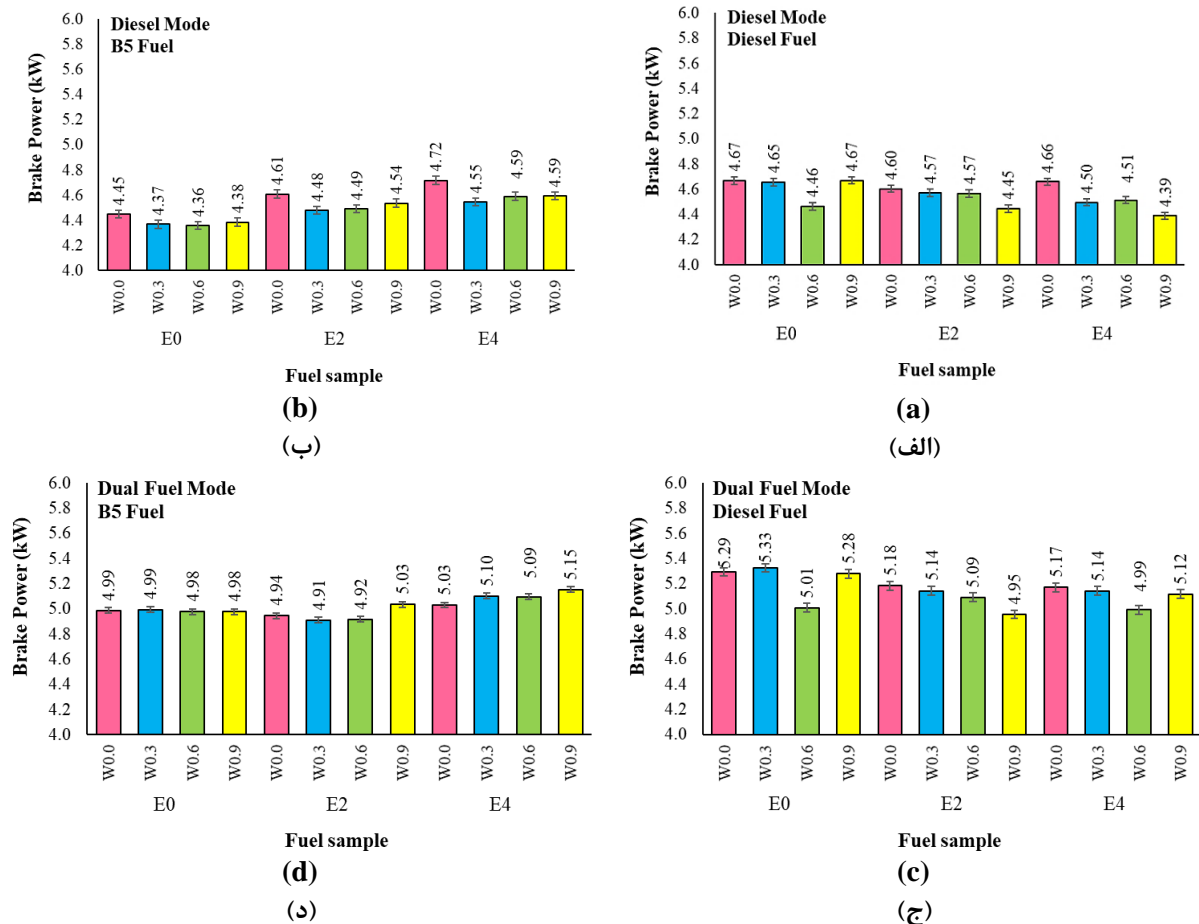


Figure 6- BP variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۶- تغییرات توان ترمزی برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در مود دیزل، ب) سوخت B5 در مود دیزل، ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

نتایج به دست آمده توسط مطالعات مختلف ممکن است بسته به نوع موتور، نسبت ترکیب سوخت و سایر شرایط تجربی مورد استفاده در هر مطالعه متفاوت باشد. بنابراین، ممکن است برای درک کامل اثرات اتانول و ترکیبات بیودیزل بر توان خروجی موتورهای دیزلی دوگانه سوز، تحقیقات بیشتری لازم باشد.

شکل ۷ تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی را برای نمونه سوخت‌های پایلوت نشان می‌دهد. کمترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به نمونه سوخت‌هایی است که در فرایند دوگانه‌سوز تحت احتراق قرار گرفته‌اند (به ترتیب حدود ۷۳ و ۷۱ درصد کمتر از حالت تک سوخته برای سوخت‌های دیزل و B5). زیرا گاز طبیعی دارای ارزش است و با حضور در محفظه احتراق بخش قابل توجهی از توان را تولید می‌کند. بنابراین بار تولید توان سوخت پایلوت کمتر مصرف می‌شود. حتی در مواردی که توان ترمزی کمتری تولید شده باشد، مصرف ویژه سوخت نیز افزایش می‌یابد تا موتور با مصرف بالای سوخت بتواند کمبود توان تولیدی را پوشش دهد [۱۹].

تأثیر ترکیبات اتانول-بیودیزل-آب بر مصرف سوخت موتور دیزل می‌تواند به عوامل مختلفی مانند نسبت ترکیب، شرایط عملکرد موتور و استراتژی تزریق سوخت بستگی داشته باشد [۳۶]. با این حال، به طور کلی، استفاده از ترکیبات اتانول-بیودیزل-آب در موتورهای دیزلی می‌تواند اثرات مثبت و منفی بر مصرف سوخت داشته باشد [۳۶، ۳۷].

از جنبه مثبت، اتانول و آب می‌توانند بازده احتراق ترکیب سوخت را بهبود بخشند و منجر به کاهش مصرف سوخت شوند. اتانول دارای محتوای اکسیژن بالاتری نسبت به سوخت دیزل است که می‌تواند به احتراق کامل تر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. آب همچنین می‌تواند به کاهش دمای احتراق و جلوگیری از تشکیل اکسیدهای نیتروژن کمک کند، که می‌تواند به افزایش راندمان موتور و کاهش مصرف سوخت کمک کند.

از جنبه منفی، استفاده از ترکیبات اتانول-بیودیزل-آب نیز می‌تواند منجر به کاهش محتوای انرژی سوخت و کاهش توان خروجی موتور شود. اتانول و آب چگالی انرژی کمتری نسبت به سوخت دیزل دارند که می‌تواند منجر به کاهش محتوای انرژی سوخت و توان خروجی کلی موتور شود. علاوه بر این، آب موجود در سوخت نیز می‌تواند منجر به مشکلات خوردگی سیستم سوخت و کاهش روانکاری شود.

به طور کلی، تأثیر ترکیبات اتانول-بیودیزل-آب بر مصرف سوخت موتور دیزل می‌تواند پیچیده باشد و به عوامل مختلفی بستگی دارد. در برخی موارد، استفاده از این ترکیبات می‌تواند منجر به بهبود راندمان احتراق و کاهش مصرف سوخت شود، در حالی که در موارد دیگر می‌تواند منجر به کاهش توان خروجی موتور و افزایش سایش اجزای موتور شود. بنابراین، ارزیابی دقیق استفاده از مخلوط‌های اتانول-بیودیزل-آب در موتورهای دیزل و در نظر گرفتن نسبت‌های ترکیبی خاص و شرایط عملیاتی برای بهینه‌سازی راندمان سوخت و عملکرد موتور بسیار مهم است.

مطالعات متعددی اثرات این ترکیبات را بر عملکرد موتور و مصرف سوخت بررسی کرده‌اند. یک مطالعه انجام شده توسط داتا و ماندال، اثرات افزودن اتانول به ترکیبات بیودیزل-دیزل را بر عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزودن اتانول به مخلوط منجر به کاهش مصرف سوخت و به دلیل افزایش بازده حرارتی موتور دیزل و در عین حال حفظ عملکرد موتور می‌شود [۳۸].

همچنین در مطالعه انجام شده توسط گوریشانکار و کریشناسامی اثرات افزودن اتانول و آب به مخلوط‌های بیودیزل-دیزل بر عملکرد موتور، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ویژگی‌های احتراق بررسی شد. نتایج به دست آمده برای امولسیون آب-بیودیزل کمی متفاوت از نتایج به دست آمده برای امولسیون آب-اتانول در موتور دیزل بود. به طوری که، امولسیون بیودیزل آب منجر به فزاینده پیشرفته احتراق شد در حالی که فاز بندی با امولسیون اتانول تاخیر داشت. راندمان حرارتی ترمز با امولسیون بیودیزل آب تا ۷ درصد در فشار متوسط مؤثر ترمزی (۶/۳ بار) و با امولسیون اتانول ۳ درصد افزایش یافت. مصرف سوخت ویژه ترمزی با امولسیون بیودیزل-آب تا ۲۰ درصد کاهش یافت، در حالی که برای امولسیون اتانول-آب نتیجه تقریباً با نمونه شاهد یکسان بود [۳۹].

به طور کلی، تأثیر ترکیبات اتانول-بیودیزل-آب بر مصرف سوخت موتور دیزل می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله نسبت ترکیب، شرایط عملکرد موتور و استراتژی تزریق سوخت بستگی داشته باشد. با این حال، چندین مطالعه نشان داده‌اند که افزودن اتانول و آب به مخلوط‌های بیودیزل-دیزل می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای شود و در عین حال عملکرد موتور را حفظ یا بهبود بخشد. اما اثرات هم زمان آب-اتانول-بیودیزل در حضور سوخت گازی به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. این مطالعه می‌تواند نتایج موثری را در این زمینه وارد ادبیات فنی کند.

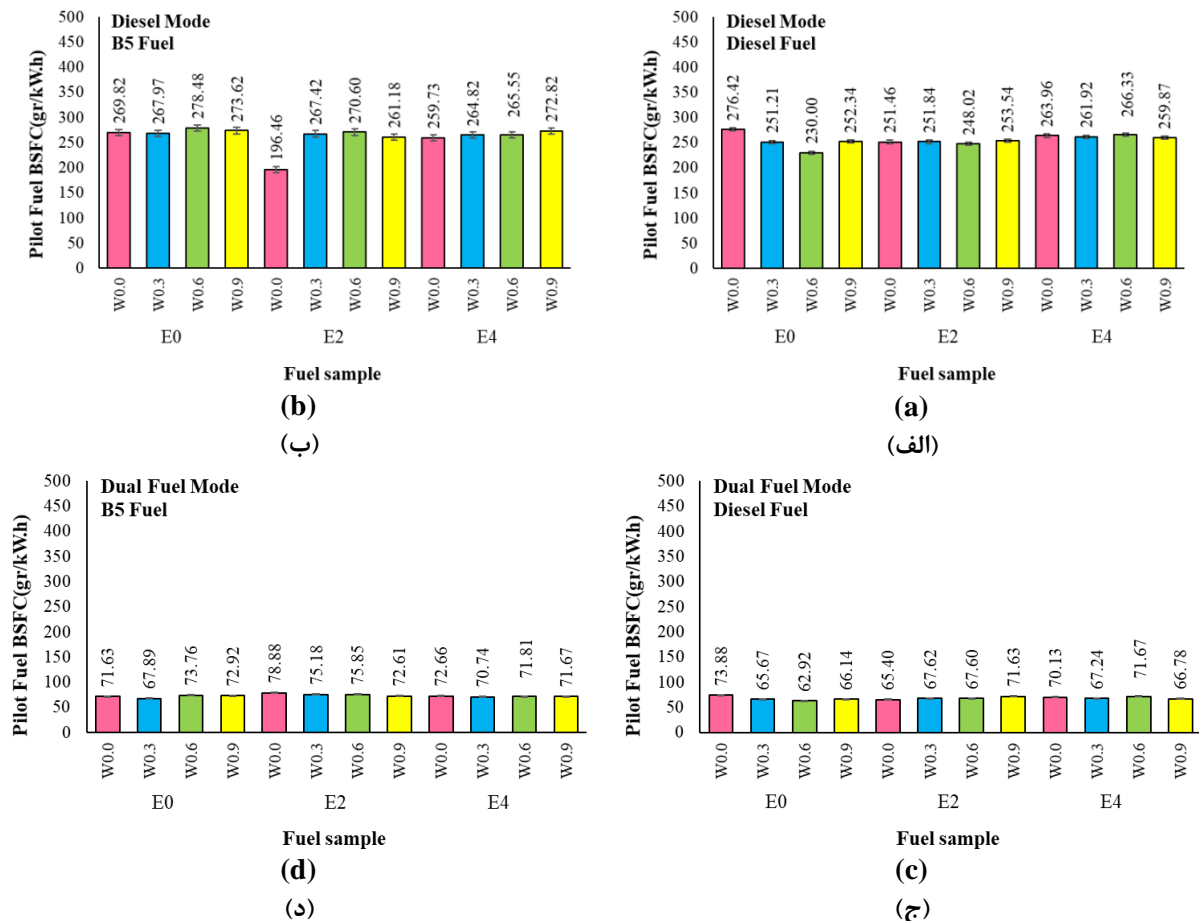


Figure 7- BSFC variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۷- تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی برای هر نمونه سوخت. (الف) سوخت دیزل در مود دیزل، (ب) سوخت B5 در مود دیزل، (ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و (د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

تأثیر نمونه سوخت‌ها بر آلاینده‌گی موتور دیزل

احتراق یک فرایند شیمیایی است که اگر به طور کامل انجام نگیرد مونوکسید کربن را به جای بخشی از انتشارات دی اکسید کربن تولید می‌کند. بر این اساس انتشار مونوکسید کربن محصول احتراق ناکامل است [۱۹]. گزارش‌های مختلفی حاکی از انتشار بالای مونوکسید کربن در مواقع به کارگیری از سوخت بیودیزل در مقایسه با سوخت دیزل خالص می‌باشند [۴۰]. شکل ۸ نرخ انتشار مونوکسید کربن برای نمونه‌های سوخت را نشان می‌دهد. در حالت کلی، انتشار مونوکسید کربن به طور

متوسط در حالت دوگانه‌سوز حدود ۴۷ و ۵۰ درصد کمتر از حالت تک سوخته به ترتیب نسبت به سوخت دیزل (شکل ۸ الف)) و B5 (شکل ۸ ب)) است. افزودن بیودیزل به نمونه سوخته‌ها، انتشار مونوکسید کربن را به میزان ۱۶ و ۱۰ درصد در مقایسه با سوخت حاوی دیزل خالص به ترتیب برای حالت تک سوخته و دوگانه‌سوز، افزایش داده است. همانطور که قابل مشاهده است، حضور گاز طبیعی میزان افزایش انتشار مونوکسیدکربن را حدود ۶ درصد نسبت به حالت تک سوخته کاهش داده است. این روند می‌تواند به دلیل مشارکت گاز طبیعی در افزایش فشار داخل محفظه احتراق باشد که موجب کاهش تأخیر در اشتعال شده و احتراق را به سمت احتراق کامل سوق می‌دهد. بر این اساس انتشار مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. همچنین حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب میزان انتشار مونوکسیدکربن را حدوداً ۲۱-، ۳۷+ و ۱- درصد در حالت تک سوخته و ۳۱-، ۲- و ۳۸- درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و ۱+، ۱۹+ و ۲۰- درصد در حالت تک سوخته و ۶۸+ و ۵۰+ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر داده اند. حضور محتوای اکسیژن در اتانول می‌تواند موجب بهبود روند احتراق با سوق دادن احتراق به سمت احتراق کامل انجام گیرد. این روند در اتانول ۲ درصد بسیار مشهود است (شکل ۸). که با افزایش محتوای اتانول از ۲ به ۴ درصد روند انتشار مونوکسیدکربن افزایش یافته است. حضور آب نیز توانسته است با موفقیت میزان انتشار مونوکسیدکربن را به طور نسبی کاهش دهد. این روند می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت آب در ایجاد فرایند میکرواحتراق و بهبود اتمیزه شدن سوخت پایلوت محتمل باشد. اما بیشترین میزان بهبود انتشار مونوکسیدکربن در حالت به کارگیری تلفیقی آب و اتانول هم برای حالت تک سوخته و هم برای حالت دوگانه‌سوز رخ می‌دهد (شکل ۸). این روند می‌تواند به دلیل ترکیب خواص بهبود دهنده احتراق برای آب و اتانول رخ دهد. بر اساس تغییرات بهترین پیشنهاد برای به کارگیری آب، اتانول و ترکیب آب-اتانول در حالت دوگانه‌سوز و بدون حضور سوخت بیودیزل است (شکل ۸).

لیکانوو و لوپاتین اثرات هم زمان سوخت دیزل، گاز طبیعی فشرده، و امولسیون های سوخت متانول و اتانول را در عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل دوگانه سوز آزمایش کردند. نتایج به دست آمده به طور تجربی نشان دادند که برای استفاده از حامل های انرژی دوستدار محیط زیست برای موتور دیزل ترکیبی با ۸۰ درصد گاز و ۲۰ درصد سوخت پایلوت مورد نیاز است که از این بابت تقریباً مشابه با یافته های مطالعه حاضر بود. برای قسمت پایلوت، امولسیون هایی از ترکیب ۲۵ درصد الکل (متانول یا اتانول)، ۰.۵ درصد افزودنی سوکسینیمید، ۷ درصد آب، و ۶۷.۵ درصد سوخت دیزل استفاده شد. این نمونه سوخت، باعث کاهش محتوای گازهای خروجی در هنگام کار بر روی حالت دوگانه سوز با گردش مجدد گازهای خروجی از آگروز شد. در این میان مونوکسیدکربن و دی اکسیدکربن به ترتیب با کاهش ۲۴ و ۴۶ درصد بیشترین کاهش ها را به خود اختصاص دادند [۴۱].

در حالت کلی می‌توان از مطالعات انجام شده نتیجه گیری کرد، ترکیبات آب-اتانول-بیودیزل تأثیر مثبتی بر کاهش انتشار مونوکسیدکربن در موتورهای دیزلی دارد [۴۲]. این روند تقریباً در مطالعه حاضر نیز مشاهده شده است. وجود آب در مخلوط می‌تواند دمای احتراق را کاهش داده و از تشکیل مونوکسیدکربن جلوگیری کند [۲۰]. علاوه بر این، استفاده از اتانول و بیودیزل می‌تواند فرآیند احتراق را بهبود بخشد و منجر به سوخت کامل تر سوخت، کاهش تشکیل مونوکسیدکربن و سایر انتشارات مضر شود.

در مقابل، احتراق گاز طبیعی معمولاً در مقایسه با احتراق سوخت دیزل، انتشار مونوکسید کمتری تولید می‌کند. زیرا که گاز طبیعی حاوی نسبت بیشتری از هیدروژن است که سرعت شعله بالاتری دارد و می‌تواند منجر به سوخت کاملتر سوخت شود. علاوه بر این، احتراق گاز طبیعی معمولاً در دمای پایین تری نسبت به احتراق سوخت دیزل رخ می‌دهد و باعث کاهش بیشتر تشکیل مونوکسیدکربن می‌شود.

با این حال، روند تغییرات انتشار مونوکسیدکربن در حضور آب-اتانول-بیودیزل و گاز طبیعی به عوامل مختلفی از جمله نوع موتور و شرایط کار بستگی دارد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که در حالی که احتراق گاز طبیعی عموماً انتشار مونوکسیدکربن کمتری تولید می‌کند. به طور کلی، تحقیقات بیشتری برای درک کامل روند تغییرات انتشار مونوکسیدکربن در

حضور آب-اتانول-بیودیزل و گاز طبیعی و اینکه چگونه ممکن است تحت تأثیر شرایط مختلف موتور و عملکرد قرار گیرد، مورد نیاز است.

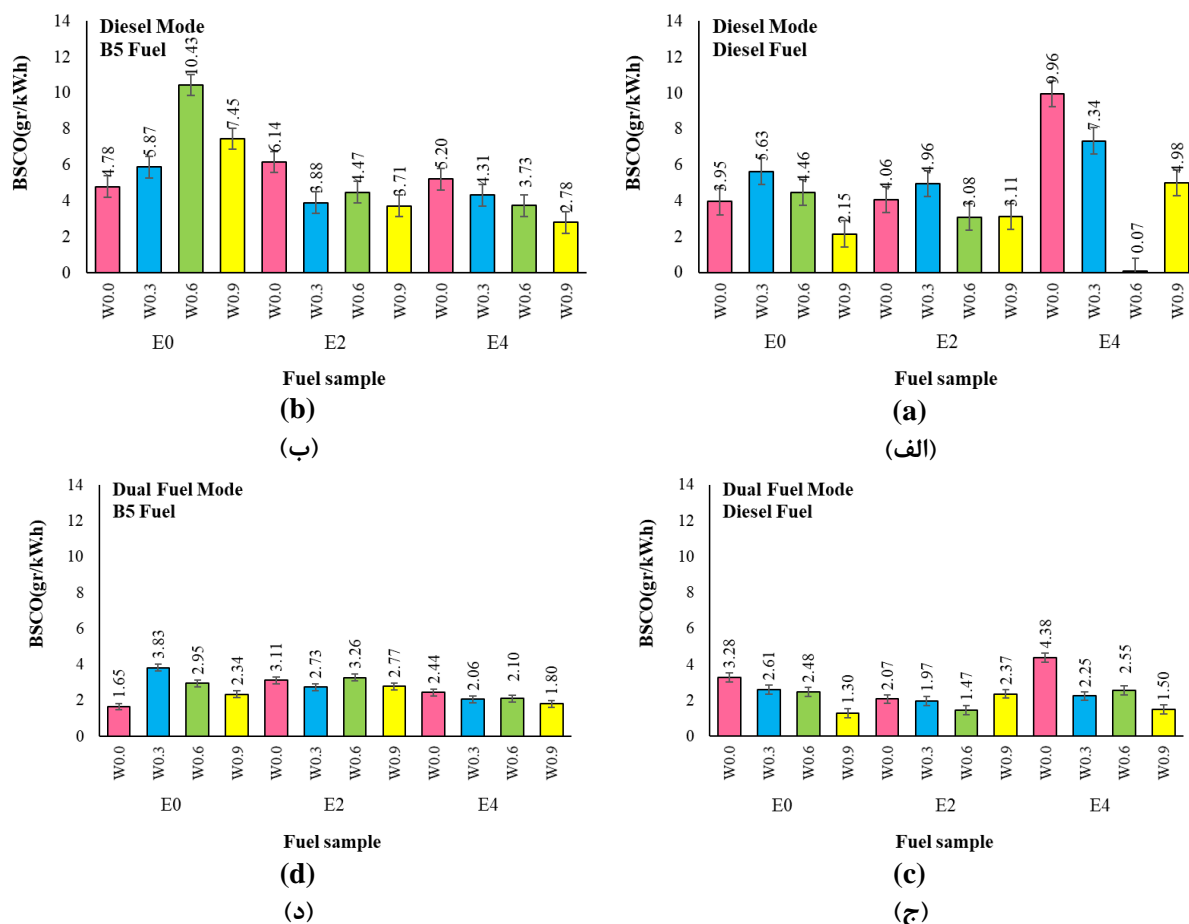


Figure 8- CO emission variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۸- تغییرات انتشار مونوکسیدکربن برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در مود دیزل، ب) سوخت B5 در مود دیزل، ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

شکل ۹ انتشار دی اکسیدکربن در حضور نمونه سوخت‌ها نشان می‌دهد. حضور دی اکسیدکربن در انتشارات موتور می‌تواند به چند احتمال رخ دهد. یکی از احتمال‌ها حضور محتوای کربن در ترکیبات سوخت است. اما سوق یافتن احتراق به سمت احتراق کامل، احتمال دیگری است. بر اساس شکل ۹، به طور میانگین انتشار دی اکسیدکربن در حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب حدود ۷-، ۱۷+ و ۸+ درصد در حالت تک سوخته و ۱۲-، ۱۲+ و ۲- درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و ۱۶+، ۱۵+ و ۲۳+ درصد در حالت تک سوخته و ۳۱+، ۱۲+ و ۲۷+ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر یافته است. میزان افزایش دی اکسیدکربن برای سوخت حاوی B5 تا حدودی بیشتر از سوخت حاوی دیزل خالص است. اما در حالت کلی، ترکیب آب-اتانول توانسته است میزان انتشار دی اکسید کربن را افزایش دهد. بخشی از این افزایش انتشار می‌تواند به دلیل بهبود فرایند احتراق به دلیل محتوای اکسیژن در بیودیزل و اتانول و همچنین خواص میکرو احتراق آب در بهبود اتمیزه شدن سوخت برای احتراق بهتر باشد. از طرفی دیگر، فرایند احتراق دوگانه‌سوز میزان انتشار دی اکسیدکربن را

حدوداً ۴ و ۵ درصد به ترتیب نسبت به دیزل خالص و B5 افزایش داده است. این روند نیز می‌تواند با احتیاط به دلیل بهبود احتراق در حضور گاز طبیعی به دلیل افزایش فشار احتراق و سوق دادن احتراق به سمت احتراق کامل باشد.

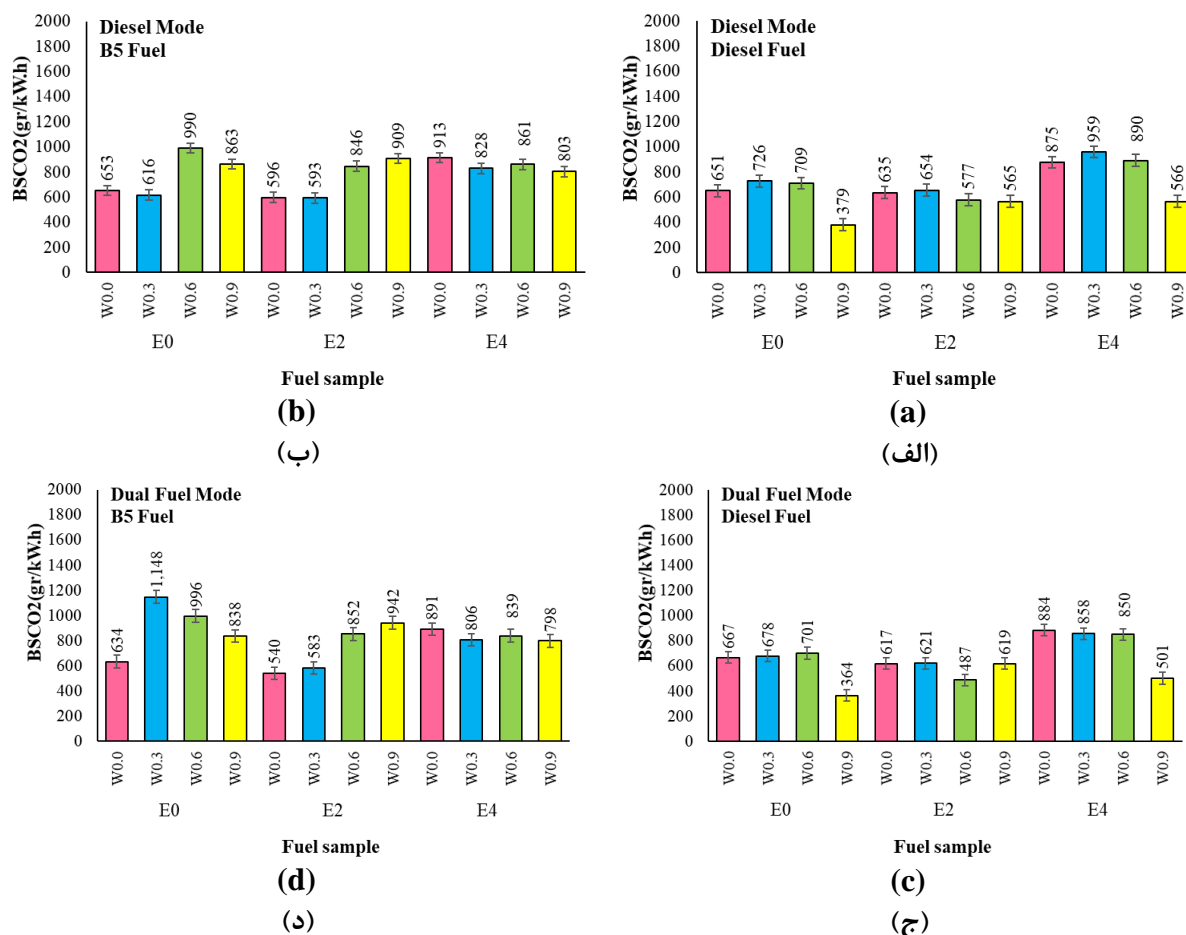


Figure 9- CO₂ emission variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۹- تغییرات انتشار دی اکسید کربن برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در مود دیزل، ب) سوخت B5 در مود دیزل، ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

شکل ۱۰ روند انتشار اکسیدهای نیتروژن را در انتشارات موتور نشان می‌دهد. از روند تغییرات شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که به طور میانگین انتشار اکسیدهای نیتروژن در حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب حدود ۱۰-، ۵- و ۱۸- درصد در حالت تک سوخته و ۹-، ۱۷+ و ۲- درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و ۲۰+، ۳۵+ و ۵۰+ درصد در حالت تک سوخته و ۳۹+، ۲۰+ و ۴۰+ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر یافته است. حضور آب در نمونه‌های سوخت حاوی دیزل خالص توانسته است با موفقیت میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد. زیرا تمرکز بالای حرارت یکی از اصلی‌ترین عوامل ایجاد ترکیب اکسیدهای نیتروژن است. آب به دلیل دارا بودن ظرفیت حرارتی ویژه بالا می‌تواند هر گونه تمرکز حرارتی را در داخل محفظه احتراق کاهش دهد و به دنبال آن انتشار اکسیدهای نیتروژن را تحت تأثیر قرار دهد [۲۶]. این روند در مورد افزودنی اتانول کم رنگ شده است. به خصوص زمانی که احتراق دوگانه‌سوز شده و حضور گاز طبیعی موجب افزایش فشار و دمای محفظه احتراق می‌شود. حضور آب در فرایند احتراق دوگانه‌سوز فقط برای ترکیبات سوخت دیزل خالص

موجب کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن شده است. در بقیه موارد انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش یافته است. به خصوص زمانی که گاز طبیعی در فرایند احتراق ترکیبات B5 وارد می‌شود. زیرا حضور اتانول و گاز طبیعی به همراه بیودیزل در برخی از شرایط موجب افزایش دمای محفظه احتراق می‌شود و پدیده overheating به دلیل محفظه احتراق غنی از اکسیژن رخ می‌دهد. افزایش محتوای اکسیژن بیش از حد موجب رخ دادن این پدیده شده و انتشار اکسیدهای نیتروژن را افزایش می‌دهد. در مطالعه ماسوم و همکاران افزایش اتانول از صفر تا ۲۰ درصد در نمونه سوخت‌ها موجب افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن شد که به دلیل پدیده overheating رخ داده بود [۴۳]. کشکین و گورو همچنین انتشار NOx بیشتری را برای افزودن اتانول در نمونه سوخت‌ها در بارهای بالای موتور گزارش کردند که روند انتشار تقریباً مشابه روند مطالعه حاضر بود [۴۴].

اما گومز و همکاران تأثیر ترکیبات حاوی درصد بالای اتانول در بارهای نسبتاً پایین بر انتشار اکسیدهای نیتروژن را کاهش می‌گزارش کردند. زیرا در بارهای پایین موتور نقطه اوج فشار رخ نداده و بر این اساس دمای محفظه احتراق افزایش زیادی برای رسیدن به نقطه overheating نمی‌یابد. آنها توضیح دادند که اتانول دمای پیک را اندکی کاهش می‌دهد که در بارهای کمتر، NOx را کاهش می‌دهد. با این حال، در بارهای نسبتاً بالاتر، باز انتشار اکسیدهای نیتروژن برای مخلوط‌های حاوی اتانول نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت زیرا سرعت بالای شعله سوخت اتانول منجر به دمای اوج مشابه می‌شود [۴۵].

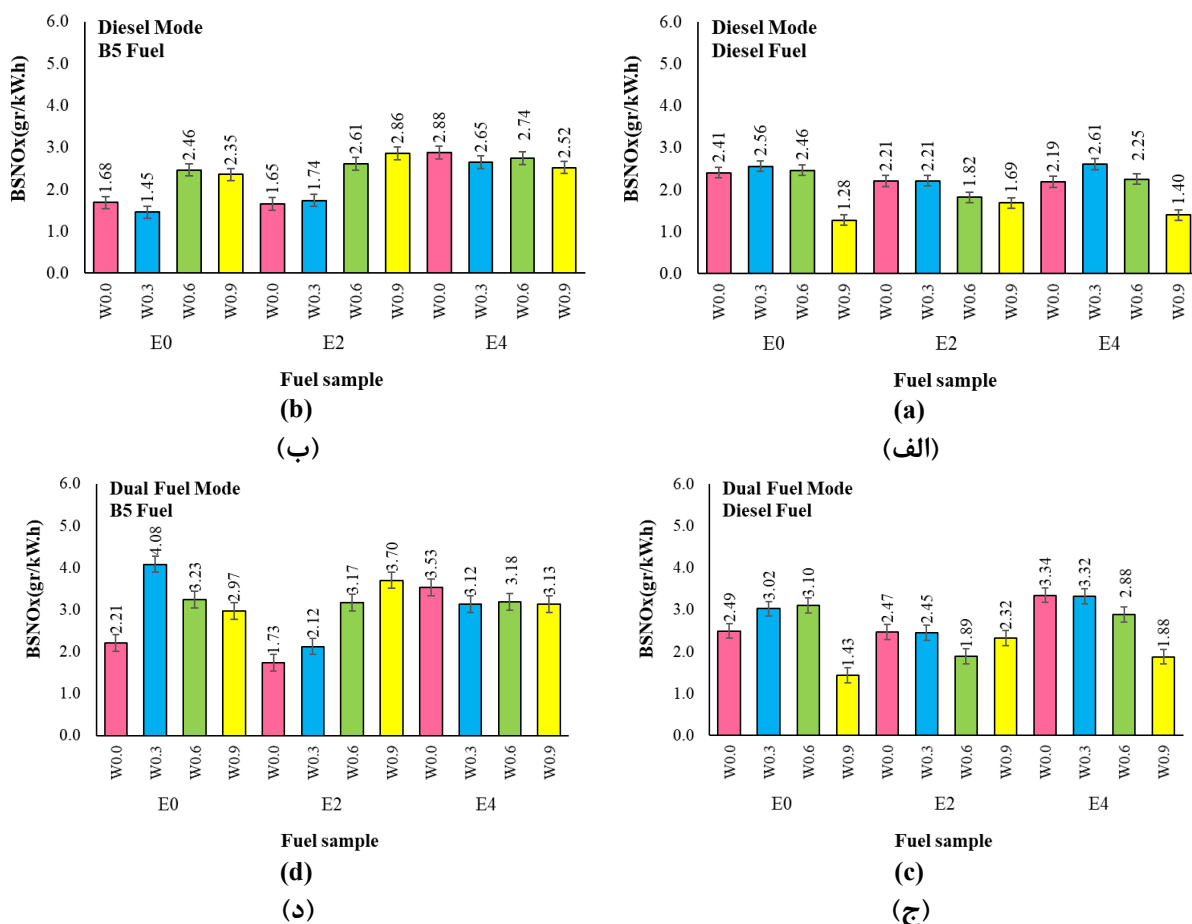


Figure 10- NOx emission variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۱۰- تغییرات انتشار اکسیدهای نیتروژن برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در مود دیزل، ب) سوخت B5 در مود دیزل، ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

شکل ۱۱ انتشار اکسیدهای گوگرد را با تغییرات نمونه سوخت‌ها نشان می‌دهد. با مشاهده روند تغییرات در شکل ۱۱ می‌توان عنوان کرد به طور میانگین انتشار اکسیدهای گوگرد در حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب حدود +۹، +۲۷ و +۱۳ درصد در حالت تک سوخته و +۶، +۱۳ و +۱۷ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و -۵، -۱۵ و -۲۱ درصد در حالت تک سوخته و -۸، -۸ و -۲۲ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر یافته است. حضور بیودیزل در نمونه سوخت‌ها توانسته است به طور نسبی انتشار اکسیدهای گوگرد را نسبت به نمونه سوخت‌های حاوی دیزل کاهش داده است. زیرا بیودیزل دارای محتوای گوگرد ناست.

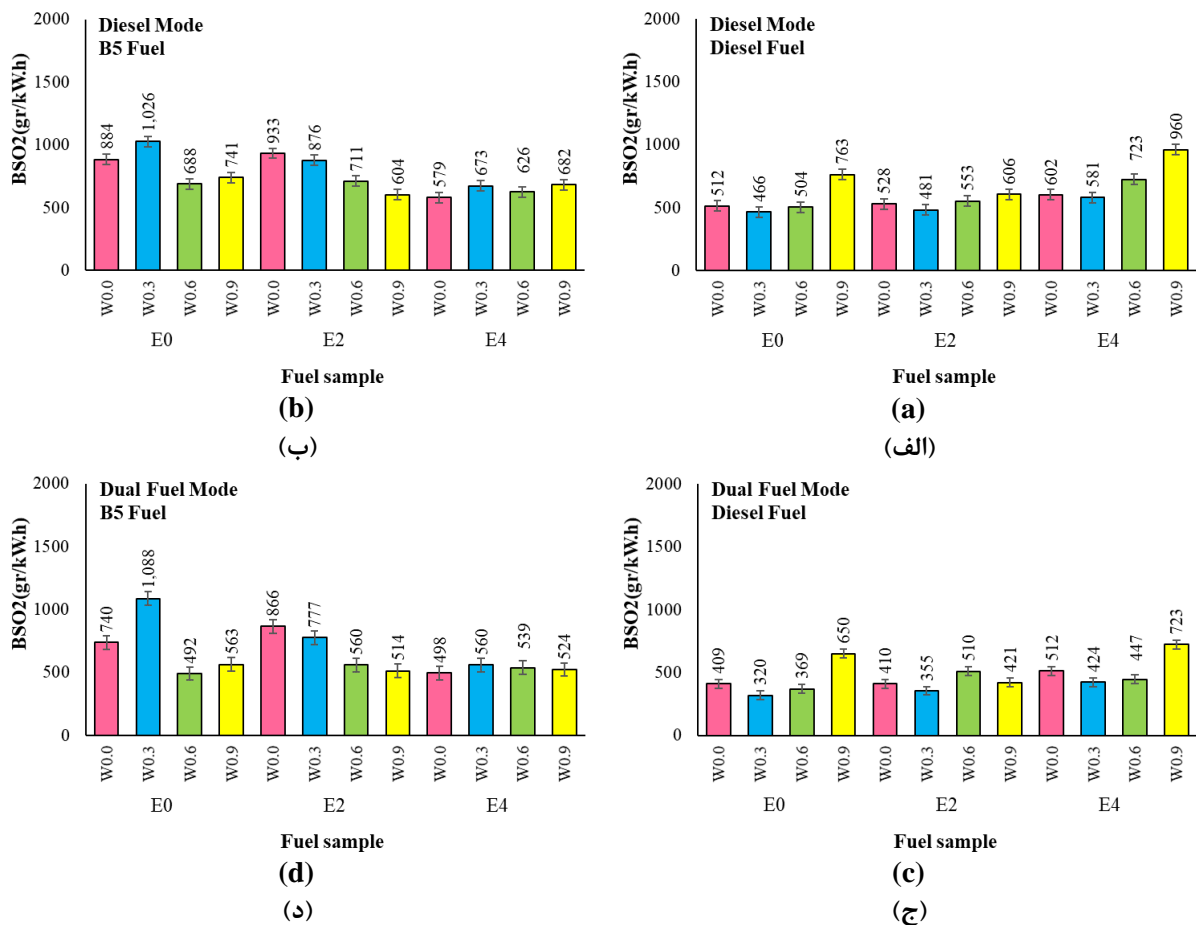


Figure 11- SO₂ emission variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۱۱- تغییرات انتشار اکسیدهای گوگرد برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در مود دیزل، ب) سوخت B5 در مود دیزل، ج) سوخت دیزل در مود دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در مود دوگانه‌سوز

شکل ۱۲ تغییرات هزینه انرژی تولید شده را در حضور نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد. در شکل ۱۲ واحد عملگری تولید یک کیلووات توان است. در این نمودار هزینه انرژی تولید شده با استفاده از بیودیزل با قیمت تمام شده هر لیتر ۵ دلار، اتانول با قیمت تمام شده هر لیتر ۳ دلار و آب مقطر دو بار تقطیر با قیمت تمام شده هر لیتر ۰/۱ دلار نسبت به میزان سوخت مصرف

شده و توان تولید شده محاسبه شد. این روند می‌توان ارتباط مستقیمی با مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور در حضور نمونه سوخت‌ها داشته باشد. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، کمترین هزینه تولید انرژی در فرایند احتراق دوگانه‌سوز رخ می‌دهد. زیرا قیمت گاز طبیعی در ایران بسیار پایین است (حدود ۰/۰۱ دلار برای هر متر مکعب گاز طبیعی). افزودن اتانول به جز در نمونه سوخت B5E2W0.3، موجب افزایش نسبی هزینه انرژی تولیدی شده است.

انجام عملیات بهینه‌سازی برای درک بهتر شرایط کارکرد بهینه یک موتور دیزلی اقدامی ضروری است. از آنجایی که عوامل زیادی در تغییر متغیرهای وابسته دخیل هستند نمی‌توان محدوده خاصی را به عنوان محدوده برای ترکیبات سوخت بدون عملیات بهینه‌سازی در نظر گرفت. بنابراین، بهینه‌سازی باید با در نظر گرفتن تمام متغیرهای مستقل و وابسته انجام شود تا به بهترین عملکرد و کمترین آلاینده‌گی خروجی موتور دیزل دست یابد. بخش بعدی نتایج بهینه‌سازی را ارائه می‌دهد.

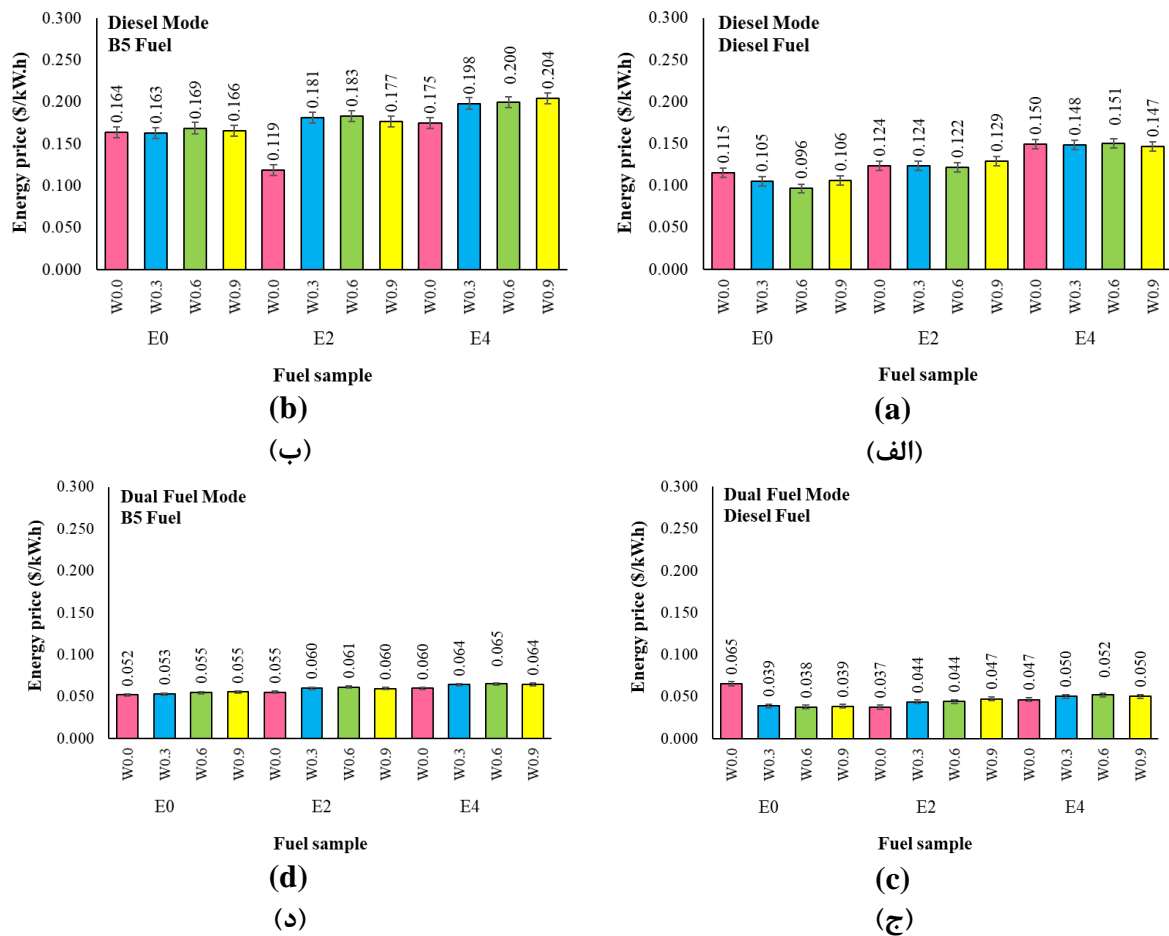


Figure 12- Energy price variations for each fuel sample. a) Diesel fuel in diesel mode, b) B5 fuel in diesel mode, c) Diesel fuel in dual-fuel mode, and d) B5 in dual-fuel mode

شکل ۱۲- تغییرات هزینه تولید انرژی برای هر نمونه سوخت. الف) سوخت دیزل در موتور دیزل، ب) سوخت B5 در موتور دیزل، ج) سوخت دیزل در موتور دوگانه‌سوز، و د) سوخت B5 در موتور دوگانه‌سوز

بهینه‌سازی

روش بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ در حضور روابط درجه سوم انجام شد. متغیرها به دو بخش مستقل و وابسته تقسیم شدند. متغیرهای وابسته عبارتند از توان موتور، مصرف سوخت، انتشار مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، اکسیدهای

نیترژن، اکسیدهای گوگرد و هزینه تولید انرژی و متغیرهای مستقل شامل مقادیر بیودیزل، آب، اتانول و گاز طبیعی بود. این روش بهینه سازی، با ایجاد یک معادله ریاضی درجه سوم چند متغیره مقادیر متغیرهای وابسته و مستقل را به هم مربوط می‌سازد. در ادامه با سازوکارها و عملیات مشتق گیری بر اساس قیودی که به عنوان شروط اصلی بهینه سازی توسط اوپراتور تعیین می‌شود، می‌تواند مقادیر بهینه متغیرهای مستقل را تولید کند. در نهایت فرایند به یک امتیاز مطلوبیت دست می‌یابد که عددی بین ۰ و ۱ است. عدد مطلوبیت بین ۰/۵ و ۱ می‌تواند بهترین نتایج بهینه سازی را تولید کند [۲۰]. شکل ۱۳ سازوکار اصلی بهینه سازی با روش سطح پاسخ را ارائه می‌دهد. بر اساس شکل ۱۳، هدف از بهینه سازی بیشینه کردن توان ترمزی و کمینه کردن مصرف سوخت، انتشار مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیترژن، و اکسیدهای گوگرد و کاهش هزینه تولید در ازای افزایش امتیاز مطلوبیت است. جدول ۵ مقادیر بهینه متغیرهای وابسته را در مقابل متغیرهای مستقل نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۴ تغییرات امتیاز مطلوبیت را در ارتباط با متغیرهای مستقل نشان می‌دهد.

بر اساس تغییرات متغیرها در شکل ۱۴ می‌توان روند تغییرات متغیرهای وابسته در ارتباط با متغیرهای مستقل را با جزئیات بیشتری بررسی کرد. شکل ۱۴ (الف) روند تغییرات امتیاز مطلوبیت را در مقابل تغییرات بیودیزل و اتانول نشان می‌دهد. بر اساس شیب تغییرات می‌توان عنوان کرد روند تأثیر پذیری امتیاز مطلوبیت از تغییرات اتانول در مقایسه با بیودیزل کمی بیشتر است. همچنین افزایش بیودیزل و اتانول ابتدا موجب افزایش و سپس موجب کاهش امتیاز مطلوبیت می‌شود. شکل ۱۴ (ب)، تأثیر آب و بیودیزل بر روی تغییرات امتیاز مطلوبیت را ارائه می‌دهد. بر اساس تغییرات می‌توان گفت، شیب تغییرات امتیاز مطلوبیت با تغییر بیودیزل بیشتر از شیب تغییرات با تغییر مقادیر آب است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تأثیرپذیری امتیاز مطلوبیت از تغییرات بیودیزل بیشتر از تغییرات آب است. افزایش محتوای بیودیزل موجب کاهش و افزایش محتوای آب در ابتدا موجب کاهش و سپس موجب افزایش امتیاز مطلوبیت می‌شود.

شکل ۱۷ (ج)، روند تغییرات امتیاز مطلوبیت بر اساس تغییرات بیودیزل و گاز طبیعی را نشان می‌دهد. بر اساس روند تغییرات می‌توان گفت، شیب تغییرات امتیاز مطلوبیت بر اساس تغییرات گاز طبیعی به مراتب کمتر از شیب تغییرات نسبت به بیودیزل است. با افزایش مقادیر گاز طبیعی به طور نسبی و با شیب ملایم امتیاز مطلوبیت کاهش یافته است. آنچه از مشاهدات مسلم است، بهینه شرایط بایستی در ترکیب سوختی با مقادیر پایین بیودیزل رخ دهد.

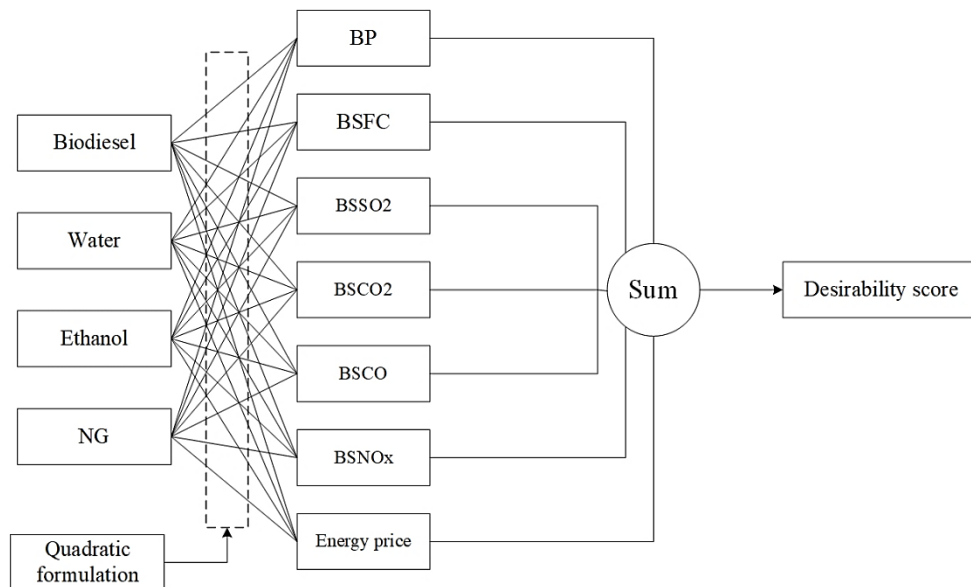
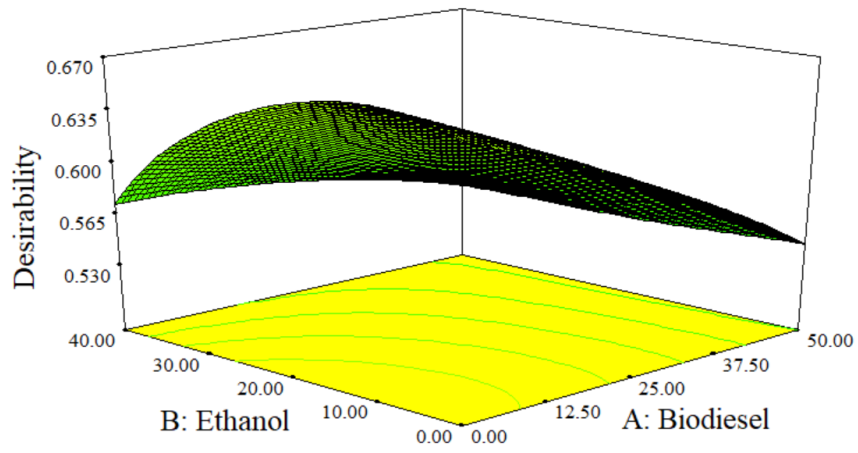
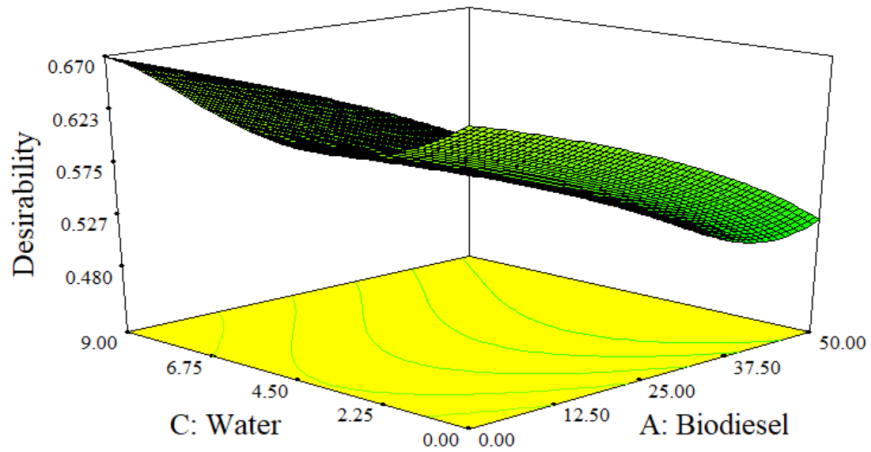


Figure 13- Optimization procedure using response surface methodology

شکل ۱۳ - روند انجام بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ



(الف)



(ب)

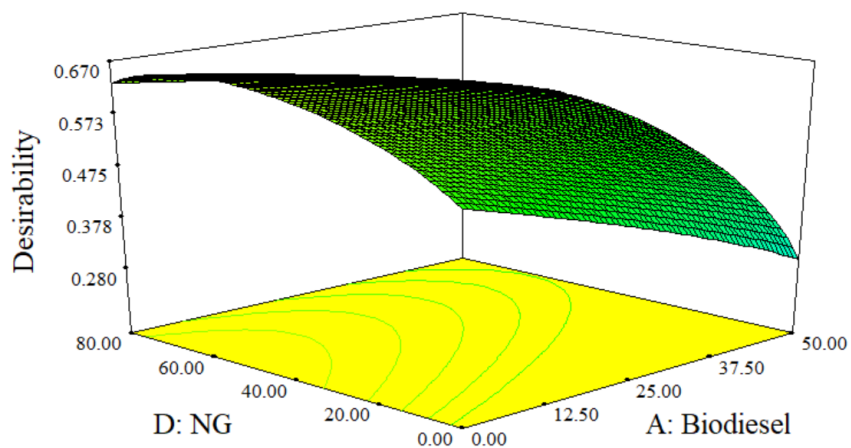


Figure 14- Optimized levels of variables: a) Biodiesel-Ethanol, b) Biodiesel-Water, c) Biodiesel-NG

شکل ۱۴- سطوح بهینه متغیرها: الف) بیودیزل- اتانول، ب) بیودیزل- آب، ج) بیودیزل- گاز طبیعی

Table 5- Optimal operation conditions of diesel engine with the lowest energy cost

جدول ۵- شرایط عملکرد بهینه موتور دیزل با کمترین هزینه انرژی

ترکیبات سوخت			
سوخت گازی (درصد)	آب (ml)	اتانول (ml)	بیودیزل (ml)
65	9.3	11.5	2.5
پارامترهای بهینه عملکرد موتور دیزل			
مصرف سوخت ویژه (g/kWh)			توان ترمزی (kW)
114.5			8.4
پارامترهای بهینه انتشارات آلاینده موتور دیزل			
دی اکسیدکربن (g/kWh)	اکسیدهای نیتروژن (g/kWh)	اکسیدهای گوگرد (g/kWh)	مونوکسید کربن (g/kWh)
435	1.71	571.23	1.80
هزینه بهینه تولید انرژی			
			هزینه انرژی (\$/kWh)
			0.07

جدول ۵ مقادیر بهینه پارامترهای مستقل و وابسته را نشان می‌دهد. نقطه بهینه عملکرد موتور در بار کامل با نمونه سوخت حاوی بیودیزل به مقدار ۲/۵ میلی‌لیتر، اتانول به مقدار ۱۱/۵ میلی‌لیتر، آب به میزان ۹/۳ میلی‌لیتر و سوخت گازی به میزان ۶۵ درصد رخ می‌دهد. در این شرایط، توان ترمزی ۸/۴ کیلووات، و مصرف سوخت ویژه ۱۱۴/۵ گرم بر کیلووات ساعت است. این نمونه سوخت مقادیر مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای گوگرد را به ترتیب به میزان ۱/۸، ۴۳۵، ۱/۷۱ و ۵۷۱/۲۳ گرم بر کیلووات ساعت تولید می‌کند. در این نقطه هزینه تولید انرژی ۰/۰۷ دلار بر کیلووات ساعت است.

نتیجه گیری

این مطالعه اثرات آب، اتانول، بیودیزل، ترکیب شده در سوخت دیزل را در دو فرایند استاندارد و دوگانه‌سوز با گاز طبیعی مورد بررسی قرار داده و عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل را مورد بحث قرار می‌دهد. در ادامه همچنین هزینه تولید انرژی نیز مورد بحث قرار گرفت. بر اساس مشاهدات، بهینه سازی برای دستیابی به بهترین عملکرد موتور و کمترین آلاینده‌های منتشر شده با به کارگیری روش سطح پاسخ انجام شد. این روند می‌تواند ما را به سمت تولید انرژی پایدار سوق دهد. نتایج نشان داد، افزودنی‌های به کاررفته، تأثیرات بسزایی در عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل هم در فرایند استاندارد و هم در فرایند دوگانه‌سوز دارد. نتیجه گیری میشود که:

- حضور ۵ درصد بیودیزل در سوخت دیزل (B5) ارزش حرارتی سوخت را به میزان نسبی تقریباً ۱/۲ درصد در مقایسه با سوخت دیزل خالص، کاهش داد.
- بالاترین نقطه اشتعال مربوط به سوخت دیزل (۸۷ درجه سانتی‌گراد) و کمترین نقطه اشتعال (۲۴ درجه سانتی‌گراد) مربوط به نمونه سوخت B5E4W0.6 بود.
- حضور اتانول و آب در نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل تأثیر مثبتی در بهبود توان ترمزی در مقایسه با نمونه سوخت‌های بدون بیودیزل داشت.

- حضور سوخت گازی در فرایند احتراق، موجب افزایش توان ترمزی به میزان قابل توجهی (به ترتیب حدود ۸۲ و ۸۱ درصد نسبت به حالت تک سوخته برای دیزل و B5) شد.
- کمترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به نمونه سوخت‌هایی بود که در فرایند دوگانه‌سوز تحت احتراق قرار گرفتند (به ترتیب حدود ۷۳ و ۷۱ درصد کمتر از حالت تک سوخته برای سوخت‌های دیزل و B5).
- انتشار مونوکسیدکربن به طور متوسط در حالت دوگانه‌سوز حدود ۴۷ و ۵۰ درصد کمتر از حالت تک سوخته به ترتیب نسبت به سوخت دیزل بود.
- افزودن بیودیزل به نمونه سوخت‌ها، انتشار مونوکسید کربن را به میزان ۱۶ و ۱۰ درصد در مقایسه با سوخت حاوی دیزل خالص به ترتیب برای حالت تک سوخته و دوگانه‌سوز، افزایش داد.
- به طور میانگین انتشار دی اکسیدکربن در حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب حدود ۷-، ۱۷+ و ۸+ درصد در حالت تک سوخته و ۱۲-، ۱۲+ و ۲- درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و ۱۶+، ۱۵+ و ۲۳+ درصد در حالت تک سوخته و ۳۱+، ۱۲+ و ۲۷+ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر یافت.
- به طور میانگین انتشار اکسیدهای گوگرد در حضور آب، اتانول و تلفیق آب-اتانول به ترتیب حدود ۱۴+، ۹+ و ۲۷+ درصد در حالت تک سوخته و ۶+، ۱۳+ و ۱۷+ درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت دیزل و ۵-، ۱۵- و ۲۱- درصد در حالت تک سوخته و ۸-، ۸- و ۲۲- درصد در حالت دوگانه‌سوز برای سوخت B5 تغییر یافت.
- نقطه بهینه عملکرد موتور در بار کامل با نمونه سوخت حاوی بیودیزل به مقدار ۲/۵ میلی لیتر، اتانول به مقدار ۱۱/۵ میلی لیتر، آب به میزان ۹/۳ میلی لیتر و سوخت گازی به میزان ۶۵ درصد رخ داد.

تشکر و قدردانی

با تشکر از آزمایشگاه سوخت و موتور دانشگاه محقق اردبیلی در راستای حمایت و پشتیبانی از انجام آزمایشات تجربی این پژوهش

منابع

- [1] P. Azadi, G. Brownbridge, S. Mosbach, A. Smallbone, A. Bhave, O. Inderwildi, and M. Kraft, "The carbon footprint and non-renewable energy demand of algae-derived biodiesel," *Applied energy*, vol. 113, pp. 1632-1644, 2014.
- [2] G. R. O. IRENA, "Energy transformation 2050," *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*, 2020.
- [3] H. Mahmudul, F. Hagos, R. Mamat, A. A. Adam, W. Ishak, and R. Alenezi, "Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines—A review," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 497-509, 2017.
- [4] C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, and S. Tonon, "Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations," *Energy*, vol. 29, no. 12-15, pp. 2195-2211, 2004.
- [5] S. Jaichandar and K. Annamalai, "The status of biodiesel as an alternative fuel for diesel engine—an overview," *Journal of Sustainable Energy Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 71-75, 2011.
- [6] G. P. Hammond and S. M. Seth, "Carbon and environmental footprinting of global biofuel production," *Applied Energy*, vol. 112, pp. 547-559, 2013.
- [7] R. L. Naylor and M. M. Higgins, "The rise in global biodiesel production: Implications for food security," *Global food security*, vol. 16, pp. 75-84, 2018.
- [8] A. Pirvaram, S. Sadrameli, and L. Abdolmaleki, "Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition," *Energy*, vol. 181, pp. 321-330, 2019.
- [9] K. Sundar and R. Udayakumar, "Performance and emissions characteristics of a variable compression ratio engine operated on dual fuel mode using diesel and biodiesel with additives," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1276, no. 1, p. 012084: IOP Publishing.

- [10] J. P. Nuszowski, *The effects of fuel additives on diesel engine emissions during steady state and transient operation*. West Virginia University, 2008.
- [11] J. E. Dec, "A conceptual model of DL diesel combustion based on laser-sheet imaging," *SAE transactions*, pp. 1319-1348, 1997.
- [12] H. Parikh, V. Prajapati, and K. Thakkar, "Performance evaluation and emission analysis of 4-S, IC engine using ethanol bio-diesel blended with diesel fuel," *J Int J Res Eng Technol*, vol. 2, no. 4, pp. 465-9, 2013.
- [13] J. Guilera, R. Bingué, E. Ramírez, M. Iborra, and J. Tejero, "Comparison between ethanol and diethyl carbonate as ethylating agents for ethyl octyl ether synthesis over acidic ion-exchange resins," *Industrial engineering chemistry research*, vol. 51, no. 50, pp. 16525-16530, 2012.
- [14] L. Tarabet, K. Loubar, M. Lounici, K. Khiari, T. Belmrabet, and M. Tazerout, "Experimental investigation of DI diesel engine operating with eucalyptus biodiesel/natural gas under dual fuel mode," *Fuel*, vol. 133, pp. 129-138, 2014.
- [15] R. Jatoth, S. K. Gugulothu, and G. R. kiran Sastry, "Experimental study of using biodiesel and low cetane alcohol as the pilot fuel on the performance and emission trade-off study in the diesel/compressed natural gas dual fuel combustion mode," *Energy*, vol. 225, p. 120218, 2021.
- [16] G. R. Gawale and G. N. Srinivasulu, "Experimental investigation of ethanol/diesel and ethanol/biodiesel on dual fuel mode HCCI engine for different engine load conditions," *Fuel*, vol. 263, p. 116725, 2020.
- [17] R. Senthilraja, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and N. Nedunchezian, "Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel-Ethanol-Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel," *Energy*, vol. 112, pp. 899-907, 2016.
- [18] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, M. Alizamir, A. Mosavi, S. Shamshirband, and T. Rabczuk, "Using SVM-RSM and ELM-RSM approaches for optimizing the production process of methyl and ethyl esters," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 2889, 2018.
- [19] S. F. Ardabili, B. Najafi, M. Aghbashlo, Z. Khounani, and M. Tabatabaei, "Performance and emission analysis of a dual-fuel engine operating on high natural gas substitution rates ignited by aqueous carbon nanoparticles-laden diesel/biodiesel emulsions," *Fuel*, vol. 294, p. 120246, 2021.
- [20] S. Faizollahzadeh Ardabili, "Improving the combustion process of biodiesel using additives," Ph.D. thesis Fundamental, Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 2021.
- [21] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, and S. Shamshirband, "Fuzzy logic method for the prediction of cetane number using carbon number, double bounds, iodine, and saponification values of biodiesel fuels," *Environmental Progress Sustainable Energy*, vol. 38, no. 2, pp. 584-599, 2019.
- [22] M. J. Pratas, S. V. Freitas, M. B. Oliveira, S. C. Monteiro, Á. S. Lima, and J. A. Coutinho, "Biodiesel density: experimental measurements and prediction models," *Energy Fuels*, vol. 25, no. 5, pp. 2333-2340, 2011.
- [23] B. Tesfa, F. Gu, R. Mishra, and A. Ball, "LHV prediction models and LHV effect on the performance of CI engine running with biodiesel blends," *Energy conversion management*, vol. 71, pp. 217-226, 2013.
- [24] P. S. Mehta and K. Anand, "Estimation of a lower heating value of vegetable oil and biodiesel fuel," *Energy Fuels*, vol. 23, no. 8, pp. 3893-3898, 2009.
- [25] W.-J. Lee, Y.-C. Liu, F. K. Mwangi, W.-H. Chen, S.-L. Lin, Y. Fukushima, C.-N. Liao, and L.-C. Wang, "Assessment of energy performance and air pollutant emissions in a diesel engine generator fueled with water-containing ethanol-biodiesel-diesel blend of fuels," *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5591-5599, 2011.
- [26] E. Akbarian, B. Najafi, M. Jafari, S. Faizollahzadeh Ardabili, S. Shamshirband, and K.-w. Chau, "Experimental and computational fluid dynamics-based numerical simulation of using natural gas in a dual-fueled diesel engine," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 1, pp. 517-534, 2018.
- [27] L. F. R. Verdusco, "Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 652-665, 2013.
- [28] K. Krisnangkura, T. Yimsuwan, and R. Pairintra, "An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures," *Fuel*, vol. 85, no. 1, pp. 107-113, 2006.
- [29] L. Razaq, M. Mujtaba, M. Shahbaz, S. Nawaz, H. M. Khan, A. Hussain, U. Ishtiaq, M. Kalam, M. E. M. Soudagar, and K. A. Ismail, "Effect of biodiesel-dimethyl carbonate blends on engine performance, combustion and emission characteristics," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 7, pp. 5111-5121, 2022.

- [30] P. Patel, B. Patel, E. Vekaria, and M. Shah, "Biophysical economics and management of biodiesel, a harbinger of clean and sustainable energy," *International Journal of Energy Water Resources*, vol. 4, no. 4, pp. 411-423, 2020.
- [31] A. Gómez, C. Mata, and O. J. J. o. E. E. Armas, "Effect of ethanol–diesel fuel blend on diesel engine emissions produced by different bus fleets," vol. 142, no. 2, p. E4015003, 2016.
- [32] R. Kumar and O. P. J. J. E. d. S. A. Chaurasia, "A review on performance and emissions of compression ignition engine fueled with ethanol-diesel blend," vol. 52, no. 2, pp. 205-14, 2019.
- [33] N. S. Shahir, n. H. Masjuki, M. Kalam, A. Imran, A. J. R. Ashraful, and S. E. Reviews, "Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review," vol. 48, pp. 62-78, 2015.
- [34] M. Mofijur, M. Rasul, and J. J. P. E. Hyde, "Recent developments on internal combustion engine performance and emissions fuelled with biodiesel-diesel-ethanol blends," vol. 105, pp. 658-664, 2015.
- [35] A. D. M. Guedes, S. L. Braga, and F. J. F. Pradelle, "Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends–Part 2: Optimization of injection timing," vol. 225, pp. 174-183, 2018.
- [36] N. M. Ribeiro, A. C. Pinto, C. M. Quintella, G. O. Da Rocha, L. S. Teixeira, L. L. Guarieiro, M. do Carmo Rangel, M. C. Veloso, M. J. Rezende, R. J. E. Serpa da Cruz, and fuels, "The role of additives for diesel and diesel blended (ethanol or biodiesel) fuels: a review," vol. 21, no. 4, pp. 2433-2445, 2007.
- [37] P. Appavu, J. Jayaraman, and H. J. A. J. o. M. E. Venu, "NOx emission reduction techniques in biodiesel-fuelled CI engine: A review," 2019.
- [38] A. Datta and B. K. J. E. Mandal, "Engine performance, combustion and emission characteristics of a compression ignition engine operating on different biodiesel-alcohol blends," vol. 125, pp. 470-483, 2017.
- [39] S. Gowrishankar and A. J. E. Krishnasamy, "Emulsification–A promising approach to improve performance and reduce exhaust emissions of a biodiesel fuelled light-duty diesel engine," vol. 263, p. 125782, 2023.
- [40] C. Venkataraman and G. U. M. Rao, "Emission factors of carbon monoxide and size-resolved aerosols from biofuel combustion," *Environmental science technology*, vol. 35, no. 10, pp. 2100-2107, 2001.
- [41] V. Likhanov and O. J. T. e. Lopatin, "Use of natural gas, methanol, and ethanol fuel emulsions as environmentally friendly energy carriers for mobile heat power plants," vol. 64, pp. 935-944, 2017.
- [42] J. K. Mwangi, W.-J. Lee, Y.-C. Chang, C.-Y. Chen, and L.-C. J. A. E. Wang, "An overview: Energy saving and pollution reduction by using green fuel blends in diesel engines," vol. 159, pp. 214-236, 2015.
- [43] B. Masum, H. Masjuki, M. Kalam, I. R. Fattah, S. Palash, and M. Abedin, "Effect of ethanol–gasoline blend on NOx emission in SI engine," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 209-222, 2013.
- [44] A. Keskin and M. Gürü, "The effects of ethanol and propanol additions into unleaded gasoline on exhaust and noise emissions of a spark ignition engine," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environmental Effects*, vol. 33, no. 23, pp. 2194-2205, 2011.
- [45] P. Gomes, R. Ecker, A. Kulzer, A. Kufferath, and E. Conti, "Study on boosted direct injection si combustion with ethanol blends and the influence on the ignition system," SAE Technical Paper0148-7191, 2011.

English Abstract

The effect of ethanol as a biodiesel fuel additive on the performance and emissions of a dual-fuel diesel engine

Amir Hashemi-Nejhad¹, Bahman Najafi^{2*}, Sina Faizollahzadeh Ardabili³

1- Ph.D. student, biosystem engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

2- Professor, Biosystem Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

3- Ph.D., Renewable Energy, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

*Corresponding author

(Received: 2023/01/27, Received in revised form: 2023/04/22, Accepted: 2023/05/05)

Investigating the effects of pilot fuel containing low percentages of ethanol and water in the diesel-biodiesel fuel mixture in a dual-fuel combustion process with natural gas can have favorable results on the performance and emissions of a diesel engine. In the present study, three levels of ethanol (0, 2, and 4%), two levels of biodiesel (0 and 5%), and four levels of water (0, 0.3, 0.6, and 0.9%) were mixed with diesel fuel. All these fuel samples were considered as pilot fuel in the dual fuel combustion process with an 80% natural gas replacement percentage. Based on the obtained results, the presence of water, ethanol, and the combination of water-ethanol and natural gas can improve the diesel engine's performance by increasing the combustion chamber pressure and reducing the pollutants. The presence of oxygen content in ethanol can improve the combustion process by pushing the combustion toward complete combustion. The results of the optimization using the response surface method showed that the optimal point of engine performance at full load with a fuel sample containing biodiesel in the amount of 2.5 ml, ethanol in the amount of 11.5 ml, water in the amount of 9.3 ml and gas fuel occurs in 65%. Under this condition, compared to the control sample, the braking power increased by about 79%, and the specific fuel consumption decreased by about 58%. This fuel sample reduced the amounts of carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, and energy production costs by 54, 33, 29, and 39%, respectively, and increased sulfur oxides by 11%.

Keywords: Dual fuel diesel engine, Diesel fuel, Water, Ethanol, Natural gas