

شبیه‌سازی عملکرد یک موتور احتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده (RCCI) با سوخت بیودیزل روغن پسماند پخت و پز (WCO) با تمرکز بر روند مصرف گونه‌های تشکیل دهنده سوخت

صالح طالب امیری^۱، روزبه شفقت^{۲*}، امید جهانیان^۳، رضوان عالمیان^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳ پژوهشگر فوق دکتری، آزمایشگاه کوربا، INSA Rouen Normandie

^۴ مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

چکیده

به‌کارگیری استراتژی موتورهای کم‌دماسوز یکی از راهکارهای موثر برای کاهش اکسیدهای نیتروژن است؛ در مطالعه حاضر یک مدل تک‌ناحیه‌ای با در نظر گرفتن مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی، جهت بررسی عملکرد یک موتور احتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل شده (RCCI) با سوخت ترکیبی دیزل/بیودیزل روغن پسماند پخت و پز (WCO) - بنزین توسعه داده شد. ابتدا نتایج عددی به کمک نتایج تجربی اعتبارسنجی و سپس پارامترهای عملکردی و نرخ تولید و مصرف گونه‌ها در بارهای مختلف بررسی شد. بررسی مصرف گونه‌های شیمیایی نشان داد، اسیدهای چرب غیر اشباع در فرآیند احتراق با سرعت بیشتری مصرف می‌شوند. سرعت مصرف دیزل نیز نسبت به WCO در تمامی بارها کمتر است. با توجه به نتایج، با افزایش بار از ۲۰ تا ۸۰ درصد، لحظه‌ی شروع احتراق گرم، در حدود ۲/۵ درجه به لحظه‌ی شروع پاشش سوخت نزدیک‌تر می‌شود؛ همچنین با افزایش جرم سوخت، به دلیل سهم بالای سوخت LR بازه‌ی شکل‌گیری احتراق سرد کوتاه‌تر می‌شود. در تمامی حالت‌ها شروع تولید گونه‌ی فرمالدهید هم‌زمان با آغاز آزادسازی حرارت دمایی و شروع تولید گونه‌ی هیدروکسیل هم‌زمان با آغاز فرآیند آزادسازی حرارت دما بالا است. نسبت مولی فرمالدهید تولید شده به هیدروکسیل با افزایش بار موتور، به دلیل کاهش نسبت سوخت پاشش مستقیم (DI) به سوخت پاشش پورت (FPI) کاهش یافته، منجر به کاهش بازه‌ی احتراق سرد می‌شود.

کلمات کلیدی: سوخت بیودیزل روغن پسماند؛ اسید چرب اشباع؛ موتور RCCI شبیه‌سازی صفر بعدی.

Performance simulation of a reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine fueled with waste cooking oil biodiesel (WCO) with a focus on consumption trends of fuel constituents

S. Talesh Amiri¹, R. Shafaghat^{2,*}, O. Jahanian³, R. Alamian⁴

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Babol Noshirvani university of technology, Babol, Iran

² Prof., Mech. Eng., Babol Noshirvani university of technology, Babol, Iran

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Babol Noshirvani university of technology, Babol, Iran

⁴ Postdoctoral Research Fellow, CORIA Lab, INSA Rouen Normandie

Abstract

Using the strategy of low-temperature combustion engines is one of the effective solutions to reduce nitrogen oxides; In the present study, a single-zone code was developed considering the detailed chemical kinetic mechanism to investigate the performance of an RCCI engine with WCO-gasoline diesel/biodiesel hybrid fuel. The study of the consumption of chemical species showed that unsaturated fatty acids are consumed more quickly in the combustion process. Diesel consumption speed is also lower than WCO in all loads. According to the results, with an increase in load from 20 to 80%, the moment of starting hot combustion is closer to the moment of starting fuel injection by about 2.5 degrees. Also, with the increase of fuel mass, due to the high proportion of LR fuel, the period of formation of cold ignition becomes shorter. In all cases, the beginning of the production of formaldehyde species is the same time as the beginning of the low temperature heat release and the beginning of the production of the hydroxyl species is the same time as the beginning of the high temperature heat release process.

Keywords: waste cooking oil biodiesel fuel; saturated fatty acid; Zero-dimensional simulation RCCI engine.

۱- مقدمه

وابستگی موتورهای احتراق داخلی به سوخت‌های فسیلی و افزایش تقاضای انرژی منجر به کاهش چشم‌گیر ذخایر سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر شده است. از طرفی موتورهای احتراق داخلی یکی از پرکاربردترین ادوات محرک در صنایع مختلف هستند؛ زیرا علاوه بر چگالی توان بالا، سوختی به نسبت ارزان مصرف می‌کنند؛ لذا امکان حذف این ادوات قدرتمند از صنایع مختلف جهان به راحتی امکان‌پذیر نیست [۱]؛ بنابراین، محققان در سراسر جهان مصمم به یافتن جایگزین‌های پایدار برای سوخت‌های فسیلی برای دستیابی به احتراق پاک هستند تا نگرانی‌های فزاینده در مورد وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تأثیر آن بر محیط زیست برطرف شود [۲، ۳]. یکی از سوخت‌های جایگزین مناسب برای استفاده در موتورهای اشتعال تراکمی، بیودیزل است که از انواع روغن‌های گیاهی و حیوانی از منابع تجدیدپذیر پس از طی فرآیند ترانس استریفیکاسیون استخراج می‌شود [۴، ۵]. روغن سویا [۶]، آفتابگردان [۷]، نخل [۸]، کلزا [۹]، دانه پنبه [۱۰] و جاتروفا [۱۱] از جمله رایج‌ترین روغن‌های مورد استفاده برای تولید بیودیزل هستند.

قیمت روغن‌های گیاهی خوراکی از قیمت سوخت دیزل بالاتر است؛ از طرفی در صورت مصرف روغن‌های خوراکی به عنوان سوخت موتورهای درونسوز جهت موازنه‌ی بازار عرضه و تقاضا، لازم است برخی دانه‌های روغنی و جلبک‌ها به صورت مضاعف کشت شوند که مستلزم صرف زمان، هزینه و تخصیص مساحت زیاد زمین‌های کشاورزی بوده، حتی تهدید بحران‌های تغذیه برای انسان‌ها را به دنبال خواهد داشت. در این شرایط، به‌کارگیری روغن‌های گیاهی پسماند و روغن‌های گیاهی خام غیرخوراکی به عنوان منابع بالقوه‌ی بیودیزل با قیمت پایین ترجیح داده می‌شوند [۱۲]. در این راستا، سوخت بیودیزل روغن پسماند پخت و پز یکی از منابع مورد قبول برای جایگزینی سوخت دیزل است؛ زیرا علاوه بر در دسترس بودن به میزان کافی، با هزینه‌ی ناچیزی قابل تهیه بوده، تولید آن مستلزم صرف زمان زیاد نیست.

هریبرنیک و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹ طی یک مطالعه‌ی عددی و تجربی به بررسی عملکرد و تولید آلاینده‌ی یک موتور دیزل تزریق مستقیم با سوخت ترکیبی دیزل -

WCO پرداختند. آن‌ها همچنین فشار محفظه احتراق و منحنی نرخ آزادسازی حرارت را با توسعه‌ی یک کد احتراق تک ناحیه‌ای صفربعدی استخراج کردند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که اضافه شدن WCO در بار کم باعث افزایش آلاینده‌ی اکسیدهای نیتروژن، HC و CO می‌شود؛ همچنین در بار بالا با اضافه شدن WCO با نسبت ۵۰٪، مقدار آلاینده‌ی soot به میزان ۶۵٪ کاهش می‌یابد؛ در حالی که در نسبت ترکیب ۷۵٪ WCO، مقدار این آلاینده‌ی تنها در حدود ۸/۷٪ کاهش خواهد یافت. پلامونون و سیزر [۱۴] نشان دادند که استفاده از سوخت بیودیزل روغن پسماند باعث افزایش آلاینده‌ی اکسیدهای نیتروژن می‌شود؛ با این حال، بیودیزل پسماند پخت و پز مخلوط شده با گازوئیل (B20) در مقایسه با گازوئیل، ذرات معلق بیشتر و انتشار NOx کمتری دارد. همچنین نتایج نشان دادند که اضافه شدن سوخت بیودیزل روغن پسماند باعث کاهش تأخیر در اشتعال و افزایش بیشینه فشار داخل سیلندر می‌شود. منوگوپال و همکاران [۱۵] در راستای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌ی احتراق سوخت WCO ترکیب سوخت دیزل - PODE/WCO را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ترکیب دی متیل اتر (PODE) با سوخت WCO باعث کاهش ویسکوزیته سوخت ترکیبی، افزایش محتوای اکسیژن و افزایش عدد ستان سوخت می‌شود. در این مطالعه بیودیزل ترانس استری شده WCO در حجم‌های مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با دیزل ترکیب شد. نتایج نشان داد که سوخت ترکیبی W20 باعث افزایش ۶/۳۹ درصدی NOx، کاهش انتشار CO، HC و دوده به ترتیب به میزان ۲۱/۱۱٪، ۲۳/۵۱٪ و ۲۲/۴۵٪ می‌شود.

با توجه به تنوع ترکیبات تشکیل‌دهنده‌ی بیودیزل روغن پسماند تهیه‌شده از منابع مختلف، عملکرد این سوخت‌ها می‌تواند متفاوت باشد. این تفاوت را اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها ایجاد می‌کند [۱۶-۱۸]. در این راستا گانش و همکاران [۱۹] به بررسی اثر کیفیت سوخت WCO در عملکرد موتور دیزل پرداختند. در این مطالعه از روغن آفتابگردان و اولئین نخل به‌دلیل ترکیب متفاوت اسیدهای چرب برای مقایسه استفاده شد. نتایج نشان داد که ویسکوزیته سینماتیکی بیودیزل به شدت تحت تأثیر محتوای روغن‌های پسماند پخت و پز قرار می‌گیرد. علاوه بر این،

اسیدهای چرب اشباع بالا می‌تواند احتراق و شرایط عملیاتی را در بارهای کم بهبود بخشد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل WCO می‌تواند باعث افزایش دمای عملکردی موتور و تولید آلاینده‌گی NOx شود. روش‌های مختلفی از جمله EGR [۲۳]، ترکیب سوخت با افزونه‌هایی چون اتانول و بنزین [۲۴] و اضافه کردن آب به داخل سیلندر [۲۵] برای کاهش آلاینده‌گی NOx پیشنهاد شده است [۲۶]؛ اما یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای کاهش آلاینده‌گی NOx استفاده از استراتژی موتورهای کم‌دماسوز است. در موتورهای LTC دمای احتراق، آلاینده‌گی NOx و دوده به دلیل افزایش سطح همگن‌سازی مخلوط سوخت و هوا به صورت همزمان کاهش می‌یابند. در بین استراتژی‌های LTC موتور RCCI با توجه به کنترل قابل قبول لحظه‌ی شروع احتراق، از محبوبیت بیشتری برخوردار است [۲۷، ۲۸]. به همین دلیل استفاده از سوخت بیودیزل در موتور RCCI می‌تواند علاوه بر کاهش آلاینده‌گی CO، HC و soot، آلاینده‌گی NOx را نیز کاهش دهد [۲، ۲۹]. همچنین مطالعات تجربی زیادی روی تأثیر گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت بیودیزل انجام شد؛ نتایج نشان می‌دهد که اسیدهای چرب تشکیل‌دهنده سوخت بیودیزل تأثیر قابل توجهی بر فاز احتراقی، لحظه‌ی شروع و بازه‌ی احتراق دارد. در این راستا برای ارزیابی دقیق عملکرد انواع سوخت‌های بیودیزل روغن پسماند در موتورهای RCCI، بررسی نرخ مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده این سوخت از اهمیت بالایی برخوردار است؛ لذا هدف مطالعه‌ی حاضر، بررسی عددی بکارگیری سوخت بیودیزل روغن پسماند بر عملکرد یک موتور احتراق تراکمی کم‌دماسوز با استراتژی RCCI با ترکیب سوخت دیزل و بنزین است؛ به طوری که روند تولید و مصرف گونه‌های مختلف همچون اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع و نیز اثر آن بر عملکرد موتور قابل مشاهده باشد. بررسی نرخ مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت بیودیزل و تأثیر آن بر عملکرد و احتراق موتور از اهمیت بالایی برخوردار بوده، به عنوان مهم‌ترین نوآوری، از اهداف مهم این مطالعه است. شایان توجه است که به دلیل اهمیت بالای بررسی گونه‌های مختلف تشکیل‌دهنده سوخت، در این مطالعه از مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی استفاده شده است؛ همچنین به دلیل تعداد بالای گونه‌ها و واکنش‌های موجود در این مکانیزم، با توجه به سرعت

نویسندگان هیچ تفاوت قابل توجهی در عملکرد موتور در طول آزمایش‌های موتور بین بیودیزل‌های تولید شده از روغن‌های تازه و روغن‌های پسماند نیافتند. با این حال، احتراق بیودیزل‌های تولید شده از WCO نسبت به بیودیزل‌های تولید شده از روغن‌های تازه، کربن مونوکسید بالاتری تولید کرد. در مقابل، انتشار اکسید نیتروژن و دود ناشی از بیودیزل‌های تولید شده از روغن‌های پسماند و روغن‌های تازه مشابه بود. جعفری حقیقی و همکاران [۲۰] گزارش کردند که افزایش درصد اسیدهای چرب اشباع (مانند C14:0، C16:0 و C18:0) در بیودیزل، منجر به افزایش عدد ستان و پایداری اکسیداسیون و کاهش تولید NOx می‌شود. پینزی و همکاران [۲۱] تأثیر ساختار استرهای اسید چرب در مشخصه‌های سوخت و انتشار NOx سوخت بیودیزل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پیوندهای دوگانه، مقدار ارزش حرارتی، عدد ستان، ویسکوزیته و دمای انجماد کاهش می‌یابد؛ در حالی که چگالی و دمای شعله آدیباتیک افزایش می‌یابد. همچنین، با بزرگ شدن زنجیره کربن، ارزش حرارتی، عدد ستان، ویسکوزیته، نقطه انجماد، نقطه تبخیر و دمای شعله آدیباتیک افزایش می‌یابد؛ در حالی که چگالی به میزان ناچیزی کاهش خواهد یافت. پوهان و همکاران [۲۲] تأثیر اسیدهای چرب غیر اشباع را در سوخت بیودیزل بر ویژگی‌های احتراق یک موتور CI ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که بیودیزل‌هایی با اسیدهای چرب اشباع بالا دارای عدد ستان کمتری هستند؛ بنابراین بازه‌ی احتراق را افزایش می‌دهند؛ اما بیودیزل‌هایی که از اسیدهای چرب غیر اشباع بالاتری تشکیل شده‌اند، دارای عدد ستان بالاتری بوده، استفاده از آن‌ها بازه‌ی احتراق را کاهش خواهد داد. بهاری و همکاران [۱۷] در یک مطالعه‌ی تجربی، عملکرد سوخت WCO با نسبت بالای اسیدهای چرب اشباع را در یک موتور اشتعال تراکمی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در چهار بار مختلف موتور و سرعت ثابت انجام شد. نتایج نشان داد، با توجه به عدد ستان بالاتر بیودیزل نسبت به دیزل، در صورت استفاده از بیودیزل، مقدار تأخیر در اشتعال در بیشتر موارد کاهش می‌یابد؛ همچنین استفاده از بیودیزل WCO با اسیدهای چرب اشباع بالا باعث بهبود BSFC و BTE می‌شود. بیشترین بهبود در بارگذاری‌های ۱/۲ و ۱/۶ بار مشاهده شد؛ طور کلی، نتایج آن‌ها نشان داد که WCO با

جدول ۱- مشخصات حالت‌های مختلف آزمون [۲]

پارامتر	مقدار بهینه			
	1	2	3	4
عدد مورد	1	2	3	4
نرخ بار (%)	20	40	60	80
BMEP (bar)	۱/۰۶	۲/۱۲	۳/۱۹	۴/۲۴
نسبت انرژی سوخت (% پاششی پورت)	۴۷/۰۸	۵۷/۸۷	۸۲/۲۱	۹۴/۱۱
لحظه‌ی آتش سوخت (CAD) آتش مستقیم bTDC)	30	30	30	30
نسبت هوا به سوخت	۶۱/۵۷	۴۸/۳۷	۳۸/۱۱	۳۰/۱۴

فرآیند تهیه سوخت WCO و ترانس‌استریفیکاسیون در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات سوخت‌های استفاده شده در جدول ۲ و گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت بیودیزل (از آزمون شناسایی GC) در جدول ۳ ارائه شده است. در این کار از یک موتور دیزل تک سیلندر سبک، هوا خنک و تنفس طبیعی با کاربری پمپاژ آب کشاورزی استفاده شد (جدول ۴). شایان ذکر است که سوخت بنزین به عنوان سوخت PFI و مخلوط سوخت دیزل و WCO به عنوان سوخت DI تعریف شدند؛ به‌گونه‌ای که سوخت بنزین به صورت مخلوط با هوا از منی‌فولد ورودی وارد محفظه‌ی احتراق شده، سوخت ترکیبی دیزل/بیودیزل به صورت مستقیم به محفظه‌ی احتراق پاشش می‌شد.



شکل ۱- نمایی از فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون [۲]

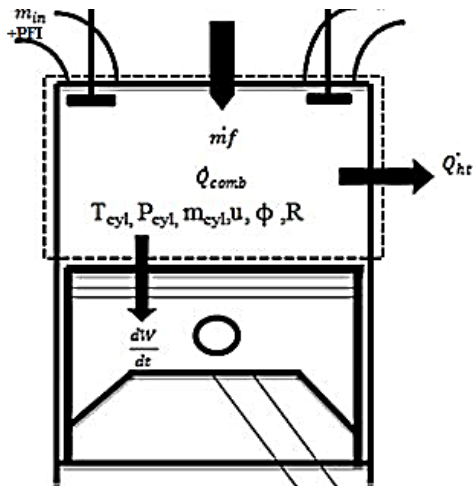
بالای حل کد تک ناحیه‌ای جهت افزایش سرعت محاسبات، یک کد یک‌بعدی تک‌ناحیه‌ای برای شبیه‌سازی موتور RCCI با سوخت ترکیبی دیزل - WCO/ بنزین در محیط نرم‌افزار MATLAB بر اساس مشخصات موتور هدف توسعه داده شد. همچنین جهت تعریف مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی و پیاده‌سازی معادلات احتراقی روی هندسه‌ی مسئله، از افزونه‌ی Cantera به صورت کوپل با نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

۲- تعریف مسئله

در مطالعه‌ی حاضر، احتراق سوخت بیودیزل روغن پسماند در ترکیب با سوخت دیزل و بنزین در یک موتور احتراق تراکمی کم‌دماسوز با استراتژی RCCI مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تعداد گونه‌های تشکیل‌دهنده و اثرگذار در واکنش شیمیایی سوخت بیودیزل روغن پسماند، روند تولید و مصرف گونه‌های مختلف تشکیل‌دهنده‌ی این سوخت تشریح گردید. در این راستا با توجه به سرعت بالای حل کد تک ناحیه‌ای [۳۰] یک کد تک ناحیه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB با افزونه‌ی Cantera با هدف بررسی صفربعدی نرخ مصرف گونه‌ها توسعه داده شد. برای اعتبارسنجی نتایج عددی از مطالعه‌ی چیدامبارام و کرشناسامی [۲] استفاده شد. آنها در یک مطالعه‌ی تجربی عملکرد سوخت WCO را در یک موتور RCCI بررسی کردند. عملکرد موتور در چهار بار مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که بازه‌ی تغییرات BMEP از ۱/۰۶ تا ۴/۲۴ بار بوده است (جدول ۱). با توجه به جدول ۱، نسبت PFI به DI در ۲۰ درصد از بار اعمالی ۴۷/۰۸ بود و این نسبت با افزایش بار موتور، افزایش می‌یافت؛ لذا با افزایش بار اعمالی بر روی موتور، علی‌رغم افزایش نسبت سوخت به هوا، سوخت WCO کمتری وارد محفظه‌ی احتراق می‌شد.

در مطالعه‌ی عددی حاضر جهت بررسی نرخ تولید و مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت WCO، موتور هدف در این چهار حالت مطابق جدول ۱ شبیه‌سازی شد و روند تولید و مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت بیودیزل روغن پسماند نیز در این چهار حالت مورد بررسی قرار گرفت.

آزادسازی حرارت است. این معادلات در چهارچوب یک جرم کنترل با حجم متغیر (شکل ۲) مطابق با ابعاد و هندسه‌ی سیلندر موتور لحاظ می‌شوند [۳۳].



شکل ۲- حجم کنترل در مدل‌سازی تک ناحیه‌ای و ترم‌های معادله بقای انرژی

حجم، فشار و دمای مخلوط گاز موجود در جرم کنترل در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. مبنای محاسبه‌ی این پارامترها، حل معادله‌ی قانون اول ترمودینامیک (معادله‌ی ۱) تحت شرایط عملکردی موتور است [۳۴].

$$\delta Q - PdV = mdu + m \sum_{i=1}^{N_s} u_i dy_i \quad (1)$$

Q, P, m و u و y_i به ترتیب حرارت کل، فشار، جرم ماده، انرژی درونی و نسبت جرمی هر گونه می‌باشند. اگر انتقال حرارت فقط ناشی از اتلاف حرارتی به جداره سیلندر فرض شود، معادله‌ی قانون اول ترمودینامیک به صورت معادله‌ی ۲ بازنویسی می‌شود [۳۳].

$$\frac{dq}{dt} - P \frac{dV}{dt} = mC_v \frac{dT}{dt} + m \sum_{i=1}^{N_s} u_i \frac{dy_i}{dt} \quad (2)$$

C_v ظرفیت حرارتی ویژه در حجم ثابت است. در صورت بازنویسی رابطه ۲ بر اساس دما، معادله دیفرانسیل مدل ترمودینامیکی تک‌ناحیه‌ای تولید می‌شود [۳۳].

جدول ۲- مشخصات سوخت‌های مورد مطالعه [۳۱، ۳۲]

مشخصات سوخت	بنزین	دیزل	WCO
ارزش حرارتی (MJ/kg)	۴۲/۷	۴۴/۲۷	۳۹/۵۹
عدد ستان	-	47	>51
عدد اکتان	91	-	-
چگالی (kg/m ³)	718	813	825
لزجت در ۲۰ درجه سانتی گراد (mm ² /s)	-	۲/۸	۷/۳۵
لزجت در ۴۰ درجه سانتی گراد (mm ² /s)	۰/۲۸۱۸	۲/۸۲۵۳	۵/۰۴

جدول ۳- نتایج تست GC سوخت WCO [۲]

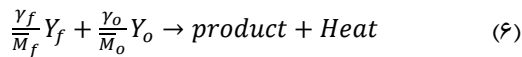
Fatty acid methyl ester	Waste cookin g oil biodies el (% mass)
Lignoseric C24:0	۰/۳۳
Arachidic C20:0	۰/۶۶
Linoleic C18:2	۵۴/۹۷
Oleic C18:1	۳۲/۹۳
Stearic C18:0	۷/۵۳
Palmitic C16:0	۷/۹۰

جدول ۴- مشخصات موتور [۲]

نوع موتور	تک سیلندر هوا خنک
توان	۴/۴ kW
سرعت	1500 rpm
حجم جابجایی	662 cc
قطر سیلندر	۸۷/۵ mm
ارتفاع سیلندر	110 mm
نسبت تراکم	15:1
نوع پاشش سوخت	CRDI and PFI

۳- معادلات حاکم

مجموعه محاسبات لازم جهت شبیه‌سازی یک موتور احتراق داخلی شامل سه بخش حل معادله دیفرانسیل مربوط به محاسبه‌ی تغییرات حجم سیلندر در هر گام زمانی، حل معادلات ترمودینامیکی و حل معادلات شیمیایی فرآیند احتراق شامل تولید و مصرف گونه‌های شیمیایی و میزان



Y_o و Y_f به ترتیب کسر جرمی گونه‌های سوخت و اکسیژن بوده، \bar{M}_o و \bar{M}_f نشان‌دهنده‌ی جرم مولار هستند. برای بیان نرخ واکنش از قانون Arrhenius استفاده می‌شود [۳۳]:

$$\dot{\omega} = \rho^2 A \left(\frac{Y_f}{M_f} \right)^{n_f} \left(\frac{Y_o}{M_o} \right)^{n_o} \exp \frac{-T_a}{T} \quad (7)$$

$\dot{\omega}$ نرخ واکنش، T_a دمای فعال‌سازی، A مقدار ثابت و n_f و n_o ضرایب استوکیومتری می‌باشند. سرعت واکنش برای هر رابطه شیمیایی به شکل زیر بیان می‌گردد [۳۳]:

$$RR_k = K_{f,k} \prod_{i=1}^{N_s} [S_i]^{v_{k,i}} - K_{b,k} \prod_{i=1}^{N_s} [S_i]^{v_{k,i}} \quad (8)$$

شایان توجه است که برخی از واکنش‌ها در مکانیزم شیمیایی با حضور جسم سوم انجام می‌گیرند. منظور از جسم سوم گونه‌ای است که در واکنش‌دهنده‌ها و محصولات بدون تغییر باقی می‌ماند. این گونه بر ساختار دیگر گونه‌ها تأثیرگذار نبوده بر سرعت انجام واکنش تأثیر می‌گذارد.

۴- توسعه‌ی کد تک ناحیه‌ای

یک کد تک ناحیه‌ای با توجه به معادلات حاکم و با در نظر گرفتن سینتیک مفصل شیمیایی برای تقریب زمان شروع احتراق و بررسی کمی و کیفی رفتار متغیرها در یک موتور RCCI توسعه داده شد. منطق عملکرد کد به این صورت است که ابتدا نسبت مولی سوخت و هوا به‌همراه شرایط مرزی به عنوان داده‌های ورودی دریافت می‌شوند. معادله دیفرانسیل تغییرات حجم به روش ODE و با دستور ode15 در هر گام زمانی در نرم‌افزار MATLAB حل شده، حجم سیلندر مشخص می‌شود. پس از محاسبه‌ی حجم، فشار و دمای محفظه با حل معادلات ترمودینامیک در هر لحظه بررسی می‌شود. نسبت مولی گونه‌ها به محض رسیدن گام زمانی به لحظه‌ی پاشش سوخت HRF تغییر کرده، فرآیند تغییر حجم ادامه می‌یابد. در هر گام زمانی، داده‌های دما با مکانیزم شیمیایی مطابقت داده می‌شود. به محض اینکه دما و فشار محفظه سیلندر به شرایط

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{1}{V} \left(\frac{dq}{dt} - P \frac{dV}{dt} \right) - \rho \sum_{i=1}^{N_s} u_i \frac{dy_i}{dt}}{\rho C_v} \quad (3)$$

برای بررسی نرخ تولید و مصرف گونه‌های شیمیایی شرکت‌کننده در فرآیند احتراق، باید معادلات مربوط به نرخ تغییرات کسر جرمی گونه‌های شیمیایی (معادله‌ی ۴) نیز در مدل‌سازی عددی اعمال شود.

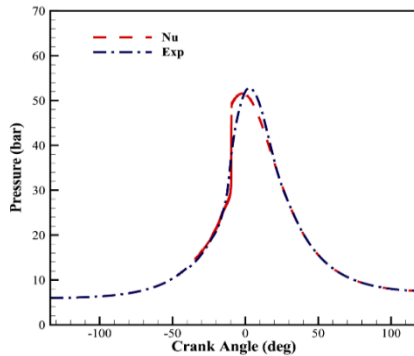
$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{M_i \dot{\omega}_i}{\rho} \quad (4)$$

$\dot{\omega}_i$ نشان‌دهنده‌ی نرخ واکنش شیمیایی است. تغییرات حجم سیلندر نیز بر اساس معادله‌ی ۵ و با توجه به دور موتور و مشخصات هندسی محاسبه می‌شود [۳۳].

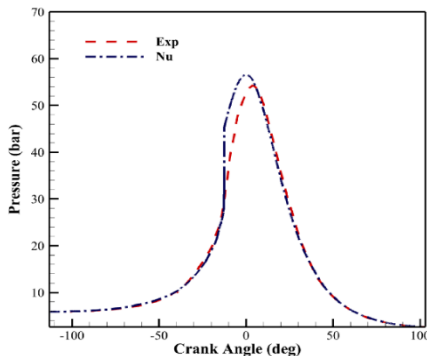
$$\frac{V}{V_c} = 1 + 0.5(r_c - 1) \left[R + 1 + \cos\theta - (R^2 - \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

V_c و V به ترتیب حجم لحظه‌ای و حجم مرده هستند. r_c نسبت تراکم، R نسبت طول شاتون به شعاع لنگ و θ زاویه‌ی لنگ در هر لحظه است. مجموعه معادلات دیفرانسیل ۱ الی ۵ به صورت هم‌زمان برای حجم سیلندر از زمان بسته شدن سوپاپ ورودی تا باز شدن سوپاپ خروجی حل می‌شوند. این معادلات شامل یک معادله دیفرانسیل تغییر دما، یک معادله دیفرانسیل تغییر حجم و معادله دیفرانسیل تغییر کسر مولی به تعداد گونه‌های شیمیایی مکانیزم انتخاب شده برای سوخت هدف است. در مدل تک ناحیه‌ای، معادلات ترمودینامیکی در کنار معادلات سینتیک شیمیایی در هر گام زمانی برای تمامی گونه‌های شیمیایی موجود در سینتیک مفصل شیمیایی بر حسب زاویه لنگ و به صورت هم‌زمان حل می‌شوند.

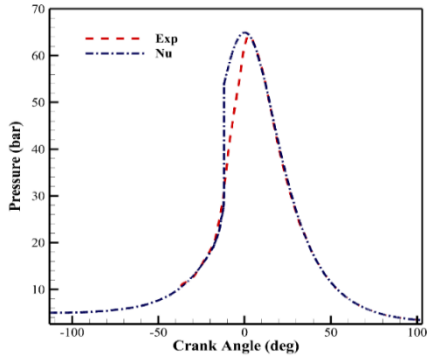
معادله‌ی ۶ شکل کلی یک واکنش شیمیایی را نشان می‌دهد که محصولات واکنش شامل آب، گازهای گلخانه‌ای و آلپندگی‌ها می‌باشند. هر واکنش کلی نیز از تعداد زیادی واکنش جزئی تشکیل می‌شود که در هر کدام از آن‌ها کسر مشخصی از دو یا چند گونه‌ی شیمیایی با نسبت جرمی مشخص با هوا واکنش می‌دهند [۳۳].



a: BMEP = ۱/۰۶ bar



b: BMEP = ۲/۱۲ bar



c: BMEP = ۳/۱۹ bar

شکل ۳- اعتبارسنجی میانگین فشار داخل سیلندر موتور

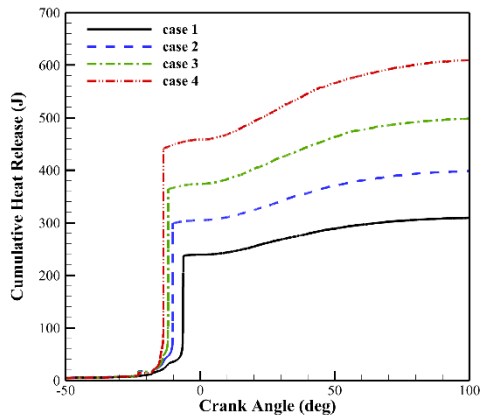
احتراق برسد، مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی با در نظر گرفتن سرعت نرخ واکنش، شروع به حل معادلات مربوط به واکنش‌های شیمیایی زنجیره‌ای می‌کند؛ در این راستا علاوه بر محاسبه‌ی نرخ تولید و مصرف گونه‌ها، مقدار حرارت آزاد شده نیز محاسبه می‌شود. الگوریتم کد توسعه یافته در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به گونه‌های تشکیل دهنده‌ی سوخت، در شبیه‌سازی حاضر از مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی سوخت متیل لینولنات شامل ۵۸۲ گونه و ۲۱۱۷۴ واکنش استفاده شده است [۳۵]. در مدل تک ناحیه‌ای فرض‌هایی به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- شبیه‌سازی برای چرخه‌ی بسته‌ی موتور انجام شده است.
- کل سامانه در لحظه‌ی اول به صورت یک ناحیه با دما، فشار و غلظت ترکیبات یکسان در نظر گرفته شده است.
- سیال داخل محفظه قبل و بعد از احتراق، گاز ایده‌آل فرض شده است.
- سوخت پاشش مستقیم در لحظه‌ی مورد نظر به صورت گازی به مجموعه اضافه می‌شود.
- جرم سامانه ثابت بوده، از نشتی گازها از شکاف رینگ‌ها چشم‌پوشی شده است.

۵- اعتبارسنجی

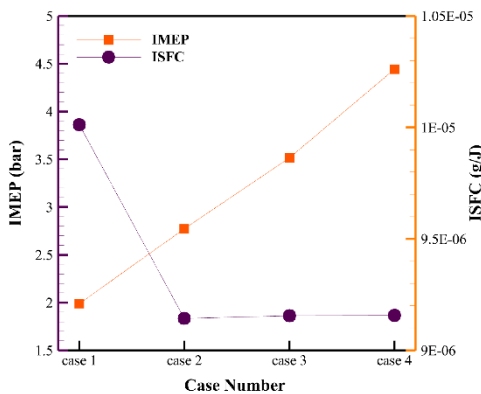
همان‌طور که اشاره شد، برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی از نتایج تجربی مطالعه‌ی چیدامبارام و کرشناسامی [۲] استفاده شده است. در این راستا شبیه‌سازی موتور هدف در حالت عددی با سوخت ترکیبی دیزل/بیودیزل WCO انجام شد. نتایج عددی میانگین فشار داخل سیلندر و آلاینده‌ی مونوکسید کربن برای چهار حالت مختلف (مطابق جدول ۱) با نتایج تجربی مقایسه شدند که نشان‌دهنده‌ی اعتبار قابل قبول کد تک‌ناحیه‌ای است.

سوخت، بازه‌ی شکل‌گیری احتراق سرد به دلیل سهم بالای سوخت LRF کوتاه‌تر می‌شود.



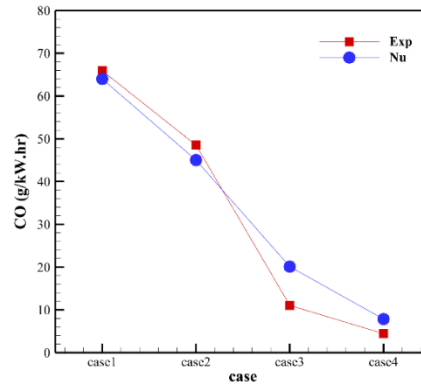
شکل ۵- مقایسه‌ی نمودار آزادسازی حرارت تجمعی در بارهای مختلف

تغییرات IMEP و ISFC به‌طور هم‌زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل، علی‌رغم افزایش مداوم IMEP از بار ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد، تغییرات ISFC در Case های ۲، ۳ و ۴ روندی مشابه داشته، در Case 1 افزایش چشم‌گیری دارد. زیرا لحظه‌ی شروع احتراق در Case 1 نسبت به Case های دیگر به مقدار قابل توجهی به نقطه‌ی مرگ بالا نزدیک‌تر بوده (شکل ۵)، بخش عمده‌ای از فرایند احتراق بعد از نقطه‌ی مرگ بالا شکل خواهد گرفت؛ لذا توان تولیدی موتور کاهش یافته، ISFC افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.



شکل ۶- IMEP و ISFC در بارهای مختلف

روند مصرف گونه‌های شیمیایی سوخت بیودیزل روغن پسماند برای Case 4 در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه



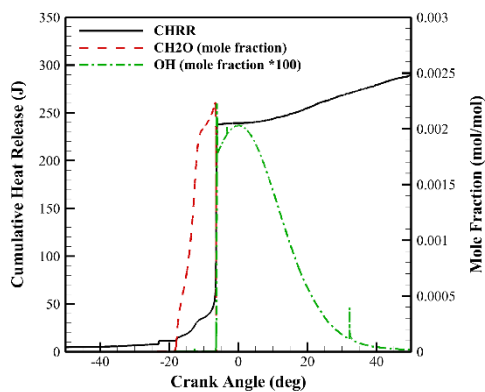
شکل ۴- اعتبارسنجی آلابندگی مونوکسید کربن

۶- نتایج و بحث

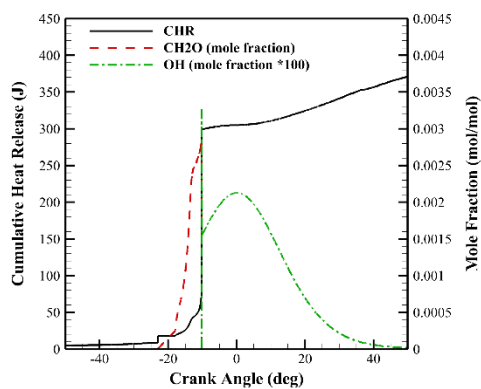
با توجه به ساختار کد توسعه یافته، هوا و بنزین (به عنوان سوخت LRF) به صورت مخلوط پیش‌آمیخته در حجم اولیه‌ی محفظه‌ی احتراق (در لحظه‌ی IVC) تعریف شده است. چون لحظه‌ی دقیق شروع تزریق سوخت پاشش مستقیم پارامتری مهم در توسعه‌ی کد تک‌ناحیه‌ای است، سوخت HRF (ترکیب دیزل/بیودیزل روغن پسماند)، در تمامی حالت‌ها در لحظه‌ی $CA \approx 30$ \approx $bTDC$ مستقیماً به داخل محفظه‌ی احتراق تزریق می‌شود. شایان توجه است که فرآیند تزریق و تبخیر سوخت در آزمون تجربی به صورت آبی رخ نمی‌دهد؛ از طرفی تمامی گونه‌ها در مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی در فاز گازی تعریف می‌شوند؛ به همین دلیل بازه‌ی زمانی بین شروع تزریق سوخت تا تبخیر کامل جرم سوخت DI نیز در کد تک ناحیه‌ای در نظر گرفته شده است.

نمودار نرخ آزادسازی حرارت تجمعی بر اساس زاویه لنگ در بارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به استراتژی احتراقی موتور در حالت RCCI، احتراق دو مرحله‌ای شامل احتراق دما پایین (LHR) و احتراق دما بالا (HHR) در تمامی بارها به خوبی مشاهده می‌شود. با افزایش بار اعمالی بر روی موتور، جرم سوخت ورودی افزایش می‌یابد؛ لذا با افزایش بار، مقدار حرارت آزاد شده کل نیز افزایش یافته، نشان دهنده‌ی مصرف سهم بیشتر سوخت در فرآیند احتراق است. افزایش جرم سوخت ورودی باعث شده است که با افزایش بار، لحظه‌ی شروع احتراق گرم، به لحظه‌ی شروع پاشش سوخت نزدیک‌تر شود؛ همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش جرم

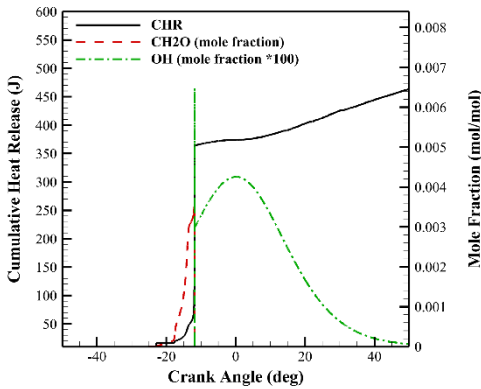
گونه‌ی فرمالدهید طی فرآیند آزادسازی حرارت دمایی، تولید و مصرف می‌شود؛ همچنین، شروع تولید گونه‌ی هیدروکسیل هم‌زمان با آغاز فرآیند آزادسازی حرارت دما بالا بوده، فرآیند مصرف آن تا پایان فرآیند احتراق ادامه دارد. نسبت مولی فرمالدهید به هیدروکسیل به دلیل کاهش نسبت سوخت DI به FPI، با افزایش بار موتور کاهش یافته، بازه‌ی احتراق سرد نیز کاهش می‌یابد.



Case 1

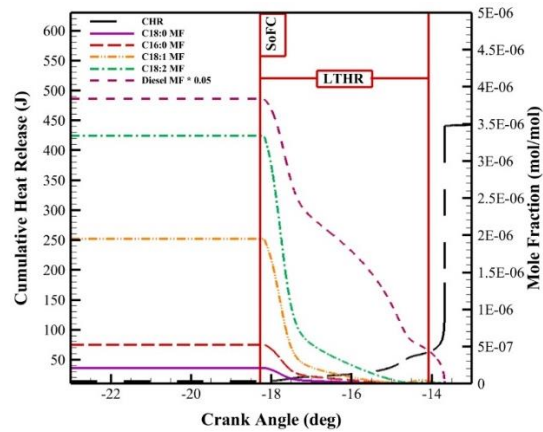


Case 2



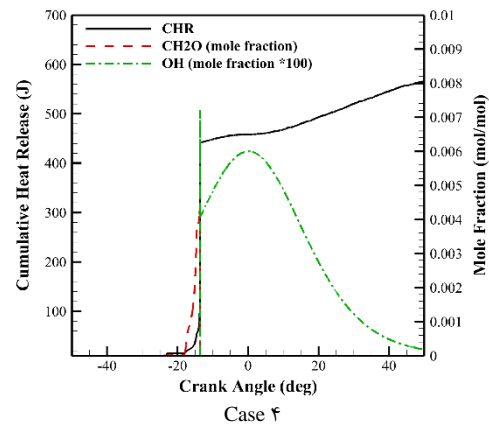
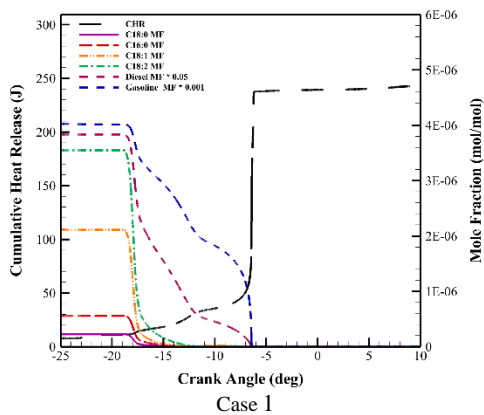
Case 3

به شکل، شروع مصرف گونه‌های شیمیایی اسید چرب غیر اشباع زودتر از گونه‌های شیمیایی اسید چرب اشباع رخ می‌دهد. شایان توجه است که اختلاف لحظه‌ی شروع مصرف گونه‌های اسید چرب اشباع و غیر اشباع در حدود ۰/۱ درجه زاویه لنگ بوده که قابل چشم‌پوشی است؛ ولی سرعت مصرف گونه‌ها در دو حالت نام‌برده متفاوت است؛ زیرا اسیدهای چرب غیراشباع حداقل یک پیوند دوگانه در زنجیره اسیدهای چرب دارند که با کاهش اتم‌های هیدروژن در زنجیره کربن، اسیدهای چرب غیر اشباع در برابر پراکسیداسیون لیپیدی آسیب‌پذیرتر می‌شوند [۳۶]. به همین دلیل گونه‌های اسید چرب غیر اشباع مطابق شکل ۷، با سرعت بیشتری مصرف می‌شوند و بازه‌ی احتراق بیودیزل روغن پسماند در مقایسه با سوخت دیزل کاهش خواهد یافت. در این شرایط با به‌کارگیری سوخت بیودیزل با اسیدهای چرب غیراشباع بالا، بازه‌ی احتراق سرد کاهش یافته، حرارت کل سوخت بیودیزل تزریق شده در زمانی کوتاه آزاد می‌شود؛ لذا استفاده از سوخت بیودیزل با اسید چرب غیر اشباع بالا در موتورهای RCCI باعث ایجاد کوبش خواهد شد و پیشنهاد می‌شود، در صورت استفاده از سوخت بیودیزل با اسید چرب غیر اشباع بالا فرآیند پاشش سوخت با اندکی تأخیر آغاز شود.

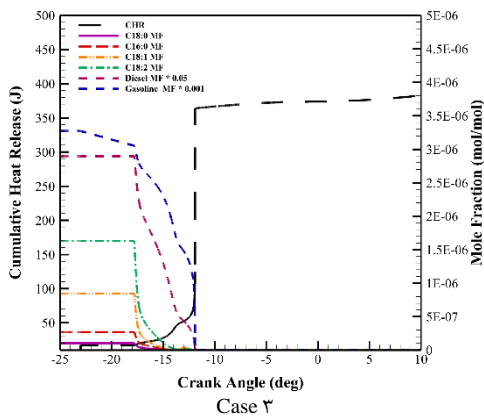
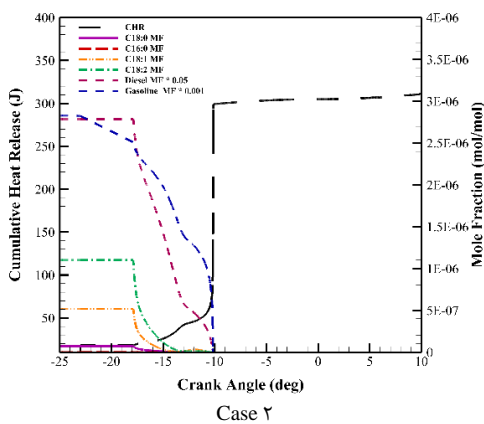


شکل ۷- روند مصرف گونه‌های شیمیایی تشکیل دهنده‌ی سوخت بیودیزل روغن پسماند

نرخ آزادسازی حرارت تجمعی در کنار نرخ تولید و مصرف گونه‌های هیدروکسیل و فرمالدهید در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل، شروع تولید گونه‌ی فرمالدهید در تمامی بارگذاری‌ها هم‌زمان با شروع آزادسازی حرارت دما پایین بوده،



شکل ۸- مقایسه‌ی نرخ آزادسازی حرارت تجمعی با نرخ تولید و مصرف گونه‌های هیدروکسیل و فرمالدهید



فرآیند مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت در طی فرآیند آزادسازی حرارت در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به شکل، تکمیل فرآیند مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت WCO تقریباً در یک لحظه رخ داده است. با توجه به ماهیت سوخت WCO استفاده شده در مطالعه‌ی تجربی، گونه‌های اسید چرب اشباع تشکیل‌دهنده این سوخت از اسیدهای چرب غیر اشباع آن کمتر است؛ اما با توجه به سرعت بالای مصرف اسیدهای چرب غیر اشباع، این گونه‌ها تقریباً در یک بازه‌ی زمانی مصرف شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در طی فرآیند آزادسازی حرارت دمایی، گونه‌های تشکیل‌دهنده سوخت WCO به صورت کامل مصرف شده است. با توجه به عدد ستان و واکنش‌پذیری بالاتر گونه‌های سوخت WCO و نیز حجم کمتر این سوخت، فرآیند مصرف سوخت دیزل مستلزم صرف مدت زمان بیشتری بوده، حتی سهم قابل توجهی از سوخت دیزل در طی فرآیند احتراق گرم و به صورت هم‌زمان با سوخت بنزین مصرف شده است.

گونه‌های بیودیزل تقریباً هم‌زمان آغاز می‌شود؛ در صورتی که سرعت مصرف گونه‌های شیمیایی اسید چرب غیر اشباع بسیار بیشتر از گونه‌های غیر اشباع است.

- با افزایش بار از ۲۰ تا ۸۰ درصد، لحظه‌ی شروع احتراق گرم، در حدود ۲/۵ درجه به لحظه‌ی شروع پاشش سوخت نزدیک‌تر می‌شود.

فهرست علائم اختصاری

فهرست حروف لاتین

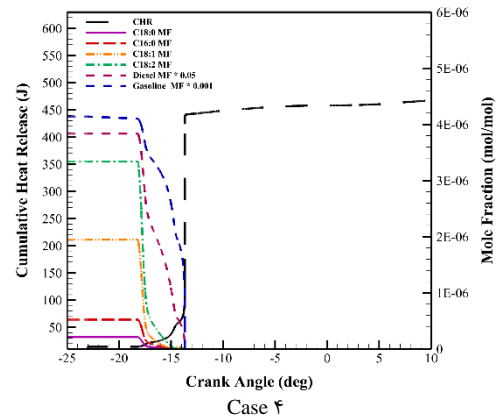
غلظت جرم گونه‌ها	C (kg)
نیروی بدنه	$g \left(\frac{kg}{s^2} \right)$
آنتالپی گونه	$H \left(\frac{J}{kg} \right)$
شماره‌ی گونه	i
ثابت انرژی جنبشی توربولانسی	$k \left(\frac{m}{s^2} \right)$
مقیاس طول	L (m)
فشار	P (Pa)
تولید ویژه‌ی منبع انرژی	$\dot{q} \left(\frac{W}{kg} \right)$
تولید گونه	$\dot{r} \left(\frac{kg}{s} \right)$
منبع آنتالپی گونه‌ها	$S_H (J)$
منبع توده گونه‌ها	$S_k (mol, kg)$
مقیاس زمان	T (s)
سرعت	$U, u \left(\frac{m}{s} \right)$
سرعت میانگین جریان توربولانسی	$\bar{u}_i, \bar{u}_j \left(\frac{m}{s} \right)$
متغیر مکانی	$x_i, x_j, x_k (m)$

فهرست حروف یونانی

دلتای کروئکر	δ_{ij}
نرخ اتلاف تلاطم وزنی	$\varepsilon \left(\frac{kg}{m s^3} \right)$
ضریب هدایت	$\lambda \left(\frac{W}{m K} \right)$
لزجت	$\mu \left(\frac{kg}{m s} \right)$
لزجت توربولانسی	$\mu_t \left(\frac{kg}{m s} \right)$
چگالی	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
تنش برشی	$\tau (Pa)$

فهرست حروف اختصاری

سه بعدی (3 dimension)	D ۳
نقطه‌ی مرگ پایین (Bottom dead center)	BDC



شکل ۹- نرخ مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت در مقایسه با آزادسازی حرارت تجمعی

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر عملکرد یک موتور احتراق تراکمی در حالت RCCI با ترکیب سوخت دیزل - بیودیزل WCO و بنزین به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. یک کد تک‌ناحیه‌ای در نرم‌افزار MATLAB - Cantera برای شبیه‌سازی موتور هدف توسعه داده شد. مکانیزم سینتیک مفصل شیمیایی سوخت ترکیبی مورد نظر جهت بررسی دقیق نرخ مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت بیودیزل در شبیه‌سازی تک ناحیه‌ای اعمال شد. روند مصرف گونه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت WCO و عملکرد موتور در چهار بار مختلف بررسی شد. مهم‌ترین نتایج مطالعه‌ی عددی حاضر به شرح زیر است:

- لحظه‌ی شروع احتراق، گرم با افزایش بار، به لحظه‌ی شروع پاشش سوخت نزدیک‌تر می‌شود. همچنین با افزایش جرم سوخت (به دلیل سهم بالای سوخت LR) بازه‌ی شکل‌گیری احتراق سرد کوتاه‌تر می‌شود.
- لحظه‌ی شروع احتراق در حالت پیشینه بار به مقدار قابل توجهی تغییر نمی‌کند، زیرا نسبت انرژی FPI نسبت به DI بسیار بالاتر است.
- نسبت مولی فرمالدهید تولید شده به هیدروکسیل با افزایش بار موتور و به دلیل کاهش نسبت سوخت DI به FPI، کاهش یافته و منجر به کاهش بازه‌ی احتراق سرد می‌شود.
- لحظه‌ی شروع مصرف گونه‌های اشباع و غیر اشباع تفاوت چندانی نداشته و فرآیند مصرف دیزل و

- fueled by diesel-biodiesel and 3D silver thiocyanate nanoparticles additive fuel blends. J. the Taiwan Instit. Chem. Eng., 124, 369-380..
- [4] Pinto, A. C., Guarieiro, L. L., Rezende, M. J., Ribeiro, N. M., Torres, E. A., Lopes, W. A., ... & Andrade, J. B. D. (2005). Biodiesel: an overview. J. Brazilian Chem. Society, 16, 1313-1330..
- [5] Lee, I., Johnson, L. A., & Hammond, E. G. (1995). Use of branched-chain esters to reduce the crystallization temperature of biodiesel. J. the American Oil Chem. Soc., 72, 1155-1160.
- [6] Gaur, A., Dwivedi, G., Baredar, P., & Jain, S. (2022). Influence of blending additives in biodiesel on physiochemical properties, engine performance, and emission characteristics. Fuel, 321, 124072.
- [7] Elkelawy, M., El Shenawy, E. A., Bastawissi, H. A. E., Shams, M. M., & Panchal, H. (2022). A comprehensive review on the effects of diesel/biofuel blends with nanofluid additives on compression ignition engine by response surface methodology. Energy Conversion and Management: X, 14, 100177..
- [8] Ojapah, M. M., & Diemuodeke, E. O. (2023). Effect of palm oil biodiesel blends on engine emission and performance characteristics in an internal combustion engine. Open J. Energ. Effic., 1(1), 13-24..
- [9] Öztürk, E. and Ö. Can, Effects of EGR, injection retardation and ethanol addition on combustion, performance and emissions of a DI diesel engine fueled with canola biodiesel/diesel fuel blend. Energy, 2022. 244: p. 123129.
- [10] Shelke, P.S., N.M. Sakhare, and S. Lahane, Investigation of combustion characteristics of a cottonseed biodiesel fuelled diesel engine. Procedia Technology, 2016. 25: p. 1049-1055.
- [11] El-Seesy, A.I., H. Hassan, and S. Ookawara, Effects of graphene nanoplatelet addition to jatropha Biodiesel–Diesel mixture on the performance and emission characteristics of a diesel engine. Energy, 2018. 147: p. 1129-1152.
- [12] Özbay, N., N. Oktar, and N.A. Tapan, Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. Fuel, 2008. 87(10-11): p. 1789-1798.
- [13] Hribernik, A. and B. Kegl, Performance and exhaust emissions of an indirect-injection (IDI) diesel engine when using waste cooking oil as fuel. Energy & fuels, 2009. 23(3): p. 1754-1758.
- [14] Plamondon, E. and P. Seers, Parametric study of pilot–main injection strategies on the performance of a light-duty diesel engine fueled with diesel or a WCO biodiesel–diesel blend. Fuel, 2019. 236: p. 1273-1281.
- TDC (top dead centre) نقطه‌ی مرگ بالا
- EVO (exhaust valve opening) باز شدن سوپاپ
- دود
- HCCI (homogeneous charge compression ignition) اشتعال تراکمی با شارژ همگن
- HCF (high cetan number fuel) سوخت با عدد ستان بالا
- HOF (high octane number fuel) سوخت با عدد اکتان بالا
- HTHR (high temperature heat release) آزادسازی حرارت دمابالا
- IMEP (Indicated Mean Effective Pressure) فشار مؤثر اندیکاتوری
- ISFC (Indicated specific fuel consumption) مصرف ویژه‌ی سوخت اندیکاتوری
- IVC (inlet valve closing) بسته‌شان سوپاپ ورودی
- LHV (low heat value) مقدار کم حرارت
- LTHR (low temperature heat release) آزادسازی حرارت دماپایین
- PFI (port fuel injection) سوخت پاشش از پورت
- RCCI (Reactivity controlled compression ignition) احتراق تراکمی با کنترل واکنش‌پذیری
- RoHR (rate of heat release) نرخ آزادسازی حرارت
- Rpm (round per minute) دور بر دقیقه
- SoHTHR (start of high temperature heat release) شروع آزادسازی حرارت دمابالا
- مراجع**
- [1] TaleshAmiri, S., Shafaghat, R., Mohebbi, M., Mahdipour, M. A., & Esmaeili, M. (2021). Power Enhancement of a Heavy-Duty Rail Diesel Engine Considering the Exhaust Gas and ancillary facilities Temperature Limitation: A Feasibility Study. Int. J. Maritime Tech., 15, 107-118.
- [2] Chidambaram, A. R., & Krishnasamy, A. (2022). Investigations on Dual Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition Engine using Alternative Fuels Produced from Waste Resources (No. 2022-01-1095). SAE Technical Paper..
- [3] Elkelawy, M., Etaiw, S. E. D. H., Ayad, M. I., Marie, H., Dawood, M., Panchal, H., & Bastawissi, H. A. E. (2021). An enhancement in the diesel engine performance, combustion, and emission attributes

- [26] Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., & Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 473-490..
- [27] T Talesh Amiri, S., Shafaghat, R., Jahanian, O., & Fakhari, A. H. (2021). Numerical investigation of reactivity controlled compression ignition engine performance under fuel aggregation collision to piston bowl rim edge situation. *Iranian (Iranica) J. Energy & Environment*, 12(1), 10-17.
- [28] Fakhari, A. H., Shafaghat, R., Jahanian, O., Ezoji, H., & Motallebi Hasankola, S. S. (2020). Numerical simulation of natural gas/diesel dual-fuel engine for investigation of performance and emission. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 139, 2455-2464.
- [29] Kumar, M.S., K. Arul, and N. Sasikumar, (2019) Impact of oxygen enrichment on the engine's performance, emission and combustion behavior of a biofuel based reactivity controlled compression ignition engine. *J. Energ. Instit.*, 92(1): p. 51-61.
- [30] Gautam, P.S., P.K. Vishnoi, and V. Gupta, (2022) A single zone thermodynamic simulation model for predicting the combustion and performance characteristics of a CI engine and its validation using statistical analysis. *Fuel*, 315: p. 123285.
- [31] Li, J., W. Yang, and D. Zhou, (2017) Review on the management of RCCI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69: p. 65-79.
- [32] Vickers, N.J., (2017) Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? *Current biology*, 27(14): p. R713-R715.
- [33] Bartok, W. and A.F. Sarofim, (1991) Fossil fuel combustion: a source book.
- [34] Jahanian, O. and S. Jazayeri, (2012) A comprehensive numerical study on effects of natural gas composition on the operation of an HCCI engine. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, 67(3): p. 503-515.
- [35] Ranzi, E., Frassoldati, A., Stagni, A., Pelucchi, M., Cuoci, A., & Faravelli, T. (2014). Reduced kinetic schemes of complex reaction systems: fossil and biomass-derived transportation fuels. *Int. J. Chem. Kinetics*, 46(9), 512-542.
- [36] Catapano, A. L., Reiner, Ž., De Backer, G., Graham, I., Taskinen, M. R., Wiklund, O., ... & Wood, D. (2011). ESC/EAS Guidelines for the management of dyslipidaemias: the Task Force for the management of dyslipidaemias of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Atherosclerosis Society (EAS). *Atherosclerosis*, 217(1), 3-46..
- [15] Venugopal, I.P., D. Balasubramanian, and A. Rajarajan, Potential improvement in conventional diesel combustion mode on a common rail direct injection diesel engine with PODE/WCO blend as a high reactive fuel to achieve effective Soot-NOx trade-off. *J. of Cleaner Production*, 2021. 327: p. 129495.
- [16] Kassem, Y. and H. Çamur, A laboratory study of the effects of wide range temperature on the properties of biodiesel produced from various waste vegetable oils. *Waste and biomass valorization*, 2017. 8(6): p. 1995-2007.
- [17] Bahari, R., Shafaghat, R., Jahanian, O., & Ghaedi, A. (2022). The influence of biodiesel with high saturated fatty acids on the performance of a CI engine fuelled by diesel and biodiesel blend fuels at low loads. *Int. J. Amb. Energ.*, 43(1), 7643-7656..
- [18] Tayari, S., R. Abedi, and A. Rahi, Comparative assessment of engine performance and emissions fueled with three different biodiesel generations. *Renewable Energy*, 2020. 147: p. 1058-1069.
- [19] Adhikesavan, C., D. Ganesh, and V.C. Augustin, Effect of quality of waste cooking oil on the properties of biodiesel, engine performance and emissions. *Cleaner Chemical Engineering*, 2022. 4: p. 100070.
- [20] Jafarihaghighi, F., Bahrami, H., Ardjmand, M., & Mirzajanzadeh, M. (2021). Combustion, performance, emission and fatty acid profiles analysis of third generation biodiesels obtained from a recycle and fresh feedstock: a comparative assessment. *Int. J. Sust. Eng.*, 14(6), 2114-2125.
- [21] Pinzi, S., Rounce, P., Herreros, J. M., Tsolakis, A., & Dorado, M. P. (2013). The effect of biodiesel fatty acid composition on combustion and diesel engine exhaust emissions. *Fuel*, 104, 170-182.
- [22] Puhan, S., Saravanan, N., Nagarajan, G., & Vedaraman, N. (2010). Effect of biodiesel unsaturated fatty acid on combustion characteristics of a DI compression ignition engine. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1079-1088.
- [23] Maiboom, A., X. Tauzia, and J.-F. Hétet, (2008) Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. *Energy*, 33(1): p. 22-34.
- [24] Gad, M., et al., (2020) Enhancing the combustion and emission parameters of a diesel engine fueled by waste cooking oil biodiesel and gasoline additives. *Fuel*, 269: p. 117466.
- [25] Shafaghat, R., S. Talesh Amiri, and O. Jahanian, (2020) Numerical Study of the Effect of Adding Water with Different Temperatures to Low-Reactivity Fuel in a Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Engine. *Fuel and Combustion*, 13(4): p. 43-62.