

بررسی عددی موتور اشتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده (RCCI) با استفاده از افزودنی ستانی

امیرحسین کاکایی

دانشیار - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده خودرو
Kakae_ah@iust.ac.ir

امیر محمدیان

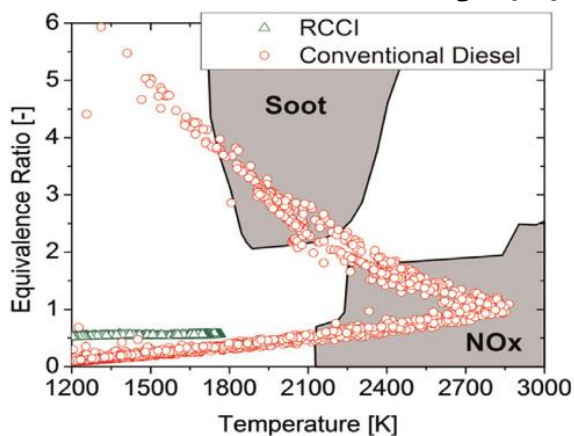
کارشناسی ارشد - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده خودرو
Amirmohammadian37@gmail.com

چکیده

موتور اشتعال تراکمی تزریق مستقیم (DICI) پربازده ترین موتور احتراق داخلی می باشد، که تاکنون محققان به آن دست پیدا کرده اند. بیشترین دلیل این بازده بالا، قابلیت این موتور در استفاده از نسبت تراکم بالا بدون ترس از پدیده ناک (knock)، کاهش اتلافات نیمه بار (به علت نبودن دریچه گاز)، بازده احتراق بالا، و خصوصیات مطلوب گاز برای استخراج کار به علت فقیر سوزاندن می باشد. به علت نگرانی های اشاره شده در مورد مصرف سوخت های فسیلی و آلاینده های آن موتورهای اشتعال تراکمی در دهه های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۱، ۲].

با توجه به مطالب فوق کاهش آلاینده و بالا بردن بازده موتورهای دیزل از اهمیت بالایی برخوردار است، که ایده موتور RCCI می تواند در این زمینه بسیار کارآمد باشد. همچنین می دانیم که داشتن دو منبع سوخت در این نوع موتورها علاوه بر هزینه بر بودن آن، نیاز دارد تا این دو منبع سوخت در فواصل زمانی نسبتاً یکسانی بر شوند. این مشکل در کاربری های حمل و نقل محسوس تر است. پس مشخص است که تحقیق در زمینه افزودنی های ستانی، که می تواند مشکل مذکور را برطرف کند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

برای درک بهتر مزیت RCCI نسبت به موتور دیزل معمولی می توان به شکل ۱ مراجعه نمود. دمای ماکزیمم سیلندر در موتور RCCI بسیار پایین تر از موتور دیزل معمولی می باشد، که این مسئله می تواند احتمال تولید آلاینده های اکسیدهای نیتروژن را کمتر کند. علاوه بر آن در این شکل مشخص است که موتور RCCI آلاینده های اکسید نیتروژن و دوده ناچیزی تولید می کند.



شکل ۱- مقایسه آلاینده های دوده و اکسید نیتروژن بین موتور RCCI و موتور دیزل معمولی [۳]

با توجه به خطرات افزایش آلاینده در شهرهای بزرگ و همچنین محدود بودن سوخت های فسیلی، احتراقی تمیز و با بازده بالا در موتورهای احتراق داخلی ضروری می باشد. بین موتورهای احتراق داخلی، موتور اشتعال تراکمی از بازده بالایی برخوردار است، اما با توجه به میزان آلاینده های بالای آن، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. ایده موتور اشتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده (RCCI)، احتراقی با آلاینده های پایین و بازده بالا را به ما می دهد. موتور RCCI یک فناوری احتراق دو سوخته می باشد، بدین ترتیب که سوخت با واکنش پذیری پایین را به صورت پیش-آمیخته و سوخت با واکنش پذیری پایین را به صورت پاشش مستقیم، وارد سیلندر می کند. یکی از معایب این ایده نیاز به دو منبع سوخت می باشد. برای رفع این مشکل می توان از یک سوخت با واکنش پذیری کم به عنوان سوخت پایه استفاده کرد و برای محیا کردن سوخت با واکنش پذیری بالا از همان سوخت به علاوه مقدار کمی از افزودنی ستانی، استفاده کرد. در این راستا تحقیق بنده در مورد تاثیر افزودنی ستانی در موتور RCCI، با استفاده از افزودنی ستانی می باشد. هدف از این تحقیق این است که با افزودن مقدار کمی از افزودنی ستانی در سوخت پاشش مستقیم، رفتار موتور RCCI را بررسی کنیم. در این تحقیق نشان دادیم که با افزودن مقدار کمی از افزودنی ستانی به سوخت ایزوبوتانول، می توان سوختی مشابه سوخت دیزل تولید کرد، که بتواند نقش سوخت با واکنش پذیری بالا را، در موتور RCCI به خوبی ایفا کند.

واژه های کلیدی: موتور RCCI، افزودنی ستانی، سوخت ایزوبوتانول، واکنش پذیری، DTBP

مقدمه

زندگی مدرن بدون استفاده از تکنولوژی احتراق امکان پذیر نمی باشد. در حقیقت احتراق ابزار اصلی گرمایش، تدارک غذا و آماده سازی مواد در طی هزاران سال گذشته می باشد و احتراق هیدروکربن های مایع نیز منبع اصلی انرژی برای استفاده در صنعت حمل و نقل می باشد. اما سوزاندن سوخت های فسیلی برای حمل و نقل باعث افزایش نگرانی در مورد آلاینده های و تاثیر آن بر روی تغییر اقلیم جهانی می شود. سهم حمل و نقل از CO₂ در ایالات متحده حدود ۳۰٪ می باشد. سالانه ۳ میلیون آلاینده های نفر در اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می دهند که ۹۰ درصد آنان در کشورهای توسعه یافته هستند. پس با توجه به مطالب مذکور باید به دنبال راهی برای احتراق تمیز و با بازده بالا، برای موتورهای احتراق داخلی بود.

نشان می‌دهد که قدرت کنترل فاز احتراق با این استراتژی تحویل سوخت (زمان پاشش سوخت و درصد بنزین پیش‌آمیخته)، تابع قوی از غلظت EHN در پاشش مستقیم نیست. همچنین مشاهده شد که میزان تولید آلاینده‌های اکسید نیتروژن تابع قوی از غلظت کلی EHN درون سیلندر است. در کل میزان آلاینده‌های اکسید نیتروژن در مدل بنزین به علاوه EHN، به طرز قابل توجهی بیشتر از مدل قبلی یعنی بنزین و دیزل است [۵].

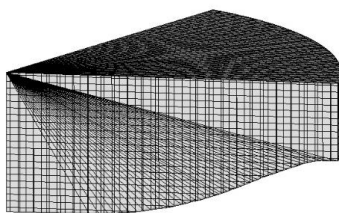
روش حل و فرضیه‌ها

در این تحقیق ما از نرم‌افزار CONVERGE CFD که یک نرم‌افزار شبیه‌سازی سه‌بعدی می‌باشد استفاده کردیم. برتری این نرم‌افزار نسبت به نرم‌افزارهای مشابه قابلیت شبیه‌سازی حرفه‌ای موتورهای احتراق داخلی می‌باشد. کد کانورج، از شبکه کارترین یکپارچه و ثابت و از روش حجم محدود استفاده می‌کند. برای انتقال جرم، مومنتوم و انرژی، شارهای سلول با استفاده از روش تفاضل مرکزی مرتبه دوم محاسبه شدند. برای حل گذرا از روش ضمنی پیشروی زمانی استفاده شد. همچنین فرم پایسته برای حل معادلات حاکم استفاده شد. برای کوپلینگ فشار و سرعت در حل گذرا از روش PISO استفاده شده است. روش PISO یک تکنیک پیش‌بینیگر-اصلاحگر است که ابتدا میدان سرعت را به طور ضمنی حل می‌کند و سپس با استفاده از حل ضمنی فشار، به طور مکرر آن را به روز رسانی می‌کند. همچنین در جدول ۱ خلاصه‌ی مدل‌های مورد استفاده در کد کانورج شرح داده شده است.

جدول ۱- مدل‌های استفاده شده در کد کانورج

نوع مدل انتخابی	پارامترهای شبیه‌سازی
RNG k-ε	آشفتگی جریان
KH-RT	تجزیه قطرات اسپری
O'Rourke	برخورد قطرات اسپری
SAGE	مدل احتراق
۱۰۸ گونه و ۴۳۵ واکنش	شیمی سوخت
Extended Zeldovich	مکانیزم NOx

در هندسه مورد بررسی چون نازل ۶ سوراخ دارد، یک ششم محفظه‌ی احتراق شبیه‌سازی می‌شود تا از حجم محاسبات کاسته شود. لذا شبکه محاسباتی یک شبکه قطعی ۶۰ درجه می‌باشد. در شکل ۲ که قطاع ۶۰ درجه را به همراه مش‌های آن نشان می‌دهد، فرم کاسه پیستون نیز مشخص است. در این تحقیق شبیه‌سازی از بعد از مرحله‌ی مکش شروع می‌شود.



شکل ۲- مش‌هایی که در شبیه‌سازی استفاده شده

همچنین به دلیل تاثیر زیاد نوع سوخت در عملکرد و آلاینده‌های احتراق داخلی، انتخاب سوخت و افزودنی ستانی در موتور RCCI از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق تمرکز ما بر روی تاثیر افزودنی ستانی بر روی احتراق موتور RCCI می‌باشد. در این تحقیق ما از سوخت‌های دیزل، ایزوئوتانول و افزودنی ستانی DTBP استفاده کردیم. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی مدل افزودنی ستانی با مدل قدیمی یعنی مدل سوخت ایزوئوتانول و دیزل مقایسه خواهد شد. همچنین باید اشاره کنیم که طبق بررسی‌های صورت گرفته، تحقیقات انجام شده در زمینه تاثیر افزودنی‌های ستانی در موتور RCCI، اکثراً به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. از طرفی می‌دانیم که می‌توان از نتایج شبیه‌سازی تخمین‌های بسیاری خوبی برای تحقیق آزمایشگاهی ارائه کرد. پس با توجه به پرهزینه بودن تحقیق به صورت آزمایشگاهی، مطالعه عددی در زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پیشینه تحقیق

اسپلیتر^۱ در سال ۲۰۱۰ موتور سنگین RCCI را با استفاده از افزودنی ستانی آزمایش کرد. او در این آزمایش سوخت بنزین را به عنوان سوخت اصلی در نظر گرفت، بدین صورت که برای پاشش در منیفولد ورودی از بنزین و برای پاشش مستقیم درون سیلندر از بنزین به علاوه مقدار کمی از افزودنی ستانی DTBP، استفاده کرد. با اضافه کردن این مقدار DTBP به سوخت بنزین، رفتار مخلوط سوخت شبیه به سوخت دیزل شد و احتراق در موتور RCCI به خوبی انجام شد. سپس مدل ایجاد شده با افزودنی ستانی با مدل اولیه RCCI (یعنی مدل دیزل و بنزین) مقایسه کرد. از مقایسه این دو مدل نتیجه شد که با استفاده از بخار بنزین بیشتر می‌توان فشار پاشش مستقیم را از ۸۰۰ بار در دیزل به ۴۰۰ بار در بنزین کاهش داد. در شرایطی که موتور در آن آزمایش شد بازده گرمایی اندیکاتوری بالای ۵۷٪ بود. رفتار و اندازه آلاینده‌ها در دو مدل با یکدیگر قابل مقایسه بودند. همچنین آلاینده‌های نیتروژن و ذرات معلق^۲ مطابق با استاندارد EPA HD 2010 بودند. دمای پایین‌تر آزادسازی حرارت در مدل بنزین و افزودنی ستانی، کار تراکم را کاهش داد و راندمان حرارتی را به میزان ۱٪ نسبت به حالت دیزل و بنزین افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که برای احتراق مناسب در موتور RCCI با استفاده از سوخت بنزین به عنوان سوخت پایه، مقدار کمی از افزودنی ستانی DTBP مورد نیاز می‌باشد [۴].

درک رفتار موتور RCCI، با استفاده از بنزین پیش‌آمیخته و ترکیب بنزین و افزودنی ستانی به صورت پاشش مستقیم، در سال ۲۰۱۵ توسط دمپسی انجام شد. در این تحقیق از افزودنی ستانی EHN استفاده شده است، مقدار افزودنی اضافه شده در این تحقیق ۱۰، ۵ و ۲/۵٪ است. کنترل آلاینده‌ها و فاز احتراق ترکیب‌های مختلف سوخت، در دور موتور ۲۳۰۰ rpm و فشار موثر میانگین ترمزی ۴/۲ بار، انجام شده است. همچنین پارامترهایی نظیر زمان پاشش مستقیم سوخت، درصد بنزین پیش‌آمیخته و دمای ورودی، در این تحقیق تغییر می‌کنند. این آزمایش با یک موتور مدرن چهار سیلندر دیزل با سیستم پاشش اصلاح شده، که به سیستم پاشش در منیفولد مجهز شده است، انجام می‌شود. پیستون‌ها اصلاح شده‌اند تا عملکرد پیش‌آمیخته‌ی بالایی داشته باشند. نتایج آزمایش

¹ Derek Splitter
² PM

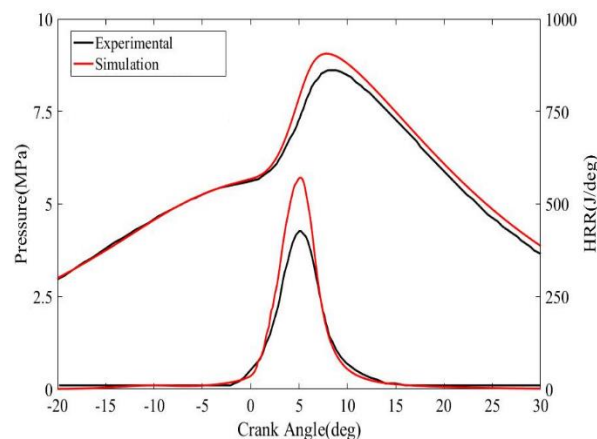
نام مستعارشان می‌شناسیم. بنابراین مدل ایزوبوتانول به علاوه افزودنی ستانی را iBD و مدل ایزوبوتانول/دیزل را BD می‌نامیم.

جدول ۴- سوخت‌های مدل شده

سوخت‌ها	پیش‌آمیخته	پاشش مستقیم
ایزوبوتانول/دیزل (BD)	ایزوبوتانول	دیزل (ان-هیپتان)
ایزوبوتانول/DTBP (iBD)	ایزوبوتانول	ایزوبوتانول + ۲۰٪ DTBP

ارایه نتایج و بحث

ابتدا به صحت سنجی شبیه‌سازی انجام شده پرداخته خواهد شد. در شکل ۳ مقایسه‌ی نمودار فشار و نرخ آزاد سازی انرژی، بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای مدل iBD ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار فشار قبل از احتراق بر هم منطبق است و بعد از احتراق نیز نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین زمان شروع احتراق تقریباً یکسان می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده به خوبی با واقعیت و نتایج تجربی مطابق می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج تجربی استفاده شده از تحقیق آقای دلسکو و ۳ می‌باشد [۶]. ایشان موتور RCCI را با استفاده از سوخت ایزوبوتانول به عنوان هر دو سوخت با واکنش پذیری بالا و پایین، با افزودن DTBP، به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد.



شکل ۳- نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما برا صحت‌سنجی مدل iBD

برای درک بهتر احتراق مدل iBD به دمای اولیه می‌توان به شکل ۴ مراجعه نمود. در این شکل کانتور دمای سیلندر برای زاویه‌ی میل‌لنگ‌های متفاوت، رسم شده است، پس می‌توان رشد احتراق را مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود در 0 ATDC هنوز شروع نشده است. که این مسئله نشان می‌دهد دمای کلی سیلندر برای احتراق ترکیب سوخت استفاده شده در مدل iBD فراهم نشده است. اما در 5 ATDC احتراق به تازگی آغاز شده و در حال رشد می‌باشد. همچنین در 15 ATDC احتراق به خوبی در کل سیلندر رشد کرده و سوخت تقریباً به طور کامل می‌سوزد. این روند شروع احتراق و انتشار آن همچنین نشان

ابعاد موتور شبیه‌سازی شده در جدول ۲ آورده شده است. موتور شبیه‌سازی شده CAT SCOTE می‌باشد که هندسه کاسه پیستون آن اصلاح شده است. همچنین نسبت تراکم ۱۴/۸۸ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی از لحظه‌ی بسته شدن سوپاپ ورودی یعنی زاویه ۱۴۳- درجه (ATDC) تا لحظه‌ی باز شدن سوپاپ خروجی یعنی زاویه ۱۳۰- (ATDC)، انجام شده است. همچنین مشخصات شرایط عملکردی موتور که ما در شبیه‌سازی استفاده کردیم در جدول ۳ آورده شده است. در هر دو مدل شبیه‌سازی شده پاشش سوخت مستقیم درون سیلندر، در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله اول پاشش که در زاویه ۵۸- درجه‌ی (ATDC) رخ می‌دهد، ۶۷٪ سوخت، درون سیلندر پاشیده می‌شود و در مرحله دوم پاشش که در زاویه ۳۷- درجه‌ی (ATDC) رخ می‌دهد، باقی سوخت یعنی ۳۳٪ آن درون سیلندر پاشیده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی از ایزوبوتانول به عنوان سوخت با واکنش پذیری پایین و از همان سوخت به علاوه ۲۰ درصد افزودنی ستانی به عنوان سوخت با واکنش پذیری بالا استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات موتور

نوع موتور	کاتریپلار SCOTE
قطر×گورس (cm)	۱۶/۵۱×۱۳/۷۲
حجم جابجایی (L)	۲/۴۴
نسبت تراکم هندسی	۱۴/۸۸ : ۱
نسبت چرخش	۰/۷
باز شدن سوپاپ ورودی (ATDC')	-۳۳۵
بسته شدن سوپاپ ورودی (ATDC')	-۱۴۳
باز شدن سوپاپ خروجی (ATDC')	۱۳۰
بسته شدن سوپاپ خروجی (ATDC')	-۳۵۵

جدول ۳- مشخصات عملکردی موتور

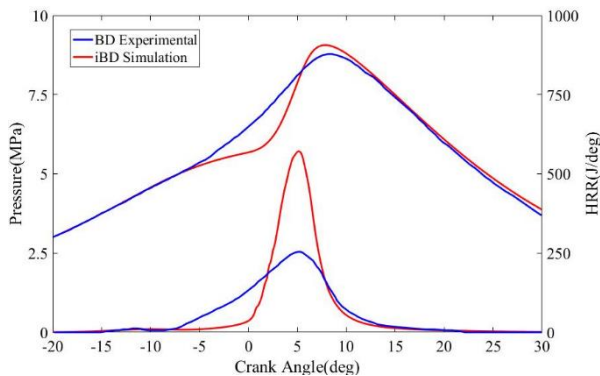
هندسه‌ی موتور	وان حمامی
دور موتور (rpm)	۱۳۰۰
فشار اولیه (bar)	۱/۵
دمای اولیه (درجه سانتیگراد)	۸۲
درصد گازهای بازگشتی (EGR%)	۰
جرم سوخت کل (mg/cycle)	۹۷
درصد سوخت پیش‌آمیخته (٪)	۴۰/۶
زمان پاشش اول (CA ATDC)	-۵۸
زمان پاشش دوم (CA ATDC)	-۳۷
مقدار پاشش در مرحله اول (٪)	۶۷

در جدول ۴ سوخت‌های استفاده شده در دو مدل (که یکی در این تحقیق شبیه‌سازی شده و دیگری مطابق با نتایج تجربی می‌باشد) ارائه و برای هر مدل نام مستعار انتخاب شده است. از این پس در این تحقیق مدل‌ها را با

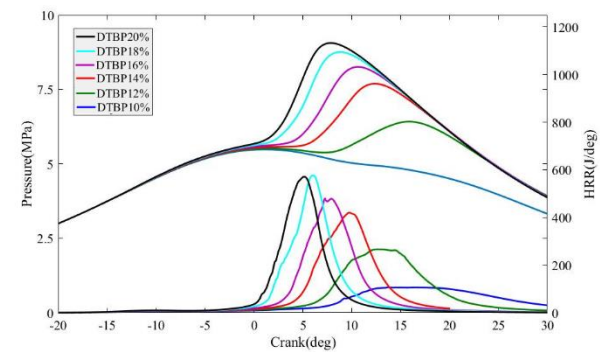
³ Dan DeIvescovo

برای درک بهتر تاثیر افزودنی ستانی در این قسمت می‌خواهیم تاثیر درصد افزودنی ستانی در سوخت پاشش مستقیم را، بر احتراق مدل iBD بررسی نماییم. پیش‌تر گفتیم که در این مدل ایزووتانول به عنوان سوخت پیش-آمیخته و ایزووتانول به علاوه مقدار کمی از افزودنی ستانی DTBP، به صورت پاشش مستقیم در سیلندر وارد می‌شوند. برای شبیه‌سازی ابتدا نمودار صحت سنجی شده را رسم کردیم، که در آن، درصد DTBP در سوخت پاشش مستقیم، ۲۰٪ است. این نمودار با رنگ سیاه در شکل دیده می‌شود. سپس این مقدار را به ۱۸٪، ۱۶٪، ۱۴٪، ۱۲٪، ۱۰٪ کاهش دادیم، تا رفتار موتور را بررسی کنیم.

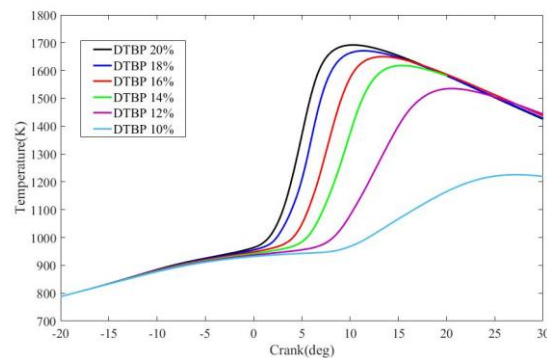
نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶ و شکل ۷ آورده شده است، که در شکل ۶ نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما و در شکل ۷ نمودار دمای میانگین سیلندر را برای درصدهای مختلف افزودنی ستانی DTBP نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما برای دو مدل iBD و BD



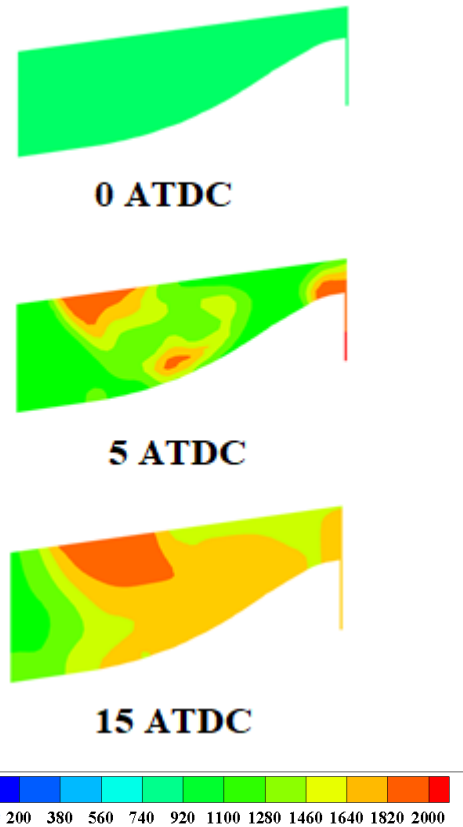
شکل ۶- نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما برای درصدهای مختلف DTBP



شکل ۷- نمودار دما برای درصدهای مختلف DTBP

همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش در درصد افزودنی ستانی از ۲۰٪ به ۱۸٪ احتراق مقداری به تعویق می‌افتد و همچنین نرخ آزادسازی گرما

می‌دهد که احتراق در زمان مناسبی آغاز شده است. علاوه بر این با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده نمود که دمای میانگین سیلندر نسبت به دیزل‌های متداول کمتر بوده و همین موضوع باعث می‌شود تا انتشار آلاینده‌گی اکسید نیتروژن (NOx) در این موتور کمتر از دیزل‌های متداول باشد.



شکل ۴- کانتر دمای مدل iBD در زاویه‌های مختلف

هدف اصلی این تحقیق این است که نشان دهیم می‌توان به جای استفاده از دو سوخت مختلف در موتور RCCI که نیاز به دو منبع سوخت دارد، از یک سوخت به علاوه مقدار کمی از افزودنی ستانی، استفاده کرد. در این راستا در این قسمت به مقایسه مدل iBD شبیه‌سازی شده و مدل BD تجربی خواهیم پرداخت.

در شکل ۵ نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما برای دو مدل مذکور آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توانستیم با افزودن مقدار کمی از افزودنی ستانی به سوخت پایه ایزووتانول، سوختی مشابه سوخت دیزل ایجاد کنیم، که بتواند نقش سوخت با واکنش پذیری بالا را در موتور RCCI ایفا کند. با توجه به نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما می‌توان گفت که احتراق در موتور RCCI برای هر دو مدل به خوبی رخ می‌دهد. به عبارت دیگر احتراقی که در آن سوخت پاشش مستقیم ترکیبی از افزودنی ستانی و سوخت ایزووتانول می‌باشد، مشابه احتراقی است که در آن سوخت پاشش مستقیم، سوخت دیزل است. البته همان‌طور مشاهده می‌شود، احتراق در مدل iBD دیرتر آغاز می‌شود، این مسئله می‌تواند به دلیل واکنش پذیری کم سوخت ایزووتانول و همچنین دیرتر تبخیر شدن آن نسبت به سوخت دیزل باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق موتور اشتعال ترکیبی با واکنش پذیری کنترل شده (RCCI) به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی با نرم-افزار کانورج، که کدی برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان به روش "دینامیک سیالات محاسباتی" می‌باشد، انجام شد. برای شبیه‌سازی آشفته‌گی جریان از مدل $k-\epsilon$ RNG، برای تجزیه قطرات پاشش از مدل KH-RT، برای برخورد قطرات پاشش از مدل O'Rourke و برای احتراق از مدل SAGE استفاده شده است. در این شبیه‌سازی برای کاهش در حجم محاسبات، از مکانیزم کاهش یافته، که شامل ۱۰۸ گونه و ۴۳۵ واکنش است، استفاده شده است.

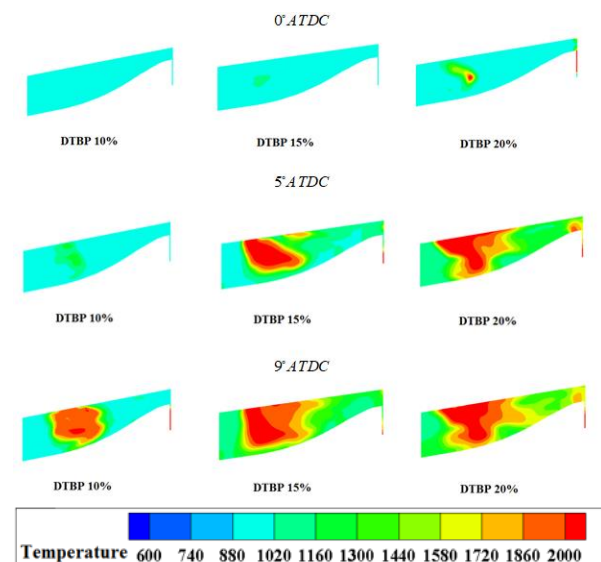
در این تحقیق برای شبیه‌سازی مدل iBD سوخت ایزوئتانول به صورت پیش‌آمخته و همین سوخت به علاوه مقدار کمی (۲۰٪) از افزودنی ستانی DTBP، به صورت پاشش مستقیم، استفاده شده است.

در این تحقیق ابتدا به صحت‌سنجی نتایج بدست آمده پرداخته شده است، یعنی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود در ادبیات پیشین، مقایسه شده است. در این راستا نمودار فشار و نرخ آزاد سازی گرما برای این مقایسه آورده شده است. مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردارند و رفتاری شبیه به رفتار نتایج تجربی دارند. البته خطای اندکی نیز بین این دو مشاهده شد که می‌تواند ناشی از فرضیات شبیه‌سازی باشد.

یکی از اهداف این تحقیق مقایسه دو مدل iBD و BD بود تا نشان داده شود که می‌توان با افزودن مقدار کمی از افزودنی ستانی به سوخت با واکنش پذیری پایین، به رفتاری مانند سوخت با واکنش پذیری بالا دست یافت. در این راستا نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل iBD (که در آن از سوخت ایزوئتانول به عنوان سوخت پایه با واکنش پذیری کم، و از همان سوخت با مقدار مناسبی (۲۰٪) از افزودنی ستانی DTBP به عنوان سوخت با واکنش پذیری بالا استفاده می‌کند) با نتایج آزمایشگاهی مدل BD (که از سوخت ایزوئتانول به عنوان سوخت با واکنش پذیری کم و از سوخت دیزل (ان-هپتان) به عنوان سوخت با واکنش پذیری بالا استفاده می‌کند) مقایسه شدند. مشاهده شد احتراق مدل iBD مشابه مدل BD می‌باشد، البته احتراق مدل iBD، به دلیل دیرتر تبخیر شدن سوخت ایزوئتانول نسبت به دیزل، دیرتر آغاز می‌شود. اما در مجموع رفتاری مشابه خواهند داشت. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب ایزوئتانول و افزودنی ستانی، می‌تواند رفتاری مشابه سوخت دیزل داشته باشد.

در مرحله بعد به بررسی تاثیر مقدار افزودنی ستانی در احتراق مدل iBD، که یکی از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد، پرداخته شد. در این بخش شبیه‌سازی با چهار مقدار افزودنی ستانی ۲۰٪، ۱۵٪، ۱۰٪ و ۵٪ انجام شد تا حساسیت موتور به این پارامتر بررسی شود. لازم به ذکر است که مقدار ۲۰٪ افزودنی ستانی در مدل صحت‌سنجی شده استفاده شده بود. با بررسی نتایج بدست آمده، مشاهده شد که با کاهش در افزودنی ستانی احتراق دیرتر و ناقص‌تر رخ می‌داد. همچنین مشاهده شد که حساسیت موتور در این مدل، به مقدار افزودنی ستانی، در کمتر از ۱۵٪ شدیدتر می‌شود، به نحوی که در مقدار افزودنی ستانی ۱۰٪ احتراق کاملاً ناقص رخ داده و نمودار فشار به هیچ وجه نتوانست در حد مطلوبی رشد کند. همچنین در مقدار افزودنی ستانی ۵٪ عملاً احتراقی رخ نداد و نمودار فشار کاملاً مشابه نمودار موتورینگ رفتار کرد. با توجه به مطالب مذکور متوجه

کمتر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود تا فشار ماکزیمم کاهش یابد. همچنین با کاهش افزودنی ستانی این بار از ۱۸٪ به ۱۶٪ احتراق نسبت به حالت قبلی بیشتر به تاخیر می‌افتد و نرخ آزاد سازی انرژی و همچنین فشار ماکزیمم به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. این مسئله نشان می‌دهد که، حساسیت موتور به درصد افزودنی ستانی، با کاهش مقدار افزودنی افزایش می‌یابد. اگر این روند را تا ۱۰٪ ادامه دهیم، مشاهده می‌کنیم که نرخ آزادسازی انرژی بسیار کم است و مقدار بسیار کمی از سوخت، سوخته است. نمودار فشار نیز به نمودار موتورینگ نزدیک است و هیچ گونه افزایش فشار محسوس ناشی از احتراق در آن دیده نمی‌شود. همچنین در شکل ۷ که نمودار دمای میانگین سیلندر را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که با کاهش در درصد افزودنی ستانی به مرور ماکزیمم دما کاهش یافته و نهایتاً در مدل ۱۰٪ درصد افزودنی ستانی افزایش دمای ناشی از احتراق ناچیز است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که موقعیت ماکزیمم دمای سیکل، با کاهش درصد افزودنی ستانی DTBP، به سمت راست حرکت می‌کند، که این مسئله نشان دهنده تاخیر در شروع احتراق می‌باشد. برای درک بهتر موضوع می‌توان به شکل ۸ رجوع کرد. در این شکل کانتور دما برای سه مدل با درصد افزودنی‌های مذکور برای سه زاویه میل-لنگ مختلف رسم شده است. دلیل انتخاب این سه مدل ملموس بودن تفاوت‌ها بین آنهاست.



همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش افزودنی ستانی به دلیل کاهش واکنش پذیری سوخت احتراق ناقص‌تر رخ می‌دهد. در مدل ۱۰٪ افزودنی ستانی در زاویه میل‌لنگ 0 ATDC هیچ احتراقی رخ نمی‌دهد، اما در مدل ۱۵٪ افزودنی ستانی همانطور که مشاهده می‌شود احتراق در شرف انجام است و در مدل ۲۰٪ افزودنی ستانی احتراق به طور کامل انجام می‌شود. در زاویه میل‌لنگ 5 ATDC، که در مدل ۲۰٪ درصد افزودنی ستانی احتراق در اوج خود است، همچنان در مدل ۱۰٪ افزودنی ستانی، احتراق هنوز کامل رخ نداده است. این تاخیر زیاد در این احتراق، باعث می‌شود که بخش کوچکی از سوخت بسوزد. این مسئله به خوبی تاثیر افزودنی ستانی را در واکنش‌پذیری سوخت و احتراق نشان می‌دهد.

Combustion," *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 8, no. 2, pp. 329-343, 2015.

شدیم که افزودنی ستانی تاثیر به سزایی در افزایش واکنش پذیری سوخت داشته و این تاثیر در مقادیر کمتر بیشتر می‌باشد. همچنین از نتایج بدست آمده، مشاهده شد که با افزودن مقدار مناسب افزودنی ستانی، می‌توان به احتراقی مناسب در موتور RCCI، با استفاده از یک سوخت پایه با واکنش پذیری پایین، دست یافت.

فهرست علائم

ATDC	بعد از نقطه مرگ بالا
CO	مونواکسید کربن
EGR	باز خورانی گازهای خروجی
NOx	اکسیدهای نیتروژن
RCCI	احتراق تراکمی کنترل واکنش پذیری
DTBP	دی-ترت بوتیل پرواکسید
SCOTE	موتور تک سیلندر آزمایشی
HRR	نرخ آزاد شدن حرارت

مراجع

- [1]. A. B. Dempsey, "Dual-fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) with alternative fuels," THE UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, 2013.
- [2]. S. L. Kokjohn, "Reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion," THE UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, 2012.
- [3]. K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, and A. M. Dean, "Mechanism of the smokeless rich diesel combustion by reducing temperature," SAE technical paper 0148-7191, 2001.
- [4]. D. Splitter, R. D. Reitz, and R. Hanson, "High efficiency, low emissions RCCI combustion by use of a fuel additive," *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 3, no. 2010-01-2167, pp. 742-756, 2010.
- [5]. A. B. Dempsey, S. Curran, and R. D. Reitz, "Characterization of reactivity controlled compression ignition (RCCI) using premixed gasoline and direct-injected gasoline with a cetane improver on a multi-cylinder engine," *SAE International Journal of Engines*, vol. 8, no. 2015-01-0855, pp. 859-877, 2015.
- [6]. D. DelVescovo, H. Wang, M. Wissink, and R. D. Reitz, "Isobutanol as Both Low Reactivity and High Reactivity Fuels with Addition of Di-Tert Butyl Peroxide (DTBP) in RCCI