

ارزیابی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل در حضور بیودیزل، دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول به عنوان افزودنی‌های سوخت اکسیژن‌دار از نقطه نظر روش تحلیل اکسرژی - زیست‌محیطی

حسن وحدتی^۱، حبیب کلاهدوز^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسفراین، اسفراین، h.vahdati@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسفراین، اسفراین، habib.kolahdooz@iau.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵)

چکیده: مطالعه حاضر به بررسی تأثیر انواع افزودنی‌های سوخت اکسیژنه بر عملکرد موتور دیزل می‌پردازد. انتشارات هدف ارزیابی این مواد افزودنی نه تنها از نقطه نظر عملکرد، بلکه با در نظر گرفتن عوامل محیطی از طریق روش تحلیل اکسرژی-زیست‌محیطی است. این تحقیق عملکرد موتور دیزل را با استفاده از ترکیبات سوخت معمولی و اکسیژن‌دار، با تمرکز بر بیودیزل، دی‌متیل کربنات (DMC) و دی‌اتیلن گلیکول (DEG) ارزیابی می‌کند. این آزمایش شامل مقایسه بازده سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و رفتار موتور با این مواد افزودنی است. برای درک مفاهیم زیست‌محیطی، این مطالعه از روش اکسرژی-زیست‌محیطی استفاده می‌کند که تجزیه و تحلیل انرژی را با ملاحظات زیست‌محیطی ادغام می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این افزودنی‌های اکسیژن‌دار منجر به اثرات متفاوتی بر عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. افزودن بیودیزل تمایل به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند ذرات معلق و اکسیدهای نیتروژن دارد، در حالی که DMC و DEG نیز به کاهش انتشار کمک می‌کنند اما با تأثیرات متفاوت بر راندمان موتور. تجزیه و تحلیل خارجی محیطی چشم‌انداز جامعی در مورد هزینه‌ها و مزایای زیست‌محیطی استفاده از این افزودنی‌های سوخت ارائه می‌دهد. به طور کلی، این مطالعه بینش‌هایی را در مورد اینکه چگونه افزودنی‌های سوخت اکسیژنه می‌توانند بر عملکرد موتور دیزل و انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر بگذارند، ارائه و بر اهمیت متعادل کردن عملکرد با تأثیرات زیست‌محیطی تأکید می‌کند. این یافته‌ها به اکتشاف مداوم جایگزین‌های سوخت پاک‌تر در موتورهای دیزل، با تمرکز بر بهینه‌سازی عملکرد موتور و پایداری محیطی کمک می‌کند.

کلیدواژه‌گان: بیودیزل، انرژی زیستی، تولید پایدار، انرژی، افزودنی سوخت

مقدمه

در سال‌های اخیر یکی از تأمین‌کننده‌های اصلی قدرت در صنعت مادر، مانند صنعت حمل و نقل، موتورهای دیزلی است. منبع اصلی تأمین انرژی در موتورهای دیزل سوخت دیزل است. بنابراین سوخت دیزل یکی از مهمترین حامل‌های انرژی است [۱]. یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط‌زیست موتورهای دیزلی است به طوری که با سوزاندن سوخت دیزل آلاینده‌هایی تولید می‌شود که به‌طور جدی بر محیط‌زیست و آب و هوای زمین تأثیر می‌گذارد. اخیراً روش‌های مختلفی برای کاهش این آلاینده‌ها به‌کار گرفته شده است [۲]. با توجه به کاهش منابع انرژی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، توجه به محدودیت‌های ذکر شده و

همچنین استفاده فشرده از موتورهای احتراق داخلی از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، محققان و دانشمندان در حال بررسی جایگزین‌هایی هستند. سوخت‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی می‌توانند انرژی پاک تولید کنند [۴،۳].

در سیاست‌های مربوط به بخش حمل و نقل و صنعت، هدف اصلی جلوگیری از مصرف منابع انرژی و محدود کردن انتشار آلاینده‌های ناشی از موتورهای احتراق داخلی است. انتشار گازهای گلخانه‌ای از موتورهای دیزل تهدیدی جدی برای سلامت انسان است. در این راستا، دانشمندان تحقیقات و آزمایشاتی را برای توسعه موتورهای دیزلی و سوخت انجام می‌دهند. این پیشرفت منجر به ایجاد قوانین و مقرراتی برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای از موتورهای دیزلی شده است که هر روز به‌روز می‌شوند. همچنین محدودیت‌ها و استانداردهایی برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای موتورهای دیزلی تعیین شد. موتورهای تراکمی احتراق داخلی به‌دلیل بازده حرارتی بالا، کاهش قابل توجهی در مصرف سوخت ویژه ایجاد می‌کنند. یکی از معایب موتورهای دیزلی این است که انتشار آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن و دوده بیشتری از موتورهای بنزینی دارند [۵]. در طول این سال‌ها محققان روش‌های مختلفی را برای حل مشکلات موتورهای احتراق داخلی پیشنهاد کرده‌اند. یکی از این تکنیک‌ها که طی سالیان متمادی توسط محققان توسعه و گسترش یافته و تکنیکی بسیار موفق در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت دیزل است، استفاده از نسبت‌های مختلف بیودیزل در سوخت دیزل است. بیودیزل سوختی است که از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود و استفاده از این سوخت به جای بنزین و دیزل از آسیب به محیط‌زیست جلوگیری می‌کند. بیودیزل کمتر از دیزل محیط زیست را آلوده می‌کند. یکی دیگر از مزیت‌های بیودیزل قابلیت اختلاط و همگن شدن آن به هر نسبت با دیزل است. یکی از عوامل مهم برای استفاده از این روش، عدم تغییر در اجزای موتور دیزل است. بیودیزل همچنین دارای معایبی است که عمده‌ترین آن‌ها تولید اکسیدهای نیتروژن بیشتر از دیزل و اکسید شدن بیودیزل است. رسوبات اکسیداسیون بیودیزل که در بیودیزل نامحلول هستند باعث گرفتگی سوزن‌های انژکتور، رسوبات فیلتر و خرابی سیستم سوخت می‌شوند. از طرفی ویسکوزیته بیودیزل در مقایسه با دیزل زیاد است و در صورت عدم کنترل درصد اضافه بیودیزل می‌تواند سیستم سوخت را تحت فشار قرار داده و اتمیزه شدن سوخت از انژکتورها را کاهش دهد. تمام این کاستی‌ها در نهایت می‌تواند باعث آسیب قابل توجه و ویرانگر به اجزای موتور دیزل شود [۶].

تحقیقات بسیاری در جهت بهبود عملکردی موتور دیزل و کاهش انتشارات حاصل از آن در حال انجام هستند. اضافه کردن آب به مخلوط سوخت بیودیزل، بکارگیری بازخورانی گازهای خروجی و استفاده از انواع افزودنی‌ها، تکنولوژی‌هایی هستند که می‌توانند در کاهش آلاینده‌گی‌های موتورهای دیزل کمک کند [۷].

محققان اخیراً، در راستای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل از انواع افزودنی‌ها استفاده کرده‌اند که این افزودنی‌ها شامل افزودنی‌های اکسیژن‌دار و افزودنی‌های نانو است. افزودنی‌های اکسیژن‌دار شامل ان بوتانول، دی متیل کربنات، دی اتیل اتر، متانول، اتانول، اتیلن گلیکول، تری آستین، استون و افزودنی‌هایی از این دسته می‌باشند [۸، ۱۰]. حضور اکسیژن در احتراق کامل موتور برای بهبود احتراق و به‌دنبال آن کاهش آلاینده‌گی منتشر شده از موتور دیزل، مؤثر است [۱۱]. نانو افزودنی‌ها با داشتن خاصیت مساحت سطح مخصوص بالا، از طریق کاهش مرحله تأخیر در اشتعال، کمک به بهبود احتراق کامل‌تر و کاهش آلاینده‌ها در عملکرد سوخت کمک می‌کنند و همچنین با افزایش نرخ تبخیر قطرات، ذخیره انرژی در سطوح زیاد و ایجاد فعالیت‌های کاتالیزوری اجتناب ناپذیر است [۱۲]. باناپورم و همکاران (۲۰۱۴) اکنون تحقیقاتی در زمینه استفاده از افزودن اکسیدهای فلزی و آلی در سوخت دیزل، جهت بهبود کیفیت، ارتقا عملکرد، کاهش آلاینده‌ها و بهبود خواص فیزیکی - شیمیایی سوخت انجام شده است. طبق مطالعاتی که در مورد به‌کارگیری افزودنی‌های نانو به سوخت دیزل، گزارش شده، حضور افزودنی‌های نانو باعث افزایش سرعت انتشار گرما و سرعت احتراق موتور دیزل است [۱۳]. همچنین افزودنی‌های نانو مواد در سوخت دیزل، موجب جلوگیری از تشکیل مونوکسید کربن و افزایش سطح واکنش می‌شود [۱۴]. استفاده از ذرات نانو مواد، معایبی هم دارد. رسوب‌گذاری در مخزن سوخت و مسیرهای انتقال سوخت به‌دلیل عدم قابلیت همگن شدن ذرات نانو مواد در سوخت دیزل و هزینه بالای تهیه افزودنی‌های نانو از جمله معایبی هستند که استفاده از نانو مواد را به همراه دارد. محققان بسیاری بخاطر ورود مواد نانو به محیط‌زیست از طریق آگروز که اثرات منفی در سلامت محیط‌زیست و موجودات زنده وارد می‌کند، استفاده از افزودنی‌های اکسیژن‌دار را توصیه می‌کنند [۱۵].

افزودنی‌های سوخت اکسیژنه، مانند بیودیزل، دی متیل کربنات (DMC) و دی اتیلن گلیکول (DEG)، راه حل‌های بالقوه‌ای را برای کاهش انتشارات مضر موتورهای دیزل ارائه می‌دهند [۱۶،۱۸]. بیودیزل، مشتق شده از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی، یک منبع تجدیدپذیر است که می‌تواند دی‌اکسید کربن و انتشار ذرات را کاهش دهد. از سوی دیگر، DMC و DEG، اکسیژن‌های مصنوعی با خواصی هستند که می‌توانند راندمان احتراق را بهبود بخشند و انتشارات سمی را کاهش دهند. این افزودنی‌ها برای دستیابی به تعادل بین عملکرد و اثرات زیست‌محیطی نویدبخش هستند [۱۹،۲۱].

روش تحلیل اکسرژی - زیست‌محیطی ابزار ارزشمندی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی است. این روش تجزیه و تحلیل اکسرژی، کیفیت تبدیل انرژی را با ملاحظات زیست‌محیطی ترکیب و ارزیابی می‌کند. این روش به محققان اجازه می‌دهد تا هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط با تلفات انرژی و تولید ضایعات را به روشی جامع کمی کنند. با استفاده از این روش برای موتورهای دیزل با افزودنی‌های سوخت اکسیژنه، می‌توان درک بهتری داشت که چگونه این مواد افزودنی نه تنها بر عملکرد موتور بلکه بر پایداری محیطی نیز تأثیر می‌گذارد [۲۲].

در این مطالعه، هدف اصلی ارزیابی عملکرد و انتشار موتورهای دیزلی در هنگام استفاده از مواد افزودنی سوخت اکسیژنه مختلف از منظر برون‌محیطی است. با تمرکز بر بیودیزل، DMC و DEG، قصد داریم شناسایی کنیم که کدام افزودنی‌ها بیشترین مزایای را از نظر کاهش انتشار و اثرات زیست‌محیطی دارند و در عین حال عملکرد موتور را حفظ یا افزایش می‌دهند. نتایج این مطالعه می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را برای صنایعی که به دنبال جایگزین‌های سوخت پاک‌تر هستند، ارائه دهد.

رویکرد تجربی شامل مقایسه عملکرد و آلاینده‌های موتورهای دیزل در هنگام استفاده از ترکیب‌های مختلف سوخت است. این ترکیب‌ها شامل نسبت‌های متفاوتی از بیودیزل، DMC و DEG می‌شود که امکان ارزیابی چگونگی تأثیر هر افزودنی بر رفتار موتور و خروجی آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، بازده انرژی این ترکیب‌ها برای تعیین پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند. این رویکرد جامع درک دقیقی از مبادلات بین عملکرد و پایداری محیطی ارائه می‌دهد [۲۳،۲۴].

مطابق با مطالعات انجام شده، موضوع حاضر از نیاز فوری برای پرداختن به چالش‌های انرژی و محیطی ناشی می‌شود. موتورهای دیزلی نقش مهمی در بخش‌های مختلف اقتصاد ایفا می‌کنند، با این حال آن‌ها همچنین سهم عمده‌ای در آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. با ارزیابی جامع اثرات افزودنی‌های سوخت جایگزین بر عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از روش انرژی‌اکونومیک، محققان می‌توانند بینش‌های ارزشمندی در مورد مزایای بالقوه و معاوضه‌های مرتبط با این افزودنی‌ها ارائه دهند.

علاوه بر این، روش اکسرژی - زیست‌محیطی یک رویکرد سیستماتیک برای ارزیابی نه تنها بازده ترمودینامیکی موتورهای دیزل، بلکه ردپای محیطی آن‌ها ارائه می‌دهد. این روش محققان را قادر می‌سازد تا تخریب اکسرژی را در سیستم موتور تجزیه و تحلیل کنند و چگونگی تأثیر مواد افزودنی سوخت مختلف بر تولید آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای را ارزیابی کنند. با ادغام اصول ترمودینامیکی با ملاحظات زیست‌محیطی، روش اکسرژی - زیست‌محیطی درک جامعی از مفاهیم پایداری استفاده از بیودیزل، دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول به‌عنوان افزودنی‌های سوخت اکسیژنه در موتورهای دیزل ارائه می‌دهد. در نهایت، چنین تحقیقاتی برای اطلاع رسانی تصمیمات سیاستی و نوآوری‌های تکنولوژیکی با هدف بهبود کارایی و عملکرد زیست‌محیطی موتورهای دیزل در یک چشم‌انداز انرژی به سرعت در حال تحول ضروری است.

پژوهش حاضر چندین عنصر جدید و نوآوری را در بر می‌گیرد که آن را در قلمرو متمایز می‌کند. تجزیه و تحلیل عملکرد موتور و آلاینده‌ها، ادغام بیودیزل، دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول به‌عنوان افزودنی‌های سوخت اکسیژنه نشان‌دهنده انحراف از فرمولاسیون سوخت دیزل معمولی است. در حالی که بیودیزل به‌عنوان یک جایگزین تجدیدپذیر برای دیزل فسیلی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، گنجاندن دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول ترکیبات جدیدی را با مزایای بالقوه

¹ Exergoenvironmental

برای راندمان احتراق و کاهش انتشار معرفی می‌کند. این رویکرد جدید، دامنه تحقیقات در مورد افزودنی‌های سوخت جایگزین را گسترش می‌دهد و بینش‌های تازه‌ای را در مورد اثرات هم‌افزایی آن‌ها بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل ارائه می‌دهد. اتخاذ روش اکسرژی-زیست‌محیطی به‌عنوان چارچوب تحلیلی، نوآوری قابل توجهی در ارزیابی عملکرد موتور دیزل نشان می‌دهد. برخلاف معیارهای عملکرد سنتی که صرفاً بر بازده ترمودینامیکی یا سطوح انتشار تمرکز می‌کنند، روش اکسرژی-زیست‌محیطی هر دو جنبه را در یک تحلیل یکپارچه ادغام می‌کند. این روش با کمی‌سازی تخریب اکسرژی در سیستم موتور و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی آن، درک جامعی از انرژی و عملکرد زیست‌محیطی موتورهای دیزلی ارائه می‌دهد. این رویکرد نوآورانه به محققان اجازه می‌دهد فرصت‌هایی را برای بهبود کارایی و پایداری شناسایی کنند و در نتیجه توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر موتور و فرمول‌های سوخت را هدایت کنند.

ماهیت بین‌رشته‌ای این تحقیق، که ترکیبی از اصول ترمودینامیک، علوم محیطی و مهندسی است، بر تازگی و نوآوری آن تأکید می‌کند. این مطالعه با ایجاد پل در رشته‌های مختلف، از دیدگاه‌ها و روش‌های متنوعی برای مقابله با چالش‌های پیچیده در عملکرد موتور و تجزیه و تحلیل آلاینده‌ها استفاده می‌کند. این رویکرد میان‌رشته‌ای نه تنها دقت و عمق تحقیق را افزایش می‌دهد، بلکه گرده افشانی متقابل ایده‌ها و روش‌ها را در زمینه‌های مختلف تقویت می‌کند. در نتیجه، این تحقیق به پیشرفت دانش و نوآوری در فناوری موتور و پایداری محیطی کمک می‌کند و راه را برای پیشرفت‌های آینده در توسعه موتورهای دیزلی تمیزتر و کارآمدتر هموار می‌کند.

مواد و روش‌ها

تولید بیودیزل

مراحل تولید روغن مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: ابتدا روغن عبوری از صافی کاغذی تا دمای ۶۰ درجه سانتیگراد گرم شده و همزمان الکل اتانول با نسبت مولار ۶ به یک نسبت به روغن نیز گرم و با هیدروکسید سدیم با ۰/۵٪ وزنی روغن مخلوط و برای حلالیت بهتر تا دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس محلول الکل و کاتالیزور به روغن اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد و در حین هم زدن محلول، دما به ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. شکل ۱ یک واکنش ترانس استریفیکاسیون را نشان می‌دهد که در آن یک مولکول روغن با سه مول الکل به‌صورت کاتالیزوری واکنش می‌دهد و یک اتیل استر تولید می‌کند.

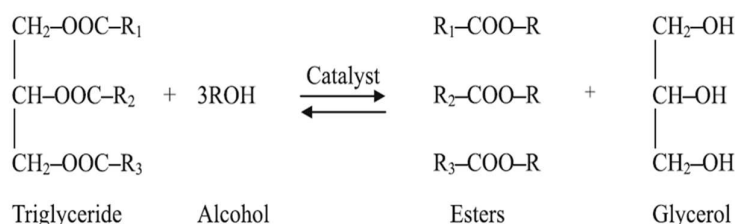


Figure 1- Transesterification reaction and formation of esters

شکل ۱- واکنش ترانس استریفیکاسیون و تشکیل استرها

در پایان فرآیند، محلول حاصل در شرایط آزمایشگاهی قرار داده شد تا با سرد شدن محلول در حین واکنش، گلیسرین تشکیل شده به دلیل وزن آن در کف ظرف جمع شده و در مرحله اصلی جدا شود. پس از جداسازی گلیسرین، فاز باقیمانده با اسید هیدروکلریک خنثی شد و اسیدیته محلول به ۷ کاهش یافت. محلول خنثی‌سازی شده با آب مقطر، که تا دمای ۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شده بود، برای حذف گلیسرین باقی مانده و سایر ناخالصی‌ها شستشو داده می‌شود. امولسیون تشکیل

شده در اثر اضافه کردن آب به استر به مدت ۴۸ ساعت به حال سکون در شرایط آزمایشگاه قرار داده می‌شود تا استر نهایی از سایر فازها تفکیک شده و از ناخالصی‌های موجود جدا شود (شکل ۲).



Figure 2- The first stage of water washing and formation of three phases of fuel, soap, and oil
شکل ۲- مرحله اول آب‌شویی و تشکیل سه فاز سوخت، صابون و روغن

آماده سازی نمونه‌های سوخت و اندازه‌گیری خواص سوخت‌ها

برای مقایسه خواص فیزیکی سوخت بیودیزل، مخلوط‌های مختلفی از نمونه سوخت با محتوای صفر و ۵ درصد بیودیزل (درصد حجمی)، دی متیل کربنات در چهار سطح ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد حجمی و دی اتیلن گلیکول در چهار سطح ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد حجمی تهیه شد. این نمونه‌ها با علامت $B_xE_yEt_z$ نمایش داده شدند که B بیانگر بیودیزل، E بیانگر دی متیل کربنات و Et بیانگر دی اتیلن گلیکول و اندیس‌ها هم به ترتیب درصد حجمی هر یک از افزودنی‌ها در سوخت دیزل را ارائه می‌دهد. سوخت دیزل خالص هم به عنوان سوخت شاهد استفاده شد.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری دانسیته نمونه سوخت‌ها از استاندارد ASTM D4052 استفاده شد. این اقدام با به کارگیری چگالی سنج دیجیتال مدل DA-130N انجام شد.

ارزش حرارتی سوخت، مقدار حرارتی است که یک سوخت در شرایط احتراق آزاد کرده و می‌سوزد، تا آنکه محصول احتراق دوباره تا حد دمای محیط سرد شوند. در این مطالعه از استاندارد ASTM D240 برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی استفاده شد. این آزمون به وسیله دستگاه بمب کالریمتر انجام شد.

نقطه ابری شدن پایین‌ترین دمایی است که در آن دما در سوخت مایع اولین ذرات کریستال و موم ظاهر می‌شود. نقطه ابری شدن مطابق استاندارد ASTM D 5773 بوسیله مشاهده شفافیت سوخت که تحت شرایط کنترل شده سرد می‌شود، تعیین می‌شود. نمونه در استوانه شیشه‌ای ریخته شد و به منظور ایجاد شرایط همگن در سوخت، دمای آن با استفاده از آن به 40°C رسانده شد. سپس نمونه از آن خارج شده و پس از هم دما شدن با محیط، در دستگاه سردکن قرار داده شد. کاهش دمای نمونه کنترل و به محض رؤیت اولین ذرات کریستال و مومی شکل در ته ظرف، دمای نمونه به عنوان نقطه ابری شدن ثبت شد.

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه سوخت‌ها مطابق با استاندارد ASTM D445 از دستگاه بروکفیلد مدل DV-II Prime استفاده شد. از هر نمونه سوخت ۱۶ cc در محل موردنظر در دستگاه ریخته شده و با چرخش اسپیندل در داخل محلول، گرانروی آن در صفحه نمایشگر دستگاه نشان داده می‌شود.

نقطه اشتعال یکی از معیارهای سنجش تمایل نمونه به تشکیل ترکیب قابل اشتعال با هوا تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاه است. این آزمایش به روش فنجان باز، مطابق با استاندارد ASTM D93 انجام شد.

برای شناسایی ترکیبات بیودیزل از روش کروماتوگرافی گازی استفاده شد. آنالیز کروماتوگرافی گازی بیودیزل، بر اساس استاندارد ASTM انجام گرفت.

انجام آزمون موتور

مشخصات مجموعه آزمون موتور بکار رفته در این مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است. این موتور یک موتور دیزل تک سیلندر چهارزمانه است. شکل ۳ تصویری از کلیات عملیات آزمون موتور را نشان می‌دهد.



Figure 3- Engine test instruments

شکل ۳- تجهیزات آزمون موتور

جدول ۱- مشخصات موتور

Table 1- Engine specifications

Manufacture	Kirloskar Ltd., India
Type	Vertical, four-stroke, single-cylinder
Speed	constant speed
Engine power	7.4 kW @ 1500 rpm`
Cylinder dimensions	102 mm/116mm
Volume	0.948 L
Comparison ratio	17.5
Cooling system	Water Cooling

برای انجام آزمون موتور ابتدا موتور با سوخت دیزل روشن شده و به مدت ده دقیقه در شرایط تمام بار قرار گرفت تا گرم شود. سپس موتور برای تخلیه سوخت خاموش شد. در ادامه مخلوط سوخت‌های موردنظر را یک به یک داخل موتور ریخته و موتور دوباره روشن شد. بار اعمال شده به صورت بار کامل تنظیم و موتور به مدت چند دقیقه در حالت کار قرار گرفت تا به دور نهایی

برسد و در حالت پایدار قرار گیرد. پس از اتمام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های مربوط به هر آزمایش، عملیات تجزیه و تحلیل برای مقایسه پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور با استفاده از مخلوط سوخت‌ها و سوخت گازوئیل خالص، به کمک نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

جدول ۲، مشخصات و دقت ابزار اندازه‌گیری را ارائه می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات و دقت ابزار اندازه‌گیری

Table 2- Specifications and accuracies of measuring instruments

Parameter	Accuracy	Resolution	Parameter	Uncertainty	Percentage uncertainty (%)
Engine load	±1	0.1 N	Fuel flow rate	0.31 (g/h)	4.20
Engine speed	±1	1 rpm	BP	0.047 (kW)	0.001
CO ₂	±1	0.1 %	BSEC	0.179 (g/kWh)	1.015
NO _x	±1	1 ppm			
CO	±1	1 ppm			

تحلیل اکسرژی

معادله تعادل اکسرژی در موتور دیزل را به‌عنوان یک حجم کنترل، می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{E}x_a + \dot{E}x_f = \dot{E}x_{ex} + \dot{E}x_{sh} + \dot{E}x_c + \dot{E}x_{em} + \dot{E}x_{des} \quad (1)$$

که $\dot{E}x_a$ آهنگ اکسرژی انتقال اکسرژی توسط هوای ورودی است. $\dot{E}x_f$ آهنگ اکسرژی سوخت ورودی است که برابر مجموع آهنگ اکسرژی سوخت دیزل $\dot{E}x_D$ و آهنگ اکسرژی سوخت گاز طبیعی $\dot{E}x_{NG}$ است. $\dot{E}x_{ex}$ آهنگ اکسرژی انتقال حرارت از گازهای خروجی از آگروز موتور است. $\dot{E}x_{sh}$ آهنگ اکسرژی کار شفت و $\dot{E}x_c$ و $\dot{E}x_{em}$ به ترتیب آهنگ جریان اکسرژی در نتیجه انتقال حرارت به سیستم خنک‌کاری موتور و هوای محیط است. $\dot{E}x_{des}$ نیز آهنگ تخریب اکسرژی است [۲۳، ۲۴]. آهنگ اکسرژی هوای ورودی به موتور بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳، ۲۴]:

$$\dot{E}x_a = \dot{Q}_a - m_a C_{p,a} T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} + R_a \ln \frac{P_1}{P_0} \quad (2)$$

که P_1 فشار هوای ورودی و P_0 فشار محیط مرده است. آهنگ اکسرژی ورودی توسط سوخت دیزل به موتور، در حقیقت دسترس‌پذیری شیمیایی سوخت است و از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\dot{E}x_f = \dot{E}x_D + \dot{E}x_{NG} = m_D \phi_F LHV_D = m_f [x \phi_F LHV_D] \quad (3)$$

ϕ_d و ϕ_{ng} نیز اکسرژی مخصوص سوخت‌های دیزل و گاز طبیعی است که بر اساس تعداد کربن، هیدروژن و اکسیژن موجود در ساختار شیمیایی آن‌ها، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi = 1.0401 + 0.17283 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{N}{C} \times (1 - 2.0268 \frac{H}{C}) \quad (4)$$

به‌طور مشابه، اتلاف اکسرژی در اثر خروج گازها از آگروز موتور $\dot{E}x_{ex}$ ، نیز با توجه به تغییر آنتالپی و آنتروپی گازهای خروجی آگروز در دمای T_3 و فشار P_3 نسبت به شرایط محیط مرده، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\dot{E}x_{ex} = \dot{Q}_{ex} - m_{ex} C_{p,ex} T_0 \ln \frac{T_3}{T_0} + R_a \ln \frac{P_3}{P_0} \quad (5)$$

آهنگ اکسرژی کار شفت \dot{E}_{sh} برابر با مقدار توان ترمزی موتور (\dot{W}_{sh}) است، که به طور تجربی از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. جریان اکسرژی در اثر انتقال حرارت به آب خنک کاری \dot{E}_c ، با توجه به دبی جرمی آب (\dot{m}_w)، دمای ورودی ($T_{w,in}$) و خروجی ($T_{w,out}$) آب خنک کاری و دمای محیط به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}_c = \dot{Q}_w + \dot{m}_w T_0 C_w \ln \frac{T_{w,out}}{T_{w,in}} \quad (6)$$

همچنین اکسرژی از دست رفته در اثر انتقال حرارت به محیط، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}_{em} = \dot{Q}_{em} \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (7)$$

که T_s دمای متوسط سطح موتور و \dot{Q}_{em} انتقال حرارت منتقل شده به محیط است که از رابطه (۷-۳) محاسبه می‌شود. بازده انرژی (η) یا بازده حرارتی ترمزی موتور طبق قانون اول ترمودینامیک برابر نسبت مقدار توان ترمزی موتور \dot{E}_{sh} (کار واقعی گرفته شده) بر انرژی حرارتی ورودی سوخت‌ها $\dot{Q}_d + \dot{Q}_{ng}$ است و بیان‌گر تبدیل انرژی سوخت‌ها به توان مفید است:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{sh}}{\dot{Q}_f} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\dot{Q}_d + \dot{Q}_{NG}} \quad (8)$$

بازده اکسرژی (ε) نیز مطابق قانون دوم ترمودینامیک، برابر نسبت اکسرژی \dot{E}_{sh} بر اکسرژی‌های ورودی ($\dot{E}_a + \dot{E}_d + \dot{E}_{ng}$) است:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_w}{\dot{E}_a + \dot{E}_f} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\dot{E}_a + \dot{E}_d + \dot{E}_{NG}} \quad (9)$$

تحلیل زیست‌محیطی

ارزیابی چرخه حیات یک رویه تخصصی است که برای ارزیابی منابع، فرآیندها و خدمات مورد استفاده در طول چرخه تولید، از اکتساب مواد خام، تولید و مراحل تا سیستم‌های مختلف تولید و اثرات بالقوه زیست‌محیطی آن فعالیت‌ها استفاده می‌شود. در ابتدا، ارزیابی چرخه حیات از روشی استفاده می‌کند که چگونه آیت‌های مختلف بر محیط تأثیر می‌گذارند. ارزیابی چرخه حیات یک رویکرد استاندارد برای ارائه یک پایه علمی محکم برای پایداری محیطی برای کسب و کارها و دولت‌ها است [۲۵]. ارزیابی چرخه حیات اثرات اکولوژیکی مواد کامپوزیتی را در مورد ماهیت قابل بازیافت آن‌ها تجزیه و تحلیل می‌کند [۲۲]. تجزیه و تحلیل از گهواره تا گور (LCA) اثرات زیست‌محیطی یک محصول یا خدمات را از زمان تصور تا زمان دور انداختن آن، از جمله تمام مراحل ساخت، حمل و نقل، مصرف کاربر نهایی و دفع زباله بررسی می‌کند [۲۵]. LCA دارای چهار مرحله است: تعریف اهداف و دامنه، انجام تجزیه و تحلیل موجودی، انجام ارزیابی تأثیر و تفسیر نتایج.

روش LCA شامل مرزهای سیستم و میزان جزئیات مورد نیاز است که می‌تواند بر اساس کاربرد خاص و موضوع تحقیق متفاوت باشد. عمق و دامنه یک مطالعه LCA بسته به اهداف مطالعه می‌تواند طور قابل توجهی متفاوت باشد. برای مطالعه حاضر، مرزهای سیستم شامل تولید بیودیزل، آماده سازی سوخت و مرحله احتراق نمونه‌های سوخت می‌شود [۴]. هدف اصلی این مطالعه LCA انجام یک ارزیابی جامع از اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول، آماده سازی سوخت و تولید و استفاده از انرژی از طریق ترکیبات بنزین و بیواتانول برای افزایش راندمان موتور و به حداقل رساندن آلاینده‌ها است.

در LCA، واحد عملکردی (FU) به تیمی از مراجع برای داده‌های موجودی اشاره دارد [۴]. FU معمولاً در خروجی سیستم توضیح داده می‌شود [۲۵]. در این مطالعه، FU نهایی برای هر مخلوط سوخت ۱ گیگاژول از توان شفت تولید شده توسط احتراق تعیین

می‌شود. علاوه بر این، برای درک اثرات زیست‌محیطی هر مرحله، زیرسیستم‌های متعددی مستقل از مراحل قبل بررسی می‌شوند. در واقع، این نوع محاسبات در LCA می‌تواند بینش بیشتری در مورد ماهیت عملیاتی هر مرحله از منظر اثرات محیطی ارائه دهد.

LCI بخش مهمی از فرآیند ارزیابی چرخه عمر است که هدف آن کمی کردن تمام ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم است. این مرحله شامل چهار مرحله فرعی است که به صورت همزمان انجام می‌شود [۲۵]. در مرحله اول، تمام عملیات درگیر در چرخه عمر محصول، از برداشت انرژی و مواد خام از محیط‌زیست، باید شناسایی شوند. مرحله دوم چالش برانگیزترین مرحله است و نیاز به استخراج داده‌های ضروری برای هر روش دارد. داده‌ها را می‌توان از مطالعات علمی، انتشارات متخصص LCA و سوابق تجاری و دولتی به دست آورد. مرحله سوم شامل بازنگری مرزهای سیستم برای شناسایی بردارهای مهم مرزهای سیستم و حذف فرآیندهایی است که از مرزهای سیستم فراتر می‌روند [۲۶]. در نهایت، تمام ورودی‌ها و خروجی‌های فرآیندها توسط FU تنظیم می‌شوند [۴]. ارزیابی LCA به‌طور کلی از دو جزء کلیدی، انتشار مستقیم و غیرمستقیم تشکیل شده است.

انتشار مستقیم از منابعی می‌آید که کسب و کار گزارش دهنده مالک یا کنترل آن‌ها است. این مطالعه انتشار مستقیم را با مرحله احتراق، که به‌عنوان انتشار آگروز شناخته می‌شود، مرتبط می‌کند. تحقیقات قبلی CO₂، NO_x، O₂ و CO را به‌عنوان انتشارات اصلی آگروز موتور احتراق تراکمی شناسایی کردند [۴]. انتشار غیرمستقیم آن‌هایی هستند که از عملیات سازمان گزارش‌دهنده می‌آیند، اما از منابعی می‌آیند که متعلق به سایر طرف‌ها هستند یا توسط آن‌ها اداره می‌شوند. در واقع، این انتشارات مربوط به ایجاد مواد شیمیایی متعدد در اجزای مختلف سیستم تولید انرژی است. جدول ۳ سیاهه تهیه شده برای این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۳- سیاهه ارزیابی چرخه حیات

Table 3- Life cycle inventory

Item	Value	Unit
Biodiesel production (FU= 1 kg of Bioethanol)		
Steel	0.0015	kg
Water	3	kg
Waste cooking oil	1	kg
Electricity	0.23	kWh
Fuel sample preparation (FU= 1 kg of fuel sample)		
Additive	Based on fuel sample requirement	kg
Span	Based on fuel sample requirement	kg
Tween	Based on fuel sample requirement	kg
Water	Based on fuel sample requirement	kg
Biodiesel	Based on fuel sample requirement	kg
Diesel	Based on fuel sample requirement	kg
Steel	0.00087	kg
Polyethylene	0.0015	kg
Acrylonitrile Butadiene Styrene	0.0048	kg
Electricity	0.45	kWh
Combustion of fuel samples (FU= 1 MJ shaft power produced)		
Indirect emissions		
Waste oil	Based on WCO requirement	kg
Biodiesel	According to PF sample	kg
Diesel fuel	According to PF sample	kg
Engine body	0.000012	kg
Direct emissions		
NO _x	Measured for each scenario	kg
CO ₂	Measured for each scenario	kg
CO	Measured for each scenario	kg

برای اندازه‌گیری بارهای محیطی در این تحقیق از روش IMPACT2002+ استفاده شد. این روش از آنالیز نشان می‌دهد که چگونه می‌توان یک استراتژی نقطه میانی / آسیب نوشته شده را پیاده‌سازی کرد. این رویکرد چندین پیامد LCI (مانند جریان‌های اولیه و سایر مداخلات) را با استفاده از پانزده دسته‌ی متوسط مرتبط می‌کند: سلامت انسان (HH)، کیفیت اکوسیستم (EQ)، تغییرات آب و هوا (CC) و منابع (R).

تحلیل حساسیت

تجزیه و تحلیل حساسیت همه چیز در مورد تجزیه و تحلیل منابع عدم قطعیت در ورودی‌های یک مدل یا سیستم ریاضی و اثرات آن‌ها بر خروجی مدل یا سیستم است [۱۵]. با ایجاد تغییرات ۱۰ درصدی در اطلاعات و ضریب خروجی، می‌توانیم تجزیه و تحلیل حساسیت چهار دسته آسیب را انجام دهیم. چهار پیامد آسیب به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته می‌شوند و متغیرهای مستقل ترکیبات سوخت شامل درصد افزودنی‌ها در نمونه سوخت‌ها، در فرآیند احتراق هستند. پارامترها و چندین تجزیه و تحلیل با استفاده از صفحه گسترده Excel 2019 محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، از نرم‌افزار SimaPro V8.2.3 برای انجام تحقیقات بر روی دسته‌بندی LCA استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

خواص فیزیکی - حرارتی

بخش اول از ارائه نتایج، مقادیر مربوط به خواص فیزیکی-حرارتی نمونه سوخت‌ها را ارائه می‌دهد. این مقادیر با استفاده از استانداردها و روش‌های ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها به دست آمدند. جدول ۴ مقادیر مربوط به گرانشی، چگالی، نقطه اشتعال، نقطه ابری شدن و ارزش حرارتی سوخت را به عنوان اصلی‌ترین خواص نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد.

جدول ۴- خواص فیزیکی- حرارتی نمونه سوخت‌ها

Table 4- Physical-thermal properties of fuel samples

Samples	Viscosity (mm ² /s)	Density (g/cm ³)	Flash point (Centigrade)	Cloud point (Centigrade)	Calorific value (MJ/kg)
Control	2.812	0.864	85	1	44.02
B5	2.844	0.872	86	0	42.80
B5E3	2.843	0.871	87	-2	42.70
B5E5	2.841	0.867	85	-3	42.66
B5E7	2.837	0.865	84	-3	42.67
B5Et3	2.846	0.871	86	-1	42.68
B5Et5	2.847	0.872	86	-2	42.66
B5Et7	2.847	0.874	87	-2	42.65
B5E3Et3	2.844	0.869	85	-3	42.68
B5E5Et3	2.841	0.870	85	-4	42.67
B5E7Et3	2.836	0.871	85	-4	42.67
B5E3Et5	2.844	0.871	86	-5	42.66
B5E5Et5	2.841	0.871	86	-4	42.66

² Human health

³ Ecosystem quality

⁴ Climate change

⁵ Resources

Samples	Viscosity (mm ² /s)	Density (g/cm ³)	Flash point (Centigrade)	Cloud point (Centigrade)	Calorific value (MJ/kg)
B5E7E5	2.838	0.872	85	-5	42.65
B5E3E7	2.844	0.872	87	-4	42.65
B5E5E7	2.841	0.872	86	-5	42.64
B5E7E7	2.839	0.873	86	-6	42.63

بر اساس آنچه در جدول ۴ ارائه شده است، افزودن بیودیزل، دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات، باعث کاهش ارزش حرارتی سوخت شده است. این می‌تواند به دلیل ارزش حرارتی پایین بیودیزل، دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات نسبت به سوخت دیزل باشد. از طرفی دیگر، افزودن دی متیل کربنات به B5 باعث کاهش دانسیته و گرانروی نمونه‌ها و افزودن دی اتیلن گلیکول باعث افزایش دانسیته و گرانروی نمونه سوخت‌ها شده است. این ویژگی نمونه سوخت‌ها می‌تواند بر رفتار احتراقی نمونه سوخت‌ها تأثیر بگذارد.

افزودن دی متیل کربنات باعث کاهش دمای اشتعال و دمای نقطه ابری شدن شده است. از طرفی دیگر افزودن دی اتیلن گلیکول هم رفتاری مشابه با اتانول به نمونه سوخت‌ها در دمای نقطه ابری شدن و نقطه اشتعال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، افزودن دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول مقادیر ارزش حرارتی سوخت را نسبت به سوخت دیزل و B5 کاهش داده است. یکی از اصلی‌ترین دلایل، وجود محتوای اکسیژن بالا در دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول است.

نتایج آزمون عملکردی موتور

این بخش به ارائه نتایج عملکردی موتور از نقطه نظر توان تولیدی و مصرف سوخت ویژه ترمزی می‌پردازد. شکل ۴ نتایج حاصل از عملکرد موتور دیزل را در حضور نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست آمده نمونه سوخت دیزل بالاترین توان ترمزی را تولید می‌کند. با افزودن دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات، توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد. این کاهش در افزودن دی متیل کربنات حساسیت کمتری نسبت به افزودن دی اتیلن گلیکول دارد.

دلیل این کاهش توان ترمزی می‌تواند کم بودن ارزش حرارتی دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات نسبت به سوخت دیزل باشد. لازم به ذکر است، افزودن بیودیزل نیز موجب کاهش توان تولیدی به دلیل کم بودن ارزش حرارتی آن نسبت به سوخت دیزل است.

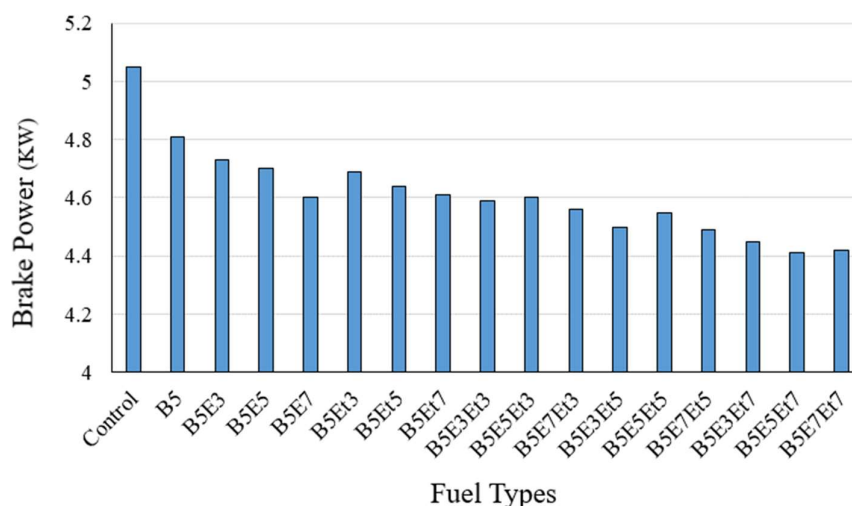


Figure 4- The results of engine output power in the presence of fuel samples

شکل ۴- نتایج توان تولیدی موتور در حضور نمونه سوخت‌ها

شکل ۵ نتایج حاصل از مصرف سوخت ویژه ترمزی را نشان می‌دهد. این تغییرات را می‌توان دقیقاً برعکس روند تغییرات توان ترمزی دانست.

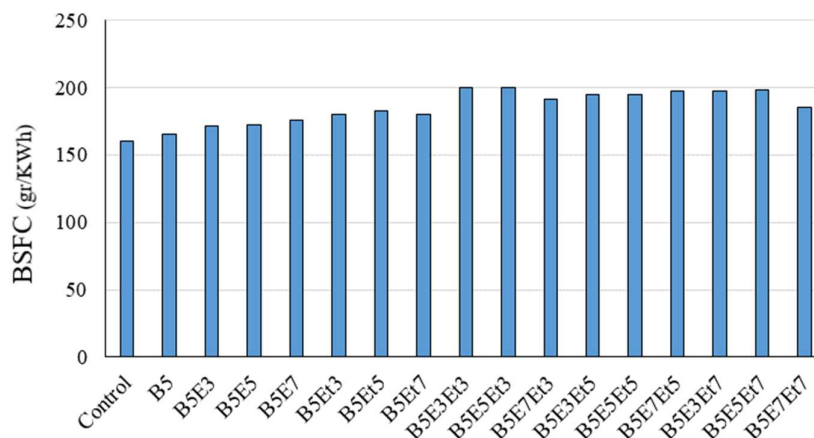


Figure 5- The results of special braking fuel consumption

شکل ۵- نتایج حاصل از مصرف سوخت ویژه ترمزی

مطابق با شکل ۵ می‌توان عنوان کرد افزودن بیودیزل و افزودنی‌های دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول موجب افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی به دلیل کاهش توان تولیدی و کاهش ارزش حرارتی سوخت می‌شود. بالاترین مصرف سوخت مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ و ۵ درصد دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول است. در حالی که کمترین مصرف سوخت ویژه ترمزی مربوط به نمونه سوخت دیزل است.

نتایج آنالیز اکسرژی

بخش اول از این قسمت به ارائه نتایج مربوط به اکسرژی ورودی نسبت به سوخت دیزل را ارائه می‌دهد که شامل اکسرژی حمل شده توسط سوخت و هوا است. شکل ۶ نتایج مربوط به اکسرژی ورودی از سوخت‌های مختلف را در مقایسه با سوخت دیزل نشان می‌دهد.

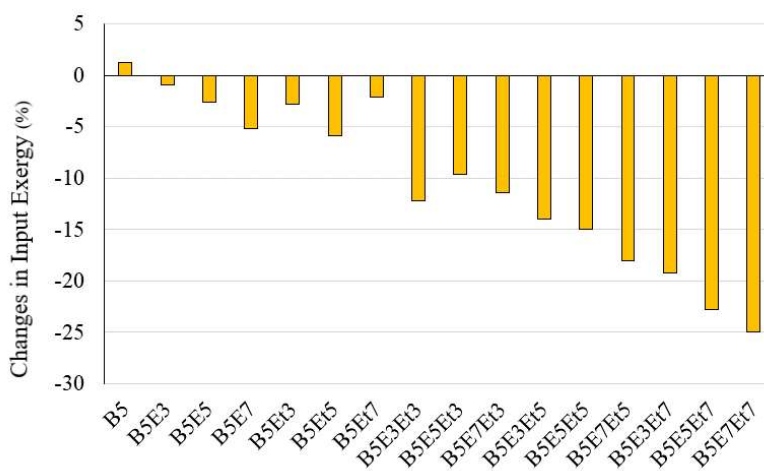


Figure 6- Input exergy changes compared to the control

شکل ۶- تغییرات اکسرژی ورودی نسبت به کنترل

مطابق با شکل ۶ افزودن بیودیزل به میزان ۵ درصد موجب افزایش نسبی اکسرژی ورودی و در سایر سوخت‌ها به طور نسبی موجب کاهش اکسرژی ورودی شده است. کمترین کاهش مربوط به نمونه سوخت B5E3 و بیشترین کاهش مربوط به نمونه سوخت B5E7Et7 است. افزودن دی متیل کربنات موجب کاهش اکسرژی ورودی شده است که این کاهش در نمونه سوخت‌های حاوی دی اتیلن گلیکول کمتر است. این روند نشان می‌دهد در مورد اکسرژی ورودی، افزودنی دی اتیلن گلیکول بهترین عملکرد را نسبت به دی متیل کربنات داشته است.

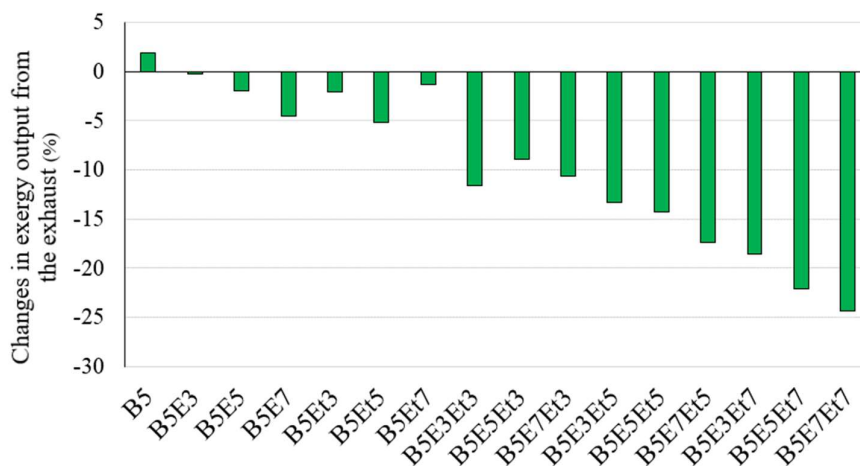


Figure 7- Changes in exergy output from the exhaust compared to the control

شکل ۷- تغییرات اکسرژی خروجی از آگروز نسبت به کنترل

شکل ۷ نتایج مربوط به اکسرژی خروجی از آگروز نمونه سوخت‌های مختلف را نسبت به کنترل نشان می‌دهد. بر اساس آنچه در شکل ۷ ارائه شده است، افزایش مقادیر افزودنی‌ها باعث کاهش اکسرژی خروجی از آگروز نسبت به کنترل می‌شود. یکی از دلایل می‌تواند کاهش اکسرژی ورودی با افزایش مقادیر افزودنی‌ها باشد. دلیل دیگر می‌تواند افزایش بازدهی کل نمونه سوخت های حاوی افزودنی‌های اکسیژن‌دار باشد.

شکل ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر تغییرات اکسرژی شافت و درصد آن نسبت به اکسرژی ورودی در مقایسه نمونه سوخت‌ها نسبت به کنترل را ارائه می‌دهد.

بر اساس آنچه در شکل ۸ مشخص است، افزودن دی متیل کربنات نسبت به دی اتیلن گلیکول بیشتر باعث کاهش اکسرژی شافت شده است. این می‌تواند به دلیل محتوای اکسیژن این دو افزودنی نسبت به یکدیگر باشد. همچنین می‌توان عنوان کرد در مقایسه با اکسرژی ورودی، حضور افزودنی‌ها باعث افزایش نسبت اکسرژی شافت به اکسرژی ورودی شده است. به عبارت دیگر، حضور افزودنی‌ها باعث شده مقادیر بیشتری از اکسرژی ورودی به کار مفید تبدیل شود. یکی از اصلی‌ترین دلایل، محتوای اکسیژن این افزودنی‌ها است که می‌تواند فرایند احتراق را بهبود داده و کار مفید بیشتری را به کاربر ارائه دهد.

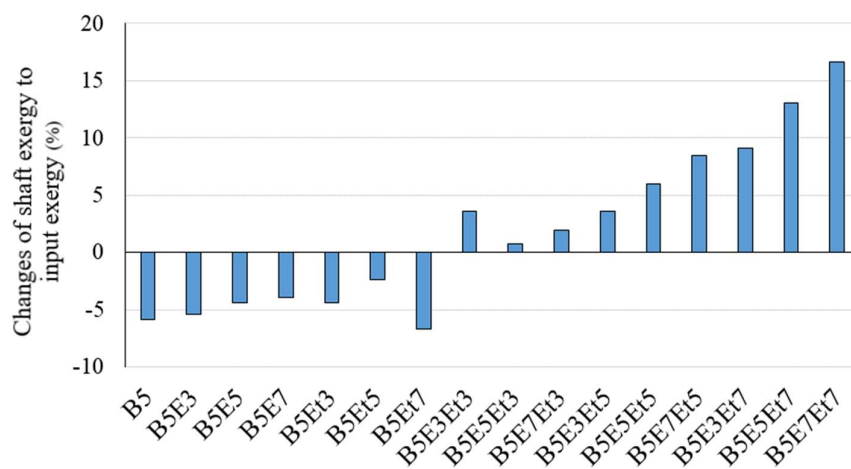


Figure 8- Changes of shaft exergy to input exergy
 شکل ۸- تغییرات اکسرژی شافت به اکسرژی ورودی

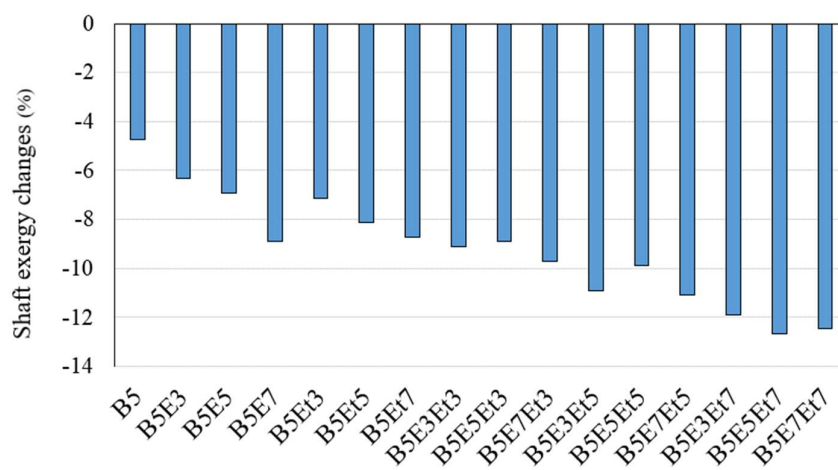


Figure 9- Shaft exergy changes compared to the control
 شکل ۹- تغییرات اکسرژی شافت نسبت به کنترل

مرحله نهایی در بررسی و آنالیز اکسرژی، بررسی مقادیر اکسرژی تخریب شده است. این مقدار اکسرژی همان کار مفیدی است که از دسترس خارج شده است. بر همین اساس، می‌توان به عینه مشاهده کرد که هر کدام از نمونه سوخت‌ها نسبت به سوخت شاهد چه میزان از کار مفید را تخریب کرده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، حضور افزودنی‌ها به طور متوسط حدود ۲۰ درصد نسبت اکسرژی شافت به اکسرژی ورودی را افزایش داده‌اند. شکل ۹ مقادیر اکسرژی تخریب شده را برای نمونه سوخت‌ها ارائه می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، مقادیر اکسرژی تخریب شده با حضور افزودنی‌ها کاهش می‌یابد. برای بررسی بیشتر و بهتر می‌توان درصد اکسرژی تخریب شده را نسبت به اکسرژی ورودی بررسی کرد. شکل ۱۱ درصد اکسرژی تخریب شده نسبت به اکسرژی ورودی را نشان می‌دهد.

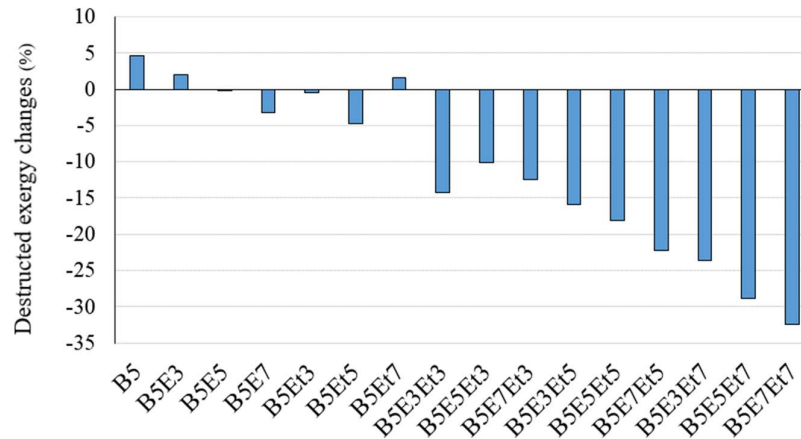


Figure 10- Destroyed exergy changes
شکل ۱۰- تغییرات اکسرژی تخریب شده

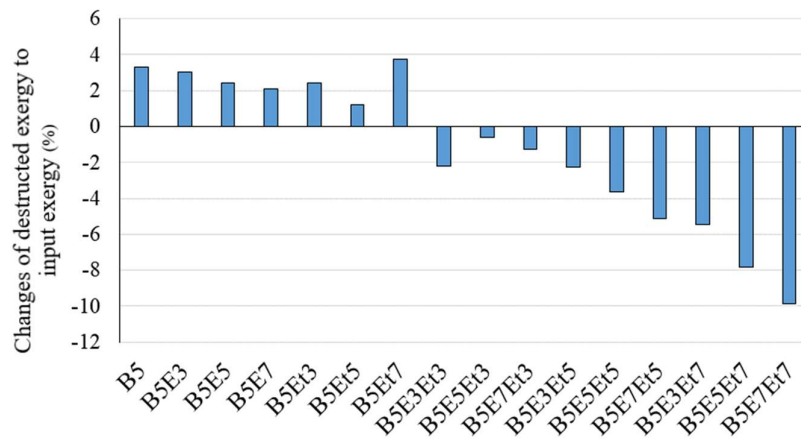


Figure 11- Changes of destroyed exergy to input exergy
شکل ۱۱- تغییرات اکسرژی تخریب شده به اکسرژی ورودی

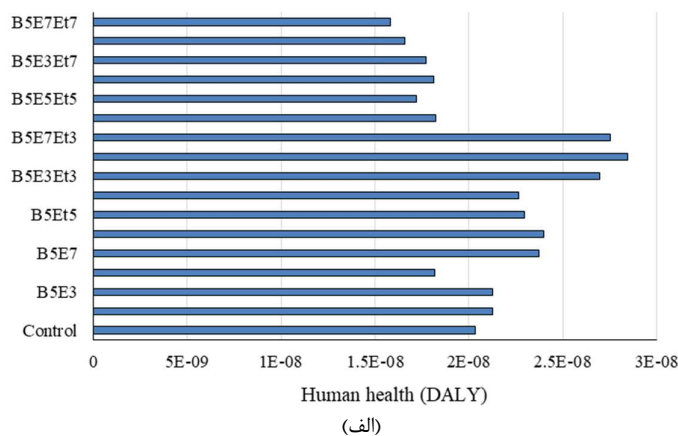
مطابق با شکل ۱۱ می توان دریافت، حضور افزودنی ها باعث کاهش درصد اکسرژی تخریب شده نسبت به اکسرژی ورودی از حدود ۴ تا ۱۰- درصد شده است. کاهش این نسبت در تلفیق افزودنی ها، بالاترین مقدار را داشته است (به طور متوسط حدود ۱۰ درصد). این روند نشان می دهد، تأثیر متقابل افزودنی ها باعث افزایش کار مفید در موتور دیزلی نسبت به سوخت دیزل می شود. به نحوی که می تواند مثرتر بودن تأثیر افزودنی اکسیژن دار در بهبود فرایند احتراق را نشان دهد. از طرف دیگر، افزایش بار موتور به طور نسبی باعث شده است اکسرژی تخریب شده کاهش یافته و کار مفید بیشتری تولید شود. یکی از دلایل، افزایش فشار داخل محفظه احتراق و به دنبال آن افزایش دمای داخل محفظه احتراق و افزایش راندمان موتور است.

در حالت کلی می توان گفت، بهترین نوع نمونه سوخت ها، افزودن تلفیقی افزودنی های بیودیزل، دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول است. در این مطالعه، نمونه سوخت های $B_5E_3Et_3$ ، $B_5E_3Et_5$ و $B_5E_3Et_7$ می توانند به عنوان سوخت هایی با درصد تخریب اکسرژی کمتر برای بار عملکردی ۱۰۰ درصد انتخاب شوند. بر اساس مشاهدات، بهترین بار عملکردی موتور نزدیک به بار بیشینه موتور است. کومار و راتو (۲۰۱۷) بهترین بار عملکردی موتور را با ۹۵ درصد اعلام کردند. همچنین نجفی و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه ای برای بهینه سازی شرایط عملکردی موتور انجام دادند و بهترین بار عملکردی موتور را با ۹۰ درصد اعلام

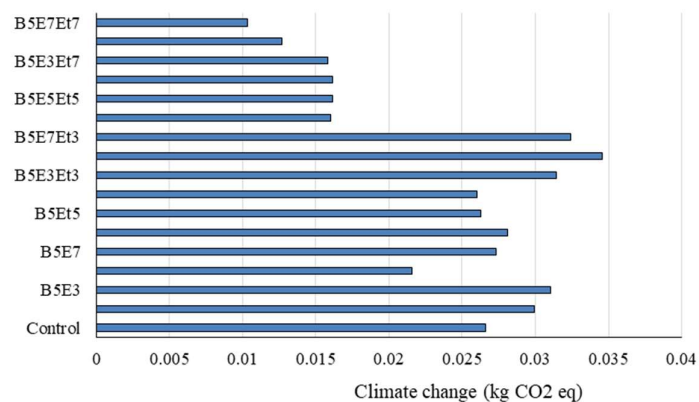
کردند. همان‌طور که مشخص است، موتورهای دیزل در بارهای نزدیک به بار کامل بهترین عملکرد را نسبت به شرایط عملکردی برخه بار ایجاد می‌کنند.

نتایج آنالیز اثرات زیست محیطی

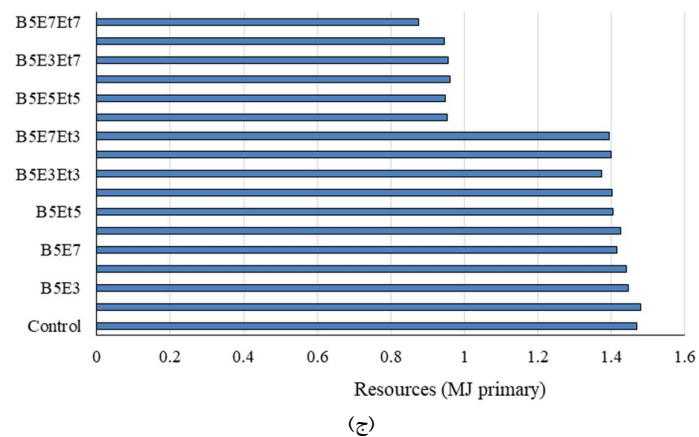
در این بخش نتایج مربوط به آنالیزهای زیست محیطی از نقطه نظر تأثیرات پایانی ارزیابی چرخه حیات مورد بحث قرار گرفت.



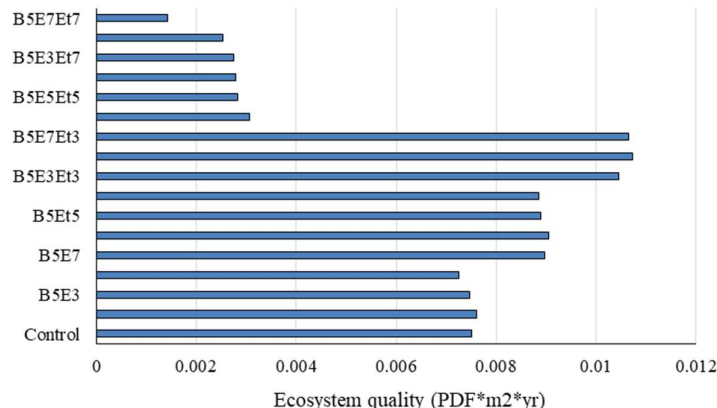
(الف)



(ب)



(ج)



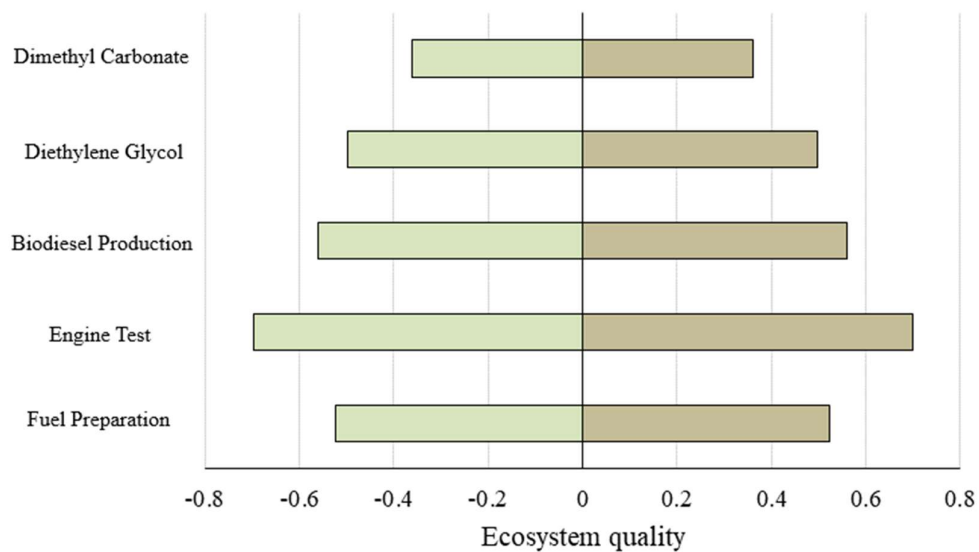
(د)

Figure 12- Changes in environmental impacts. a) human health, b) climate change, c) resource quality, d) ecosystem quality
 شکل ۱۲- تغییرات تأثیرات زیست‌محیطی. الف) سلامت انسان، ب) تغییرات آب و هوایی، ج) کیفیت منابع، د) کیفیت اکوسیستم

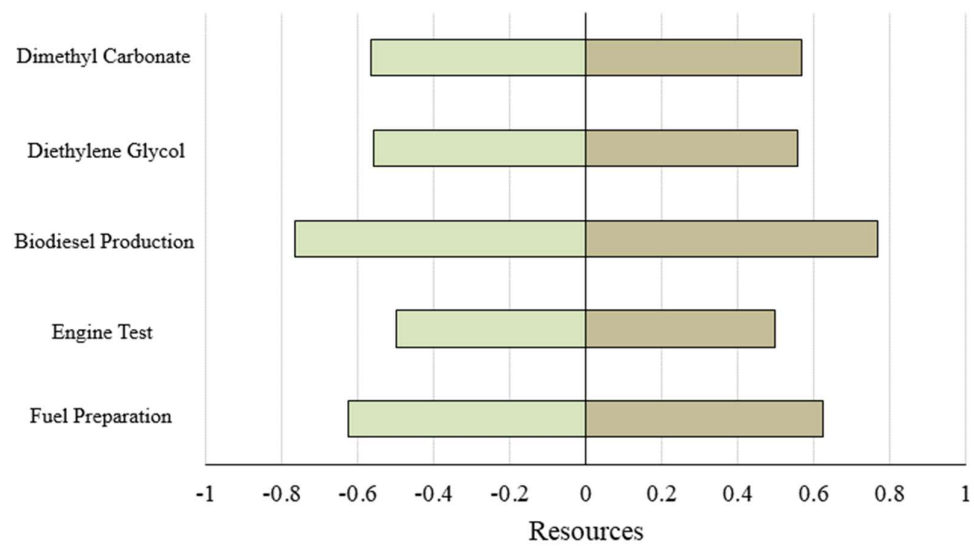
همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است، افزودن دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول به تنهایی حتی در برخی مواقع مانند تغییرات آب و هوایی، سلامت انسان و کیفیت منابع تأثیرات زیست‌محیطی را نسبت به سوخت دیزل افزایش می‌دهد. اما زمانی که هر دو با هم تلفیق می‌شوند، تأثیرات زیست‌محیطی کاهش می‌یابد. یکی از دلایل این امر می‌تواند به بهبود کیفیت احتراق در حضور افزودنی‌های اکسیژن دالالت داشته باشد. به این صورت که ممکن است خواص افزودنی‌ها به تنهایی از برخی منظر کاستی‌هایی داشته باشد که تلفیق اینها بتواند این کاستی‌ها را مرتفع کند.

این یافته‌ها می‌تواند به یافته‌های اکسرژی هم ارتباط داشته باشد. به این صورت که با تلفیق افزودنی‌ها می‌توان دریافت نسبت تخریب اکسرژی به اکسرژی ورودی کاهش قابل توجهی داشته است. بر این اساس می‌توان عنوان کرد، برای بررسی عملکرد یک موتور، علاوه بر تست‌های عملکرد و آلاینده‌گی نیاز است آنالیزهای جانبی مانند تحلیل اکسرژی- زیست‌محیطی نیز انجام گیرد. در این مطالعه توان ترمزی موتور مطابق با شکل ۴ با افزودن تلفیقی از دی‌متیل کربنات و دی‌اتیلن گلیکول کاهش یافته است و مطابق با شکل ۵، مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز افزایش یافته است. در نگاه اول می‌توان عنوان کرد تلفیق این افزودنی‌ها گزینه مناسبی برای یک موتور دیزلی نیست. اما با انجام بررسی‌ها و آنالیزهای جانبی می‌توان مشاهده کرد با افزودن تلفیقی از این افزودنی‌ها، کار خالص به دست آمده از موتور بهبود می‌یابد و از طرفی دیگر تأثیرات زیست‌محیطی بر روی چهار شاخص اصلی که در کوتاه مدت و بلند مدت می‌تواند سلامت محیط زیست و موجودات زنده را مورد بررسی قرار دهد کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان عنوان کرد صرف آنالیز عملکردی موتور نمی‌تواند به تنهایی گزینه مناسبی برای بررسی کیفیت یک سوخت باشد.

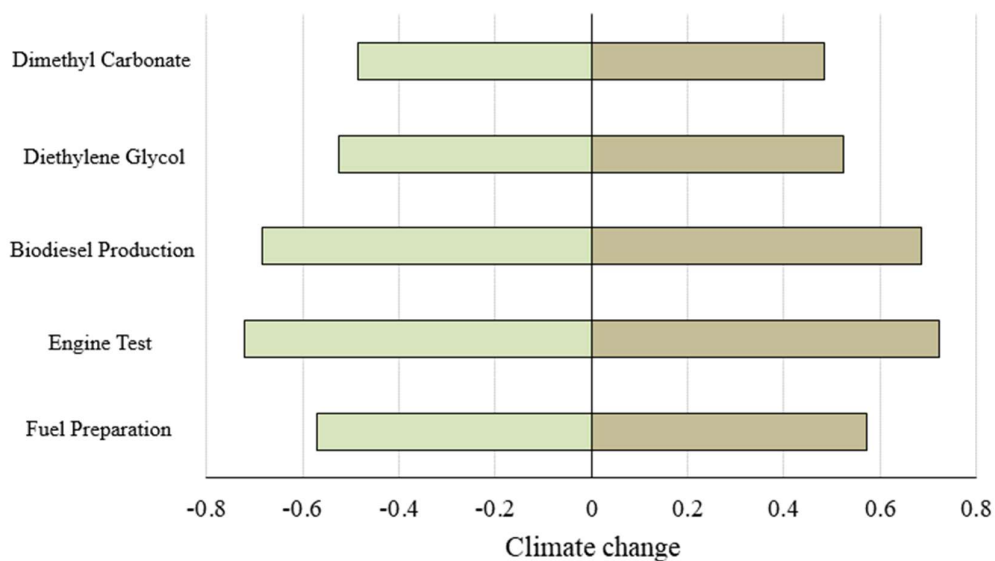
شکل ۱۳ نتایج به‌دست آمده از آنالیز حساسیت را ارائه می‌دهد. این آنالیز نشان می‌دهد که کدام نهاد به‌دست آمده و کدام نهاد کمترین تأثیر را بر روی پارامترهای زیست‌محیطی دارد. در واقع این آنالیز چرخه بررسی را از نقطه نظر تأثیرات فرایندها و نهاده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهد.



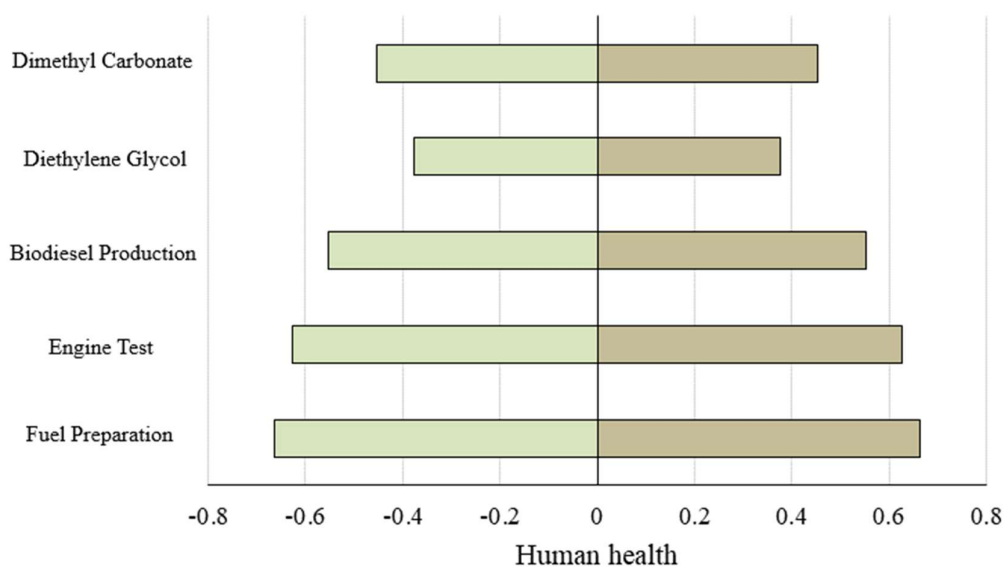
(الف)



(ب)



(د)



(ج)

Figure 13- The result of sensitivity analysis on environmental impacts. a) human health, b) climate change, c) resource quality, d) ecosystem quality

شکل ۱۳- نتیجه آنالیز حساسیت بر روی تأثیرات زیست‌محیطی. الف) سلامت انسان، ب) تغییرات آب و هوایی، ج) کیفیت منابع، د) کیفیت اکوسیستم

مطابق با نتایج به‌دست آمده از شکل ۱۳ می‌توان عنوان کرد، افزودن افزودنی‌های دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات کمترین تأثیر را به‌طور متوسط نسبت به سایر نهاده‌ها دارند. از طرفی دیگر، تست موتور به جز در تأثیر روی کیفیت منابع در

سایر پارامترها، تأثیر به سزایی دارد. تولید بیودیزل نیز به دلیل فرایندهایی که در مراحل تولید آن انجام می‌گیرد، بالاترین تأثیر را در کیفیت منابع از خود به‌جای می‌گذارد. بررسی این تأثیرات، می‌تواند محققان را در طول مراحل آزمایشات بیشتر راهنمایی کند تا بتوانند با دستیابی به یک استراتژی مطمئن در راستای تولید انرژی پایدار حرکت کنند.

نتیجه‌گیری

ارزیابی عملکرد موتور دیزل و انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از بیودیزل، دی متیل کربنات، و دی اتیلن گلیکول به عنوان افزودنی‌های سوخت اکسیژن‌دار از طریق روش تحلیل اکسرژی- زیست‌محیطی چشم‌انداز پیچیده‌ای از مبادلات را برجسته می‌کند. در حالی که این افزودنی‌ها مزایای بالقوه‌ای را از نظر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود بهره‌وری سوخت ارائه می‌کنند، اجرای آن‌ها نیازمند یک رویکرد ظریف است. این تحقیق بر نیاز به بررسی بیشتر در مورد فعل و انفعالات پیچیده بین این مواد افزودنی و فرآیند احتراق، به ویژه از نظر تأثیر آن‌ها بر تخریب انرژی و تشکیل آلاینده‌ها تأکید می‌کند. علاوه بر این، اثرات بلندمدت این مواد افزودنی بر دوام موتور، الزامات تعمیر و نگهداری و اثرات کلی محیطی نیازمند ارزیابی جامع است. به طور کلی نتایج زیر به‌دست آمد:

- مطابق با نتایج به‌دست آمده نمونه سوخت دیزل بالاترین توان ترمزی را تولید می‌کند. با افزودن دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات، توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد.
- افزودن بیودیزل و افزودنی‌های دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول موجب افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی به دلیل کاهش توان تولیدی و کاهش ارزش حرارتی سوخت می‌شود.
- افزودن بیودیزل به میزان ۵ درصد موجب افزایش نسبی اکسرژی ورودی و در سایر سوخت‌ها به‌طور نسبی موجب کاهش اکسرژی ورودی شده است.
- افزایش مقادیر افزودنی‌ها باعث کاهش اکسرژی خروجی از آگروز نسبت به کنترل می‌شود.
- افزودن دی متیل کربنات نسبت به دی اتیلن گلیکول بیشتر باعث کاهش اکسرژی شافت شده است.
- حضور افزودنی‌ها به‌طور متوسط حدود ۲۰ درصد نسبت اکسرژی شافت به اکسرژی ورودی را افزایش داده‌اند.
- حضور افزودنی‌ها باعث کاهش درصد اکسرژی تخریب شده نسبت به اکسرژی ورودی از حدود ۴ تا ۱۰ درصد شده است.
- افزودن افزودنی‌های دی اتیلن گلیکول و دی متیل کربنات کمترین تأثیر زیست محیطی را به‌طور متوسط نسبت به سایر نهاده‌ها دارند. از طرفی دیگر، تست موتور به جز در تأثیر روی کیفیت منابع در سایر پارامترها، تأثیر به سزایی دارد.
- بهترین نوع نمونه سوخت‌ها، افزودن تلفیقی افزودنی‌های بیودیزل، دی متیل کربنات و دی اتیلن گلیکول است. در این مطالعه، نمونه سوخت‌های B5E3Et3, B5E3Et5 و B5E3Et7 می‌توانند به عنوان سوخت‌هایی با درصد تخریب اکسرژی کمتر برای بار عملکردی ۱۰۰ درصد باشند. بر اساس مشاهدات، بهترین بار عملکردی موتور نزدیک به بار بیشینه موتور است.

منابع

- [1] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, S. Amid, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, B. Khoshnevisan, and G. J. R. E. Kianian, "Life cycle assessment analysis of an ultrasound-assisted system converting waste cooking oil into biodiesel," vol. 151, pp. 1352-1364, 2020.
- [2] S. Faizollahzadeh Ardabili, B. Najafi, S. J. E. P. Shamshirband, and S. Energy, "Fuzzy logic method for the prediction of cetane number using carbon number, double bounds, iodine, and saponification values of biodiesel fuels," vol. 38, no. 2, pp. 584-599, 2019.
- [3] J. Ghazanfari, B. Najafi, S. Faizollahzadeh Ardabili, and S. Shamshirband, "Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard," *Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 1411221, 2017.
- [4] A. Hashemi-Nejhad, B. Najafi, S. Ardabili, G. Jafari, and A. Mosavi, "The Effect of Biodiesel, Ethanol, and Water on the Performance and Emissions of a Dual-Fuel Diesel Engine with Natural Gas: Sustainable Energy Production through a Life Cycle Assessment Approach," *International Journal of Energy Research*, vol. 2023, 2023.
- [5] M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, B. Najafi, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, S. Faizollahzadeh Ardabili, E. Akbarian, E. Khalife, P. Mohammadi, H. Rastegari, H. S. Ghaziaskar, "Environmental impact assessment of the mechanical shaft work produced in a diesel engine running on diesel/biodiesel blends containing glycerol-derived triacetin," vol. 223, pp. 466-486, 2019.
- [6] R. K. Saluja, V. Kumar, and R. Sham, "Stability of biodiesel—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 866-881, 2016.
- [7] 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.
- [8] A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. J. i. j. o. h. e. Aydin, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines," vol. 35, no. 20, pp. 11366-11372, 2010.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] S. Srihari, S. Thirumalini, and K. Prashanth, "An experimental study on the performance and emission characteristics of PCCI-DI engine fuelled with diethyl ether-biodiesel-diesel blends," *Renewable energy*, vol. 107, pp. 440-447, 2017.
- [13] N. Banapurmath, W. M. Budzianowski, Y. Basavarajappa, R. Hosmath, V. Yaliwal, and P. J. I. J. o. S. E. Tewari, "Effects of compression ratio, swirl augmentation techniques and ethanol addition on the combustion of CNG—biodiesel in a dual-fuel engine," vol. 7, no. 1, pp. 55-70, 2014.
- [14] 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.
- [15] F. H. Shoar, B. Najafi, and A. Mosavi, "Effects of triethylene glycol mono methyl ether (TGME) as a novel oxygenated additive on emission and performance of a dual-fuel diesel engine fueled with natural gas-diesel/biodiesel," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1172-1189, 2021.
- [16] 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.
- [17] S. SenthilKumar and K. Rajan, "Performance and emission characteristics of diesel engine using biodiesel with the effect of dimethyl carbonate (DMC) fumigation," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 2, pp. 2986-2998, 2022.
- [18] B. Venkanna and C. V. Reddy, "Performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on blends of honne oil/diesel fuel/kerosene/DMC," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 48-57, 2011.
- [19] S. Amid, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, A. Hajiahmad, B. Najafi, H. S. Ghaziaskar, H. Rastegari, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, P. Mohammadi, "Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel

- oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends, " *Energy Conversion Management*, vol. 203, p. 112245, 2020.
- [20] O. I. Awad, X. Ma, M. Kamil, O. M. Ali, Y. Ma, and S. Shuai, "Overview of polyoxymethylene dimethyl ether additive as an eco-friendly fuel for an internal combustion engine: Current application and environmental impacts, " *Science of the total environment*, vol. 715, p. 136849, 2020.
- [21] J. Börjesson, R. Peterson, and F. Tjerneld, "Enhanced enzymatic conversion of softwood lignocellulose by poly (ethylene glycol) addition, " *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 754-762, 2007.
- [22] R. Pourdarbani, S. Ardabili, E. Akbarpouran, and J. L. Hernandez-Hernandez, "Exergo-Environmental Optimization of a Diesel Engine, " *Acta Technologica Agriculturae*, vol. 25, no. 3, pp. 157-168, 2022.
- [23] M. Demirbas and M. K. Yesilyurt, "Investigation of the behaviors of higher alcohols in a spark-ignition engine as an oxygenated fuel additive in energy, exergy, economic, and environmental terms, " *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, no. 10, pp. 4427-4462, 2023.
- [24] 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.
- [25] F. Hashemi, R. Pourdarbani, S. Ardabili, and J. L. Hernandez-Hernandez, "Life Cycle Assessment of a Hybrid Self-Power Diesel Engine, " *Acta Technologica Agriculturae*, vol. 26, no. 1, pp. 17-28, 2023.
- [26] T. M. Gundoshmian, S. Ardabili, M. Csaba, and A. Mosavi, "Modeling and optimization of the oyster mushroom growth using artificial neural network: Economic and environmental impacts, " *Mathematical Biosciences Engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 9749-9768, 2022.

English Abstract

Evaluation of diesel engine performance and emissions in the presence of biodiesel, dimethyl carbonate, and diethylene glycol as oxygenated fuel additives from the point of view of Exergoenvironmental method

Hasan Vahdati¹, Habib Kolahdooz^{2*}

1- Master's student, Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Esfaryen Branch, Esfaryen, vahdatihasan.research@gmail.com

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Esfaryen Branch, Esfaryen, habib.kolahdooz@iau.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/11/23, Received in revised form: 2025/01/03, Accepted: 2025/01/03)

The present study investigates the effect of oxygenated fuel additives on diesel engine performance. Publications aim to evaluate these additives not only from the point of view of performance but also by considering environmental factors through the lens of the extra-environmental method. This research evaluates diesel engine performance using conventional and oxygenated fuel blends, focusing on biodiesel, dimethyl carbonate (DMC), and diethylene glycol (DEG), including comparing fuel efficiency, emissions, and engine behavior with these additives. This study uses the exergoenvironmental method to understand environmental implications, integrating exergy analysis with environmental considerations. The results show that using these oxygen additives affects engine performance and greenhouse gas emissions. Adding biodiesel reduces greenhouse gas emissions, such as particulate matter and nitrogen oxides. At the same time, DMC and DEG also help reduce emissions but have different effects on engine efficiency. Environmental externality analysis provides a comprehensive perspective on these fuel additives' environmental costs and benefits. Overall, this study provides insights into how oxygenated fuel additives can affect diesel engine performance and emissions, emphasizing the importance of balancing performance with environmental impact. These findings contribute to the continued exploration of cleaner fuel alternatives in diesel engines, focusing on optimizing engine performance and environmental sustainability.

Keywords: Biodiesel, bioenergy, sustainable production, exergy, fuel additive