

تأثیر افزودنی‌های ان - بوتانول و دی متیل کربنات به‌عنوان افزودنی سوخت بیودیزل در عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل

مقداد خیاط درستکار^۱، هادی غائبی^{۲*}، ابراهیم عبدی اقدم^۳، سینا فیض‌اله زاده اردبیلی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، meghdadbluearsh@yahoo.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، hghaebi@uma.ac.ir

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، eaaghdam@uma.ac.ir

۴- دکتری تخصصی، انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، sina.faiz@uma.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴)

چکیده: موتورهای دیزل به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تولید انرژی و مصرف سوخت دیزل به‌شمار می‌آیند. به‌کارگیری از سوخت بیودیزل به‌عنوان بخشی از سوخت مصرفی موتورهای دیزل می‌تواند تأثیر مثبتی در کاهش به‌کارگیری از منابع فسیلی و انتشار آلاینده‌ها داشته باشد. به‌کارگیری از سوخت بیودیزل در کنار مزایای آن، دارای معایبی نظیر افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌باشد که به‌عنوان یک گاز سمی تلقی می‌شود. محققان بسیاری افزودنی‌های متفاوتی در راستای پوشش بخشی از معایب سوخت بیودیزل ارائه داده‌اند. در این مقاله دو نوع افزودنی اکسیژن‌دار شامل دی متیل کربنات و ان بوتانول به‌صورت تلفیقی با مقادیر کم در سوخت‌های B2 (۲ درصد بیودیزل و ۹۸ درصد دیزل) و B5 (۵ درصد بیودیزل و ۹۵ درصد دیزل) مخلوط شدند. به‌کارگیری مقادیر کم این افزودنی‌ها می‌تواند موجب کاهش هزینه تولید سوخت شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، نمونه سوخت‌های B2D10N10 و B2D10N0 توانستند توان ترمزی موتور دیزل را به ترتیب حدود ۱۲ و ۱۰ درصد نسبت به سوخت B2 افزایش دهند. از طرفی استفاده از نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های ترکیبی دی متیل کربنات و ان بوتانول در سوخت B2 به‌طور متوسط حدود ۱۸ درصد مصرف سوخت ویژه ترمزی را نسبت به سوخت دیزل و حدود ۳۲ درصد نسبت به سوخت B2 کاهش داد. استفاده از افزودنی‌های ترکیبی دی متیل کربنات و ان بوتانول میزان بازده حرارتی را به‌طور متوسط حدود ۱۵ الی ۳۰ درصد نسبت به سوخت‌های دیزل، B2 و B5 افزایش داد. افزودن دی متیل کربنات و ان بوتانول به‌صورت ترکیبی در مقادیر کم موجب کاهش انتشار مونوکسیدکربن به‌میزان قابل توجه شد. بالاترین میزان انتشار دی اکسیدکربن در سوخت‌های حاوی ترکیبات ترکیبی دی متیل کربنات، ان بوتانول و B5 اتفاق می‌افتد که حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد بود. طی فرایند بهینه‌سازی، نمونه سوخت B2D30N20 به‌عنوان فرمولاسیون بهینه در تلفیق سوخت دیزل، بیودیزل، دی‌متیل کربنات و ان بوتانول انتخاب شد.

کلیدواژگان: بیودیزل، موتور دیزل، سوخت دیزل، دی متیل کربنات، ان-بوتانول

مقدمه

از آنجایی که ذخایر جهانی سوخت‌های فسیلی و مواد خام محدود است، علاقه پژوهشی به سمت سوخت‌های غیرنفتی، تجدید پذیر و غیر آلاینده سوق یافته است [۱]. سوخت‌های زیستی یکی از منابع انرژی جایگزین بالقوه برای سوخت‌های فسیلی است و هنوز هم می‌تواند مبنای توسعه پایدار از نقطه‌نظر نگرانی‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی باشد. در این راستا بیودیزل

به‌عنوان یک سوخت جایگزین در موتورهای دیزل در نظر گرفته می‌شود. این سوخت‌ها اکنون جایگاه برجسته‌ای در توسعه سوخت‌های جایگزین دارند. بیودیزل یا همان دیزل زیستی در موتورهای احتراق تراکمی به‌صورت مخلوط با سوخت دیزل استفاده می‌شود [۲].

سوخت دیزل یک منبع انرژی مهم در زمینه‌های کشاورزی، صنعتی و حمل‌ونقل است. افزایش هزینه منابع سوخت فسیلی، بحران‌های نرخ آلودگی ناشی از موتورهای دیزلی را افزایش می‌دهد و منجر به حرکت روبه‌جلو در جستجوی جایگزینی تجدیدپذیر برای سوخت دیزل می‌شود [۳]. به‌عنوان مثال، بیشتر آلاینده‌های بخش ماشین‌های کشاورزی از احتراق سوخت دیزل منتشر می‌شوند [۴]. در موتورهای دیزل انتشار مونوکسید کربن (CO)، هیدروکربن نسوخته (UHC)، اکسید نیتروژن (NOx) و انتشار دود چشمگیر هستند. امروزه کارشناسان به دنبال روش‌هایی برای کاهش آلاینده‌ها بدون تغییر ساختار موتور هستند [۵، ۶].

استفاده از سوخت‌های جایگزین کم کربن و کم هزینه راه‌حل مناسبی برای مسائل فوق‌الذکر است [۷]. بیودیزل یک منبع انرژی کم کربن است. بیودیزل یک سوخت زیستی تجدیدپذیر است که از روغن گیاهی یا چربی حیوانی استخراج می‌شود. بیودیزل منبعی زیست‌تخریب‌پذیر [۸]، غیرسمی، بدون گوگرد و ایمن در ذخیره‌سازی است [۹] که می‌تواند برخی از انتشارات موتور مانند CO و UHC را کاهش دهد. این نوع سوخت زیستی دارای گرانش و چگالی بالاتر در مقایسه با سوخت دیزل و همچنین ارزش حرارتی کمتر است [۱۰].

از سوی دیگر، بیودیزل دارای محتوای اکسیژن است که می‌تواند احتراق سوخت دیزل را از نظر بازده احتراق بهبود بخشد. اما، ارزش حرارتی پایین می‌تواند یکی از محدودیت‌های افزایش ویژگی‌های عملکرد موتور باشد [۱۰، ۱۱]. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، محتوای بیودیزل با مقداری کم در سوخت دیزل امنیت انرژی و محیط‌زیست را بهبود می‌بخشد. بالاسوبرامانیان و همکاران عملکرد، احتراق، صدا و آلاینده‌های موتور آزمایشی را با استفاده از B20 و B40، B60، B100 بررسی کردند. موتور آزمایشی با سوخت ترکیبی B20 بهترین عملکرد را داشت که هیدروکربن‌های نسوخته را ۱۷ درصد، مونوکسید کربن را ۳۰ درصد و دود را ۱۴ درصد کاهش داد [۱۲].

به‌طور تجربی مشخص شده است که به‌کارگیری سوخت بیودیزل در موتور دیزل، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و کیفیت زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد [۱۳]. علی‌رغم بسیاری از مزایای که برای سوخت بیودیزل عنوان شده‌اند، این سوخت دارای معایب بسیاری نیز است که شامل گرانش بالاتر از سوخت دیزل، پایداری اکسیداسیون کمتر، انتشار اکسیدهای نیتروژن است. انتشار بیشتر اکسیدهای نیتروژن تأثیر مستقیمی بر سلامت انسان دارد [۱۴]. بسیاری از مطالعات تأیید کرده‌اند که موتور دیزلی در حضور مخلوط‌هایی از سوخت بیودیزل و دیزل، انتشار بالایی از اکسیدهای نیتروژن را دارد. در مطالعاتی از شافی و ولراج (۲۰۱۵) [۱۵]، راداکریشن (۲۰۱۷) [۱۶] و لاکاس و همکاران (۲۰۱۷) [۱۷] گزارش کردند که درجه بالای غیراشباع بودن در متیل استر روغن یکی از دلایل اصلی انتشار اکسیدهای نیتروژن است.

بسیاری از مطالعات تأکید دارند که استفاده از بیودیزل به‌عنوان سوخت در موتورهای دیزل منجر به کاهش راندمان موتور دیزل و توان ترمزی موتور و افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی در مقایسه با سوخت دیزل شده‌است [۱۸]. بر این اساس، مزایای مثبت بیودیزل در کنار انتشار اکسیدهای نیتروژن بالا و بازدهی ترمزی پایین موتور، از بین می‌رود. بسیاری از محققان در تلاش برای کاهش معایب بیودیزل انجام داده‌اند [۱۹-۲۱].

این تلاش‌ها در راستای به‌کارگیری مواد افزودنی شامل آب، افزودنی‌های نانو، و افزودنی‌های اکسیژن‌دار است. افزودنی‌های اکسیژن‌دار با دارا بودن محتوای اکسیژن می‌تواند در بهبود شرایط احتراق و کاهش آلاینده‌ها نقش مهمی داشته باشد. حضور محتوای اکسیژن در این افزودنی‌ها موجب کاهش آلاینده‌های موتور (به خصوص انتشار ذرات معلق و کمک به انجام احتراق کامل طی فرایند احتراق می‌شود [۲۲].

احتراق یک فرآیند پیچیده است و بنابراین، بسیاری از پارامترها به طور بالقوه می‌توانند بر میزان انتشار موتور تأثیر بگذارند. یکی از منابع اصلی انتشار آلاینده‌های موتورهای دیزل احتراق ناقص سوخت‌ها است که عمدتاً به دلیل کمبود اکسیژن کافی به وجود می‌آید [۲۳]. وجود اکسیژن در ساختار افزودنی اکسیژن‌دار می‌تواند به رفع این مشکل کمک کند. ترکیبات اکسیژن‌دار با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت، یک راه حل کارآمد برای غلبه بر پدیده احتراق ناقص ارائه می‌دهد. تأثیر ترکیبات اکسیژن‌دار اضافی به سوخت دیزل به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴، ۲۵]. اگرچه بسیاری از ترکیبات اکسیژن‌دار معرفی شده‌اند، همه این موارد را نمی‌توان در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار گیرند، برخی مانند بوتیل تری اتر به دلیل انتشار آن در آب‌های زیرزمینی، استفاده از آن در بسیاری از ایالات آمریکا ممنوع کرده است.

ترکیبات اصلی افزودنی‌های اکسیژن‌دار که در ترکیب با سوخت دیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: متانول [۲۶]، اتانول [۲۷]، بوتانول [۲۸، ۲۹]، پلی‌اتوکسی استر [۳۰]، اتیل تری‌بوتیل [۳۱]، متیل بوتانوات [۳۲]، اتیلن گلیکول مونواستات [۳۳]، دی‌متیل اتر [۳۴]، دی‌متیل کربنات [۳۵]، دی‌اتیلن گلیکول و همچنین انواع مختلف مخلوط مواد افزودنی فوق‌الذکر. مواد افزودنی اکسیژن‌دار فوق با بنزین خوب مخلوط می‌شوند، اما اکثر آنها در سوخت دیزل قابل پخش نیستند. در حقیقت، مخلوط این مواد افزودنی با دیزل از پایداری کمتری برخوردار است و بنابراین، امولسیفایرها و سورفکتانت‌های مناسب باید به کارگرفته شوند. یکی از مشکل‌سازترین آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی انتشار اکسیدهای نیتروژن است. اکسیدهای نیتروژن موجود در آگروز حاوی اکسید نیتریک و دی‌اکسید نیتروژن است [۳۶، ۳۷].

چندین فاکتور به طور بالقوه می‌تواند بر شکل‌گیری اکسیدهای نیتروژن تأثیر بگذارد، اما معمولاً وقتی مواد افزودنی اکسیژن‌دار به سوخت دیزل وارد می‌شوند، اثر متقابل هم‌افزایی و متضاد وجود دارد. به‌عنوان مثال، پایین آمدن عدد ستان و میزان اکسیژن ترکیبات سوخت حاوی چنین مواد افزودنی می‌تواند منجر به قله دمایی بالاتر شود که به نوبه خود می‌تواند منجر به افزایش تشکیل اکسیدهای نیتروژن شود [۳۸]. از طرف دیگر، آنتالپی بالاتر تبخیر و دمای شعله کمتر آدیاباتیک مخلوط سوخت اکسیژن می‌تواند منجر به پایین آمدن قله دمایی درون سیلندر و در نتیجه کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن شود [۳۹].

افزودنی‌های اکسیژن‌دار می‌توانند با افزایش تأخیر احتراق، تأثیر خود را اعمال کنند. افزایش تأخیر احتراق می‌تواند منجر به یک مرحله احتراق شدید پیش احتراقی شود [۴۰]. مقادیر بالاتر سوخت در این مرحله سوزانده شود و از این رو، افزایش دمای احتراق افزایش یابد [۴۱]. چنین فعل و انفعالی در بین عوامل ذکر شده در نهایت می‌تواند بسته به ویژگی‌های موتور و یا شرایط کار، روند شکل‌گیری NOx را مثبت یا منفی تغییر دهد [۴۲]. بر این اساس، برخی مطالعات افزایش انتشار NOx را گزارش کرده‌اند [۴۳]، در حالی که برخی این ادعا را رد کرده‌اند [۴۴].

بر این اساس، در این مطالعه تصمیم به استفاده از تلفیق دو نوع افزودنی اکسیژن‌دار شامل ان-بوتانول و دی‌متیل کربنات در راستای بررسی شرایط عملکردی و آلاینده‌های موتور گرفته شد تا بتوان به یک فرمولاسیون جدید و پایدار از افزودنی‌های بیودیزل دست پیدا کرد. این افزودنی‌ها به صورت مستقل در مطالعات مختلف با تأثیرات مثبت بر عملکرد و آلاینده‌های موتورهای دیزل همراه بوده‌اند. در مطالعه ییلماز و همکاران (۲۰۲۲) اثرات سوخت دیزل، بیودیزل روغن پسماند، و ترکیبات ان-بوتانول بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل مورد بررسی قرار گرفت. این ترکیبات انتشارات اکسیدهای نیتروژن را تا ۲۸/۱ درصد نسبت به دیزل خالص برای بارهای بالا کاهش داد. این در حالی بود که دمای گازهای خروجی تا ۳۳/۵ درصد و هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسیدکربن به ترتیب تا ۸۴/۲ درصد و ۹۳/۸ درصد افزایش یافته بود [۴۵]. در مطالعه یو و همکاران (۲۰۲۲) ان بوتانول در درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد با نمونه سوخت‌های دیزل-بیودیزل مخلوط شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، در حالت برخه بار، بازده حرارتی موتور و انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش یافت و انتشار دوده و مونوکسیدکربن افزایش یافت [۴۶]. همانطور که مشخص است، درصدهای بالای افزودنی ان-بوتانول علاوه بر افزایش هزینه تولید سوخت، می‌تواند موجب افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن شود.

در مطالعه رزاق و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد موتور، آلاینده‌گی و ویژگی‌های احتراق توسط موتور دیزل تک سیلندر در شرایط بار کامل و سرعت‌های متغیر موتور از ۱۱۰۰ دور در دقیقه تا ۲۱۰۰ دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های سوخت شامل درصد ثابتی از دی‌متیل کربنات (۱۰ درصد) و درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ برای بیودیزل بود. بر اساس نتایج به دست آمده توان ترمزی موتور در نمونه‌های شامل دی‌متیل کربنات افزایش جزئی نسبت به نمونه‌های دیگر داشت. همچنین مصرف ویژه سوخت ترمزی نیز به‌طور متوسط در نمونه‌های حاوی دی‌متیل کربنات کاهش یافت. افزودن مقدار ثابتی از دی‌متیل کربنات به درصد‌های بیودیزل، باعث شد انتشار مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته باشد. حضور دی‌متیل کربنات در نمونه‌های سوخت به خصوص در دوره‌های موتور بالاتر، موجب افزایش نسبی انتشار اکسیدهای نیتروژن شد [۴۷]. در مطالعه رامش و همکاران (۲۰۲۲) افزودن ۵ درصد دی‌متیل کربنات به سوخت حاوی ۲۰ درصد بیودیزل موجب کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و افزایش انتشار مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته شد [۴۸]. این روند انتشار کاملاً متفاوت با یافته‌های مطالعه رزاق و همکاران (۲۰۲۲) بود. با مطالعه بیشتر در میان مطالعات انجام شده یکی از پاسخ‌های احتمالی برای این روند متناقض، کم بودن درصد افزودنی دی‌متیل کربنات در مطالعه رامش و همکاران (۲۰۲۲) نسبت به مطالعه رزاق و همکاران (۲۰۲۲) به دست آمد. با توجه به اینکه هزینه تولید سوخت نیز یکی از فاکتورهای اصلی در تهیه نمونه‌های سوخت است، تصمیم بر این شد مطالعه‌ای با حضور درصد‌های پایین افزودنی‌های ان-بوتانول و دی‌متیل کربنات در سوخت بیودیزل انجام دهیم تا با تلفیق درصد‌های بهینه و پایین از هر دو افزودنی، ضمن کاهش هزینه سوخت، بتوان انتشار آلاینده‌های موتور دیزل را تا حد امکان کاهش داد. بر اساس جستجوهای تکمیلی، مطالعه‌ای در پیرامون تأثیرات متقابل افزودنی‌های ان-بوتانول و دی‌متیل کربنات در سوخت بیودیزل در درصد‌های پایین انجام نگرفته است. این مطالعه شامل چهار مرحله کلی است. مرحله اول آماده‌سازی نمونه‌های سوخت را تشریح می‌کند. مرحله دوم نحوه انجام آزمون موتور و اندازه‌گیری خواص سوخت را ارائه می‌دهد. مرحله سوم به تحلیل نتایج تجربی می‌پردازد و مرحله نهایی نمونه‌های سوخت به‌دست آمده را از نقطه نظر هزینه اقتصادی، انتشار آلاینده‌گی و توان تولیدی بهینه‌سازی می‌کند.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های سوخت

بیودیزل از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون روغن خوراکی پسماند در حضور سدیم هیدروکسید با ۱/۱ درصد وزنی (به‌عنوان کاتالیزور) و متانول با نسبت الکل به روغن شش به یک و شدت اختلاط ۷۱۰ دور در دقیقه تولید شد. دمای تولید در محدوده نقطه جوش متانول ثابت نگه داشته شد. این شرایط بر اساس گزارشی از فیض اله زاده اردبیلی و همکاران (۲۰۱۸) به‌عنوان بهترین شرایط برای دستیابی به حداکثر بازده تولید بیودیزل بود [۴۹]. خواص ترموفیزیکی بیودیزل تولیدی شامل چگالی، گرانروی، ارزش حرارتی و نقطه اشتعال طی دستورالعمل‌های استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد. جدول ۱ استانداردهای اندازه‌گیری و محدوده را برای هر عامل نشان می‌دهد.

Table 1- Standard range of biodiesel and base fuels properties

جدول ۱- محدوده استاندارد اندازه‌گیری خواص بیودیزل و سوخت‌های پایه

Unit	DMC	n-butanol	Diesel	Biodiesel	Standard limit	Standard code	Property
mm ² /s	0.63	3.6	2.9	4.7	1.9-6	ASTM D445	Viscosity
g/cm ³	1.07	0.81	0.86	0.89	0.87-0.90	ASTM 6751-02	Density
MJ/kg	16	32.5	45.8	37.5	35-39.9	ASTM D240	Calorific value
°C	20	33	89	135	>130	ASTM D93	Flash point

سه سطح ان- بوتانول (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و سه سطح دی متیل کربنات (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) با سوخت بیودیزل مخلوط شدند و بعد از مخلوط شدن با بیودیزل، سوخت‌های حاوی B2 (۲ درصد بیودیزل و ۹۸ درصد دیزل) و B5 (۵ درصد بیودیزل و ۹۵ درصد دیزل) در تیمارهای مختلف تهیه شدند. با این کار درصدهای اضافه شده برای ان-بوتانول و دی متیل کربنات همگی درصدی از B2 و B5 به دست آمدند تا با مقادیر بسیار کم بر خلاف مطالعات انجام شده، تهیه شوند. هموژنایزر Polytron® برای تثبیت نمونه‌های سوخت در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد. سوخت دیزل به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. جدول ۲ جزئیات آماده‌سازی نمونه‌های سوخت را برای ۱۰۰۰ میلی‌لیتر نشان می‌دهد.

Table 2- Fuel Sample compositions

جدول ۲- ترکیبات نمونه سوخت‌ها

DMC	n-butanol	Biodiesel	Diesel	Code	Order
0	0	0	1000	B0D0N0	1
0	0	20	980	B2D0N0	2
1	0	19	980	B2D5N0	3
2	0	18	980	B2D10N0	4
3	0	17	980	B2D15N0	5
0	0	50	950	B5D0N0	6
2.5	0	47.5	950	B5D5N0	7
5	0	45	950	B5D10N0	8
7.5	0	42.5	950	B5D15N0	9
0	1	19	980	B2D0N5	10
0	2	18	980	B2D0N10	11
0	3	17	980	B2D0N15	12
0	2.5	47.5	950	B5D0N5	13
0	5	45	950	B5D0N10	14
0	7.5	42.5	950	B5D0N15	15
1	1	18	980	B2D5N5	16
1	2	17	980	B2D5N10	17
1	3	16	980	B2D5N15	18
2	1	17	980	B2D10N5	19
2	2	16	980	B2D10N10	20
2	3	15	980	B2D10N15	21
3	1	16	980	B2D15N5	22
3	2	15	980	B2D15N10	23
3	3	14	980	B2D15N15	24
2.5	2.5	45	950	B5D5N5	25
2.5	5	42.5	950	B5D5N10	26
2.5	7.5	40	950	B5D5N15	27
5	2.5	42.5	950	B5D10N5	28
5	5	40	950	B5D10N10	29
5	7.5	37.5	950	B5D10N15	30
7.5	2.5	40	950	B5D15N5	31
7.5	5	37.5	950	B5D15N10	32
7.5	7.5	35	950	B5D15N15	33

انجام آزمون موتور

موتور مورد نظر یک موتور دیزل تزریق مستقیم تک سیلندر، تنفس طبیعی، با سرعت ثابت (۱۵۰۰ دور در دقیقه) بود (جدول ۳ مشخصات موتور را نشان می‌دهد). موتور هدف به یک ژنراتور برق متصل بود (شکل ۱ به‌عنوان شماتیک ست آپ آزمایش). جدول ۴ دقت و محدوده اندازه‌گیری ابزارهای مورد استفاده در طول آزمایش را نشان می‌دهد. تمامی تست‌ها در ۱۵۰۰ دور در دقیقه و بار کامل (۱۰۰ درصد) انجام شد. بر اساس مطالعه‌ای از نجفی و همکاران (۲۰۱۸) موتور دیزل در بار نزدیک به بار کامل می‌تواند بالاترین بازدهی را از خود به نمایش بگذارد [۵۰]. بر این اساس، در این مطالعه موتور دیزل تحت بار کامل ژنراتور برای انجام آزمون موتور تنظیم شد. بار موتور با استفاده از دستگاه بارگذاری مقاومت متغیر (TDGC2-5KVA) متصل به یک ژنراتور برق که به موتور هدف کوپل شده بود اعمال شد. ژنراتور توسط یک لودسل ۲۰۰ کیلونیوتن از طریق بازویی به طول ۳۰ سانتی‌متر تجهیز شد. برای اندازه‌گیری بار اعمال شده از یک نیرو سنج Lutron FG-5100 استفاده شد.

آزمایش‌ها در حضور نمونه‌های مختلف سوخت و دیزل به‌عنوان سوخت شاهد انجام شد. شکل ۲ به وضوح نمودار جریان را برای روش تست موتور به کار گرفته شده در مطالعه حاضر نشان می‌دهد. با توجه به تغییر ارزش حرارتی نمونه‌های سوخت، بعد از تغییر نمونه سوخت‌ها، دور موتور در دور ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه (دوری که ژنراتور حداکثر توان خود را تولید می‌کند) تنظیم می‌شد و سپس پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور ثبت می‌شدند.

لازم به ذکر است که موتور با سوخت دیزل راه‌اندازی شد و به مدت ۵ دقیقه کار کرد تا به حالت پایدار برسد. همچنین، موتور بین هر آزمایش به مدت ۵ دقیقه با دیزل کار می‌کرد تا به یک اطمینان مورد نیاز از داده‌های ثبت شده دست یابد. یک آنالایزر گاز احتراق Seitron chemist S500 برای اندازه‌گیری انتشار گازهای خروجی (شامل مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته استفاده شد.

Table 3- Engine specifications

جدول ۳- مشخصات موتور

Model: HSD1G-178FE
Engine type: Vertical, four-stroke, single-cylinder, air-cooled
Constant speed, Direct injection CI engine
Rated power: 2.8 kW@2200 rpm
Displacement volume: 0.406 L
Cooling type: Air Cooling

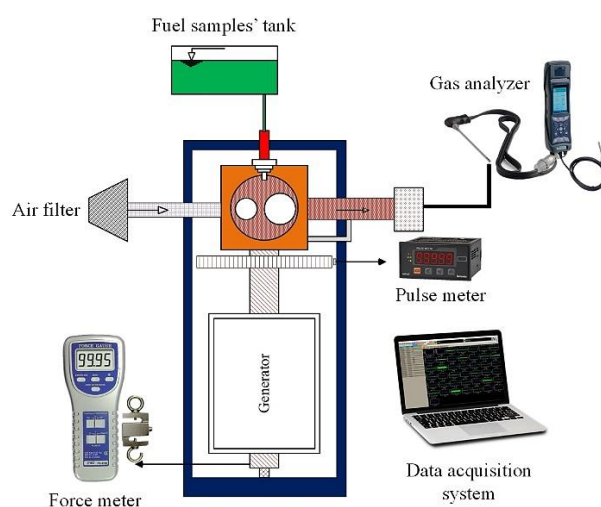


Figure 1- Schematic of the experimental setup

شکل ۱- طرح‌واره ست آپ آزمایشی

Table 4- Measurement accuracy values

جدول ۴- مقادیر دقت اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش

Resolution	Limit	Accuracy	Unit	Parameters
0.1 %	0-99	±1	Vol. %	CO2
1 ppm	0-5155	±1	ppm	NOx
1 ppm	0-8000	±1	ppm	CO
1 ppm	0-20000	±1	ppm	UHC
0.1 N	0-100	±1	N	Engine load

بر اساس شکل ۲، بعد از شروع آزمون، موتور دیزل ابتدا با سوخت دیزل راه‌اندازی می‌شود. بعد از ۵ دقیقه که شرایط دمایی موتور دیزل تقریباً به حالت پایدار رسید، نمونه سوخت مورد نظر با سوخت دیزل جایگزین می‌شود. در این مرحله بایستی دقت کرد تا هوا وارد سیستم سوخت‌رسانی موتور دیزل نشود. در صورت ورود هوا، سیستم سوخت‌رسانی باید هواگیری شود. در مرحله بعدی، بار مورد نظر به موتور اعمال می‌شود. در این مرحله باید منتظر ماند تا تغییرات پارامترهای مورد آزمون تقریباً به صفر برسد و شرایط موتور دیزل از نقطه نظر تغییرات پارامترها پایدار شود. بعد از پایدار شدن متغیرها، داده‌ها ثبت می‌شوند. این مراحل تا زمانی انجام می‌گیرد که تمام نمونه سوخت‌ها یک به یک مورد آزمون قرار گیرند. بعد از ثبت داده‌های مربوط به نمونه سوخت نهایی، فرایند انجام تست موتور به اتمام می‌رسد. در این مرحله، دوباره به موتور دیزل اجازه داده می‌شود تا با سوخت دیزل در شرایط کاملاً بی‌بار به مدت ۵ دقیقه روشن بماند تا شرایط کاری موتور دوباره پایدار شود و تمام سیستم سوخت‌رسانی از نمونه سوخت‌های قبلی پاکسازی شود و سپس موتور را خاموش می‌کنیم.

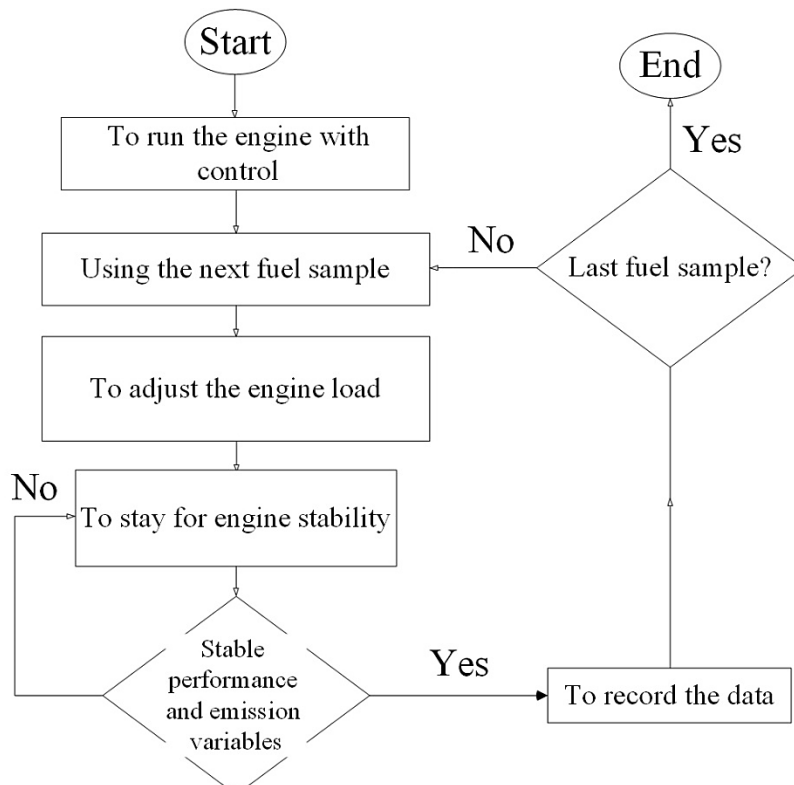


Figure 2- Engine test flowchart

شکل ۲- فلوچارت انجام آزمون موتور

در ادامه برای محاسبه گشتاور از معادله (۱) استفاده شد. براساس 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 بر حسب (N) و R فاصله گریز از مرکز میل لنگ به (m) .

$$T = F \times R \quad (1)$$

برای محاسبه توان ترمزی که همان توان موجود در چرخ لنگر است، از معادله (۲) استفاده شد. در این معادله P عبارتست از توان ترمزی بر حسب کیلووات، T گشتاور بر حسب نیوتون متر و n دور موتور بر حسب دور بر دقیقه است.

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

بازدهی حرارتی ترمزی نیز یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد موتور تلقی می‌شود. این پارامتر با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد:

$$BTE (\%) = \frac{BP}{LHV \times mf} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، BTE بازده حرارتی ترمزی بر حسب درصد، LHV مقدار ارزش حرارتی پایین سوخت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم، BP توان ترمزی موتور بر حسب کیلووات و mf مصرف سوخت بر حسب کیلوگرم بر ثانیه است. بخش بعدی به ارائه نتایج تجربی به دست آمده از آزمون موتور می‌پردازد.

نتایج و بحث

این بخش از مقاله به ارائه نتایج به دست آمده از آزمون تجربی نمونه سوخت‌ها بر روی عملکرد و آلایندگی موتور دیزل می‌پردازد. قبل از ارائه نتایج، باید از ارتباط بین متغیرها اطمینان کسب کرد و سپس روند تغییرات آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. برای بررسی روابط بین متغیرهای مستقل (شامل درصد بیودیزل، درصد دی‌متیل کربنات و درصد ان-بوتانول) و متغیرهای وابسته (شامل مقادیر توان ترمزی (BP) ، مصرف سوخت ویژه ترمزی $(BSFC)$ ، بازدهی حرارتی ترمزی (BTE) و انتشارات مونوکسیدکربن (CO) ، اکسیدهای نیتروژن (NOx) ، دی‌اکسیدکربن (CO_2) و هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)) از روش آنالیز واریانس $(ANOVA)$ در نرم افزار SPSS 19 استفاده شد. نتایج بدست آمده در جدول ۵ با به کارگیری F value ارائه شده‌اند. همانطور که از جدول ۴ مشخص است، تأثیرات بیودیزل بر انتشار مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته، تأثیر دی‌متیل کربنات بر بازدهی حرارتی ترمزی، انتشار اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته و تأثیر ان بوتانول بر میزان مصرف سوخت ویژه، بازده حرارتی و انتشار مونوکسیدکربن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشند. از طرفی دیگر تأثیر بیودیزل بر تولید توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه، انتشار اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسیدکربن، تأثیر دی‌متیل کربنات بر توان ترمزی، و انتشار دی‌اکسیدکربن و تأثیر ان بوتانول بر انتشارات اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشند. اما تأثیر بیودیزل بر بازده حرارتی، تأثیر دی‌متیل کربنات بر مصرف سوخت ویژه و تأثیر ان بوتانول بر توان ترمزی معنی‌دار نیست. به عبارت دیگر تأثیر قابل توجهی بر روند تغییرات پارامترهای عنوان شده ایجاد نکرده‌اند.

Table 5- Results of ANOVA for analyzing the relation of variables

جدول ۵- نتایج ANOVA برای بررسی روابط بین متغیرها							متغیر
UHC	CO ₂	NO _x	CO	BTE	BSFC	BP	
3.571**	2.901*	2.988*	3.983**	1.589 ^{ns}	2.959*	3.066*	بیودیزل
7.11**	3.22*	6.311**	5.133**	3.679**	1.729 ^{ns}	2.783*	دی متیل کربنات
2.82*	2.077*	2.904*	6.527**	4.633**	8.182**	0.654 ^{ns}	ان بوتانول

** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد
* معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد
ns عدم معنی داری

نتایج خواص فیزیکی-حرارتی نمونه سوخت‌ها

این مرحله به بررسی خواص فیزیکی-حرارتی نمونه سوخت‌ها می‌پردازد. بر اساس آنچه در مطالعه فیض‌اله زاده اردبیلی و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شده است [۱۱]، خواص فیزیکی-حرارتی نمونه سوخت‌ها یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار در عملکرد موتورهای دیزل است. چگالی سوخت یکی از مهمترین خواص فیزیکی-حرارتی سوخت است. شکل ۳ تغییرات چگالی نمونه سوخت‌ها را ارائه می‌دهد. همانطور که مشخص است، کمترین چگالی سوخت مربوط به سوخت دیزل است. با افزایش درصد بیودیزل، چگالی سوخت افزایش می‌یابد. زیرا چگالی سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل بیشتر است [۵۱]. افزودن دی متیل کربنات روند افزایش چگالی را نسبت به افزودن ان بوتانول تشدید می‌کند. زیرا چگالی ان بوتانول کمتر از چگالی دی متیل کربنات است. در حالت کلی، بالاترین میزان چگالی مربوط به سوخت‌های زیر مجموعه B5 با تلفیق دو افزودنی دی متیل کربنات و ان بوتانول است.

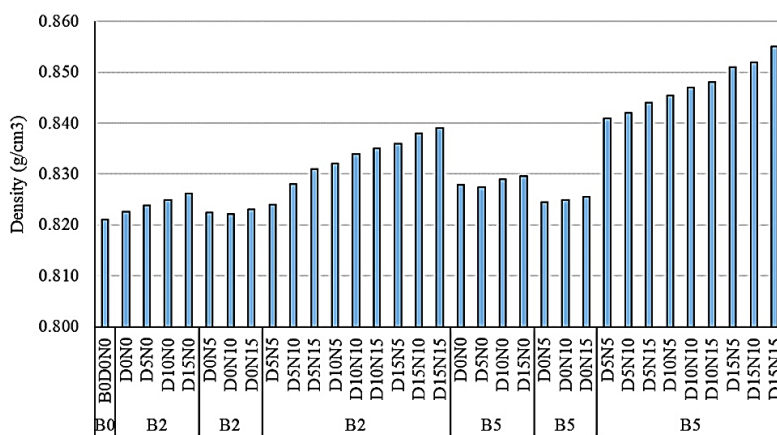


Figure 3- Fuel density changes for each sample

شکل ۳- تغییرات چگالی سوخت برای هر نمونه

شکل ۴ تغییرات ارزش حرارتی نمونه سوخت‌ها را نسبت به سوخت شاهد (سوخت دیزل) ارائه می‌دهد. بالاترین ارزش حرارتی سوخت مربوط به سوخت دیزل خالص است. افزودن بیودیزل، موجب کاهش ارزش حرارتی سوخت می‌شود [۵۲، ۵۳]. به طوری که کمترین ارزش حرارتی سوخت مربوط به نمونه‌های حاوی B5 است. افزودن ان بوتانول و دی متیل کربنات نیز موجب کاهش ارزش حرارتی سوخت می‌شود. این ترکیبات به دلیل دارا بودن محتوای اکسیژن، دارای ارزش حرارتی پایین در مقایسه با سوخت دیزل خالص می‌باشند. بر اساس شکل ۴، تأثیر ان بوتانول در کاهش ارزش حرارتی نسبت به تأثیر دی متیل کربنات در کاهش ارزش حرارتی، در سوخت‌های حاوی B2 کمی بیشتر است اما در سوخت‌های حاوی B5 تأثیرات برعکس است. این تأثیر در کاهش ارزش حرارتی در سوخت حاوی B5 نسبت به سوخت حاوی B2 به مراتب بیشتر است.

شکل ۵ نقطه اشتعال نمونه سوخت‌ها را ارائه می‌دهد. نقطه اشتعال سوخت بیودیزل به دلیل حضور اکسیژن و معماری ساختار آن بالاتر از نقطه اشتعال سوخت دیزل است [۵۴، ۵۵]. بر این اساس افزودن میزان بیودیزل در سوخت دیزل موجب افزایش نقطه اشتعال سوخت می‌شود. از طرفی دیگر، به دلیل فراریت بالای افزودنی‌های ان بوتانول و دی متیل کربنات، نقطه اشتعال این افزودنی‌ها کمتر از سوخت دیزل و بیودیزل است. بر این اساس با افزایش مقادیر این افزودنی‌ها در نمونه سوخت‌ها، نقطه اشتعال سوخت کاهش می‌یابد. به طوری که کمترین نقطه اشتعال مربوط به نمونه سوخت B2 به همراه حضور تلفیقی افزودنی‌ها است. از طرفی دیگر، نمونه B5D15N10 و B5D15N15 نیز به دلیل بالا بودن محتوای ان بوتانول و دی متیل کربنات، کمترین نقطه اشتعال سوخت را دارند. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، تأثیر ان بوتانول در کاهش نقطه اشتعال نسبت به تأثیر دی متیل کربنات در کاهش نقطه اشتعال به خصوص در نمونه‌های حاوی B5 بالاتر از سایر نمونه‌ها است.

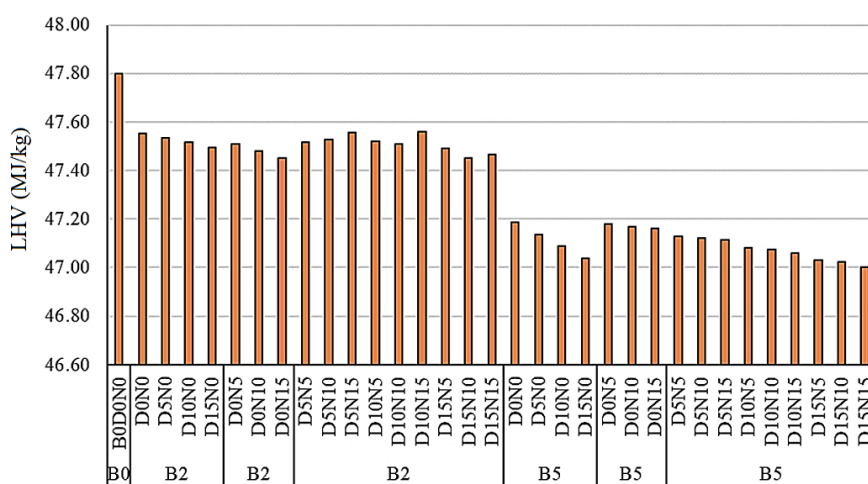


Figure 4- Fuel LHV changes for each sample
شکل ۴- تغییرات ارزش حرارتی سوخت برای هر نمونه

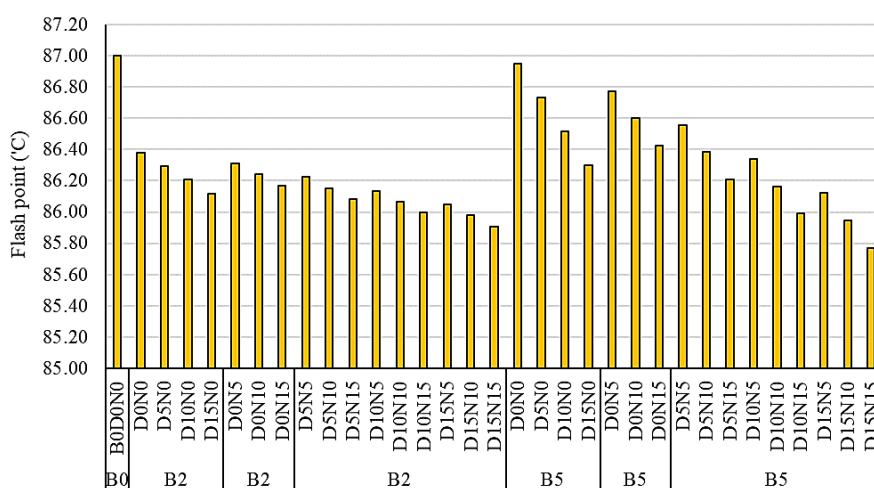


Figure 5- Flash point changes for each sample
شکل ۵- تغییرات نقطه اشتعال برای هر نمونه

شکل ۶ تغییرات گرانروی (ویسکوزیته) نمونه‌های سوخت را ارائه می‌دهد. بیودیزل دارای گرانروی بالایی نسبت به سوخت دیزل است [۵۶، ۵۷]. بنابراین افزایش درصد بیودیزل از ۲ تا ۵ درصد، موجب افزایش گرانروی نمونه سوخت‌ها می‌شود. از

طرفی دیگر، افزودن دی متیل کربنات و ان بوتانول به دلیل گرانروی پایین آنها نسبت به سوخت دیزل، موجب کاهش گرانروی نمونه سوخت‌ها می‌شود. همان‌طور که مشخص است، افزودن دی متیل کربن می‌تواند میزان کاهش بیشتری در مقادیر گرانروی نسبت به افزودن ان بوتانول به نمونه سوخت‌ها تحمیل کرده است. این میزان کاهش در سوخت‌های حاوی B5 نسبت به B2 بیشتر مشهود است.

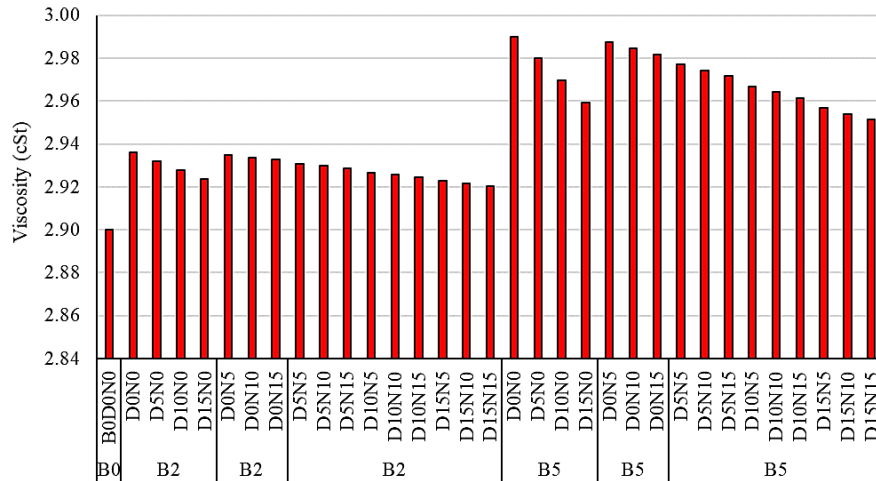


Figure 6- Fuel viscosity changes for each sample

شکل ۶- تغییرات گرانروی سوخت برای هر نمونه

شکل ۷ تغییرات عدد ستان نمونه سوخت‌ها را در حضور بیودیزل، دی متیل کربنات و ان بوتانول ارائه می‌دهد. افزایش درصد بیودیزل در نمونه سوخت‌ها به دلیل بالا بودن عدد ستان بیودیزل نسبت به سوخت دیزل [۵۸، ۱۱] موجب افزایش عدد ستان می‌شود. از طرفی دیگر به دلیل پایین بودن عدد ستان دی متیل کربنات و ان بوتانول نسبت به سوخت دیزل و بیودیزل، حضور این دو افزودنی در نمونه سوخت‌ها موجب کاهش عدد ستان می‌شود. همان‌طور که مشخص است، شیب کاهش عدد ستان در نمونه سوخت‌های حاوی B5 بیشتر از شیب کاهش عدد ستان در نمونه سوخت‌های حاوی B2 است. کمترین عدد ستان و بالاترین عدد ستان به ترتیب مربوط به سوخت دیزل و B5 است.

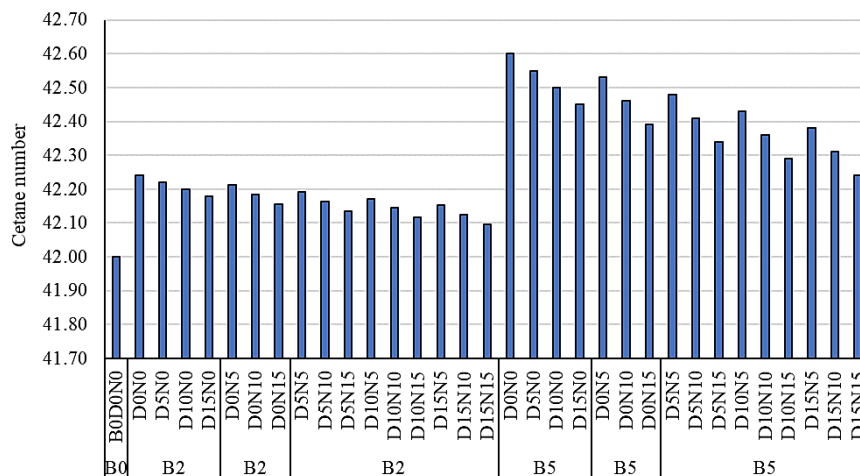


Figure 7- Cetane number changes for each sample

شکل ۷- تغییرات عدد ستان برای هر نمونه

سایر نمونه سوخت‌ها مصرف سوخت کمتری داشته‌است. زیرا در صورتی که توان ترمزی کم باشد، موتور برای جبران کمبود توان مجبور به مصرف بیشتر سوخت می‌شود [۷] (مشابه آنچه برای B2 و B5 در مقایسه با سوخت دیزل رخ داده است. زیرا ارزش حرارتی بیودیزل به مراتب حدود ۶ الی ۱۰ درصد پایین تر از سوخت دیزل است) که در اینجا این اتفاق برعکس رقم خورده‌است. از طرفی دیگر، مطابق با جدول ۴، تغییرات ان بوتانول در مصرف سوخت ویژه تأثیر معنی‌داری دارد. می‌توان عنوان کرد، حضور محتوای اکسیژن در افزودنی ان بوتانول، می‌تواند احتراق را به سمت احتراق کامل سوق دهد که البته این اتفاق در تلفیق با افزودنی دی متیل کربنات رخ می‌دهد و مصرف سوخت را نسبت به توان تولیدی کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان در مصرف سوخت پایین توان موردنظر را دریافت کرد و از اتلاف سوخت جلوگیری کرد. مطابق با شکل ۹ به طور متوسط بالاترین مصرف سوخت ویژه در نمونه سوخت‌های حاوی B5 اتفاق می‌افتد که به ترتیب حدود ۱۰ الی ۲۵ درصد بالاتر از سوخت دیزل و نمونه سوخت‌های حاوی B2 است.

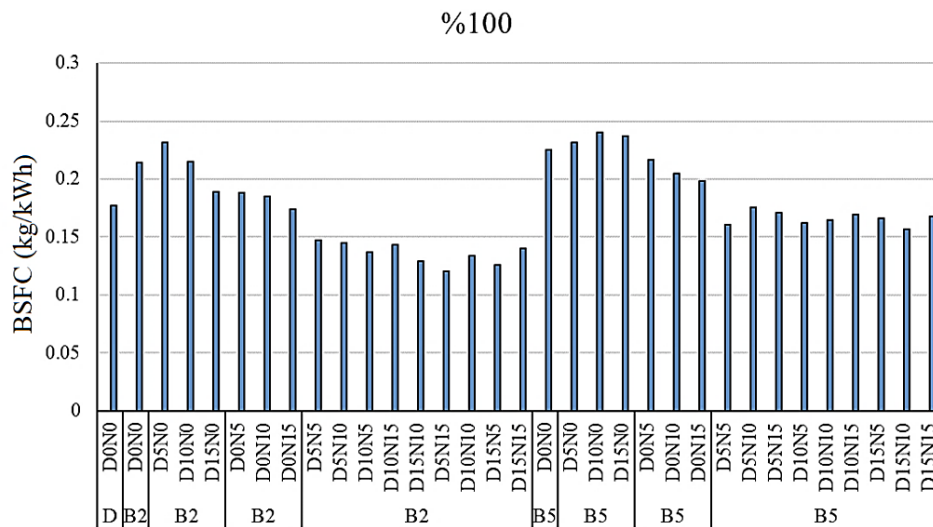


Figure 9- BSFC changes for each fuel sample
 شکل ۹- تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی برای هر نمونه سوخت

شکل ۱۰ روند تغییرات بازده حرارتی سوخت را ارائه می‌دهد. مطابق با شکل ۱۰، تأثیرات تلفیقی افزودنی‌های دی متیل کربنات و ان بوتانول هم در B5 و هم در B2 موجب افزایش بازده حرارتی سوخت شده است. این روند با بررسی روابط بین متغیرها در جدول ۴ نیز اثبات می‌شود. زیرا بر اساس جدول ۴، تغییرات دی متیل کربنات و ان بوتانول تغییرات بازده حرارتی سوخت تأثیر معنی‌داری دارد. اما تغییرات بیودیزل در تغییرات بازده حرارتی سوخت تأثیر معنی‌داری نتوانسته از خود نشان دهد. استفاده از افزودنی‌های ترکیبی دی متیل کربنات و ان بوتانول توانسته است میزان بازده حرارتی را در به طور متوسط حدود ۱۵ الی ۳۰ درصد نسبت به سوخت‌های دیزل، B2 و B5 افزایش دهد که مقدار قابل توجهی است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت استفاده از ترکیب افزودنی‌های دی متیل کربنات و ان بوتانول در مقادیر کم در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل نتوانسته است تأثیر مثبتی بر عملکرد موتور دیزل داشته باشد. این افزودنی‌ها دارای خواص فیزیکی-حرارتی مناسبی می‌باشند و همچنین دارای محتوای اکسیژن هستند که می‌تواند تأثیر مثبتی در انجام فرایند شیمیایی احتراق داشته باشد.

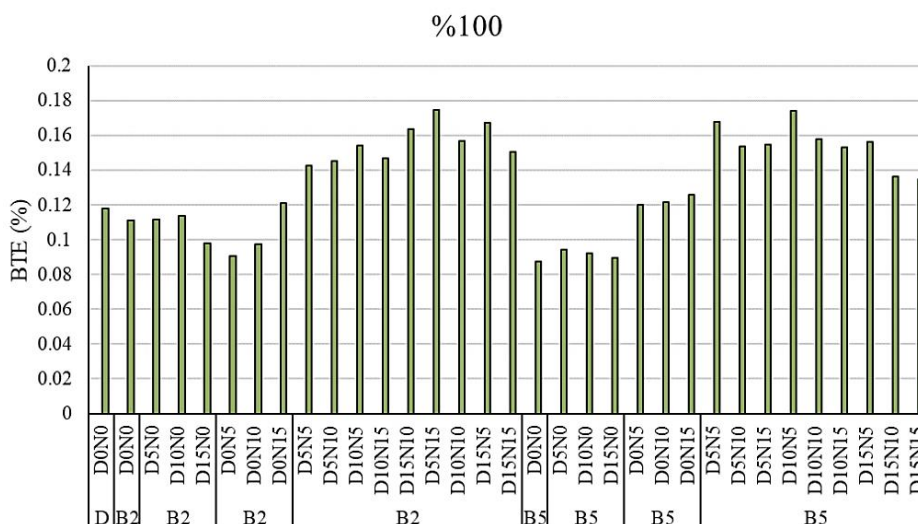


Figure 10- BTE changes for each fuel sample
 شکل ۱۰- تغییرات بازده حرارتی برای هر نمونه سوخت

تأثیر نمونه سوخت‌ها بر آلاینده‌گی موتور دیزل

انتشار مونوکسیدکربن دلالت بر عدم انجام فرایند احتراق کامل است [۷]. مطالعات متعددی از افزایش انتشار مونوکسیدکربن با افزودن بیودیزل به سوخت دیزل نسبت به سوخت دیزل خالص اشاره کرده‌اند [۵۹]. شکل ۱۱ روند انتشار مونوکسیدکربن را برای نمونه‌های سوخت ارائه می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین دلایل، گرانروی بالای سوخت بیودیزل (شکل ۷) نسبت به سوخت دیزل است که تأثیر منفی در اتمیزه شدن سوخت داشته و نمی‌تواند به‌خوبی در محفظه احتراق انرژی تولید کند. همچنین عدد ستان سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل نیز بالا است. با توجه به اینکه ساختمان و مکانیزم موتور دیزل هنگام استفاده از سوخت بیودیزل دستکاری نمی‌شود و همان مکانیزم عملکرد سوخت دیزل را دارد، بنابراین احتراق از نقطه نظر زمانی در سوخت حاوی بیودیزل به دلیل عدد ستان بالا، کمی متفاوت‌تر از سوخت دیزل خالص رخ می‌دهد و این موجب عدم احتراق کامل سوخت شده و به جای دی‌اکسیدکربن، مونوکسیدکربن تولید می‌شود. این اتفاق حتی می‌تواند منجر به پدیده‌ی ناکینگ هم شود که برای بررسی‌های بیشتر در این مورد بایستی آزمون ارتعاش موتور دیزل نیز انجام گیرد. برای جلوگیری از این اتفاق، پاشش سوخت حاوی بیودیزل باید کمی آوانس شود. اما، همان‌طور که مشخص است، با افزودن دی‌متیل کربنات و ان بوتانول انتشار مونوکسیدکربن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این روند زمانی قوت می‌گیرد که با مراجعه به جدول ۴ مشاهده می‌شود، که تأثیرات بیودیزل، دی‌متیل کربنات و ان بوتانول در انتشار مونوکسیدکربن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار هستند. یکی از دلایل کاهش انتشار مونوکسیدکربن برای نمونه سوخت‌های حاوی دی‌متیل کربنات و ان بوتانول می‌توان به کاهش عدد ستان نمونه سوخت‌ها اشاره کرد (شکل ۷). کمترین میزان انتشار مونوکسیدکربن در سوخت‌های ترکیبی حاوی B5 یعنی در سمت راست شکل ۱۱ رخ می‌دهد. در این منطقه با توجه به اینکه محتوای افزودنی‌های دی‌متیل کربنات و ان بوتانول درصدی از مقدار بیودیزل در سوخت دیزل می‌باشند، بالاترین میزان اکسیژن در سوخت برای احتراق آماده است.

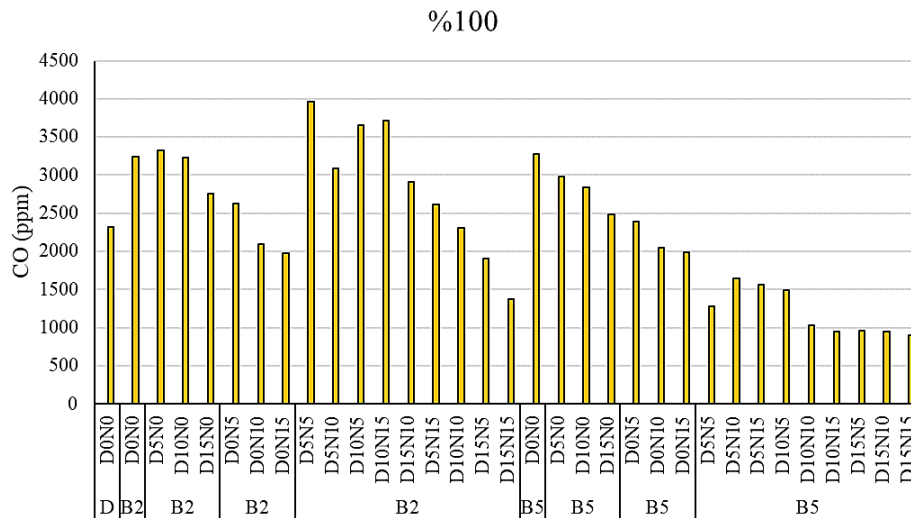


Figure 11- CO emission changes for each fuel sample

شکل ۱۱- تغییرات انتشار مونوکسیدکربن برای هر نمونه سوخت

شکل ۱۲ انتشار دی اکسیدکربن را بر اساس تغییرات فرمولاسیون سوختها ارائه می دهد. حضور دی اکسید کربن بالا در خروجی موتور می تواند در اثر بالابودن درصد کربن در فرمولاسیون سوخت و همچنین حرکت به سمت احتراق کامل تر تعبیر گردد. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، به طور نسبی و به طور میانگین بالاترین میزان انتشار دی اکسیدکربن در سوخت های حاوی ترکیبات تلفیقی دی متیل کربنات، ان بوتانول و B5 اتفاق می افتد که حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد است. با مقایسه شکل ۱۲ و شکل ۱۱ می توان نتیجه گرفت در این محدوده انتشار مونوکسیدکربن نیز کاهش داشته است. پس می توان گفت در این محدوده احتراق به سمت احتراق کامل سوق داده شده است. اما این دلیل محکمی برای افزایش انتشار دی اکسیدکربن در این محدوده نیست.

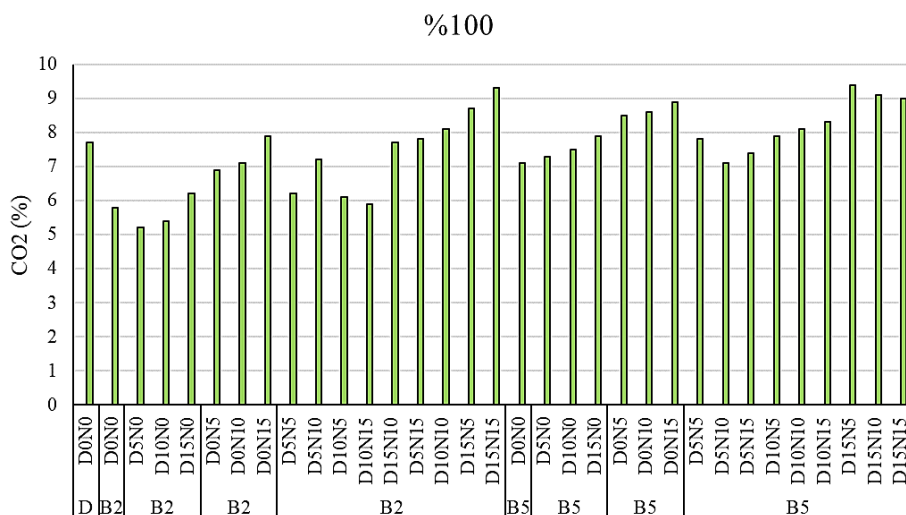


Figure 12- CO2 emission changes for each fuel sample

شکل ۱۲- تغییرات انتشار دی اکسیدکربن برای هر نمونه سوخت

زیرا تغییرات محدوده B5 و B2 تفاوت زیادی باهم ندارند. براساس جدول ۴، تأثیر نمونه افزودنی‌ها و بیودیزل در انتشار مونوکسیدکربن، کمتر از تأثیر آنها بر انتشار دی‌اکسیدکربن است. می‌توان ادعا کرد حضور محتوای کربن در دی‌متیل‌کربنات هم می‌تواند یکی از دلایل بالا رفتن انتشار دی‌اکسیدکربن است. به‌طور کلی برای انتشار یک آلاینده عوامل مختلفی می‌توانند دست به دست دهند و روند انتشار را تحت تغییر قرار دهند.

شکل ۱۳ روند انتشار اکسیدهای نیتروژن را در انتشارات موتور دیزل در حضور افزودنی‌ها ارائه می‌دهد. با توجه به آنچه در قسمت بیان مساله عنوان شد، از جمله معایب بیودیزل، افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن است. بر این اساس محققان به دنبال افزودنی‌هایی مناسب برای کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن هستند. بر اساس شکل ۱۳، می‌توان عنوان کرد افزودن دی‌متیل‌کربنات و آن بوتانول توانسته‌است تا حدودی انتشار اکسیدهای نیتروژن را به خصوص در نمونه سوخت‌های حاوی B2 کاهش دهد. به طوری که می‌توان گفت در نمونه سوخت‌های ترکیبی با حضور دی‌متیل‌کربنات و آن بوتانول در B2 به‌طور متوسط انتشار اکسیدهای نیتروژن حدود ۱۵ الی ۲۵ درصد نسبت به سوخت دیزل و بیودیزل کاهش داشته‌است. به طوری که با مراجعه به جدول ۴ می‌توان دریافت تأثیر بیودیزل، دی‌متیل‌کربنات و آن بوتانول در انتشار اکسیدهای نیتروژن کاملاً معنی‌دار می‌باشند. این کاهش در تأثیرات ترکیبی افزودنی‌ها در حضور B5 نیز مشهود است. اما در تأثیرات ترکیبی افزودنی‌ها در حضور B5 (یعنی سمت راست شکل ۱۳) این روند کاملاً به هم خورده‌است. یکی از اصلی‌ترین دلایل انتشار اکسیدهای نیتروژن دمای بالای محفظه احتراق است [۷]. بر اساس آنچه در قسمت قبل عنوان شد، سوخت‌های این بخش از نمودار (یعنی سمت راست نمودار ۱۳) دارای محتوای اکسیژن بالایی هستند. حضور محتوای اکسیژن بالا از طرفی موجب حرکت به سمت احتراق کامل می‌شود و از طرفی دیگر دمای محفظه احتراق را افزایش می‌دهد. به خصوص اینکه موتور در حالت بیشینه بار خود کار می‌کند. این بالا بودن دمای احتراق، تعادل انتشار اکسیدهای نیتروژن را به هم می‌زند و موجب تغییرات آبی انتشار اکسیدهای نیتروژن و در بیشتر مواقع موجب افزایش انتشار آن می‌شود. اتفاقی که می‌توان ادعا کرد در نمونه سوخت‌های ترکیبی دی‌متیل‌کربنات و آن بوتانول در حضور B5 رخ داده‌است.

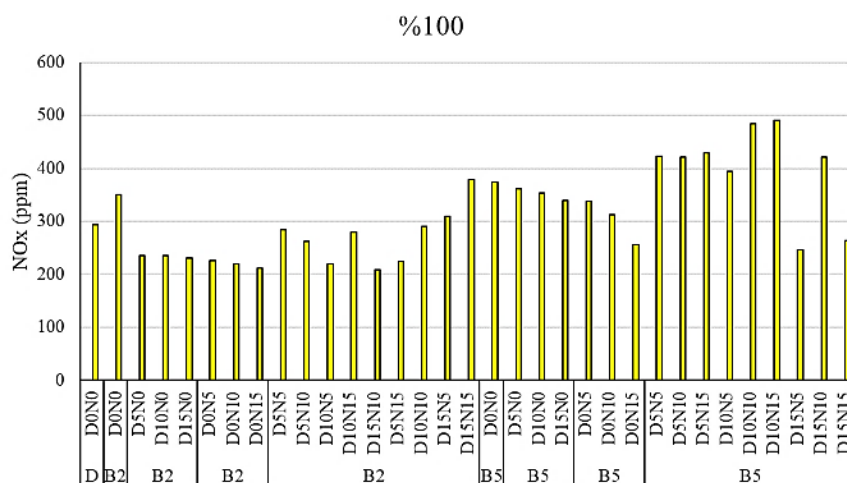


Figure 13- NOx emission changes for each fuel sample
 شکل ۱۳- تغییرات انتشار اکسیدهای نیتروژن برای هر نمونه سوخت

شکل ۱۴ انتشار هیدروکربن‌های نسوخته را با تغییرات نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد. از دلایل انتشار هیدروکربن‌های نسوخته می‌توان به عدم انجام کامل احتراق در حضور نمونه سوخت‌ها اشاره کرد. به طوری که می‌توان مشاهده کرد، نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل انتشار هیدروکربن‌های نسوخته را نسبت به سوخت دیزل به میزان حدوداً ۱۶ و ۲۵ درصد به ترتیب

برای B2 و B5 کاهش داده‌اند. زیرا سوخت‌های حاوی بیودیزل دارای محتوای کمتر آروماتیک نسبت به سوخت دیزل می‌باشند. آروماتیک‌ها نوعی هیدروکربن هستند که احتراق آن‌ها دشوارتر از انواع دیگر هیدروکربن‌ها است. سوخت دیزل حاوی سطوح بالاتری از مواد آروماتیک نسبت به بیودیزل است، به این معنی که وقتی سوخت دیزل سوزانده می‌شود، تعداد بیشتری از این ترکیبات نسوخته باقی می‌مانند و به انتشار هیدروکربن‌های نسوخته کمک می‌کنند [۶۰]. این تئوری زمانی قوت می‌گیرد که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که کمترین انتشار هیدروکربن‌های نسوخته به طور نسبی در سمت راست شکل ۱۴ یعنی جایی که بالاترین محتوای آروماتیک سوخت موجود است، اتفاق می‌افتد.

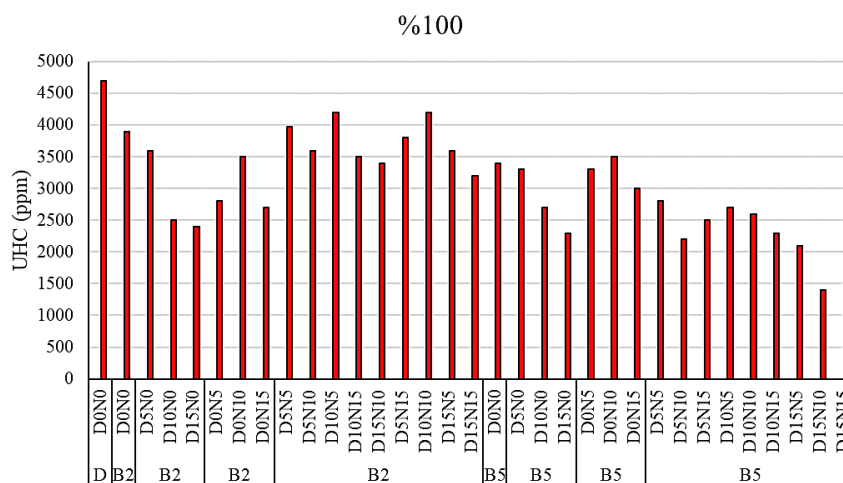


Figure 14- UHC emission changes for each fuel sample

شکل ۱۴- تغییرات انتشار هیدروکربن‌های نسوخته برای هر نمونه سوخت

شکل ۱۵ مقادیر هزینه انرژی تولید شده را ارائه می‌دهد. در شکل ۱۵ واحد عملگری تولید یک کیلووات توان است. یعنی شکل ۱۵ هزینه دلاری به ازای تولید یک کیلووات توان را برای نمونه‌های سوخت ارائه می‌دهد. در این نمودار هزینه انرژی تولید شده با استفاده از بیودیزل با قیمت تمام شده هر لیتر ۵ دلار، دی متیل کربنات با قیمت تمام شده هر لیتر ۴۰ دلار و ان بوتانول با قیمت تمام شده هر لیتر ۵ دلار نسبت به میزان سوخت مصرف شده و توان تولید شده محاسبه شد. این روند می‌توان ارتباط معنی داری با بازدهی حرارتی و توان تولید شده موتور در حضور نمونه سوخت‌ها داشته باشد. همانطور که از شکل ۱۵ مشخص است، کمترین هزینه تولید انرژی در نمونه سوخت‌های ترکیبی حاوی دی متیل کربنات و ان بوتانول در حضور B2، جایی که کمترین میزان افزودنی‌ها موجب تولید مقادیر قابل توجه توان و بازده حرارتی (شکل‌های ۸ و ۱۰) می‌شوند. این بخش از نمودار شکل ۱۵ به طور نسبی و به طور میانگین هزینه تولید انرژی را به میزان ۱۱، ۲۷ و ۴۱ درصد به ترتیب نسبت به سوخت دیزل، B2 و B5 کاهش می‌دهد.

بر اساس یافته‌ها می‌توان گفت برای درک درستی از شرایط عملکرد بهینه موتور دیزل نیاز به انجام عملیات بهینه‌سازی در راستای دستیابی به فرمولاسیون بهینه سوخت ضروری است. زیرا عوامل متعددی در تغییرات متغیرهای وابسته دخیل هستند و نمی‌توان محدوده مشخصی را به‌عنوان محدوده بهینه جز با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای فرمولاسیون سوخت در نظر گرفت. بنابراین بایستی با در نظر گرفتن تمام متغیرهای مستقل و وابسته عملیات بهینه‌سازی برای دستیابی به بهترین عملکرد موتور دیزل و کمترین انتشار تولیدی انجام گیرد. بخش بعدی به ارائه نتایج بهینه‌سازی می‌پردازد.

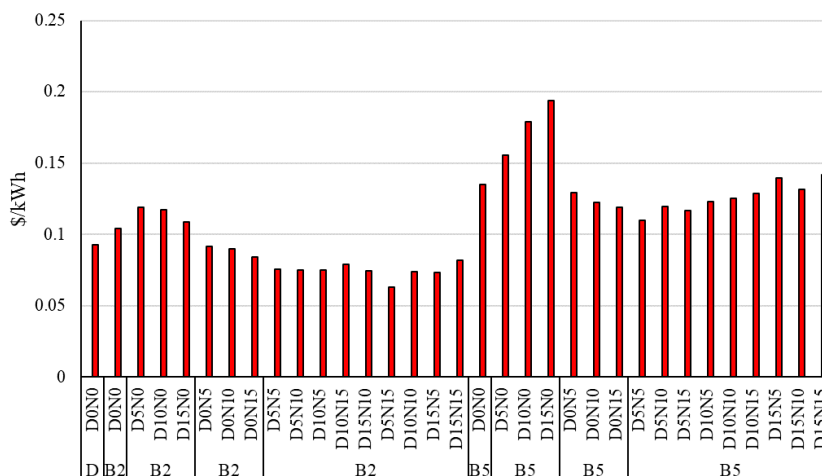
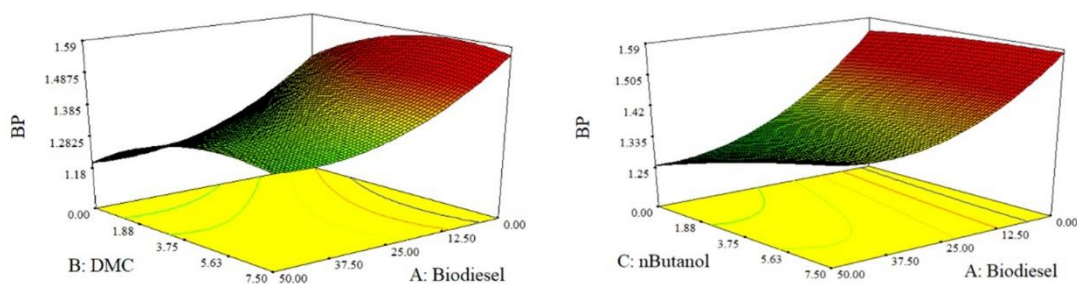


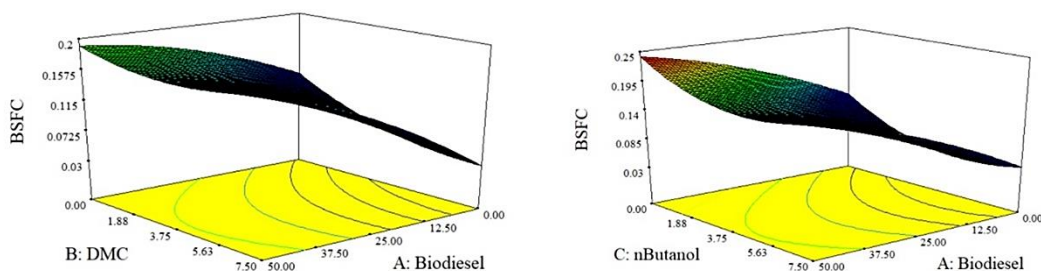
Figure 15- Energy price changes for each fuel sample
 شکل ۱۵- تغییرات هزینه تولید انرژی برای هر نمونه سوخت

بهینه‌سازی

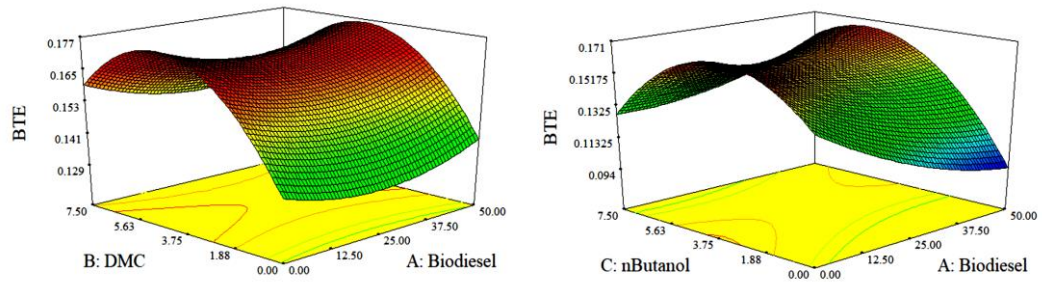
فرایند بهینه‌سازی به کارگیری روش سطح پاسخ (RSM) در حضور روابط quadratic انجام گرفت. متغیرها به دو بخش مستقل و وابسته تقسیم شدند. متغیرهای وابسته شامل تغییرات توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازده حرارتی، انتشارات مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و هزینه تولید انرژی و متغیرهای مستقل شامل مقادیر بیودیزل، ان بوتانول و دی متیل کربنات بودند. معادلات درجه دوم یک رابطه چند وجهی در حضور متغیرهای مستقل با تک تک متغیرهای وابسته برقرار می‌کنند و سپس روند تغییرات را بررسی و بر اساس قیود تعریف شده نقاط بهینه را ایجاد می‌کنند. قیود تعریف شده در راستای بیشینه سازی توان ترمزی و بازده حرارتی و کمینه‌سازی مصرف سوخت ویژه، انتشارات مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته، اکسیدهای نیتروژن و هزینه سوخت تولید شده، اعمال شدند. خروجی‌های مدل در شکل ۱۶ و جدول ۵ ارائه شده‌اند.



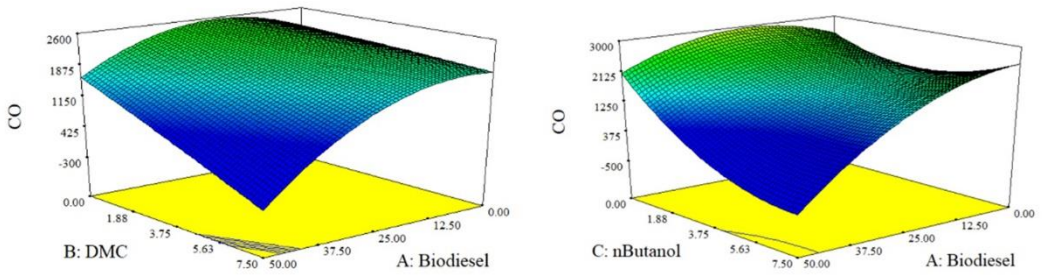
(الف)



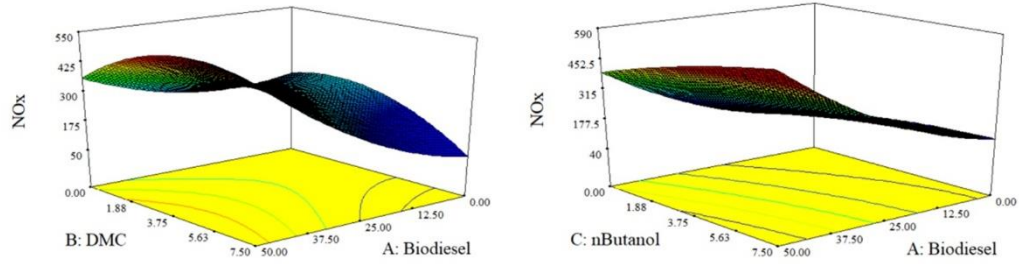
(ب)



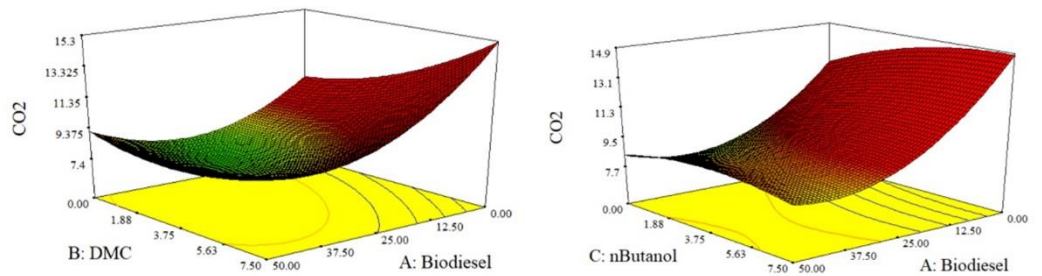
(ب)



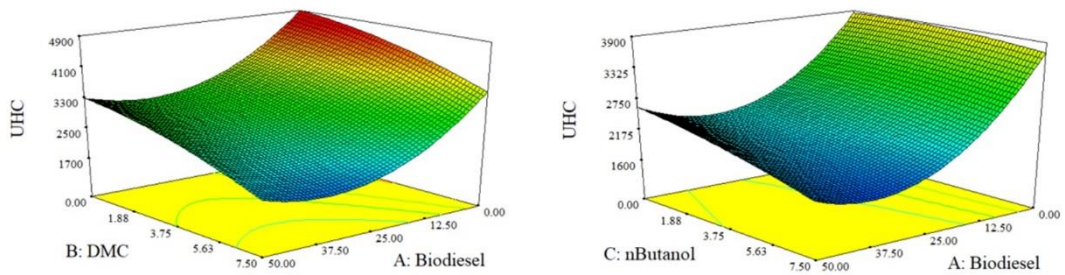
(ج)



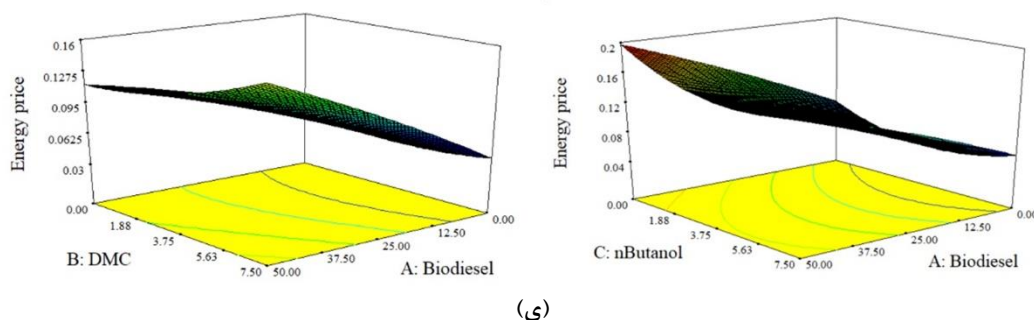
(د)



(ه)



(و)



(ی)

Figure 16- Optimized levels of variables: a) BP, b) BSFC, c) BTE, d) CO, e) NOx, f) CO2, g) UHC, and h) Energy price

شکل ۱۶- سطوح بهینه متغیرها: الف) توان ترمزی، ب) مصرف سوخت ویژه، پ) بازده حرارتی، ت) مونوکسیدکربن، ج) اکسیدهای نیتروژن، د) دی اکسیدکربن، ه) هیدروکربن‌های نسوخته، و ی) هزینه تولید انرژی

بر اساس تغییرات متغیرها در شکل ۱۶ می‌توان روند تغییرات متغیرهای وابسته در ارتباط با متغیرهای مستقل را با جزئیات بیشتری بررسی کرد. شکل ۱۶ الف) روند تغییرات توان ترمزی در مقابل تغییرات سه پارامتر مستقل شامل دی متیل کربنات، ان بوتانول و بیودیزل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، روند تغییرات ان بوتانول در مقایسه با روند تغییرات دی متیل کربنات و بیودیزل شیب کمتری دارد. بنابراین تغییرات توان ترمزی حساسیت کمتری نسبت به تغییر ان بوتانول در مقایسه با سایر پارامترهای مستقل دارد. از طرفی دیگر، روند تغییرات دی متیل کربنات در مقابل توان ترمزی حالت زینی شکل دارد. بیشینه توان ترمزی در مقادیر کمینه بیودیزل، بیشینه ان بوتانول و میانی دی متیل کربنات رخ داده‌است. بر اساس شکل ۱۶ ب) مقادیر کمینه مصرف سوخت ویژه در مقادیر کمینه بیودیزل، بیشینه ان بوتانول و بیشینه دی متیل کربنات رخ می‌دهد. به طوری که شیب تغییرات دی متیل کربنات در مقابل تغییرات مصرف سوخت ویژه نشان از حساسیت پایین این متغیر مستقل دارد. شکل ۱۶ پ) روند تغییرات بازده حرارتی را در مقابل متغیرهای مستقل نشان می‌دهد. روند حساسیت ان بوتانول و دی متیل کربنات به حالت زینی رو به بالا و روند حساسیت بیودیزل به حالت زینی رو به پایین است. بیشینه مقادیر بازده حرارتی در مقادیر میانی دی متیل کربنات و ان بوتانول و بیشینه مقدار بازده حرارتی در مقادیر بیشینه بیودیزل اتفاق می‌افتد. شکل ۱۶ ت) روند تغییرات مونوکسیدکربن در مقابل متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، کمینه مقدار انتشار مونوکسیدکربن در مقادیر بیشینه ان بوتانول، دی متیل کربنات و بیودیزل رخ می‌دهد. شکل ۱۶ ج) روند تغییرات انتشار اکسیدهای نیتروژن را در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روند تأثیرگذاری بیودیزل و ان بوتانول کمی ملایم‌تر از روند تأثیرگذاری دی متیل کربنات است. این روند در جدول ۴ نیز مشهود است. به طوری که تأثیر دی متیل کربنات در انتشار اکسیدهای نیتروژن معنی‌داری بالایی در مقایسه با تأثیر بیودیزل و ان بوتانول در انتشار اکسیدهای نیتروژن دارد. شکل ۱۶ د) روند تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل را ارائه می‌دهد. بر اساس روند تغییرات مشاهده می‌شود کمترین انتشار دی اکسیدکربن در مقادیر بالای بیودیزل و دی متیل کربنات و مقادیر میانی ان بوتانول رخ می‌دهد. شکل ۱۶ ه) روند تغییرات هیدروکربن‌های نسوخته در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. کمترین انتشار هیدروکربن‌های نسوخته در مقادیر بالای متغیرهای مستقل رخ می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، بر اساس شیب تغییرات، تأثیرپذیری تغییرات انتشار هیدروکربن‌های نسوخته از تغییرات بیودیزل و دی متیل کربنات بالاتر از ان بوتانول است. این ادعا در جدول ۵ نیز قابل‌رؤیت است. شکل ۱۶ ی) روند تغییرات هزینه انرژی تولید شده در مقابل متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. کمترین هزینه تولید انرژی در بیودیزل و دی متیل کربنات پایین و ان بوتانول بالا رخ می‌دهد. اما جمع‌بندی این موارد بایستی به یک نقطه بهینه منجر شود که آن هم فرمولاسیون بهینه نمونه

سوخت برای دستیابی به عملکرد، آلاینده‌گی و هزینه انرژی بهینه است. جدول ۶ نقاط بهینه متغیرهای مستقل و وابسته را ارائه می‌دهد.

Table 6- Optimal operation conditions of diesel engine with the lowest energy cost

جدول ۶- شرایط عملکرد بهینه موتور دیزل با کمترین هزینه انرژی			
ترکیبات سوخت			
بیودیزل (ml)	ان-بوتانول (ml)	دی متیل کربنات (ml)	
9.69	4.42	6.76	
پارامترهای بهینه عملکرد موتور دیزل			
توان ترمزی (kW)	مصرف سوخت ویژه (g/kWh)	بازده حرارتی (%)	
1.48	0.127	0.16	
پارامترهای بهینه انتشارات آلاینده‌گی موتور دیزل			
مونوکسید کربن (ppm)	هیدروکربن‌های نسوخته (ppm)	اکسیدهای نیتروژن (ppm)	دی‌اکسید کربن (%)
1947.67	2992.30	144.86	7.4
بهینه‌سازی اقتصادی			
هزینه انرژی (\$/kWh)			
0.066			

مطابق با جدول ۶، نقطه بهینه عملکرد موتور در بار کامل با نمونه سوخت حاوی بیودیزل به مقدار ۹/۶۹ میلی‌لیتر، ان-بوتانول به مقدار ۴/۴۲ میلی‌لیتر و دی متیل کربنات به مقدار ۶/۷۶ میلی‌لیتر اتفاق می‌افتد. در این نمونه سوخت، توان ترمزی ۱/۴۸ کیلووات، مصرف سوخت ویژه ۰/۱۲۷ گرم بر کیلووات ساعت و بازده حرارتی ۰/۱۶ درصد است. این نمونه سوخت مقادیر مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته، اکسیدهای نیتروژن و دی اکسیدکربن را به ترتیب به میزان ۱۹۴۷/۶۷ پی پی ام، ۲۹۹۲/۳ پی پی ام، ۱۶۴/۸۶ پی پی ام و ۷/۴ درصد تولید می‌کند. در این نقطه هزینه تولید انرژی ۰/۰۶۶ دلار بر کیلووات ساعت است. این نمونه سوخت در آزمایشگاه تهیه شد و تحت آزمون موتور قرار گرفت. لازم به ذکر است، این نمونه بر اساس دقت تجهیزات اندازه‌گیری آزمایشگاهی تهیه شد. مقادیر به دست آمده برای توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه و بازده حرارتی به ترتیب برابر ۱/۳۶ کیلووات، ۰/۱۳۷ گرم بر کیلووات ساعت و ۰/۱۴ درصد به دست آمد. از طرفی دیگر، مقادیر انتشار مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته، اکسیدهای نیتروژن و دی اکسیدکربن به ترتیب برابر ۲۰۱۵ پی پی ام، ۳۱۰۰ پی پی ام، ۱۴۰ پی پی ام و ۱۰ درصد به دست آمدند. لازم به ذکر است در این نقطه هزینه تولید انرژی برابر ۰/۰۵۲ دلار بر کیلووات ساعت بود. همان‌طور که مشخص است، روش بهینه‌سازی توانست با دقت بالایی (حدود ۸۹ درصد) شرایط بهینه عملکرد موتور را برای تهیه فرمولاسیون بهینه سوخت ایجاد کند. بر این اساس فرمولاسیون بهینه نمونه سوخت در تلفیق سوخت دیزل، بیودیزل، دی متیل کربنات و ان بوتانول عبارت است از: B2D30N20 (سوختی حاوی ۲ درصد بیودیزل با محتوای ۳۰ درصد دی متیل کربنات و ۲۰ درصد ان بوتانول)

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیرات افزودنی‌های ان بوتانول و دی متیل کربنات در سوخت بیودیزل با درصدهای کم به‌عنوان افزودنی‌های اکسیژن‌دار در عملکرد، آلاینده‌گی و هزینه تولید انرژی یک موتور دیزل تک سیلندر در شرایط بار کامل می‌پردازد. مطالعات انجام شده و مشابه همگی در مقادیر بالای افزودنی‌ها بحث کرده‌اند. اما مطالعه حاضر به بررسی مقادیر افزودنی در مقادیر کم می‌پردازد. زیرا هزینه تمام شده سوخت نیز یکی از نکات مهم در دسترسی به فرمولاسیون سوخت پایدار است.

اساس نتایج به دست آمده مقادیر پایین افزودن دی متیل کربنات در تلفیق با آن بوتانول و بیودیزل می تواند به مراتب تأثیر بسزایی در مقادیر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل داشته باشد. همچنین هزینه توان تولید شده را به مراتب کاهش می دهد. بر این اساس نتایج زیر به دست آمدند:

- کمترین میزان توان ترمزی تولید شده مربوط به سوخت B5D0N5 است.
- افزودن دی متیل کربنات از ۵ تا ۱۰ درصد به نمونه سوخت‌ها، میزان تولید توان ترمزی را از افزایش می دهد. اما افزودن دی متیل کربنات از ۱۰ تا ۱۵ درصد موجب کاهش توان تولیدی می شود.
- کمترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به نمونه سوخت‌های حاوی افزودنی‌های تلفیقی دی متیل کربنات و آن بوتانول در B2 است که به طور متوسط حدود ۱۸ درصد کمتر از سوخت دیزل و حدود ۳۲ درصد کمتر از نمونه سوخت B2 می باشند.
- استفاده از افزودنی‌های ترکیبی دی متیل کربنات و آن بوتانول توانسته است میزان بازده حرارتی را در به طور متوسط حدود ۱۵ الی ۳۰ درصد نسبت به سوخت‌های دیزل، B2 و B5 افزایش دهد که مقدار قابل توجهی است.
- افزودن دی متیل کربنات و آن بوتانول موجب کاهش انتشار مونوکسید کربن به میزان قابل توجه شد.
- بالاترین میزان انتشار دی اکسید کربن در سوخت‌های حاوی ترکیبات تلفیقی دی متیل کربنات، آن بوتانول و B5 اتفاق می افتد که حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد است.
- نمونه سوخت‌های ترکیبی با حضور دی متیل کربنات و آن بوتانول در B2 به طور متوسط انتشار اکسیدهای نیتروژن حدود ۱۵ الی ۲۵ درصد نسبت به سوخت دیزل و بیودیزل کاهش داشته است.
- کمترین هزینه تولید انرژی در نمونه سوخت‌های ترکیبی حاوی دی متیل کربنات و آن بوتانول در حضور B2، جایی که کمترین میزان افزودنی‌ها موجب تولید مقادیر قابل توجه توان و بازده حرارتی می شوند.
- B2D3N2 به عنوان فرمولاسیون بهینه نمونه سوخت در تلفیق سوخت دیزل، بیودیزل، دی متیل کربنات و آن بوتانول انتخاب شد.

تشکر و قدردانی

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

منابع

- [1] W. N. M. W. Ghazali, R. Mamat, H. H. Masjuki, and G. Najafi, "Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 585-602, 2015.
- [2] M. Wu and S. Yang, "Combustion characteristics of multi-component cedar bio-oil/kerosene droplet," *Energy*, vol. 113, pp. 788-795, 2016.
- [3] N. Banapurmath, W. M. Budzianowski, Y. Basavarajappa, R. Hosmath, V. Yaliwal, and P. Tewari, "Effects of compression ratio, swirl augmentation techniques and ethanol addition on the combustion of CNG-biodiesel in a dual-fuel engine," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 55-70, 2014.
- [4] M. Morales, G. Aroca, R. Rubilar, E. Acuna, B. Mola-Yudego, and S. González-García, "Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile," *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, pp. 239-249, 2015.
- [5] R. Vigneswaran, K. Annamalai, B. Dhinesh, and R. Krishnamoorthy, "Experimental investigation of unmodified diesel engine performance, combustion and emission with multipurpose additive along with water-in-diesel emulsion fuel," *Energy Conversion Management*, vol. 172, pp. 370-380, 2018.
- [6] A. Sharma, N. Kumar, V. Vibhanshu, and A. Deep, "Emission studies on a VCR engine using stable diesel water emulsion," *SAE Technical Paper*0148-7191, 2013.
- [7] 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.
- [8] A. J. E. S. Demirbaş, Part A: Recovery, Utilization, and E. Effects, "Biodegradability of biodiesel and petrodiesel fuels," vol. 31, no. 2, pp. 169-174, 2008.
- [9] A. T. Hoang, "Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: A review," *Fuel Processing Technology*, vol. 218, p. 106840, 2021.

- [10] A. T. Hoang, "Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system," *Journal of Marine Engineering Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 299-311, 2021.
- [11] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, and S. Shamsirband, "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.
- [12] D. Balasubramanian, A. T. Hoang, I. P. Venugopal, A. Shanmugam, J. Gao, and T. Wongwuttanasatian, "Numerical and experimental evaluation on the pooled effect of waste cooking oil biodiesel/diesel blends and exhaust gas recirculation in a twin-cylinder diesel engine," *Fuel*, vol. 287, p. 119815, 2021.
- [13] Y. Devarajan, D. B. Munuswamy, B. Nagappan, and A. K. Pandian, "Performance, combustion and emission analysis of mustard oil biodiesel and octanol blends in diesel engine," *Heat Mass Transfer*, vol. 54, no. 6, pp. 1803-1811, 2018.
- [14] T. Boningari and P. G. Smirniotis, "Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NOx abatement," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 13, pp. 133-141, 2016.
- [15] T. Shaafi and R. Velraj, "Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 655-663, 2015.
- [16] S. Radhakrishnan, Y. Devarajan, A. Mahalingam, and B. Nagappan, "Emissions analysis on diesel engine fueled with palm oil biodiesel and pentanol blends," *Journal of Oil Palm Research*, vol. 29, no. 3, pp. 380-386, 2017.
- [17] G. Labeckas, S. Slavinskas, and I. Kanapkienė, "The individual effects of cetane number, oxygen content or fuel properties on the ignition delay, combustion characteristics, and cyclic variation of a turbocharged CRDI diesel engine-Part 1," *Energy Conversion Management*, vol. 148, pp. 1003-1027, 2017.
- [18] A. Prabhu, M. Venkata Ramanan, and J. Jayaprabakar, "Production, properties and engine characteristics of Jatropha biodiesel-a review," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 42, no. 15, pp. 1810-1814, 2021.
- [19] K. P. Rao and V. Reddi, "Parametric optimization for performance and emissions of DI diesel engine with Mahua biodiesel along with Diethyl ether as an additive," *Biofuels*, vol. 11, no. 1, pp. 37-47, 2020.
- [20] X. HeLin, H. BeiBei, Z. PengFei, and A. JIANG, "Combustion and emissions characteristics of a diesel engine fueled with blends of diesel and DMF," *Chinese Science Bulletin*, vol. 62, no. 30, pp. 3506-3513, 2017.
- [21] K. Velmurugan and A. Sathiyagnanam, "Impact of antioxidants on NOx emissions from a mango seed biodiesel powered DI diesel engine," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 715-722, 2016.
- [22] J. P. Nuszowski, *The effects of fuel additives on diesel engine emissions during steady state and transient operation*. West Virginia University, 2008.
- [23] J. E. Dec, "A conceptual model of DL diesel combustion based on laser-sheet imaging," *SAE transactions*, pp. 1319-1348, 1997.
- [24] 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.
- [25] J. Guilerá, E. Bringué, 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.
- [26] N. Yilmaz, "Comparative analysis of biodiesel-ethanol-diesel and biodiesel-methanol-diesel blends in a diesel engine," *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 210-213, 2012.
- [27] X. Shi *et al.*, "Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine," *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 14, pp. 2567-2574, 2006.
- [28] O. Doğan, "The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions," *Fuel*, vol. 90, no. 7, pp. 2467-2472, 2011.
- [29] D. Rakopoulos, C. Rakopoulos, E. Giakoumis, A. Dimaratos, and D. Kyritsis, "Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine," *Energy conversion management*, vol. 51, no. 10, pp. 1989-1997, 2010.
- [30] W. Yang *et al.*, "Emulsion fuel with novel nano-organic additives for diesel engine application," *Fuel*, vol. 104, pp. 726-731, 2013.
- [31] K. Górski, W. Lotko, and M. Swat, "Particulate matter emission from diesel engine fuelled with blends of diesel oil and ethyl tert-butyl ether," *Archivum Motoryzacji*, pp. 119-126, 2010.
- [32] S. Gaíl *et al.*, "A wide-ranging kinetic modeling study of methyl butanoate combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 1, pp. 305-311, 2007.
- [33] Y. Wang and Y. Liu, "An oxygenating additive for reducing the emission of diesel engine," in *2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2008, pp. 3931-3933: IEEE.
- [34] B. H. Mehta, H. V. Mandalia, and A. B. Mistry, "A review on effect of oxygenated fuel additive on the performance and emission characteristics of diesel engine," in *National conference on recent trends in engineering & technology*, 2011, pp. 13-14.
- [35] B. R. Kumar and S. Saravanan, "Partially premixed low temperature combustion using dimethyl carbonate (DMC) in a DI diesel engine for favorable smoke/NOx emissions," *Fuel*, vol. 180, pp. 396-406, 2016.
- [36] D. B. Hulwan and S. V. Joshi, "Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content," *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5042-5055, 2011.
- [37] S. Hill and L. D. Smoot, "Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems," *Progress in energy combustion science*, vol. 26, no. 4-6, pp. 417-458, 2000.
- [38] E. Khalife, M. Tabatabaei, A. Demirbas, and M. Aghbashlo, "Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation," *Progress in energy Combustion Science*, vol. 59, pp. 32-78, 2017.
- [39] E. Sukjit, J. M. Herreros, K. Dearn, R. García-Contreras, and A. Tsolakis, "The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol-diesel blends," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 364-374, 2012.
- [40] C. Yu, S. Bari, and A. Ameen, "A comparison of combustion characteristics of waste cooking oil with diesel as fuel in a direct injection diesel engine," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 216, no. 3, pp. 237-243, 2002.
- [41] C. Swaminathan and J. Sarangan, "Performance and exhaust emission characteristics of a CI engine fueled with biodiesel (fish oil) with DEE as additive," *biomass bioenergy*, vol. 39, pp. 168-174, 2012.
- [42] V. P. Ferreira, J. Martins, E. A. Torres, I. M. Pepe, and J. M. R. De Souza, "Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with A blend of diesel-biodiesel," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 6, pp. 649-657, 2013.
- [43] O. Armas, R. García-Contreras, and Á. Ramos, "Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends," *Fuel Processing Technology*, vol. 100, pp. 63-72, 2012.
- [44] L. Xing-Cai, Y. Jian-Guang, Z. Wu-Gao, and H. Zhen, "Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol-diesel blend fuel," *Fuel*, vol. 83, no. 14-15, pp. 2013-2020, 2004.
- [45] N. Yilmaz and S. M. Davis, "Diesel blends with high concentrations of biodiesel and n-butanol: Effects on regulated pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons," *Process Safety Environmental Protection*, vol. 166, pp. 430-439, 2022.
- [46] S. Yu, C. Cao, and W. Lv, "Combustion and emission characteristics investigation of a marine diesel engine powered by diesel/biodiesel/n-butanol blends," *Energy Science Engineering*, vol. 10, no. 9, pp. 3317-3330, 2022.
- [47] L. Razzaq *et al.*, "Effect of biodiesel-dimethyl carbonate blends on engine performance, combustion and emission characteristics," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 7, pp. 5111-5121, 2022.
- [48] T. Ramesh, A. Sathiyagnanam, M. V. D. Poures, and P. Murugan, "A Comprehensive Study on the Effect of Dimethyl Carbonate Oxygenate and EGR on Emission Reduction, Combustion Analysis, and Performance Enhancement of a CRDI Diesel Engine Using a Blend of Diesel and Prosopis juliflora Biodiesel," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2022, 2022.
- [49] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, M. Alizamir, A. Mosavi, S. Shamsirband, 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.

- [50] B. Najafi, S. Faizollahzadeh Ardabili, A. Mosavi, S. Shamshirband, and T. J. E. Rabczuk, "An intelligent artificial neural network-response surface methodology method for accessing the optimum biodiesel and diesel fuel blending conditions in a diesel engine from the viewpoint of exergy and energy analysis," vol. 11, no. 4, p. 860, 2018.
- [51] 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.
- [52] B. Tesfa, F. Gu, R. Mishra, and A. Ball, "LHV predication models and LHV effect on the performance of CI engine running with biodiesel blends," *Energy conversion management*, vol. 71, pp. 217-226, 2013.
- [53] 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.
- [54] M. Gülüm and A. Bilgin, "Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel-diesel fuel blends," *Fuel Processing Technology*, vol. 134, pp. 456-464, 2015.
- [55] A. Álvarez, M. n. Lapuerta, and J. R. Agudelo, "Prediction of flash-point temperature of alcohol/biodiesel/diesel fuel blends," *Industrial Engineering Chemistry Research*, vol. 58, no. 16, pp. 6860-6869, 2019.
- [56] L. F. R. Verduzco, "Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 652-665, 2013.
- [57] 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.
- [58] K. Sivaramkrishnan and P. Ravikumar, "Determination of cetane number of biodiesel and its influence on physical properties," *ARPJ journal of engineering applied sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 205-211, 2012.
- [59] 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.
- [60] F. Payri, V. R. Bermúdez, B. Tormos, and W. G. Linares, "Hydrocarbon emissions speciation in diesel and biodiesel exhausts," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 6, pp. 1273-1279, 2009.

English Abstract

The effect of n-butanol and dimethyl carbonate additives as biodiesel fuel additives on diesel engine performance and emissions

Meghdad Khayyat Dorostkar¹, Hadi Ghaebi^{2*}, Ebrahim Abdi Aghdam³, Sina Faizollahzadeh Ardabili⁴

1- MS student, Mechanical Engineering, Mohagheg Ardabili University, Ardabil, Iran, meghdadbluearsh@yahoo.com

2- Associate Professor, Mechanical Engineering, Mohagheg Ardabili University, Ardabil, Iran, hghaebi@uma.ac.ir

3- Professor, Mechanical Engineering, Mohagheg Ardabili University, Ardabil, Iran, eaaghdam@uma.ac.ir

4- Ph.D., Renewable Energy, Mohagheg Ardabili University, Ardabil, Iran, sina.faiz@uma.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2023/02/17, Received in revised form: 2023/06/22, Accepted: 2023/07/05)

Diesel engines are considered the main sources of energy production and diesel fuel consumption. The use of biodiesel fuel as a part of diesel engines can have a positive effect on reducing the use of fossil resources and the emission of pollutants. Using biodiesel fuel, along with its advantages, has disadvantages such as increasing the emission of nitrogen oxides, which is considered a toxic gas. Many researchers have proposed different additives to cover some of the disadvantages of biodiesel fuel. In this article, two types of oxygen additives, including dimethyl carbonate and n-butanol, were combined with small amounts in B2 (2% biodiesel and 98% diesel) and B5 (5% biodiesel and 95% diesel) fuels. Using small amounts of these additives can reduce the cost of fuel production. Based on the obtained results, B2D10N10 and B2D10N0 fuel samples were able to increase the braking power of the diesel engine by about 12 and 10%, respectively, compared to B2 fuel. On the other hand, the use of fuel samples containing dimethyl carbonate and n-butanol additives in B2 fuel reduced the special brake fuel consumption by about 18% compared to diesel fuel and about 32% compared to B2 fuel. Using the combined additives of dimethyl carbonate and n-butanol increased the thermal efficiency by an average of 15-30% compared to diesel, B2, and B5 fuels. The addition of dimethyl carbonate and n-butanol in combination in small amounts significantly reduced carbon monoxide emissions. The highest amount of carbon dioxide emission occurs in fuels containing the combined compounds of dimethyl carbonate, n-butanol, and B5, which was about 10-15% higher than the control sample. During the optimization process, the B2D3N2 fuel sample was selected as the optimal formulation in combining diesel fuel, biodiesel, dimethyl carbonate, and n-butanol.

Keywords: biodiesel, diesel engine, diesel fuel, dimethyl carbonate, n-butanol