

ارزیابی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل دوسوخته در حضور بیودیزل، و نانوذرات فتوکاتالیستی از نقطه نظر روش آنالیز اقتصادی

رامین عرب عامری^۱، حبیب کلاهدوز^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسفراین، اسفراین، raminameri.research@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: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱)

چکیده: هدف این تحقیق ارزیابی عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای از نقطه نظر ارزیابی اقتصادی مراحل تولید توان است. رویکرد دوسوخته، دیزل سنتی را با بیودیزل ترکیب می‌کند و راهی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش محتوای تجدیدپذیر در سوخت ارائه می‌دهد. این مطالعه اثرات این افزودنی‌ها را بر عملکرد موتور، با تمرکز بر معیارهای کلیدی مانند توان خروجی، بازده سوخت و گشتاور ارزیابی می‌کند. مراحل انجام این پژوهش شامل آزمایش یک موتور دیزل دوسوخته (احتراق هم‌زمان سوخت گاز و مایع) با نسبت‌های مختلف بیودیزل و دیزل سنتی، همراه با انواع و غلظت‌های مختلف نانوذرات فتوکاتالیستی است. تجزیه و تحلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای بر روی آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن (NOx)، ذرات معلق (PM) و دی‌اکسید کربن (CO2) متمرکز است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل و نانوذرات فتوکاتالیستی در یک موتور دیزل دوسوخته می‌تواند منجر به بهبود راندمان احتراق و انتشار کمتر آلاینده‌های زیست‌شود. روش آنالیز اقتصادی نقاط ضعف و قوت فرایند احتراق را در دستیابی به مورد مقرون‌به‌صرفه بودن این رویکرد ارائه می‌دهد و صرفه‌جویی بالقوه ناشی از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های تولید توان را برجسته می‌کند.

کلید واژگان: موتور دوسوخته، سوخت دیزل، اثرات زیست‌محیطی، توان پایدار، آنالیز اقتصادی

مقدمه

موتورهای دیزل همچنان نقش محوری را در بخش‌های مختلف از جمله حمل و نقل، کشاورزی و کاربردهای صنعتی ایفا می‌کنند. با این حال، نگرانی‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی آن‌ها، به‌ویژه در مورد انتشار آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق، مونوکسید کربن و هیدروکربن‌ها، اکتشاف استراتژی‌های نوآورانه برای افزایش عملکرد و کاهش انتشار آلاینده‌ها را ضروری می‌سازد [۱، ۲].

امروزه حفظ و نگهداری از منابع انرژی و محیط زیست جزو مباحث مهم در بخش‌های حمل و نقل و صنایع است. در پاسخ به این نیازها، شرکت‌های بزرگ خودروسازی و مراکز تحقیقاتی زیادی در حال توسعه تکنولوژی‌های جدید موتور هستند تا بتوانند از مقررات آلاینده‌های منتشره از آگروز پیروی کنند. اگرچه یک موتور دیزل با بازده حرارتی بالا مزیت کاهش مصرف انرژی را دارد، اما اشکالاتی در خصوص انتشار آلاینده‌ها دارد. موتور دیزل آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده بیشتری نسبت به موتور بنزینی منتشر می‌کند [۳، ۴].

بیودیزل به‌عنوان یک سوخت جایگزین برای سوخت دیزل، توانایی کاهش آلاینده‌گی موتور (ذرات معلق، مونوکسیدهای کربن، مونوکسیدهای کربن و هیدروکربن‌ها) را نسبت به سوخت دیزل دارد. ولی از طرفی دیگر در مقابل این مزایا دارای معایبی نیز است. از جمله این معایب می‌توان به کم بودن پایداری اکسیدی شدن، و افزایش نشر آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن اشاره

کرد. اکسیداسیون بیودیزل منجر به تشکیل هیدروپراکسید می‌شود که موجب تولید رسوبات غیرقابل حل می‌شود و باعث از بین رفتن، خرابی و ایجاد رسوب در فیلترها و انژکتور می‌شود. محصولات نهایی اکسیداسیون نیز گرانبوی سوخت را افزایش می‌دهد که منجر به اتمیزه شدن ضعیف سوخت می‌شود. در نتیجه منجر به وارد شدن بیودیزل به محفظه میل لنگ و ایجاد رسوب با روغن روان کننده می‌شود که می‌تواند موجب ایجاد آسیب‌های جدی به موتور شود [۵، ۶].

در طولانی مدت آلودگی‌های منتشر شده از موتور دیزل برای سلامتی انسان مضر است، لذا در جوامع پیشرفته، استانداردهای سختگیرانه‌تری برای کاهش آلاینده‌ها وضع شده‌است. از این رو تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با بهبود عملکرد موتور دیزل و کاهش آلودگی‌های خروجی از اگزوز آن در حال انجام است.

روش دیگر، استفاده از افزودنی‌های پر انرژی در راستای بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های ناشی از مصرف سوخت است. افزودنی‌ها را می‌توان در چند گروه دسته بندی کرد. گروه اول افزودنی‌های اکسیژن‌دار هستند. پر کاربردترین این افزودنی‌ها شامل متانول، اتانول، گلیسرین تری استات، تری استین، استون و غیره می‌باشند [۷، ۸]. حضور محتوای اکسیژن در این افزودنی‌ها موجب کاهش آلاینده‌های موتور (به‌خصوص انتشار ذرات معلق) و کمک به انجام احتراق کامل طی فرایند احتراق می‌شود [۹].

وجود اکسیژن در این افزودنی‌ها، موجب کاهش ارزش حرارتی سوخت (نسبت به سوخت دیزل) و در نتیجه موجب کاهش توان موتور می‌شود. از طرفی دیگر، برای آنکه موتور بتواند کاهش توان ناشی از کاهش ارزش حرارتی سوخت را جبران کند، نیاز به مصرف بیشتر سوخت پیدا می‌کند. بنابراین مصرف ویژه سوخت موتور نیز افزایش می‌یابد [۱۰، ۱۱].

اتخاذ احتراق دوسوخته، استفاده از بیودیزل به‌عنوان سوخت ثانویه در کنار دیزل معمولی، یک راه امیدوارکننده برای بهبود رانندگی موتور و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در حالی که بیودیزل به‌دلیل ماهیت تجدیدپذیر و ردپای کربن کمتر، مزایای زیست‌محیطی بالقوه‌ای را ارائه می‌دهد، اثرات هم‌افزایی ترکیب بیودیزل با دیزل معمولی در یک مجموعه سوخت دوگانه، به‌ویژه در مورد تأثیرات آن‌ها بر عملکرد موتور و ویژگی‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشناخته باقی مانده‌است [۱۲].

مطالعات انجام شده در زمینه احتراق موتورهای دیزل، حاکی نقش مؤثر سوخت تجدیدپذیر بیودیزل در کاهش سطح انتشارات زیست‌محیطی می‌باشند. اما در کنار کاهش این انتشارات از موتور دیزل، پایین بودن ارزش حرارتی سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل همچنین گرانبوی بالای این سوخت نسبت به سوخت دیزل باعث کاهش توان تولید شده و افزایش مصرف ویژه سوخت می‌شود. بنابراین، جبران کاهش توان تولید شده با به‌کارگیری مواد افزودنی ضروری می‌یابد. اخیراً، تحقیقات بسیاری در جهت به‌کارگیری انواع افزودنی‌ها در سوخت بیودیزل و دیزل به‌صورت تجربی اجرا شده‌اند. اما با توجه به گستره وسیع و تنوع بالای این افزودنی‌ها، نیاز به اجرای آزمایش‌های تجربی و مطالعات بیشتر در راستای معرفی ترکیب‌های مختلف از افزودنی‌های گازی و نانو، امری ضروری و مهمی شناخته می‌شود. این روند با در نظر گرفتن هزینه سوخت‌های تولید شده و به‌دنبال آن پارامترهای اقتصادی انرژی تولید شده، می‌تواند اهمیت این موضوع را برجسته‌تر کند. در سال‌های اخیر، پژوهشگران در راستای بررسی اثرات متقابل افزودنی‌های مختلف حرکت کرده‌اند تا با استفاده از حداقل مقدار افزودنی بتوانند به تأثیرات بالاتری دست یابند. بسیاری از تحقیقات نشان دادند که احتراق مخلوط‌های افزودنی‌ها باعث کاهش مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق در مقایسه با احتراق سوخت دیزل می‌شود. در همین راستا مطالعات زیر می‌توانند مدنظر قرار گیرند:

تامیلوانان و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای برای بررسی تجربی ویژگی‌های کاری موتور احتراق تراکمی با استفاده از تأثیر افزودنی‌های اکسیژن‌دار دی‌اتیل اتر و اتانول به مخلوط‌های بیودیزل انجام دادند. آزمایش‌ها بر روی یک موتور دیزلی تک سیلندر با سرعت ثابت، پاشش مستقیم و سیستم خنک‌کاری با آب تحت شرایط کاری مشابه انجام شدند. نتایج نشان داد، افزایش رانندگی حرارتی ترمز تا ۳/۷٪ و ۶/۲٪ با افزودن اتانول و افزودنی دی‌اتیل اتر در سوخت‌های مخلوط بیودیزل به‌ترتیب در شرایط حداکثر بار به‌دست می‌آید. این روند به‌دلیل وجود محتوای اکسیژن بالاتر و ماهیت فرار مواد افزودنی به وجود می‌آید. ویژگی‌های احتراق مانند فشار درون سیلندر و نرخ آزاد شدن حرارت خالص سوخت‌های حاوی افزودنی دی‌اتیل اتر به‌ترتیب ۱/۱-۵/۲٪ و ۴-۰/۴-۲/۱۷٪

بیشتر از سایر مخلوط‌ها به دست آمد. این روند عمدتاً به دلیل عدد ستان بالاتر و طبیعت فرار بالای دی‌اتیل اتر است. دی‌اتیل اتر منجر به انتشار بیشتر اکسیدهای نیتروژن می‌شود. اما کاهش ۲ تا ۹ درصدی در انتشار اکسیدهای نیتروژن برای بیودیزل با مخلوط اتانول در مقایسه با همه مخلوط‌های دیگر مشاهده می‌شود. این در نتیجه گرمای نهان تبخیر بالا و عدد ستان کمتر اتانول منجر به کاهش فشار سیلندر در حدود ۰/۴-۰/۲۶٪ می‌شود و در نهایت منجر به انتشار هیدروکربن‌ها و مونوکسیدهای کربن نسوخته بیشتر می‌شود. مطالعات انرژی و انرژی به تجزیه و تحلیل نتیجه اتانول و افزودنی دی‌اتیل اتر همراه با ترکیبی از بیودیزل کمک می‌کند. راندمان انرژی سوخت‌های ترکیبی دی‌اتیل اتر تا ۲/۳ تا ۶ درصد در مقایسه با سایر مخلوط‌ها در همه شرایط بار افزایش می‌یابد. پیشنهاد اصلی این مطالعه، بررسی تأثیرات متقابل دی‌اتیل اتر و اتانول برای پوشش معایب این دو افزودنی در مخلوط سوخت حاوی بیودیزل بود [۱۳].

پراکاش و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر افزودن پروپیل الکل به بیودیزل را در یک موتور دیزل بررسی کردند تا تأثیر آن را بر ویژگی‌های انتشار موتور دیزل مشاهده کنند. دو مخلوط سوخت با غلظت‌های مختلف بیودیزل و افزودنی‌های اکسیژن‌دار شامل ۹۵ درصد بیودیزل + ۵ درصد پروپیل الکل و ۹۰ درصد بیودیزل + ۱۰ درصد پروپیل الکل تهیه شد. نتایج نشان داد که بیودیزل در معرض افزودن پروپیل الکل ۳/۸۱، ۷/۹۹ و ۵/۳ درصد کاهش انتشار مونوکسیدهای کربن، هیدروکربن‌ها، و اکسیدهای نیتروژن نسبت به بیودیزل خالص دارد. علاوه بر این، سوخت اصلاح شده در حین کار نیازی به تغییر در طراحی موتور نداشت [۱۴].

حقیقت شعار و همکاران (۲۰۲۱) از تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر به عنوان یک افزودنی اکسیژن‌دار به دست آمده از گلیسرول با روش اتریفیکاسیون در مخلوط دیزل / بیودیزل استفاده کردند. در این مطالعه از احتراق دوسوخته با استفاده از گاز طبیعی استفاده شد. مطالعه در بار کامل و دور ۱۵۰۰ دور در دقیقه و دو سطح بیودیزل ۵ و ۲۰ درصد استفاده شد. تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر در چهار سطح (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد حجمی) به مخلوط سوخت اضافه شد. نتایج نشان داد که تبدیل و بازیافت گلیسرول به افزودنی تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر مهم است، زیرا وجود اکسیژن در ساختار شیمیایی افزودنی تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر می‌تواند آن را به یک افزودنی اکسیژن‌دار مناسب تبدیل کند. تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر به عنوان یک افزودنی اکسیژن‌دار بیشترین پارامترهای موتور را بهبود بخشید. سوخت‌های اکسیژن‌دار به فرآیند احتراق کمک کردند و آن را بهبود بخشیدند. بهترین شرایط با افزودن ۰/۲ درصد حجمی افزودنی تری اتیلن گلیکول مونو متیل اتر به سوخت دیزل در حضور ۷۰ درصد گاز طبیعی، در مقایسه با توان ترمزی احتراق معمولی دیزل و راندمان حرارتی ترمزی به ترتیب به میزان ۱۰/۵۴ و ۱۲/۷۷ درصد افزایش یافت، اما هزینه توان تولیدی ۲۰/۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین انتشار مونوکسیدهای کربن، مونوکسیدهای کربن و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب ۷۶/۷۷، ۴۰/۹، ۱/۳۱ درصد کاهش یافت [۱۵].

عمید و همکاران (۲۰۲۰) به معرفی و آزمایش یک افزودنی اکسیژن‌دار جدید مشتق از پسماند تولید بیودیزل، یعنی دی استات اتیلن گلیکول بر روی ویژگی‌های عملکرد و انتشار یک موتور دیزلی با سوخت ترکیبات دیزل / بیودیزل اختصاص یافت. سوخت دیزل معدنی و ترکیبات آن با بیودیزل در دو درصد ۵ و ۲۰ درصد در آزمایش موتور استفاده شد. این مخلوط سوخت با اتیلن گلیکول دی استات در سه سطح حجمی در محدوده ۱-۳٪ مخلوط شد. موتور تحت شرایط بار موتور متفاوت از حالت دور آرام تا بار کامل با سرعت ثابت موتور ۱۵۰۰ دور در دقیقه کار می‌کرد. به طور کلی، جذاب‌ترین نتایج زمانی به دست آمد که سوخت دیزل با دوز ۳٪ حجمی اتیلن گلیکول دی استات در شرایط بار متوسط موتور استفاده شد. این ترکیب سوخت اکسیژنه می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در انتشار اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسید کربن شود، اما می‌تواند منجر به افزایش نامطلوب در انتشار هیدروکربن نسوخته در مقایسه با سوخت دیزل بدون افزودنی شود. به طور خاص، انتشار اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسید کربن به ترتیب ۱/۹-۴/۳ و ۱/۶-۳/۱ برابر کاهش یافت، در حالی که انتشار هیدروکربن نسوخته برای ترکیب سوخت انتخابی تحت بارهای متوسط موتور ۱/۹-۳/۶ برابر افزایش یافت. انتشار مونوکسید کربن برای این ترکیب سوخت با دیزل تمیز قابل مقایسه بود. علاوه بر این، کاهش قابل توجهی در اکسیدهای نیتروژن و انتشار دی‌اکسید کربن با کاهش جزئی در راندمان حرارتی ترمز

موتور (۵٪) به دست آمد. به عنوان یک نتیجه گیری، افزودنی اکسیژن دار توسعه یافته می تواند برای فرمول بندی مجدد سوخت دیزل با هدف کاهش قابل ملاحظه انتشار اکسیدهای نیتروژن استفاده شود [۱۶].

در مطالعه ای دیگر که توسط جایابال و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، بیودیزل استخراج شده از بذر ساپوتا به روش ترانس استریفیکاسیون همراه با سوخت دیزل در یک موتور دیزل تک سیلندر با تزریق مستقیم ریل مشترک مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق تأثیر افزودنی های اکسیژن دار، زمان بندی تزریق و گردش مجدد گازهای خروجی را بر ویژگی های عملکردی و آلایندگی موتور بررسی شد. برای این منظور، افزودنی ان-بوتانول و دی متیل کربنات به عنوان افزودنی به مخلوط B40 استفاده شد. نتایج نشان داد که فشارهای اوج درون سیلندر و نرخ آزادسازی گرما به آرامی کاهش می یابد. هر دو ترکیب اکسیژن دار بازده حرارتی ترمز مشابهی را نشان دادند و کاهش ۴/۷ درصدی در مقایسه با عملکرد دیزل ارائه دادند. ۶۰٪ کاهش در انتشار اکسیدهای نیتروژن زمانی به دست آمد که سوخت با ترکیب ان-بوتانول و دیزل باشد. انتشار دوده در حضور افزودنی های اکسیژن دار به میزان قابل توجهی کاهش یافت. به طور خلاصه، ان-بوتانول و دی متیل کربنات را می توان به عنوان افزودنی های اکسیژن دار در ترکیب سوخت دیزل / بیودیزل توصیه کرد [۱۷].

را جو و همکاران (۲۰۲۰) بر روی تأثیر مواد افزودنی مختلف اکسیژن مانند دی اتیل اتر، دی متیل اتر و دی متیل کربنات به مخلوط بیودیزل ۲۰ درصدی با غلظت های مختلف (۶ درصد و ۱۲ درصد حجمی) برای بررسی ویژگی های موتور متمرکز شدند. نتایج آزمایش نشان داد که ۱۲ درصد دی اتیل اتر اضافه شده، افزایش قابل توجهی در راندمان حرارتی ترمز نشان می دهد که ۴.۲۲٪ بیشتر از مخلوط بیودیزل است. به طور مشابه، ۱۲ درصد دی اتیل اتر کاهش قابل توجهی در انتشارات مضر خروجی موتور مانند مونوکسید کربن، هیدروکربن، اکسیدهای نیتروژن و دوده نشان داده است که در مقایسه با سوخت دیزل به ترتیب حدود ۱۰/۶۸٪، ۳۳/۳۳٪، ۱۰/۳۳٪ و ۲۷/۷۲٪ کمتر است. در بار کامل علاوه بر این، نتایج شبیه سازی نظری DIESEL-RK با مقادیر تجربی انجام شده در شرایط عملیاتی مشابه مقایسه شد و استنباط شد که ۱۲ درصد دی اتیل اتر اضافه شده به بیودیزل ویژگی های موتور امیدوارکننده را هم از نظر تجربی و هم از نظر تئوری نشان داده است [۱۸].

بیودیزل جایگزین پایداری برای دیزل فسیلی است، زیرا می تواند از منابع تجدیدپذیر مانند روغن های گیاهی و چربی های حیوانی تولید شود. سازگاری آن با موتورهای دیزلی معمولی، آن را به گزینه ای جذاب برای کاهش اتکا به سوخت های فسیلی و کاهش انتشار کربن تبدیل می کند. با این حال، تحقیقات بیشتری برای درک استفاده بهینه از آن در احتراق دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) و هم افزایی بالقوه آن با سایر فناوری های کاهش انتشار مورد نیاز است. بررسی این مطالعه در مورد عملکرد و انتشار یک موتور دیزل دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) با نانوذرات بیودیزل و فوتوکاتالیستی به این شکاف تحقیقاتی می پردازد و بینش های ارزشمندی را در مورد پیامدهای عملی اتخاذ این فناوری ها ارائه می دهد.

علاوه بر این، صرفه اقتصادی اجرای استراتژی های کاهش آلاینده و سوخت جایگزین برای سهام داران و سیاست گذاران صنعت یک ملاحظات حیاتی است. روش هزینه چرخه عمر چارچوبی جامع برای ارزیابی پیامدهای اقتصادی بلندمدت پذیرش فناوری با در نظر گرفتن عواملی مانند سرمایه گذاری اولیه، هزینه های عملیاتی و پس انداز بالقوه ارائه می دهد. با استفاده از این روش برای ارزیابی امکان سنجی اقتصادی احتراق دوسوخته با بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی، این مطالعه اطلاعات ارزشمندی را برای تصمیم گیری سرمایه گذاری و سیاست گذاری در اختیار تصمیم گیرندگان قرار می دهد. این رویکرد جامع تضمین می کند که اهداف زیست محیطی با ملاحظات اقتصادی همسو هستند و پذیرش فناوری های موتور دیزل پایدار را تسهیل می کند.

این مطالعه با نیاز مبرم به پرداختن به انتشارات از موتورهای دیزل، پتانسیل بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی برای کاهش این انتشارات و اهمیت در نظر گرفتن عوامل اقتصادی در پذیرش فناوری توجیه می شود. با ارزیابی احتراق دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) با بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی از منظر روش هزینه چرخه عمر، این مطالعه به پیشبرد راه حل های حمل و نقل پایدار و اطلاع رسانی در تصمیم گیری در صنعت موتور دیزل کمک می کند.

ادغام نانوذرات فوتوکاتالیستی در فرآیند احتراق، یک فناوری نوظهور با پتانسیل افزایش بیشتر بازده احتراق و کاهش انتشار آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی را ارائه می‌دهد. این نانوذرات وقتی وارد محفظه احتراق می‌شوند، می‌توانند احتراق کامل‌تر سوخت را تسهیل کرده و تشکیل آلاینده‌های مضر را کاهش دهند. با این حال، پیامدهای عملی و قابلیت اقتصادی ترکیب نانوذرات فوتوکاتالیستی در موتورهای دیزلی دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) همچنان نامشخص است و نیاز به ارزیابی جامع دارد [۱۹]. در حالی که بهبود عملکرد موتور و ویژگی‌های آلاینده‌ها بسیار مهم است، ارزیابی پیامدهای هزینه چرخه عمر مرتبط با اجرای چنین فناوری‌هایی به همان اندازه مهم است. روش هزینه چرخه عمر یک چارچوب جامع برای ارزیابی قابلیت اقتصادی سوخت جایگزین و استراتژی‌های کاهش انتشار در کل طول عمر عملیاتی موتور فراهم می‌کند. بنابراین، نیاز مبرم به بررسی عملکرد، انتشار و جنبه‌های اقتصادی احتراق دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) با بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی، با استفاده از روش هزینه چرخه عمر برای اطلاع‌رسانی تصمیم‌گیری و پذیرش فناوری در صنعت موتور دیزل وجود دارد [۲۰، ۲۱].

بر این اساس، اهداف کلی این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- دستیابی به مقدار مؤثر و بهترین ترکیب سوخت در چرخه احتراق دوسوخته (گاز طبیعی و دیزل) در حضور بیودیزل و سوخت دیزل
- ۲- بررسی تغییرات خواص فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های سوخت در حضور نانوذرات فوتوکاتالیستی
- ۳- بهینه‌سازی هزینه تولید انرژی با به‌کارگیری روش آنالیز اقتصادی

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های سوخت

در این مطالعه از روش ترانس استریفیکاسیون برای تولید بیودیزل استفاده شد. در تولید بیودیزل بایستی در نظر داشت عدم وجود ناخالصی در روغن پسماند یکی از اصلی‌ترین ملاحظات است. در همین راستا برای جداسازی ناخالصی‌های روغن، از فیلتر ۵۰۰ میکرونی و روش حرارت دادن روغن در راستای جداسازی آب استفاده شد. بر این اساس با به‌کارگیری هیتر استیرر، دمای روغن به ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه‌داشته می‌شود. پس از این مرحله روغن به‌طور ثابت به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شود و آب در ته ظرف جمع‌آوری می‌شود.

سپس محلول متوکسید برای انجام فرایند آماده‌سازی در این مرحله هیدروکسید سدیم به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. با افزایش خلوص متوکسید، سرعت واکنش نیز بهبود می‌یابد. با توجه به نتایج تحقیق انجام شده توسط فیض زاده اردبیلی و همکاران (۱۳۹۶)، میزان هر ماده در شرایط بهینه انتخاب شد. در این مطالعه، فرآیند واکنش ترانس استریفیکاسیون با یک کاتالیزور قلیایی مشابه برای دستیابی به راندمان بالا (۹۸/۶٪) در تولید متیل استر مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین براساس یافته‌های این مطالعه، از سدیم هیدروکسید ۱/۱ درصد وزنی استفاده شد. نسبت مولی الکل به روغن با توجه به نتایج مطالعه ۶/۱ انتخاب شد. بر این اساس برای هر مول روغن ۶ مول متانول استفاده شد.

واکنش ترانس استریفیکاسیون در دمای حدود ۶۸ درجه سانتی‌گراد و سرعت هم‌زدن حدود ۷۱۰ دور در دقیقه انجام شد. در اینجا وقتی دمای روغن به ۶۸ درجه سانتی‌گراد رسید، متوکسید تهیه شده را به روغن اضافه کرده و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت حدود ۷۱۰ دور در دقیقه هم‌می‌زنند.

پس از طی مراحل تولید بیودیزل، مدت زمان ماندگاری یک روز محاسبه شد. پس از اینکه مدت زمان ماند و استراحت به محلول داده شد، گلیسرین به‌دلیل وزن آن در کف مخزن جمع شد که توسط یک دریچه تخلیه در کف مخزن از محلول جدا شد. پس از این مرحله نوبت به حذف ناخالصی‌ها از بیودیزل می‌رسد. در این مرحله متیل استر تولید شده از الکل و گلیسرین با شستشو جدا می‌شود. در مرحله شستشو آب مقطر با دمای حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد برابر با حجم متیل استر اضافه می‌شود. این مرحله متیل استر را شستشو می‌دهد و الکل، گلیسرین و سایر مواد افزودنی موجود در محلول را جدا می‌کند، آن‌ها را در

کف مخزن جمع می‌کند و از شیر تخلیه در کف مخزن تخلیه می‌شود. البته این مرحله با مدت انتظار چند ساعته همراه است. این مرحله در چهار مرحله برای اطمینان از جداسازی ناخالصی‌ها انجام شد. خواص حرارتی-فیزیکی بیودیزل شامل دانسیته، گرانروی، ارزش حرارتی و نقطه اشتعال طی دستورالعمل‌های استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد. جدول ۱ مقادیر استاندارد روش اندازه‌گیری هر پارامتر حرارتی- فیزیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- استانداردهای اندازه‌گیری خواص حرارتی فیزیکی و ابزارهای به کار رفته

Table 1- Standards for measuring physical thermal properties and the instruments				
Property	Range	Unit	Standard No.	Instruments
Viscosity	1.9-6	mm ² /s	ASTM D445	Brookfield DV-II Prime
Density	0.87-0.90	g/cm ³	ASTM 6751-02	Density meter DA-130N
Calorific value	39.9	Mj/kg	ASTM D240	Bomb Calorimeter IKA C2000
Flash point	>130	°C	ASTM D93	Open cup
Cloud point	-3 to 12	°C	D2500	Freezing

برای تعیین کمیت هر اسید چرب آزاد از GC-MS استفاده شد. مراحل انجام این آزمایش به شرح زیر است: یک میکرولیتر (رقت ۱۰ برابری) محلول بیودیزل رقیق شده به دستگاه تزریق می‌شود. نتیجه این آزمایش شامل اندازه‌گیری نوع و میزان اسیدهای چرب و سایر عوامل مرتبط با بیودیزل است. چگالی نمونه‌های سوخت با استفاده از استاندارد ASTM 6751-02 در حضور چگالی سنج DA-130N در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. گرانروی نمونه‌های سوخت با ویسکومتر بروکفیلد مدل DV-II Prime تحت استاندارد ASTM D445 در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی نمونه‌های سوخت از ابزاری به نام کالری‌متر بمب Par-PM52 طبق استاندارد ASTM-D240 استفاده شد. این ابزار آزمایشگاهی می‌تواند ارزش حرارتی سوخت را با دقت ۱ درصد اندازه‌گیری کند. روش کار به شرح زیر است: پس از اندازه‌گیری دمای اولیه و ثانویه، مقادیر را در فرمول ۱ [۷] قرار داده می‌شود تا ارزش حرارتی سوخت محاسبه شود.

$$(1) \text{ گرمای نهان سوخت} - (\text{میزان کربنات} + 2/3 \times \text{طول سیم}) \times 2426 - (\text{دمای اولیه} - \text{دمای ثانویه}) = \text{ارزش حرارتی سوخت}$$

در نهایت بیودیزل به مقدار ۵ درصد حجمی به سوخت دیزل اضافه شد و سوخت B5 به دست آمد. در این مطالعه نانوذرات اکسید روی به دلیل اینکه در فرایند احتراق دو سوخته (گاز طبیعی-دیزل) کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، به عنوان یکی از نانوذرات با خاصیت فتوکاتالیستی انتخاب شد. این نانو ذره به صورت پک کامل خریداری شد. نانوذرات با خاصیت فتوکاتالیستی، موادی هستند که می‌توانند در حضور نور، فرآیندهای شیمیایی را تسریع کنند. این نانوذرات معمولاً از اکسیدهای نیمه‌هادی تشکیل شده‌اند و به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در زمینه‌های مختلفی از جمله تصفیه آب و هوا، ضد عفونی‌سازی و تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].

در ادامه سورفکتانت ۲٪ حجمی سوربیتان مونولات (Span 80) که در سیال پایه بسیار پراکنده و پایدار است، با سوخت B5 مخلوط شد [۲۳]. برای فرآیند اولتراسونیک، روش‌هایی که در مطالعات قبلی انجام شده توسط سوداگر و همکاران گاوانه و همکاران مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴]. اختلاط با استفاده از فرآیند فراصوت انجام شد. در ابتدا، مخلوط سوخت دیزل، سوربیتان مونولات، و نانوذرات اکسید روی (سطح دوز: ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم در لیتر) و بیودیزل با استفاده از همزن مغناطیسی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هم زده و سونیکاسیون حمام برای یک دوره آشفته‌گی ۶۰ دقیقه حرارت داده شد تا آثار آب از بین برود [۲۵]. جدول ۲ مشخصات حجمی و جزئیات آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۲- جزئیات آماده سازی نمونه سوخت برای مقدار ۱ لیتر سوخت

Table 2- Fuel sample preparation details for 1 liter fuel quantity

No.	Sample	Description
1	B0Z0	Pure diesel
2	B0Z25	Pure diesel and nanoparticle 25 mg/liter and 2% surfactant
3	B0Z50	Pure diesel and nanoparticle 50 mg/liter and 2% surfactant
4	B0Z75	Pure diesel and nanoparticle 75 mg/liter and 2% surfactant
5	B5Z0	95% pure diesel and 5% biodiesel
6	B5Z25	95% pure diesel and 5% biodiesel and nanoparticles 25 mg/liter and 2% surfactant
7	B25Z50	95% pure diesel and 5% biodiesel and nanoparticles 50 mg/liter and 2% surfactant
8	B5Z75	95% pure diesel and 5% biodiesel and nanoparticles 75 mg/liter and 2% surfactant

انجام آزمون موتور

در مطالعه حاضر از موتور Kirloskar-make CR (VCR)، تک سیلندر دیزلی-گاز طبیعی دوسوخته با توان نامی ۷/۴ کیلووات، و آب‌خنک، استفاده شد. جدول ۳ مشخصات موتور VCR را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک آنالایزر پنج گاز و دود سنج استفاده شد. انتشار HC، NOx و CO توسط آنالایزر گاز آگروز AVL 473C و انتشار دود با استفاده از دود سنج AVL اندازه‌گیری شد. AVL 473C انتشار CO و HC را با روش اندازه‌گیری مادون قرمز (مادون قرمز غیر پراکنده) و NO توسط سنسورهای الکتروشیمیایی تعیین می‌کند. شکل ۱ تصویری از کلیات عملیات آزمون موتور را نشان می‌دهد.



Figure 1- Engine test instruments

شکل ۱- تجهیزات آزمون موتور

در این پژوهش، نرخ تغییرات گاز طبیعی با مقادیر صفر، ۲۰، و ۴۰ درصد تنظیم شد. همچنین عملکرد موتور دیزلی-گاز طبیعی برای دستیابی به بالاترین بازدهی در بار کامل ۱۰۰ درصد و دور ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۳- مشخصات موتور

Table 3- Engine specifications

Kirloskar Oil Engines Ltd., India
Vertical, four-stroke, single-cylinder
7.4 kW @ 1500 rpm
Volume :0.948 l
Compression ratio: 17.5
Water Cooling
BMEP at 1500 rpm 6.21 bar

برای انجام آزمون موتور ابتدا از نمونه سوخت دیزل خالص برای تعیین داده‌های پایه برای مقایسه استفاده شد. سپس تمامی نمونه‌ها در موتور مذکور مورد آزمایش قرار گرفتند. برای استخراج داده‌ها از ابزارها و نمایشگرهای موردنیاز متصل به موتور استفاده شد که شامل دورسنج موتور، گشتاورسنج، و دبی‌سنج سوخت بود.

جدول ۴- مشخصات و دقت ابزار اندازه‌گیری

Table 4- Specifications and accuracies of measuring instruments

Parameter	Accuracy	Resolution	Parameter	Uncertainty	Percentage uncertainty (%)
Engine load	±1	0.1 N	NG flow rate	0.024 (g/h)	1.718
Engine speed	±1	1 rpm	PF flow rate	0.31 (g/h)	4.20
CO ₂	±1	0.1 %	Air flow rate	0.964 (g/h)	4
NO _x	±1	1 ppm	BP	0.047 (kW)	0.001
CO	±1	1 ppm	BSEC	0.179 (g/kWh)	1.015

موتور موردنظر با استفاده از یک تنظیم کننده دبی گاز طبیعی و یک میکسر (برای مخلوط کردن هوا و گاز طبیعی، به صورت همگن) در منیفولد ورودی هوا، به یک موتور با سوخت دوگانه دیزل-گاز طبیعی تبدیل شد. بار مورد نظر موتور با استفاده از دستگاه بارگذاری مقاومت متغیر (TDGC2-5KVA) متصل به یک ژنراتور برق 200-jb/t که به موتور هدف وصل شده است، اعمال شد. این ژنراتور به یک سلول بار ۲۰۰ kN از طریق بازو به طول ۳۰ سانتی‌متر مجهز شده بود. از یک لودسل Lutron FG-5100 برای اندازه‌گیری بار استفاده شد. برای اندازه‌گیری نیرو از نیروسنج لاترون دیجیتال استفاده شد. این نیروسنج قادر است نیروی وارده تا ۱۰۰ کیلوگرم را با دقت ۰/۰۱ کیلوگرم مورد سنجش قرار دهد.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سوخت پایلوت شامل B0Z0، B0Z25، B0Z50، B0Z75، B5Z0، B5Z25، B25Z50، و B5Z75 در نسبت‌های مختلف سوخت پایلوت به سوخت گاز (X)، یعنی ۰، ۲۰، و ۴۰ درصد بررسی شد. معادله ۲ برای محاسبه "X" استفاده شد. این معادله مقدار انرژی گاز طبیعی را در کل انرژی مخلوط سوخت نشان می‌دهد که در آن EPF نرخ انرژی سوخت پایلوت مصرف شده است که می‌تواند به صورت معادله ۳ محاسبه شود که در آن ENG نرخ انرژی گاز طبیعی مصرف شده است که می‌تواند با معادله ۴ محاسبه شود. در معادله ۴ VP و VNG به ترتیب نرخ جریان حجمی سوخت پایلوت و گاز طبیعی مصرفی هستند.

$$X = \frac{\dot{E}_{NG}}{\dot{E}_{NG} + \dot{E}_{PF}} \quad (2)$$

$$\dot{E}_P = \dot{V}_P \times \rho_P \times LHV_P \quad (3)$$

$$\dot{E}_{NG} = \dot{V}_{NG} \times \rho_{NG} \times LHV_{NG} \quad (4)$$

نرخ مصرف سوخت گاز طبیعی توسط یک جریان سنج گاز طبیعی ثبت شد در حالی که از روش سیلندر کالیبره شده برای اندازه‌گیری میزان مصرف سوخت پایلوت استفاده شد. آزمایش‌ها با نرخ جایگزینی گاز طبیعی، یعنی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد انجام شد. شکل ۲ نمودار جریان را برای روش تست موتور دوگانه‌سوز به کار گرفته شده در مطالعه حاضر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که موتور با سوخت دیزل راه اندازی شد و به مدت ۵ دقیقه کار کرد تا وضعیت ثابت را لمس کند. علاوه بر این، موتور به مدت ۵ دقیقه بین هر آزمایش با دیزل کار می‌کرد تا اعتبار موردنیاز داده‌های ثبت شده را تأیید کند.

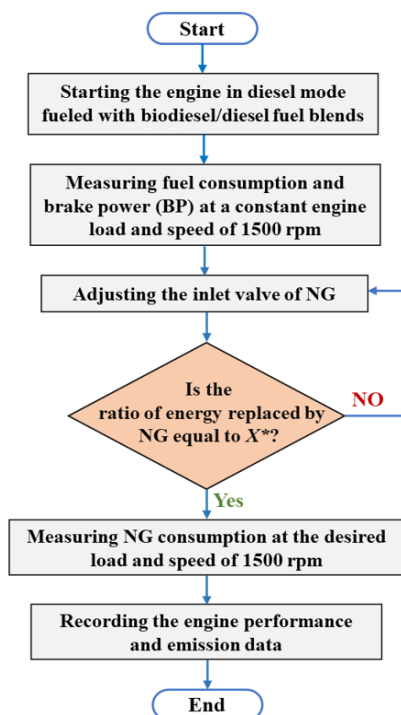


Figure 2- DFDE test procedure
شکل ۲- روش آزمون موتور دوسوخته

انجام ارزیابی اقتصادی

در این بخش، مدل هزینه تولید توان از نمونه سوخت‌ها در پنج دسته به شرح زیر دسته‌بندی شده است (فرمول ۵):

$$\text{هزینه توان تولید شده} = \text{هزینه آماده‌سازی نمونه سوخت} + \text{هزینه گاز مصرفی} + \text{هزینه ناشی از تولید آلاینده‌ها براساس شاخص آلاینده‌ها} \quad (5)$$

برای محاسبه هزینه ناشی از تولید آلاینده‌ها، در ابتدا مقدار تولید آلاینده‌ها به‌ازای هر تابع عملکردی (که در اینجا هر تابع عملکردی معادل ۱ کیلووات توان تولید شده از موتور است) محاسبه شده و سپس هزینه تولید گازهای گلخانه‌ای در آن دخیل می‌شود. هزینه آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها شامل هزینه‌های مربوط به مواد اولیه، هزینه عملیاتی، و هزینه انرژی مصرف شده برای آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها است. جدول ۵ خلاصه‌ای از داده‌های اقتصادی و شاخص‌های به کار رفته (به‌عنوان سیاهه چرخه اقتصادی) را نشان می‌دهد.

جدول ۵- سپاهه چرخه اقتصادی

Table 5- Economic cycle inventory

The cost of pollution produced based on the pollution index	NG consumption cost (\$)	Fuel preparation cost (\$)	Equal cost of CO2 emission (\$/ton)	Fuel samples
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.052	10	B0Z0
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.066	10	B0Z25
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.079	10	B0Z50
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.091	10	B0Z75
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.052	10	B5Z0
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.069	10	B5Z25
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.081	10	B25Z50
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.094	10	B5Z75
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.051	10	B0Z0 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.066	10	B0Z25 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.079	10	B0Z50 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.091	10	B0Z75 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.052	10	B5Z0 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.069	10	B5Z25 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.081	10	B25Z50 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.094	10	B5Z75 + 20%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.051	10	B0Z0 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.066	10	B0Z25 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.079	10	B0Z50 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.091	10	B0Z75 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.052	10	B5Z0 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.069	10	B5Z25 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.081	10	B25Z50 + 40%NG
According to the amounts of emission production	According to the flow rate of fuel consumption	0.094	10	B5Z75 + 40%NG

نتایج و بحث

نتایج مربوط به آماده سازی نمونه سوخت‌ها و اندازه‌گیری خواص فیزیکی-حرارتی

جدول ۶ نتایج مطالعه خواص ترموفیزیکی سوخت‌ها را ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار بیودیزل در نمونه‌های سوخت، موجب افزایش نسبی دانسیته و گرانیروی می‌شود. زیرا دانسیته و گرانیروی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل استاندارد بالاتر است. از طرفی دیگر مطابق با جدول ۶ می‌توان مشاهده کرد حضور بیودیزل در سوخت دیزل به دلیل ارزش حرارتی پایین آن، موجب کاهش ارزش حرارتی سوخت در مقایسه با سوخت دیزل می‌شود.

مطابق با جدول ۶ می‌توان مشاهده کرد، افزایش محتوای نانوذرات در نمونه سوخت‌ها موجب کاهش نسبی دانسیته و افزایش نسبی گرانشی و ارزش حرارتی می‌شود. حضور نانوذرات در نمونه سوخت‌ها از دو منظر می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. یکی اینکه حضور نانوذرات همراه با حضور سورفکتانت است. گرانشی سورفکتانت به کار رفته نسبتاً بالاتر از گرانشی سوخت دیزل و بیودیزل است. بر این اساس افزایش محتوای نانوذرات در سوخت با افزایش محتوای سورفکتانت و به دنبال آن با افزایش گرانشی همراه است. از طرفی دیگر حضور نانوذرات می‌تواند فاصله بین مولکول‌های سوخت را تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش دانسیته سوخت شود. همچنین خواص نانوذرات به دلیل مشارکت در پدیده میکرو احتراق، می‌تواند موجب بهبود توان‌گیری از سوخت به واسطه کمک به احتراق بهتر و افزایش ارزش حرارتی شود. این پدیده همچنین توسط مطالعاتی از اردبیلی و همکاران [۱۲] و خلیفه و همکاران [۲۶] نیز اشاره شده است. این خواص در پدیده احتراق و آلاینده‌گی موتور نیز می‌تواند تأثیر به‌سزایی داشته باشد.

جدول ۶- خواص حرارتی-فیزیکی نمونه‌های سوخت

Table 6- Thermo-physical properties of fuel samples

Sample Name	Density (kg/m ³)	LHV (MJ/kg)	Viscosity (cSt)	Flash Point (°C)	Cloud Point (°C)
B0Z0	0.839	42.57	3.09	92.5	-1.5
B0Z25	0.835	42.85	3.12	93.1	-1.2
B0Z50	0.833	43.78	3.19	93.9	-1
B0Z75	0.831	44.82	3.26	94.1	-1
B5Z0	0.841	42.29	3.14	95.5	-1
B5Z25	0.840	43.51	3.18	95.9	-0.5
B5Z50	0.838	44.93	3.22	96.1	-0.5
B5Z75	0.837	45.31	3.28	97.1	-0.5

جدول ۷ یافته‌های آزمون GC-MS تحت استاندارد ASTM D6584 را ارائه می‌دهند. این آزمون درصد اسیدهای چرب اشباع را نشان می‌دهد. این نتایج می‌تواند تأثیر مثبتی در افزایش عملکرد موتور داشته باشد در حالی که کاهش اسیدهای چرب اشباع عملکرد موتور را تحت شعاع قرار داده و تأثیر منفی روی عملکرد آن می‌گذارد.

جدول ۷- نتایج اسیدهای چرب موجود در سوخت دیزل

Table 7- Results of fatty acids in diesel fuel

FAME wt.%	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:1
	2.33	20.60	4.48	10.30	57.93	1.64	2.72

نتایج مربوط به عملکرد و انتشار موتور

شکل ۳ تغییرات توان ترمزی در حضور نمونه سوخت‌ها را ارائه می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، توان ترمزی تولید شده در سوخت دیزل، نسبتاً بالاتر از توان ترمزی تولید شده توسط سوخت B5 است. یکی از اصلی‌ترین دلایل، ارزش حرارتی بالای سوخت دیزل نسبت به سوخت B5 است.

همچنین، افزودن محتوای سوخت گازی موجب افزایش توان ترمزی تولید شده در موتور دوسوخته می‌شود. یکی از اصلی‌ترین دلایل که در مطالعه اکبریان و همکاران [۲۷] نیز به آن اشاره شده است، افزایش بازده حجمی موتور با تزریق سوخت گازی به صورتی مخلوطی از هوا به داخل محفظه احتراق است. همان‌طور که مشخص است روند تولید توان ترمزی در سوخت حاوی دیزل خالص و سوخت حاوی B5 با تزریق سوخت گازی کاملاً متفاوت می‌شود. این تغییر روند حاکی از بهبود روند احتراق سوخت حاوی B5 با حضور سوخت گازی است. به عبارت دیگر حضور سوخت گازی در محفظه احتراق به دلیل بهبود بازده حجمی

موتور و ایجاد شرایط بهتر برای احتراق، با سوخت حاوی B5 سازگاری بالاتری نسبت به سوخت حاوی دیزل خالص دارد. بر این اساس می‌توان عنوان کرد در صورت به‌کارگیری از سوخت حاوی بیودیزل، بهتر است از یک موتور دوسوخته با سوخت گازی استفاده شود.

حضور نانوذرات در سوخت‌های بدون سوخت گازی به‌خصوص در سوخت B5 روند خاصی را نشان نمی‌دهد. علاوه بر این در برخی نقاط موجب کاهش توان تولیدی نیز شده‌است. اما با حضور سوخت گازی در محفظه احتراق، حضور نانوذرات موجب بهبود تولید توان نیز شده‌است. به طوری‌که با افزایش غلظت نانوذرات، توان تولیدی نیز افزایش یافته‌است. بالاترین توان توسط سوخت B0Z75+40%NG تولید شده‌است که در حدود ۲۰ درصد بیشتر از نمونه سوخت شاهد است.

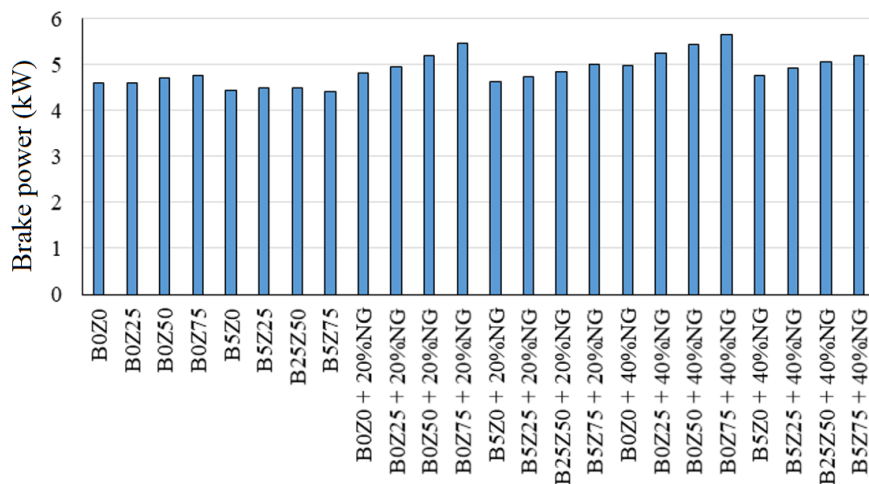


Figure 3- The process of producing braking power

شکل ۳- روند تولید توان ترمزی

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، روند تغییرات توان ترمزی با مصرف سوخت ویژه ترمزی کاملاً برعکس است. به‌طوری‌که کمترین مصرف سوخت ویژه ترمزی در نقطه‌ای اتفاق می‌افتد که بالاترین توان ترمزی تولید شده اتفاق افتاده است (سوخت B0Z75+40%NG).

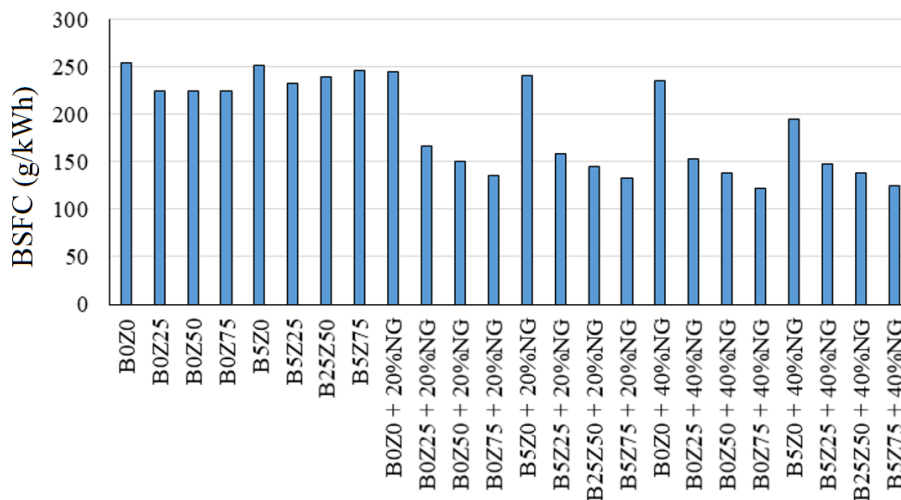


Figure 4 The trend of changes in fuel consumption, especially for braking

شکل ۴- روند تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی

شکل ۵ روند تغییرات بازده حرارتی موتور در حضور نمونه‌های سوخت را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، بازده حرارتی موتور در حضور سوخت B5 و دیزل تقریباً مشابه است. اما با افزایش درصد سوخت گازی، بازده حرارتی موتور به دلیل بهبود باز حجمی موتور بهبود می‌یابد. حضور نانوذرات به دلیل ایجاد خاصیت میکرواحتراق موجب بهبود بازده حرارتی موتور می‌شود.

در موتورهای احتراق تراکمی، سوخت به داخل محفظه احتراق پاشیده می‌شود و به ذرات ریز تبدیل می‌شود. قطرات ریز گرما را از محیط اطراف جذب کرده و تبخیر می‌شوند. تبخیر قطرات سوخت می‌تواند احتراق سوخت مایع را کامل کند [۲۸]. افزودن نانوذرات گرمای نهان تبخیر سوخت را تغییر می‌دهد. همچنین، نانوذرات می‌توانند گرانروی و کشش سطحی سیال را تغییر دهند که به نوبه خود می‌تواند پدیده تبخیر را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانوذرات باعث افزایش گرمای تبخیر سوخت و میزان انرژی آزاد شده از آن می‌شود. با نانوذرات، احتمال احتراق سوخت به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۲۹].

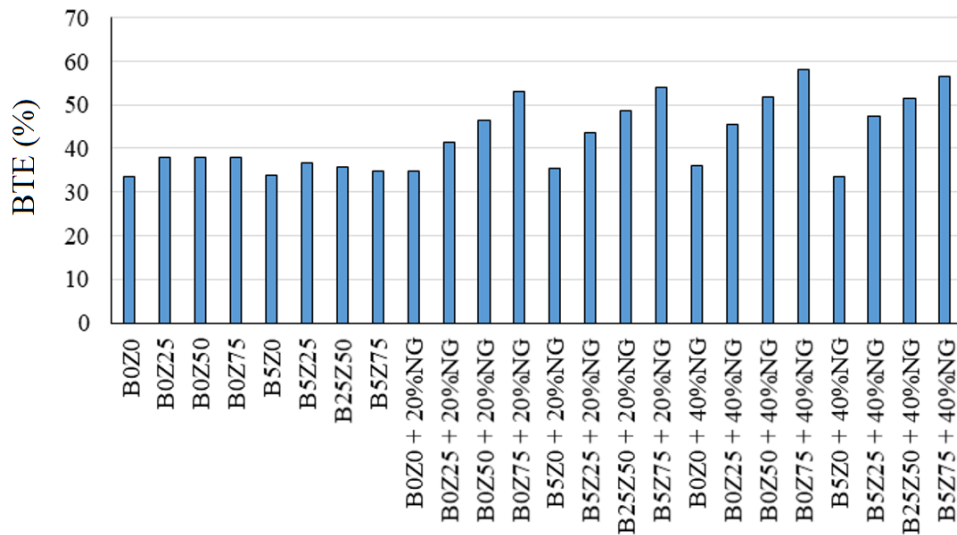


Figure 5- Changes in fuel thermal efficiency
شکل ۵- تغییرات بازده حرارتی سوخت

شکل ۶ تغییرات روند انتشار مونوکسیدکربن را نشان می‌دهد. مونوکسیدکربن گازی است که در اثر احتراق ناقص منتشر می‌شود [۳۰]. همانطور که مشخص است با افزودن سوخت گازی به فرایند احتراق و همچنین با افزودن نانوذرات، انتشار مونوکسیدکربن کاهش یافته است. این نیز گواهی دیگر بر بهبود روند احتراق با حضور نانوذرات فوتوکاتالیستی و گاز طبیعی است. کمترین انتشار مونوکسیدکربن را می‌توان در حضور نمونه سوخت B0Z75+40%NG مشاهده کرد که در حدود ۴۵ درصد کمتر از انتشار مونوکسیدکربن توسط سوخت شاهد (دیزل استاندارد) است.

دلیل انتشار مونوکسیدکربن، همانطور که قبلاً نیز عنوان شد، احتراق ناقص سوخت به دلیل اختلاط نامناسب سوخت و هوا، محتوای کم اکسیژن در محفظه احتراق و تمیزه شدن ناقص است [۳۱]. میزان اکسیژن B5 بیشتر از گازوئیل است، بنابراین انتشار مونوکسید کربن B5 کمتر از گازوئیل است [۳۲]. نتایج نشان داد که با افزودن نانوذرات به سوخت B5، انتشار مونوکسیدکربن کمتر از سوخت B5 بود. نانوذرات فوتوکاتالیستی به‌عنوان یک بافر اکسیژن در حین احتراق عمل می‌کنند که به اثر کاتالیزوری کمک می‌کند و میزان انتشار مونوکسیدکربن را کاهش می‌دهد. این در مراجع [۳۲] و [۳۳] ذکر شده است.

فانگوسواناراک و همکاران گزارش دادند که افزودن نانوذرات فتوکاتالستی به B5 باعث کاهش انتشار مونوکسیدکربن شد. آن‌ها احتراق کامل و اکسیداسیون کربن بیشتر را به این پدیده نسبت می‌دهند [۳۳].

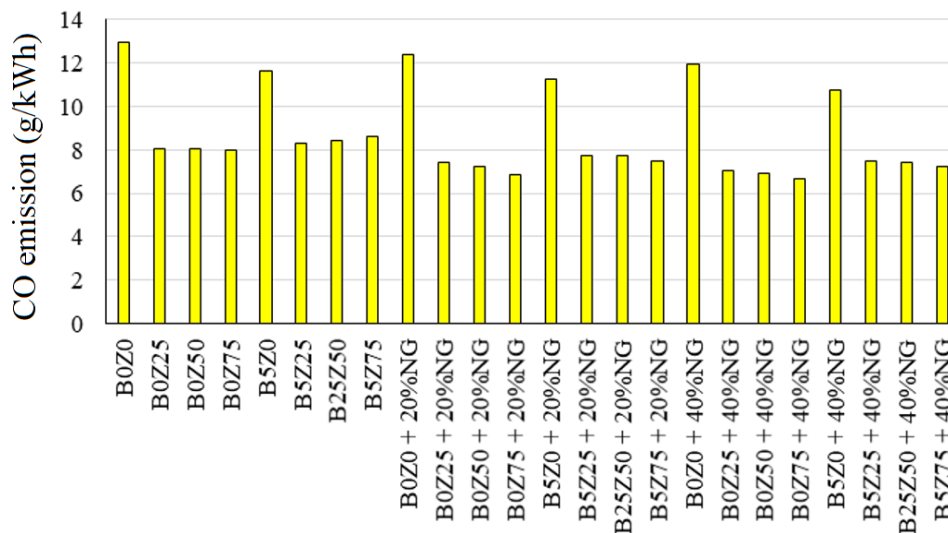


Figure 6- Carbon monoxide emission process

شکل ۶- روند انتشار مونوکسیدکربن

شکل ۷ روند انتشار دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. حضور دی‌اکسیدکربن در آگروز یک تأثیر متضاد و دوگانه ایجاد می‌کند. اولی اینکه دی‌اکسیدکربن نتیجه یک احتراق کامل است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است انتشار دی‌اکسیدکربن در سوخت B5 به دلیل محتوای اکسیژن آن نسبت به سوخت دیزل بالاتر است. زیرا محتوای اکسیژن، احتراق را به سمت احتراق کامل سوق می‌دهد و محصولات فرمولاسیون ایده‌آل احتراق را افزایش می‌دهد [۳۴،۳۵]. از طرفی دیگر انتشار دی‌اکسیدکربن در خروجی موتور موجب افزایش اثر گازهای گلخانه‌ای می‌شود. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، افزایش نانوذرات، در ابتدا موجب کاهش و سپس موجب افزایش روند انتشار دی‌اکسیدکربن شده‌است. همچنین افزایش گاز طبیعی، به‌طور نسبی موجب کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن شده‌است.

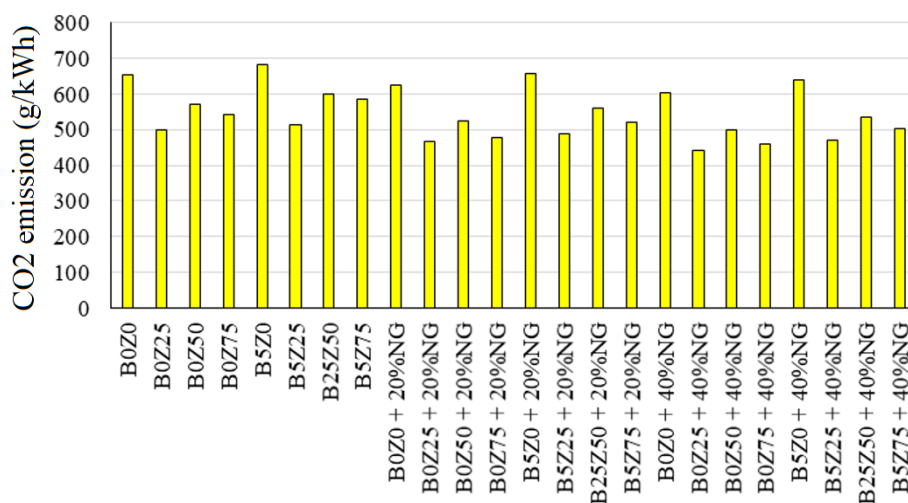


Figure 7- Carbon dioxide emission process

شکل ۷- روند انتشار دی‌اکسیدکربن

شکل ۸ روند انتشار اکسیدهای نیتروژن را نشان می‌دهد. اکسیدهای نیتروژن به دنبال افزایش تمرکز حرارتی در داخل محفظه احتراق تولید می‌شوند. با افزودن ۵ درصد سوخت بیودیزل به سوخت دیزل، انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت به دیزل افزایش می‌یابد. با استفاده از بیودیزل، دمای پیک محفظه احتراق به دلیل اکسیژن موجود در بیودیزل افزایش می‌یابد و در نتیجه انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد [۳۶]. افزودن نانوذرات به سوخت نمونه سوخت‌ها باعث کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت به سوخت B5 و شاهد شده است، زیرا این نانوذرات خاصیت بازدارندگی داشته و موجب جلوگیری از افزایش دمای محفظه احتراق شده و از تشکیل اکسیدهای نیتروژن جلوگیری می‌کنند [۳۷]. همچنین، نتایج نشان داد افزودن سوخت گازی هم به طور نسبی میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن را به دلیل بهبود همگنی در داخل محفظه احتراق و جلوگیری از ایجاد تمرکز دمایی در داخل محفظه احتراق کاهش می‌دهند.

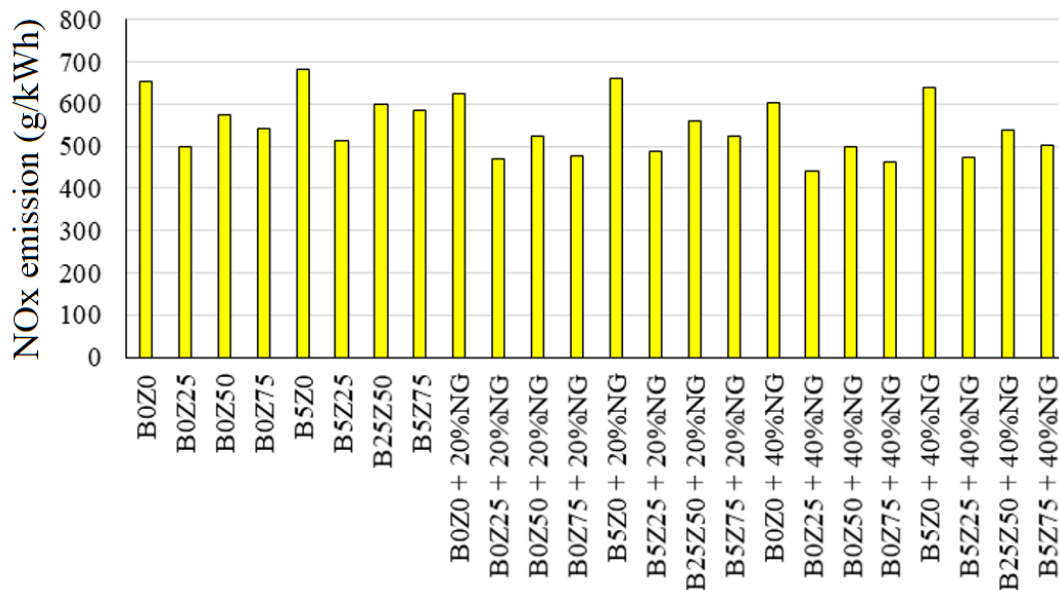


Figure 8- The emission process of nitrogen oxides

شکل ۸- روند انتشار اکسیدهای نیتروژن

نتایج مربوط به آنالیز اقتصادی

شکل ۹ هزینه انرژی تولید شده از دیدگاه آنالیز اقتصادی را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به دست آمده از تحلیل چرخه اقتصادی، با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به سوخت گازی، هزینه انتشار آلاینده‌ها و هزینه آماده سازی نمونه سوخت، هزینه انرژی تولید شده در سوخت‌های حاوی هم زمان گاز و نانوذرات کم است. می‌توان عنوان کرد یکی از اصلی‌ترین دلایل این اتفاق، بازده حرارتی بالای موتور و کاهش انتشارات موتور نام برد. از طرفی دیگر همان‌طور که مشخص است، کمترین هزینه انرژی تولید شده مربوط به نمونه سوخت B0Z75+40%NG است که حدود ۵۰ درصد کمتر از هزینه انرژی تولید شده توسط سوخت شاهد است. می‌توان عنوان کرد حضور افزودنی‌ها و سوخت گازی منجر به کاهش هزینه انرژی تولید شده می‌شود.

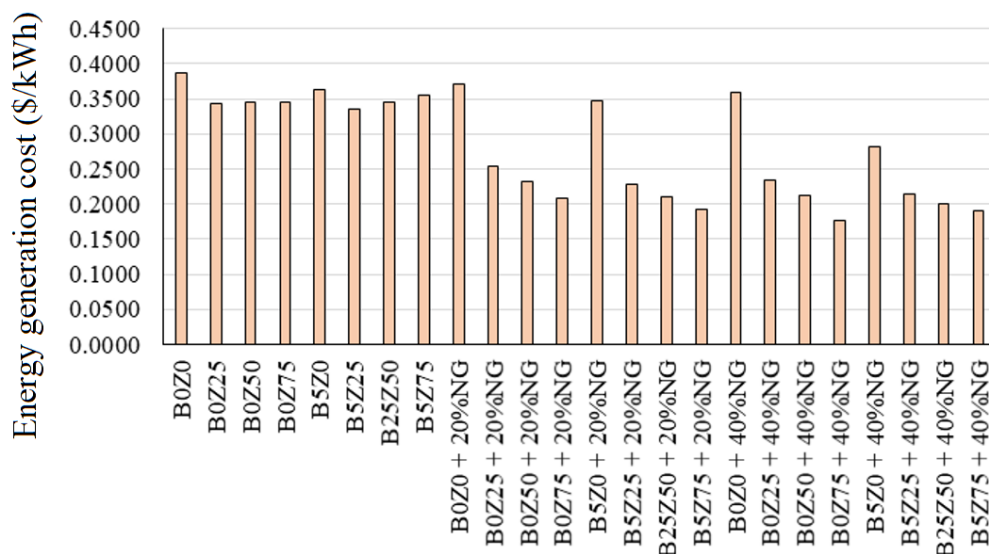


Figure 9- Cost of energy production

شکل ۹- هزینه تولید انرژی

نتایج مربوط به تحلیل حساسیت

شکل ۱۰ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت را برای یافتن مؤثرترین پارامتر در چرخه اقتصادی تولید توان در حضور نانوذرات فتوکاتالیستی و سوخت گازی نشان می‌دهد.

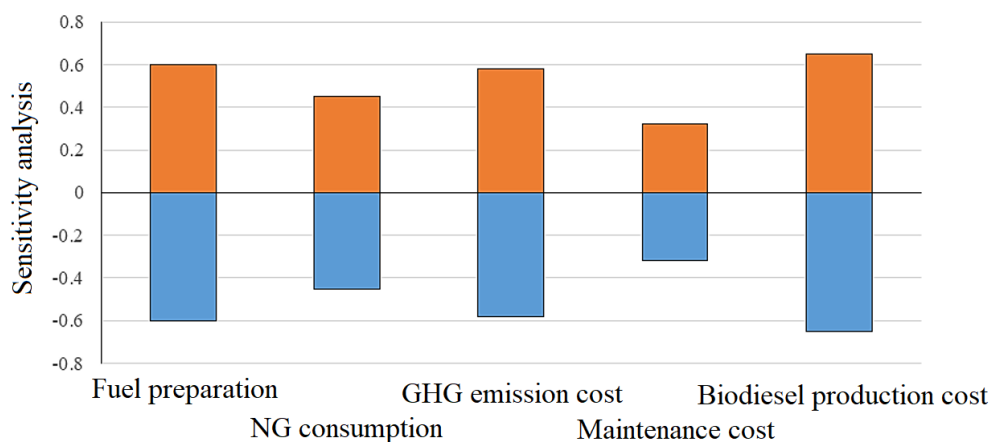


Figure 10- Sensitivity analysis of economic cycle results

شکل ۱۰- آنالیز حساسیت نتایج چرخه اقتصادی

مطابق با شکل ۱۰ می‌توان دریافت، تولید بیودیزل بالاترین سهم از چرخه اقتصادی تولید زیست توان در مطالعه حاضر را به خود اختصاص داده است. یکی از اصلی‌ترین دلایل این روند، میزان مصرف انرژی بالا در روش ترانس استریفیکاسیون و عدم مدیریت مناسب پسماند از نقطه نظر هزینه اقتصادی است. پارامتر بعدی با بالاترین ضریب تأثیرگذاری مربوط به آماده سازی نمونه سوخت‌ها است. یکی از اصلی‌ترین دلایل این امر نیز مربوط به مصرف انرژی بالا در طول روند آماده سازی نمونه سوخت‌ها است. برای جلوگیری از این روند می‌توان به کارگیری از انرژی‌های تجدیدپذیر را پیشنهاد داد. از طرفی دیگر، مطابق با شکل ۱۰ می‌توان دریافت، در صورتی که فرایند مورد تحلیل قرار گیرد، چه نقاط ضعف می‌تواند سیستم را در راه موفقیت تهدید کند.

نتیجه گیری

این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را در مورد پتانسیل استفاده از یک سیستم سوخت دوگانه، شامل بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی، برای بهبود عملکرد و انتشار موتورهای دیزل ارائه کرده است. نتایج آزمایش موتور توانایی این روش را برای افزایش راندمان احتراق، کاهش ذرات معلق و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با عملیات دیزل معمولی نشان داده است. آنالیز اقتصادی پتانسیل صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهبود پایداری زیست‌محیطی را نشان داده است، که دوام این فناوری را از منظر چرخه عمر نشان می‌دهد. با این حال، این مطالعه همچنین چندین محدودیت و چالش‌های تحقیقاتی را برجسته کرده است که باید برای درک کامل مزایای این فناوری دوسوخته مورد توجه قرار گیرد. دامنه آزمایش موتور محدود به یک سیستم تک سیلندر و حالت پایدار بود و تحلیل اقتصادی بر فرضیاتی تکیه داشت که ممکن است پیچیدگی‌های دنیای واقعی را به‌طور کامل نشان ندهند. در حالت کلی نتایج زیر به‌دست آمدند:

- افزایش محتوای نانوذرات در نمونه سوخت‌ها موجب کاهش نسبی دانسیته و افزایش نسبی گرانی و ارزش حرارتی می‌شود.
- افزودن محتوای سوخت گازی موجب افزایش توان ترمزی تولید شده در موتور دوسوخته می‌شود.
- بازده حرارتی موتور در حضور سوخت B5 و دیزل تقریباً مشابه است. اما با افزایش درصد سوخت گازی، بازده حرارتی موتور به‌دلیل بهبود باز حجمی موتور بهبود می‌یابد. حضور نانوذرات به‌دلیل ایجاد خاصیت میکرواحتراق موجب بهبود بازده حرارتی موتور می‌شود.
- کمترین انتشار مونوکسیدکربن را می‌توان در حضور نمونه سوخت $BOZ75+40\%NG$ مشاهده کرد که در حدود ۴۵ درصد کمتر از انتشار مونوکسیدکربن توسط سوخت شاهد (دیزل استاندارد) است.
- انتشار دی‌اکسیدکربن در سوخت B5 به‌دلیل محتوای اکسیژن آن نسبت به سوخت دیزل بالاتر است.
- با افزودن ۵ درصد سوخت بیودیزل به سوخت دیزل، انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت به دیزل افزایش می‌یابد.
- کمترین هزینه انرژی تولید شده مربوط به نمونه سوخت $BOZ75+40\%NG$ است که حدود ۵۰ درصد کمتر از هزینه انرژی تولید شده توسط سوخت شاهد است.

حساسیت به پارامترهای کلیدی و گنجاندن هزینه‌های سرمایه اولیه و اثرات خارجی زیست‌محیطی در ارزیابی اقتصادی به‌طور کامل بررسی نشده است. علاوه بر این، مقیاس‌پذیری، مقرون به صرفه بودن، و انطباق با مقررات تولید نانوذرات فوتوکاتالیستی و ادغام، موانع مهمی برای پذیرش گسترده باقی‌مانده است. پرداختن به این موانع فنی و لجستیکی، و همچنین پیمایش در چشم‌انداز پیچیده نظارتی، برای تجاری سازی موفقیت‌آمیز این رویکرد دوسوخته بسیار مهم خواهد بود. با حرکت روبه‌جلو، تحقیقات بیشتری برای گسترش شرایط آزمایش، بهینه‌سازی سیستم سوخت دوگانه و انجام ارزیابی جامع‌تر چرخه عمر اقتصادی و زیست‌محیطی مورد نیاز است. همکاری بین دانشگاه، صنعت و سیاست‌گذاران برای توسعه پروتکل‌های تست استاندارد، به‌روزرسانی مقررات و نشان دادن قابلیت این فناوری در برنامه‌های کاربردی دنیای واقعی ضروری است. با غلبه بر این چالش‌ها، سیستم سوخت دوگانه با بیودیزل و نانوذرات فوتوکاتالیستی این پتانسیل را دارد که به اهداف گسترده‌تر بهبود کارایی موتور، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترویج راه‌حل‌های حمل‌ونقل پایدار کمک کند.

منابع

- [1] S. Gowrishankar and A. J. E. Krishnasamy, "Emulsification—A promising approach to improve performance and reduce exhaust emissions of a biodiesel fuelled light-duty diesel engine, " vol. 263, p. 125782, 2023.
- [2] B. J. Bora, P. Sharma, B. Deepanraj, and Ü. J. F. Ağbulut, "Investigations on a novel fuel water hyacinth biodiesel and Hydrogen-Powered engine in Dual-Fuel Model: Optimization with I-optimal design and desirability, " vol. 345, p. 128057, 2023.

- [3] 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.
- [4] T. Bradley, M. A. Rajaeifar, A. Kenny, C. Hainsworth, V. del Pino, Y. del Valle Inclán, I. Povoia, P. Mendonça, L. Brown, and A. Smallbone, "Life cycle assessment of microalgae-derived biodiesel, " *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, no. 5, pp. 590-609, 2023.
- [5] 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.
- [6] D. Rathore, S. Sevda, S. Prasad, V. Venkatramanan, A. K. Chandel, R. Kataki, S. Bhadra, V. Channashettar, N. Bora, and A. J. B. Singh, "Bioengineering to Accelerate Biodiesel Production for a Sustainable Biorefinery, " vol. 9, no. 11, p. 618, 2022.
- [7] S. Faizollahzadeh Ardabili, "Improving the combustion process of biodiesel using additives, " Ph.D. thesis Fundamental, Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 2021.
- [8] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, S. Rafiee, P. Mohammadi, B. Ghobadian, S. S. Lam, M. Tabatabaei, and M. Aghbashlo, "Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends, " *Energy Conversion Management*, vol. 241, p. 114300, 2021.
- [9] M. J. Eslami, B. Hosseinzadeh Samani, S. Rostami, R. Ebrahimi, and A. J. B. Shirneshan, "Investigating and optimizing the mixture of hydrogen-biodiesel and nano-additive on emissions of the engine equipped with exhaust gas recirculation, " pp. 1-12, 2022.
- [10] A. J. Anthony, U. Bhojwani, A. Mittal, B. Singh, and U. Rehani, "Life cycle assessment of biodiesel and overview of the challenges in production of the biodiesel, " in *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2396, no. 1: AIP Publishing.
- [11] S. Zapata-Boada, M. Gonzalez-Miquel, M. Jobson, and R. Cuellar-Franca, "Integrating Process Simulation and Life Cycle Assessment to Evaluate the Economic and Environmental Performance of Algae Biodiesel, " in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 50: Elsevier, 2021, pp. 1903-1908.
- [12] 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.
- [13] A. Tamilvanan, K. Balamurugan, B. Ashok, P. Selvakumar, S. Dhamotharan, M. Bharathiraja, and V. Karthickeyan, "Effect of diethyl ether and ethanol as an oxygenated additive on Calophyllum inophyllum biodiesel in CI engine, " *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 33880-33898, 2021.
- [14] S. Prakash, S. J. Abraham Baby, and K. Manikandan, "Emission study of alcohol-biodiesel blends propelled diesel engine, " *International Journal of Ambient Energy*, vol. 42, no. 3, pp. 292-296, 2021.
- [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] S. Amid, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, A. Hajiahmad, B. Najafi, H. S. Ghaziaskar, H. Rastegari, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, and 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.
- [17] R. Jayabal, L. Thangavelu, and S. Subramani, "Combined effect of oxygenated additives, injection timing and EGR on combustion, performance and emission characteristics of a CRDi diesel engine powered by sapota biodiesel/diesel blends," *Fuel*, vol. 276, p. 118020, 2020.
- [18] V. D. Raju, H. Venu, L. Subramani, P. Kishore, P. Prasanna, and D. V. Kumar, "An experimental assessment of prospective oxygenated additives on the diverse characteristics of diesel engine powered with waste tamarind biodiesel, " *Energy*, vol. 203, p. 117821, 2020.
- [19] B. A. Oni, S. E. Sanni, B. O. Ezurike, and E. E. J. A. E. J. Okoro, "Effect of corrosion rates of preheated Schinzochytrium sp. microalgae biodiesel on metallic components of a diesel engine, " vol. 61, no. 10, pp. 7509-7528, 2022.

- [20] W. T. França, M. V. Barros, R. Salvador, A. C. de Francisco, M. T. Moreira, and C. M. J. T. I. J. o. L. C. A. Piekarski, "Integrating life cycle assessment and life cycle cost: A review of environmental-economic studies, " vol. 26, pp. 244-274, 2021.
- [21] I. G. Kerdan and D. M. J. A. E. Gálvez, "Artificial neural network structure optimisation for accurately prediction of exergy, comfort and life cycle cost performance of a low energy building, " vol. 280, p. 115862, 2020.
- [22] H. Yamashita and H. Li, *Nanostructured photocatalysts*. Springer, 2016.
- [23] R. S. Gavhane, A. M. Kate, A. Pawar, M. R. Safaei, M. E. M. Soudagar, M. Mujtaba Abbas, H. Muhammad Ali, N. R. Banapurmath, M. Goodarzi, and I. A. Badruddin, "Effect of zinc oxide nano-additives and soybean biodiesel at varying loads and compression ratios on VCR diesel engine characteristics, " *Symmetry*, vol. 12, no. 6, p. 1042, 2020.
- [24] M. E. M. Soudagar, N.-N. Nik-Ghazali, M. A. Kalam, I. A. Badruddin, N. R. Banapurmath, M. A. B. Ali, S. Kamangar, H. M. Cho, and N. Akram, "An investigation on the influence of aluminium oxide nano-additive and honge oil methyl ester on engine performance, combustion and emission characteristics," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2291-2307, 2020.
- [25] M. E. M. Soudagar, N.-N. Nik-Ghazali, M. A. Kalam, I. A. Badruddin, N. Banapurmath, T. Y. Khan, M. N. Bashir, N. Akram, R. Farade, and A. Afzal, "The effects of graphene oxide nanoparticle additive stably dispersed in dairy scum oil biodiesel-diesel fuel blend on CI engine: performance, emission and combustion characteristics," *Fuel*, vol. 257, p. 116015, 2019.
- [26] E. Khalife, M. Tabatabaei, B. Najafi, S. M. Mirsalim, A. Gharehghani, P. Mohammadi, M. Aghbashlo, A. Ghaffari, Z. Khounani, and T. R. Shojaei, "A novel emulsion fuel containing aqueous nano cerium oxide additive in diesel-biodiesel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions: Part I-Experimental analysis, " *Fuel*, vol. 207, pp. 741-750, 2017.
- [27] E. Akbarian, B. Najafi, M. Jafari, S. Faizollahzadeh Ardabili, S. Shamshirband, and K.-w. Chau, "Experimental and computational fluid dynamics-based numerical simulation of using natural gas in a dual-fueled diesel engine," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 1, pp. 517-534, 2018.
- [28] R.-H. Chen, T. X. Phuoc, D. J. I. J. o. H. Martello, and M. Transfer, "Effects of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation," vol. 53, no. 19-20, pp. 3677-3682, 2010.
- [29] H. Tyagi, P. E. Phelan, R. Prasher, R. Peck, T. Lee, J. R. Pacheco, and P. J. N. I. Arentzen, "Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel, " vol. 8, no. 5, pp. 1410-1416, 2008.
- [30] M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, B. Najafi, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, S. F. Ardabili, E. Akbarian, E. Khalife, P. Mohammadi, H. Rastegari, and H. S. J. J. o. c. p. 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.
- [31] B. Singh, J. Kaur, and K. J. J. o. E. R. T. Singh, "Production of biodiesel from used mustard oil and its performance analysis in internal combustion engine, " vol. 132, no. 3, p. 031001, 2010.
- [32] D. Yuvarajan, M. D. Babu, N. BeemKumar, and P. A. J. A. P. R. Kishore, "Experimental investigation on the influence of titanium dioxide nanofluid on emission pattern of biodiesel in a diesel engine, " vol. 9, no. 1, pp. 47-52, 2018.
- [33] K. Fangsuwannarak and K. J. R. R. P. M. O. M. Triratanasirichai, "Improvements of palm biodiesel properties by using nano-TiO₂ additive, exhaust emission and engine performance, " vol. 43, pp. 111-118, 2013.
- [34] M. Shahabuddin, A. Liaquat, H. Masjuki, M. Kalam, M. J. R. Mofijur, and S. E. Reviews, "Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel, " vol. 21, pp. 623-632, 2013.
- [35] A. E. Özçelik, H. Aydoğan, M. J. E. C. Acaroğlu, and Management, "Determining the performance, emission and combustion properties of camelina biodiesel blends, " vol. 96, pp. 47-57, 2015.
- [36] A. N. Ozsezen, M. J. E. C. Canakci, and Management, "Determination of performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled with canola and waste palm oil methyl esters, " vol. 52, no. 1, pp. 108-116, 2011.
- [37] T. Maggos, J. Bartzis, M. Liakou, and C. J. J. o. h. m. Gobin, "Photocatalytic degradation of NO_x gases using TiO₂-containing paint: A real scale study, " vol. 146, no. 3, pp. 668-673, 2007.

English Abstract

Evaluation of performance and emissions of dual fuel diesel engine in the presence of biodiesel and photocatalytic nanoparticles from the point of view of economic analysis

Ramin Arab-Ameri¹, Habib Kolahdooz^{2*}

1- Master's student, Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Esfaryen Branch, Esfaryen, raminameri.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: 2024/12/28, Accepted: 2025/01/30)

The aim of this research is to evaluate engine performance and greenhouse gas emissions from the perspective of economic evaluation of power generation stages. The dual-fuel approach combines conventional diesel with biodiesel and offers a way to reduce greenhouse gas emissions and increase the renewable content of the fuel. The study evaluates the effects of these additives on engine performance, focusing on key metrics such as power output, fuel efficiency and torque. The research steps include testing a dual-fuel diesel engine (co-combustion of gas and liquid fuels) with different ratios of biodiesel and conventional diesel, along with different types and concentrations of photocatalytic nanoparticles. The analysis of greenhouse gas emissions focuses on pollutants such as nitrogen oxides (NO_x), particulate matter (PM) and carbon dioxide (CO₂). The results show that the use of biodiesel and photocatalytic nanoparticles in a dual-fuel diesel engine can lead to improved combustion efficiency and lower emissions of bio pollutants. The economic analysis method presents the strengths and weaknesses of the combustion process in achieving the cost-effectiveness case for this approach and highlights the potential savings from reduced greenhouse gas emissions and power generation costs.

Keywords: Dual fuel engine, diesel fuel, environmental effects, sustainable power, economic cycle evaluation