

بررسی پارامترهای آلاینده‌ی موتور دیزل با استفاده از ترکیبات سوخته‌های دیزل-بیودیزل

مجتبی طیبی^۱، مصطفی کیانی ده کیانی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم- انرژی تجدیدپذیر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید

چمران اهواز، اهواز، ایران

Mojtabatayebi2014@gmail.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

Mostafa-kyani@yahoo.com

خلاصه

پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه پارامترهای آلاینده‌ی و ویژگی‌های احتراقی موتور دیزل، با استفاده از دو نوع سوخت دیزل و بیودیزل، انجام شده است. فرآیند شبیه‌سازی به کار گرفته شده در این تحقیق، بر پایه مدل‌ها و توابع استاندارد طراحی شده و بدون اعمال تغییرات دلخواه یا دست‌کاری در نتایج، انجام پذیرفته است؛ به همین دلیل از دقت و اعتبار بالایی برخوردار بوده و نتایج حاصل با داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش‌های عملی نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. سوخت بیودیزل استفاده شده نیز از گزینه‌های پیش‌فرض نرم‌افزار انتخاب شده و استانداردهای لازم برای مصرف در فرآیند احتراق را دارا بوده است. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی مربوط به احتراق سوخت دیزل با خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی بیودیزل، تطابق قابل قبولی را از نظر پارامترهای آلاینده‌ی و رفتار احتراقی نشان داده است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که میزان فشار داخلی سیلندر، دمای میانگین احتراق و همچنین غلظت آلاینده‌هایی نظیر مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و دوده (PM) در هنگام احتراق سوخت دیزل بیشتر از حالت استفاده از بیودیزل است. در مقابل، میزان تولید دی‌اکسید کربن (CO₂) در فرآیند احتراق سوخت بیودیزل نسبت به دیزل افزایش داشته است.

کلمات کلیدی: بیودیزل، موتورهای احتراقی، آلاینده‌ی، احتراق

۱. مقدمه

امروزه، کنترل و کاهش آلودگی هوا به دلیل مصرف سوخت های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه ای بزرگترین چالش در سراسر جهان است [۱]. با افزایش اثرات گازهای گلخانه ای، محققان در حال تحقیق روی استراتژی های احتراق هستند که می توانند همزمان انتشار آلاینده ها را کاهش داده و کارایی حرارتی موتور را بهبود بخشند [۲]. تحقیقات گوناگون صورت گرفته در زمینه احتراق باعث توسعه موتورهای احتراق تراکمی (CI*) شده است. موتور CI به طور گسترده در بخش های مختلفی از جمله وسایل نقلیه جاده ای، ماشین های کشاورزی، حمل و نقل، صنعتی، دریایی و لکوموتیو مورد استفاده قرار می گیرد [۳]. در حالی که موتور دیزل معمولاً راندمان بالاتری نسبت به موتورهای اشتعال جرقه ای (SI†) دارد، اما انتشار آلاینده هایی مانند دوده و NOx همچنان به عنوان نگرانی عمده برای محیط زیست محسوب می شود [۴]. برای رفع این نگرانی ها سوخت های جایگزین به طور گسترده ای به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست، اقتصادی و قابل دسترس بکار گرفته شده اند. یکی از این سوخت ها بیودیزل می باشد که، از طریق فرآیند استریفیکاسیون تولید می شود [۵]. این سوخت ها علاوه بر تولید کمتر آلاینده ها، گشتاور و قدرت مناسبی تولید می کنند [۱]. بیودیزل که از محصولات گیاهی مختلف و همچنین چربی حیوانات تولید می شود، در مقایسه با سوخت های فسیلی قابل تجدید، غیرسمی و سازگار با محیط زیست هستند. در حال حاضر، منابع بیودیزل عبارتند از: روغن سویا روغن آفتابگردان، روغن ذرت، روغن پسماند، روغن زیتون، روغن کلزا، روغن کرچک، روغن بذر گندم سیاه، روغن نخل و روغن بذر کتان و غیره . بیودیزل تولید شده از منابع روغن خوراکی مانند روغن نخل، روغن سویا و روغن آفتابگردان ، بیودیزل نسل اول نامیده می شود [۶].

بیودیزل های نسل دوم عمدتاً از روغن های غیر خوراکی تولید می شوند، و بعضی اوقات از زباله ها یا روغن پسماند و چربی های حیوانی تولید می شوند [۷]. امروزه محققان به سمت تولید بیودیزل از منابع غیر خوراکی گرایش پیدا کرده اند. در مقایسه با سوخت دیزل، بیودیزل دارای فراریت کمتری می باشد [۸]. این خصوصیات باعث می شود تبخیر، پخش و مخلوط شدن با هوا درون سیلندر در طول دوره تزریق سوخت به خوبی انجام نشود و در نتیجه دارای بازده کمتر نسبت به سوخت دیزل باشد. برای حل این مشکلات سه روش به عنوان مناسب ترین روش های مورد استفاده محققان در سراسر جهان بکار گرفته شده است. این روش ها عبارتند از: مخلوط کردن بیودیزل با دیزل در نسبت های خاص، پیش گرمایش بیودیزل قبل از تزریق داخل سیلندر، تنظیم زمان و فشار تزریق. به طور کلی، گزارش شده این روش ها که در بهبود جزئی عملکرد موتور و کاهش آلاینده های موتورهای CI با سوخت بیودیزل موفق بوده اند [۹].

اوزن و همکاران در تحقیقی بر روی عملکرد و ویژگی های احتراق یک موتور دیزل پاشش مستقیم، از سوخت بیودیزل روغن پسماند خرما و بیودیزل روغن کانولا به عنوان به عنوان سوخت استفاده کردند. بیشینه گشتاور با استفاده از بیودیزل کمی کاهش پیدا کرد. توان و گشتاور موتور در مقایسه با سوخت دیزل کاهش پیدا کرد، در حالیکه مصرف سوخت ویژه ی ترمزی افزایش یافت [۱۰].

* Compression Ignition

† Spark Ignition

تحقیقات زیادی روی عملکرد و نشر آلاینده های سوخت بیودیزل در مقایسه با سوخت دیزل انجام شده است. اکسیژن موجود در بیودیزل فرایند احتراق را نسبت به سوخت دیزل بهبود می بخشد، در نتیجه مقدار ذرات ریز، مونواکسید کربن و تمام هیدروکربن ها در موتور کاهش و میزان اکسید نیتروژن افزایش پیدا می کند. ۷۰/۴ درصد از محققان به این نتیجه رسیده اند که بیودیزل قدرت موتور را بخاطر پایین بودن ارزش گرمایی، کاهش می دهد [۱۱]. اکثر موتورهای دیزلی قابلیت کار با بیودیزل در درصدهای کم بدون اصلاح دارند و اکثر شرکت های بزرگ موتور به طور رسمی اعلام کرده اند که با استفاده از مخلوط های بیودیزل تا B20، گارانتی موتور باطل نمی شود، در حالی که تعدادی از تولید کنندگان اجازه استفاده از B100 را نیز می دهند گزارش شده است که یک موتور دیزل اصلاح نشده، قدرت و گشتاور کمتری با استفاده از سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل تولید می کند [۹].

کارارتو و همکاران به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد بیودیزل در مخلوط ها باعث کاهش ناچیز توان و گشتاور در محدوده سرعت کامل ترکیبات مختلف (B100, B80, B70, B50, B30, B20) دیزل و بیودیزل روی یک موتور دیزل را در پی داشت [۱۲].

آیدین و همکاران گزارش کردند که گشتاور با افزایش متیل استر روغن کتان در ترکیبات مخلوط سوخت (B75, B50, B20, B5) به علت گرانیوی بالا و ارزش گرمایی پایین این روغن کاهش می یابد [۱۳].

موتورهای دیزلی جدید می توانند با سوخت بیودیزل و مخلوط های آن با سوخت دیزل با اندکی تغییرات کار کنند ولی برای بهبود عملکرد آنها می توان زمان تزریق سوخت، فشار تزریق و نسبت هوا به سوخت را تنظیم نمود. همچنین می توان در هندسه محفظه احتراق مانند پیستون و سرسیلندر نیز تغییراتی ایجاد نمود. برخی مطالعات اخیر به بررسی عملکرد و آلاینده های موتور با استفاده از بیودیزل در سرعت های مختلف موتور، بارها و نسبت متفاوت دیزل-بیودیزل پرداخته اند. این نتایج نشان می دهد که عملکرد موتور وابسته به درصد بیودیزل استفاده شده می باشد. با این وجود برای بدست آوردن نسبت بیودیزل بهینه در موتور عوامل زیادی مانند مقدار سوخت مصرفی و میزان انتشار آلاینده ها را باید در نظر گرفت [۱۴].

۲. روش کار

در بخش اول روش انجام آزمایش های تجربی و در بخش دوم روش شبیه سازی موتور شرح داده شده است. در این پژوهش، آزمایش های تجربی بر یک موتور اشتعال تراکمی، تک سیلندر، آب خنک با استفاده از مخلوط سوخت های دیزل-بیودیزل (B0, B10 و B20) انجام شد.

۱.۲. صحنه گذاری داده ها

در این پژوهش سوخت بیودیزل مورد نیاز، از روغن پسماند خوراکی تهیه شد. این پژوهش متمرکز بر شبیه سازی احتراق درون موتور بوده و از داده تجربی فقط برای صحنه گذاری مدل استفاده می شود. همچنین عدم قطعیت در آزمایش های موتور خیلی کم می باشد که تقریباً همه ی مقالات تجربی مرتبط به موتور آنالیز آماری صورت نگرفته است.

برای ارزیابی مشخصه های عملکردی و آلاینده گی موتور از روش آزمون موتور در سرعت ثابت استفاده خواهد شد. سرعت موتور در تمامی آزمایش ها تقریباً ۱۲۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته می شود. سرعت ثابت موتور توسط گاورنر کنترل می شود. گاورنر در موتورهای دیزلی دور موتور را صرف نظر از کاهش یا افزایش بار، ثابت نگه می دارد. این عمل توسط دو عدد وزنه که به محور خود اتصال لولایی دارند، انجام می گیرد. این محور با سرعتی برابر نصف دور میل لنگ می گردد. به طور کلی موتورهای گاورنردار می توانند در دو حالت کنترل با گاورنر و کنترل با بار بسته به بار گشتاور وارد بر موتور، کار کنند. در روش آزمون سرعت ثابت مورد نظر در این پژوهش کلیه آزمایش ها در حالت کنترل با گاورنر صورت خواهد گرفت. پارامترهای عملکردی شامل توان و گشتاور موتور، با استفاده از یک دینامومتر هیدرولیکی اندازه گیری خواهد شد. مقدار گازهای خروجی اگزوز به وسیله یک آنالایزر دود که در منیفولد خروجی قرار می گیرد، اندازه گیری می شود.

۲.۲. شبیه سازی

۱.۲.۲. مدل های شبیه سازی احتراق

امروزه با توجه به مشکلات و هزینه های سنگین روش های آزمایشگاهی، استفاده از شبیه سازی برای بررسی فرایندهای مختلف در حوزه مهندسی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. فرایند احتراق نیز یکی از پیچیده ترین فرایندهای طبیعی است که از این قاعده مستثنی نیست. مدل احتراق، یکی از پارامترهای اصلی شبیه سازی چرخه احتراق در موتورهای احتراق داخلی می باشد. در واقع تمام جنبه های عملکرد موتور به فرایند احتراق بستگی دارد. احتراق در یک حالت سه بعدی وابسته به زمان و در یک جریان توربولانس و مخلوطی از هیدروکربن ها اتفاق می افتد و این در حالی است که اطلاعات خیلی کمی از شیمی احتراق در دسترس است. محفله احتراق می تواند اشکال مختلفی داشته باشد، بنابراین پیش بینی انتقال حرارت مشکل خواهد بود.

سه روش: مدل های صفر بعدی، مدل های شبه بعدی و مدل های چند بعدی برای بررسی فرایند احتراق وجود دارد. هر سه روش می توانند برای تخمین بازده موتور، عملکرد و آلاینده گی ها استفاده شود. مدل صفر بعدی و مدل تک بعدی به سهولت میتوانند برای تکمیل مدل های موتور به کار بروند ولی هیچ ارتباط صریحی بین آنها و هندسه محفله احتراق وجود ندارد. همچنین این مدل ها برای مطالعه پارامتریک موتور در جهت بهبود آن می تواند مورد استفاده واقع شود. وقتی هندسه محفله احتراق خیلی مهم باشد و یا مسئله پرخورانی کردن مطرح باشد، استفاده از روش های چند بعدی به میان خواهد آمد و اگر حجم محاسبات کامپیوتری در روش چند بعدی خیلی زیاد باشد، به جای انجام محاسبات برای کل موتور، محاسبات فقط برای محفله احتراق انجام می شود. امروزه روش های پیچیده دیگری نیز در حال تحقیق و بازاریابی هستند که برای بررسی اثرات توربولانس و مینیک شیمیایی استفاده می شوند.

۲.۲.۲ مدل های صفر بعدی

در این مدل ها، از الگوهای تجربی آزادسازی گرما مثل تابع ویب برای شبیه سازی استفاده می شود که زمان تنها متغیر مستقل است. طبق این الگو محفله احتراق به سه بخش تقسیم بندی می گردد:

الف) گازهای سوخته نشده

ب) گازهای سوخته شده

ج) گازهای سوخته شده مجاور دیواره های محفظه احتراق

اساس تحلیل در این روش معادلات تجربی خواهد بود. برای مثال برای انتقال گرما از معادله وشنی یا آناند و غیره استفاده می گردد و یا از ساز و کار زلدوویچ برای تولید اکسید ازت استفاده می شود [۱۵].

۳.۲.۲. مدل های شبه بعدی

این الگو از زیر الگوهای جدا از هم برای احتراق استفاده می کند که شامل نفوذ اسپری، مخلوط شدن با هوا، تبخیر قطره سوخت، تاخیر در اشتعال، آزادسازی گرما و شکل گیری آلاینده ها می باشد. سوخت تزریق شده درون محفظه احتراق در هر لحظه به نواحی کوچک تری که در جهت شعاعی پخش می گردند، تقسیم می شوند. با گذشت زمان سوخت تزریق شده، بسته هایی از اسپری سوخت را در جهت محور اسپری بوجود می آورند. فرض می شود نواحی مخلف در هر بسته جرم سوخت مساوی داشته باشند، ولی مقدار سوخت ممکن است به علت نرخ پاشش لحظه ای مختلف در زمان شکل گیری بسته ها متفاوت باشد. جرم سوخت در بسته ها را میتوان با استفاده از یک معادله تجربی بر اساس روند پاشش، فشار داخل محفظه و شکل انژکتور محاسبه کرد. همچنین فرض می شود که هیچ گونه تبدیلی بین مناطق گوناگون وجود نخواهد داشت [۱۶].

۴.۲.۲. مدل های چند بعدی

این الگوها به شکل عددی معادلات جرم، اندازه حرکت، انرژی و انواع معادلات بقا را در حالات سه بعدی به منظور پیش بینی انتشار شعله حل می کنند. این الگوها نیازمند حل معادلات جریان بوسیله برنامه های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) هستند که با زیرمدل هایی برای فرآیندهای احتراق و برخورد شعله با دیواره و آلاینده ها انجام می شود [۱۷].

۵.۲.۲. مدل سازی

مهم ترین پارامتر تاثیرگذار درون سیلندر موتور، فشار درون سیلندر می باشد. در این پایان نامه فشار درون سیلندر به صورت تجربی اندازه گیری می شود و نتایج حاصله با نتایج مدل مقایسه می شود و مدل بهینه انتخاب و دیگر پارامترهای موتور بر اساس این مدل بدست می آید. در بخش تجربی فقط فشار درون سیلندر در چندین چرخه اندازه گیری خواهد شد و میانگین داده ها برای صحت گذاری و مقایسه با نتایج استفاده می شود. برای شبیه سازی فرآیند احتراق با استفاده از نرم افزار AVL FIRE، در ابتدا هندسه موتور طراحی و شبکه بندی می شود، سپس مدل شبکه بندی شده در ماژول ورک فلو منیجر نرم افزار AVL FIRE فراخوانی می شود. تمامی مراحل شبیه سازی و اعمال پارامترها و ثبت خروجی های دو بعدی و سه بعدی در این محیط انجام می گیرد. مراحل شبیه سازی به طور خلاصه به صورت زیر می باشد:

الف) تعریف هندسه ناحیه مورد نظر میدان محاسباتی.

ب) تولید شبکه یا بخش سلول های محاسباتی.

ج) انتخاب مجموعه پدیده های فیزیکی و شیمیایی که باید مدل شوند.

د) تعریف خواص سیال.

و) تشخیص و تعریف شرایط مرزی لازم در سلول هایی که منطبق و یا در تماس با مرز محدوده می باشند.

در این تحقیق سه نوع شرط مرزی برای انجام محاسبات در نظر گرفته خواهد شد:

الف) هد (Head): این شرط مرزی از نظر وضعیت حرکت یک مرز با مولفه های سرعت صفر و از نظر حرارتی مرزی با دمای ثابت ۵۲۵ درجه کلون در نظر گرفته می شود. بنابراین هد یک شرط مرزی دیواره ساکن با دمای ثابت می باشد.

ب) دیواره: این شرط مرزی از نظر وضعیت حرکت یک مرز با مولفه های سرعت صفر و از نظر حرارتی مرزی با دمای ثابت ۴۵۰ درجه کلون در نظر گرفته می شود.

ج) پیستون: این شرط مرزی از نظر وضعیت حرکت به صورت مرز متحرک با دمای ثابت ۵۵۰ درجه کلون در نظر گرفته می شود.

نرم افزار AVL برای مدل سازی محفظه احتراق از یک مش متحرک سه بعدی استفاده می کند. روش به کار رفته برای حل معادلات کاملاً ضمنی بوده و می توان از یک شبکه بی سازمان که از چند وجهی های دلخواه ساخته شده است، استفاده کرد. برای گسسته سازی معادلات روش حجم محدود و برای ارتباطات معادلات مومنتوم و پیوستگی (ایجاد ارتباط بین سرعت، فشار و چگالی)، الگوریتم SAMPLE مورد استفاده قرار می گیرد. شبیه سازی برای موتورهای با مشخصات هندسی مشابه قابل تعمیم می باشد.

۳. مروری بر مطالعات پیشین

لژنیک و همکاران طی پژوهشی به تجزیه و تحلیل عددی و تجربی تأثیر سوخت بیودیزل بر ویژگی های پاشش سوخت با استفاده از برنامه شبیه سازی AVL FIRE پرداختند و مشخص گردید که بیودیزل آزمایش شده می تواند به عنوان سوخت جایگزین برای موتورهای دیزلی سنگین استفاده شود [۱۸].

وایدا و همکاران طی پژوهشی به مطالعه تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف سوخت دیزل، بیودیزل و مخلوط آنها بر ویژگی های اسپری سوخت با برنامه شبیه سازی AVL FIRE پرداختند. در این مطالعه، مدل عددی پیاده سازی شده در AVL FIRE متناسب با شرایط سوخت های زیستی اصلاح گردید. مقایسه نتایج آزمایشی و عددی، قابلیت استفاده از مدل عددی را تأیید کردند [۱۹].

سونی و گوپتا به منظور کاهش انتشار آلاینده ها در یک لوکوموتیو دیزلی تک سیلندر تحقیقی انجام دادند که در این تحقیق برای شبیه سازی موتور مورد نظر از نرم افزار AVL FIRE استفاده شد. در این تحقیق، تأثیر مخلوط سوخت های دیزل-متانول، نسبت چرخش، تغییر درصد بازگرداندن گازهای خروجی (EGR) و افزودن آب بر پارامترهای آلاینده های مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان داد که افزودن آب تا حدی مقدار آلاینده ها کاهش داد [۲۰].

وانگ و همکاران به مطالعه شبیه سازی عددی تأثیر تزریق سوخت و اتمیزه کردن آن در یک موتور دیزل پرداختند. تجزیه و تحلیل ویژگی های مخلوط سوخت و هوا و ویژگی های احتراق تحت نسبت چرخش های مختلف ارائه شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخش، فرآیند احتراق بهبود یافت. همچنین میزان انتشار NO و دوده نسبت به چرخش کاملاً حساس بود، به طوری که با افزایش نسبت چرخش مقدار NO افزایش و انتشار دوده کاهش یافت [۲۱].

توتاک و همکاران در پژوهشی به اعتبارسنجی و بهینه سازی چرخه ی حرارتی موتور دیزل با مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. در این پژوهش نتایج شبیه سازی عددی یک موتور اشتعال تراکمی و بهینه سازی مش

محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی بررسی شد و در نتیجه توانستند توزیع دما، میدان جریان و آلاینده‌گی را پیش بینی کنند و در نتیجه به زمان بندی تزریق بهینه ۱۲ درجه قبل از نقطه مرگ بالا دست یافتند [۲۲].

میرمحمدی و حسین آبادی در پژوهشی به بررسی اثر زاویه پاشش سوخت بر عملکرد و میزان آلاینده‌گی موتور دیزل توسط نرم افزار AVL FIRE به وسیله شبیه سازی چرخه بسته موتور که شامل دو مرحله تراکم و احتراق می باشد پرداختند و با اعمال معادلات احتراق، آشفته‌گی و آلاینده‌گی، شبیه سازی انجام شد و نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های تجربی صحت گذاری شد تا قابلیت اعتماد سایر نتایج برای بحث و مقایسه فراهم گردد. سپس با شبیه سازی سه زاویه متفاوت پاشش سوخت در صفحه (XY)، نتایج فشار، نرخ گرمای آزاد شده، دمای داخل استوانه و مقدار آلاینده‌گی آنها با هم مقایسه گردید [۲۳].

ساعتچی و همکاران طی پژوهشی یک موتور احتراق تراکمی سوخت همگن پاشش مستقیم با سوخت گاز طبیعی و دیزل را با استفاده از نرم افزار FIRE شبیه سازی کردند. با توجه به نتایج حاصل، دمای ورودی نقش بسزایی در شروع احتراق داشت به نحوی که افزایش دمای ورودی سبب احتراق زودرس گردید و در نتیجه آن توان کاهش یافت. همچنین حداکثر دمای متوسط درون سیلندر و میزان آلاینده NOx با افزایش دمای ورودی افزایش و آلاینده های CO و HC کاهش پیدا کرد. علاوه بر این، افزایش سوخت متان سبب کاهش دوره احتراق گردید. همچنین افزودن متان موجب تسریع در عمل سوختن و کامل تر شدن اکسیداسیون شده و در نتیجه مقدار آلاینده های CO و HC را کاهش داد. مخلوط سوخت متان با دیزل موجب افزایش متوسط دمای درون سیلندر شده که این امر باعث افزایش آلاینده NOx نسبت به حالت تک سوز شد، اما با افزایش نسبت پیش آمیختگی پس از یک میزان خاصی، آلاینده NOx کاهش یافت [۲۴].

۴. نتیجه گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، سوخت بیودیزل به عنوان یک جایگزین مناسب برای دیزل، به ویژه از منظر زیست محیطی و عملکرد احتراقی، مطرح می شود. احتراق زودتر به دلیل زمان تأخیر کمتر در اشتعال، باعث کاهش فشار و دمای متوسط درون سیلندر در مقایسه با دیزل شده است. همچنین، وجود اکسیژن بیشتر در ترکیب بیودیزل موجب کاهش آلاینده هایی نظیر CO و دوده شده، در حالی که CO₂ به دلیل اکسیداسیون کامل تر کربن افزایش یافته است. از سوی دیگر، دمای احتراق پایین تر در بیودیزل موجب کاهش نرخ تولید NOx شده است. در نهایت، بررسی دماهای اولیه مختلف نشان داد که افزایش دمای اولیه سیلندر منجر به کاهش اکسیژن و در نتیجه افت فشار درون سیلندر می شود.

۵. مراجع

1. Rajak, U., Nashine, P., Verma, T. N., & Pugazhendhi, A. (2019). Alternating the environmental benefits of Aegle-diesel blends used in compression ignition. Fuel, 256, 115835.
2. Lu, X., Zhou, X., Ji, L., Yang, Z., Han, D., Huang, C., & Huang, Z. (2013). Experimental studies on the dual-fuel sequential combustion and emission simulation. Energy, 51, 358-373.
3. Li, J., Yang, W. M., An, H., Zhou, D. Z., Yu, W. B., Wang, J. X., & Li, L. (2015). Numerical investigation on the effect of reactivity gradient in an RCCI engine fueled with gasoline and diesel. Energy Conversion and Management, 92, 342-352.

4. Taghavifar, H., Taghavifar, H., Mardani, A., & Mohebbi, A. (2014). Exhaust emissions prognostication for DI diesel group-hole injectors using a supervised artificial neural network approach. *Fuel*, 125, 81-89.
5. Fattah, I. R., Masjuki, H. H., Liaquat, A. M., Ramli, R., Kalam, M. A., & Riazuddin, V. N. (2013). Impact of various biodiesel fuels obtained from edible and non-edible oils on engine exhaust gas and noise emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 552-567.
6. Hassan, N. M. S., Rasul, M. G., & Harch, C. A. (2015). Modelling and experimental investigation of engine performance and emissions fuelled with biodiesel produced from Australian Beauty Leaf Tree. *Fuel*, 150, 625-635.
7. Harch, C. A., Rasul, M. G., Hassan, N. M. S., & Bhuiya, M. M. K. (2014). Modelling of engine performance fuelled with second generation biodiesel. *Procedia Engineering*, 90, 459-465.
8. Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., & Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 184-193.
9. Bari, S., & Saad, I. (2014). Effect of guide vane height on the performance and emissions of a compression ignition (CI) engine run with biodiesel through simulation and experiment. *Applied energy*, 136, 431-444.
10. Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., & Sayin, C. (2009). Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel*, 88(4), 629-636.
11. خوب بخت، گ. (۱۳۹۳). بررسی شاخص های عملکردی، آلاینده‌گی و اقتصادی کاربرد سوخت بیودیزل در موتورهای دیزل. ششمین همایش علمی تخصصی انرژی های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، تهران، <https://civilica.com/doc/311334>.
12. Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., & Tonon, S. (2004). Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*, 29(12-15), 2195-2211.
13. Aydin, H., & Bayindir, H. (2010). Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35(3), 588-592.
14. کنگری، الف. ۱۳۹۳. تحلیل احتراق سوخت بیودیزل توسط نرم افزار AVL FIRE. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه.
15. Ramos, J. I. (1989). *Internal combustion engine modeling*. Hemisphere publishing corporation.
16. Jung, D., & Assanis, D. N. (2001). Multi-zone DI diesel spray combustion model for cycle simulation studies of engine performance and emissions. *SAE transactions*, 1510-1532.
17. شاهکلائی، م. ۱۳۹۴. بررسی طرح های مختلف محفظه احتراق و زوایای پاشش در موتورهای دیزلی پاشش مستقیم. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.
18. Lešnik, L., Vajda, B., Žunič, Z., Škerget, L., & Kegl, B. (2013). The influence of biodiesel fuel on injection characteristics, diesel engine performance, and emission formation. *Applied energy*, 111, 558-570.

19. Vajda, B., Lešnik, L., Bombek, G., Biluš, I., Žunič, Z., Škerget, L., ... & Kegl, B. (2015). The numerical simulation of biofuels spray. *Fuel*, 144, 71-79.
20. Soni, D. K., & Gupta, R. (2016). Optimization of methanol powered diesel engine: A CFD approach. *Applied Thermal Engineering*, 106, 390-398.
21. Wang, G., Yu, W., Li, X., Su, Y., Yang, R., & Wu, W. (2019). Experimental and numerical study on the influence of intake swirl on fuel spray and in-cylinder combustion characteristics on large bore diesel engine. *Fuel*, 237, 209-221.
22. Tutak, W., & Jamrozik, A. (2016). Validation and optimization of the thermal cycle for a diesel engine by computational fluid dynamics modeling. *Applied Mathematical Modelling*, 40(13-14), 6293-6309.
23. ساعتچی نوبری، ع. و عطاریان، ک. و یحیایی، م. و میرزامحمد، ا. و قماش، ح. (۱۳۹۳). شبیه سازی عددی موتورهای احتراق تراکمی سوخت همگن پاشش مستقیم با سوخت گاز طبیعی و دیزل. نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، سال شانزدهم، شماره دوم، صفحه ۵۵ - ۸۱.
24. میرمحمدی، ع. و حسین آبادی، م. ۱۳۹۵. بررسی اثر زاویه پاشش سوخت بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل تزریق مستقیم. اولین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، <https://civilica.com/doc/507276>.