

اثرات پاشش چندگانه سوخت بر کاهش میزان آلاینده ها و افزایش بازده موتورهای دیزلی

علی گوران

رسول محبی*

امین امیری دلویی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و تحقیقات بوشهر، بوشهر، ایران

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

در این مطالعه راهکار پاشش دومرحله‌ای سوخت به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و اکسیدهای نیتروژن و همچنین افزایش راندمان موتور مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی احتراق از نرم‌افزار AVL FIRE بهره گرفته شده است. موتور مورد مطالعه، موتور دیزلی پاشش مستقیم OM-355 مرکز تحقیقات موتوری شرکت ایدم تبریز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در تزریق دومرحله‌ای سوخت، فشار و دمای متوسط محفظه احتراق در طرحی که در آن ۷۰٪ سوخت در مرحله اول و ۳۰٪ مابقی سوخت در مرحله دوم پاشیده می‌شود، بیشتر است. بهترین عملکرد به لحاظ کاهش میزان آلاینده دوده و آلاینده اکسیدهای نیتروژن به ترتیب مربوط به طرح‌هایی است که در آن‌ها ۹۰٪ و ۷۰٪ سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود. در نظر گرفتن فاصله زمانی ۲۰ درجه میل‌لنگ برای شروع مرحله دوم می‌تواند باعث بهینه شدن فرآیند احتراق و کاهش میزان آلاینده‌های موتور گردد.

واژه‌های کلیدی: موتور دیزل پاشش مستقیم، پاشش چندمرحله‌ای سوخت، OM-355، دوده، اکسیدهای نیتروژن.

Effects of Multiple Injection on the Emission reduction and Efficiency Increase of Diesel Engines

A. Gouran

Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University Science & Research Branch, Bushehr, Iran

R. Mohebbi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

A. Amiri Delouei

Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract

In this study, the two-stage fuel injection strategy as an effective method for the simultaneous reduction of soot and nitrogen oxides emissions and also increase engine efficiency is investigated. AVL FIRE software for numerical simulation of combustion is used. The direct injection diesel engine OM355 of the research center of Idem Tabriz is selected as the studied engine. The results of the simulation show that for the two-stage fuel injection, the average temperature and pressure in the combustion chamber are the most when 70% and 30% of the fuel is injected in the first and second stages, respectively. The best performance in terms of reducing the emissions of carbon and nitrogen oxides emissions have been achieved by using a design which 90% and 70% of the fuel is sprayed in the first stage, respectively. Considering the interval of 20 degrees of the crankshaft for the start of the second injection can optimize the combustion process and reduce emissions of the engine.

Keywords: Direct Diesel Engine, Multiple Injections, OM-355, Soot, Nitrogen oxides.

۱- مقدمه

انداختن زمان تزریق سوخت است. با استفاده از این روش امکان کاهش اکسیدهای نیتروژن فراهم می‌شود ولی میزان دوده افزایش می‌یابد. برای کاهش دوده می‌توان فشار پاشش سوخت را افزایش داد. از طرفی محدودیت‌هایی برای افزایش فشار پاشش وجود دارد که استفاده از این روش را محدود می‌کند. پاشش چند مرحله‌ای سوخت یک ابزار قدرتمند برای کاهش همزمان این دو آلاینده است.

فطرسی^[۱] در تحقیق خود به بررسی تجربی و عددی تولید اکسیدهای نیتروژن در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پرداخته است. در این تحقیق از مدل زلدوویچ برای نحوه تولید اکسیدهای نیتروژن استفاده شده است. او همچنین در تحقیق مشابهی^[۲] روی یک موتور پرسرعت پاشش

موتورهای دیزلی به دلیل مصرف سوخت پایین و توان تولیدی بالا نسبت به انواع موتورهای احتراق داخلی مزیت داشته و از این‌رو برای کاربردهای گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مشکلات اصلی موتورهای دیزلی تولید عمده آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن^۱ و دوده^۲ است که تا حدود زیادی به آهنگ آزادسازی گرمای اولیه بستگی دارد. کاهش آلاینده‌های تولیدی موتور همواره مورد توجه تولیدکنندگان موتور بوده است و روش‌های مختلفی برای این منظور تا به امروز پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های مرسوم در کاهش آلاینده‌گی، به تأخیر

^۱ NOx

^۲ Soot

مستقیم دیزل، روند احتراق را مورد مطالعه قرار داده است. در این تحقیق از مدل k-E برای نحوه انتشار آشفتنگی استفاده شده است. ویکمن و همکاران [۳] تأثیر فشار و شکل پاشش سوخت در موتور دیزل را بررسی کرده و نتیجه گرفته اند که شکل پاشش نزولی روند شکل گیری دوده را کاهش داده است. روش های محاسباتی بکار گرفته شده در مدل های چند بعدی تحلیل جریان در موتورهای احتراق داخلی، نخستین بار توسط آگوستا و هامر [۴] معرفی شده است و شامل دو روش متفاوت است. اولین روش برای محاسبات جریان سیال در داخل سیلندر استفاده شده است. آن ها ضمن تکمیل این مدل، به محاسبه زمان تأخیر حساس و ضریب اندرکنش فشاری قطره اکسیژن در محیطی با نوسانات آکوستیکی پرداخته اند. دومین روش استفاده از الگوریتم فشار مبنا است. از جمله تحقیقات انجام شده با روش های فوق، تحقیقات ماس [۵] است که برای حل جریان های دوبعدی (جریان های متقارن محوری) در داخل سیلندر موتورهای احتراق استفاده شده است. در بررسی انجام گرفته در این مقاله مدل های آشفتنگی مختلف برای شبیه سازی جریان سیال در داخل محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از مدل اسپالارت آلماراس^۱ و نرم افزار ای-وی - ال- فایر^۲ برای شبیه سازی موتور دیزل شش سیلندر OM-355 استفاده شده است. این نرم افزار با استفاده از روش حجم محدود، اقدام به گسسته سازی معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم و انرژی به همراه مدلی برای آشفتنگی نموده و سپس با یک الگوریتم تکراری اقدام به حل معادلات جبری حاصل می کند. در این بررسی از مدل داکوویچ برای تبخیر قطرات سوخت و مدل ادی بریک آپ^۳ برای فرایند احتراق و مکانیزم آلایندگی توسعه یافته زلدوویچ^۴ برای تشکیل اکسیدهای نیتروژن بهره گرفته شده است.

پریم و بریساچر [۶] نیز روشی را در شرکت انروجت، با استفاده از بسط سری فوریه برای مدل سازی همزمان نوسانات آکوستیکی و پاسخ احتراق ارائه کرده اند. این پژوهش با هدف ایجاد راهکاری جهت مدل سازی دینامیک احتراق با استفاده از نظریه زمان تأخیر حساس انجام شده است تا در نرم افزاری که برای تحلیل ناپایداری احتراق فرکانس بالا ایجاد می شود بکار رود. آن ها ابتدا شرح مختصری از نظریه زمان تأخیر حساس ارائه داده اند و سپس مدل سازی دینامیک احتراق را برای یک تک قطره و همچنین قطرات خروجی از انژکتور بیان کرده اند. در نهایت با مقایسه تابع پاسخ احتراق حاصل از مدل سازی و تابع پاسخ ارائه شده توسط نظریه زمان تأخیر حساس، پارامترهای کلیدی دینامیک احتراق را به دست آورده اند. فلاح و همکارش [۷] در تحقیق خود قابلیت کنترل دمای خنک کاری موتور را به منظور کاهش آلایندگی های اکسید نیتروژن در موتورهای دیزلی سنگین به صورت تجربی مورد ارزیابی و آزمایش قرار داده اند. در این تحقیق به منظور توازن در کاهش آلایندگی اکسید نیتروژن و دیگر آلایندگی ها نظیر دوده و مصرف سوخت، اثرات پارامترهای زمان بندی پاشش و درصد EGR سرد نیز به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل شده حاکی از آن است که با تغییر در دمای خنک کاری موتور و پارامترهای زمان بندی پاشش، مقدار آلایندگی ها و

مصرف سوخت کاهش یافته است. باشی و همکارش [۸] در تحقیق خود به مطالعه تجربی اثر تغییرات سیکلی بر روی آلایندگی های هیدروکربن نسوخته در یک موتور اشتعال جرقه ای پرداخته اند. در این تحقیق با استفاده از یک موتور تک سیلندر پژوهشی اقدام به ثبت مجموعه ای از سیکل های پیاپی و سپس بررسی آماری آن ها شده است. نتایج تحقیق ایشان حاکی از آن است که تغییرات سیکلی سبب کاهش هیدروکربن های نسوخته در خروجی موتور شده است. جعفری و همکاران [۹] نوع پاشش در محفظه احتراق یک موتور دیزلی سنگین و تأثیر آن در شکل گیری آلایندگی ها را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق از نرم افزار فایر^۵ برای شبیه سازی فرایندهای پاشش و احتراق در پنج شکل پاشش مختلف استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که کمترین میزان آلایندگی اکسید نیتروژن در پاشش مثلثی حاصل شده است و هم چنین با پیش پاشش و پس پاشش میزان دوده نیز کاهش یافته است. امی و همکاران [۱۰] در تحقیق خود به بررسی چگونگی کاهش آلایندگی های دوده و مونوکسید نیتروژن در پاشش چندمرحله ای سوخت به عنوان یک راهکار مؤثر در کنترل آلایندگی موتور دیزل MT_4.244 پرداخته اند. آن ها مقدار سوخت در هر پالس پاشش و فاصله زمانی بین دو پالس را مورد بررسی قرار داده اند. آن ها برای بررسی عددی و شبیه سازی فرایند احتراق موتور از مدل آشفتنگی K-E برای جریان متلاطم داخل محفظه سیلندر، مدل احتراق ماگنوسن-هرتاگر، مدل زلدوویچ توسعه یافته برای محاسبه مونوکسید نیتروژن و مدل هیروپاسو برای محاسبه دوده استفاده کرده اند. نتایج حاصل شده حاکی از آن است که حالت بهینه پاشش چندمرحله ای برای موتور، حالت ۲۵(۳۵)۷۵ است که در آن مونوکسید کربن ۱۱ درصد و دوده ۳۳ درصد کاهش یافته اند. خباز و همکاران [۱۱] در تحقیق خود به بررسی نظری اثرات فشار پاشش سوخت بر عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل مجهز به پرخوران در قالب شبیه سازی عددی با نرم افزار فایر پرداخته اند. آن ها در نرم افزار مذکور از مدل ادی - بریک آپ برای الگوی فرایند احتراق، مدل پاشش سوخت موج^۶، مدل زلدوویچ برای سنجش آلایندگی اکسیدهای نیتروژن و مدل هیروپاسو برای تشکیل و اکسایش دوده استفاده نموده اند. نتایج به دست آمده نشان می دهند که با افزایش فشار پاشش، بازده موتور افزایش و آلایندگی ها کاهش می یابند. ذهنی و همکاران [۱۲] در مطالعه خود به بررسی فرایند احتراق و آلایندگی موتور دیزل OM-355 دوگانه سوز پرداخته و نتایج حاصل را با موتور مشابه دیزلی مقایسه نموده اند. آن ها برای دوگانه سوز کردن موتور گاز متان را به سوخت افزوده اند و از مدل های اصلی به کاررفته در نرم افزار فایر، مدل آشفتنگی K-E یافته برای محاسبه مونوکسید نیتروژن و مدل هیروپاسو برای محاسبه دوده استفاده نموده اند.

در این مقاله تلاش بر آن است که راهکاری جهت شبیه سازی موتور احتراق داخلی برای دستیابی به بازده بالاتر و آلایندگی کمتر یافته شود. در این صورت هزینه تحقیقات کمتر شده و شرکت های خودروسازی از محققین در این زمینه حمایت بیشتری خواهند کرد. در این تحقیق،

^۵ Fire

^۶ Wave Model

^۱ Spalart Allmaras Model

^۲ Avl Fire Software

^۳ Eddy Breakup Model

^۴ Zeldovich Model

حل معادلات فوق برای کلیه محاسبات مقدار 0.001 در نظر گرفته شده است.

۱-۲- الگوی احتراقی

برای شبیه سازی فرایند احتراق در موتور اشتعال تراکمی از مدل احتراقی ادی - بریک - آپ استفاده شده است. در این مدل فرض بر این بوده که واکنش گرما و محصولات احتراق شامل گردابه های مجزا از یکدیگر هستند؛ با این فرض مقیاس زمانی واکنش شیمیایی در مقایسه با مقیاس زمانی پدیده انتقال بسیار کوتاه تر خواهد بود [۱۱] و در نتیجه فرآیند احتراق توسط یک اختلاط توربولانس در جبهه شعله کنترل خواهد شد. با توجه به رابطه ارائه شده توسط ماگنوسن و هرتاگر [۱۳]، نرخ واکنش احتراق برابر خواهد بود با:

$$\bar{\rho} \bar{r}_{fu} = \frac{C_{fu}}{\tau_R} \bar{\rho} \min \left(\bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}_{ox}}{S}, \frac{C_{pr} \cdot \bar{y}_{pr}}{1+S} \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\bar{y}_{fu}$ دسترس پذیری سوخت، $\bar{y}_{ox}$ دسترس پذیری اکسیژن و $\frac{\bar{y}_{ox}}{S}$ احتمال تحقق واکنش است که بیان کننده آن است که پخش شعله در غیاب محصولات بسیار گرم امکان پذیر نیست. $\bar{\rho}$ نرخ چگالی، C_{fu} ثابت تجربی سوخت، C_{pr} ثابت تجربی محصولات احتراق، τ_R مدت زمان اختلاط توربولانس، γ کسر جرمی، S نرخ مصرف سوخت و $\dot{r}_{fu}$ دوره کسری شیمیایی سوخت می باشد.

۲-۲- الگوی پاشش

شبیه سازی پاشش، شامل یک پدیده جریان چند فازی است و نیازمند حل عددی معادلات پایستاری برای فاز گاز و مایع به صورت همزمان است. همه محاسبات پاشش مبتنی بر روش آماری (گسسته سازی قطرات^۲) هستند.

۱-۲-۲- مدل گسسته سازی قطرات

در مدل های پیشنهادی توصیه شده است که قطر ابتدایی قطرات باید در حد قطر سوراخ نازل در نظر گرفته شود. برای نازل ها با ورودی تیز به علت کاویتاسیون، قطر قطرات کوچک تر از قطر سوراخ نازل ها خواهد بود. در این تحقیق از مدل موج استاندارد^۳ برای مدل سازی گسسته سازی قطرات استفاده شده است.

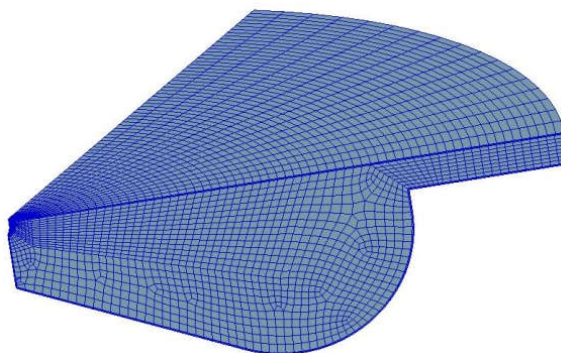
۲-۲-۲- مدل تبخیر قطرات

مدل استفاده شده برای تبخیر قطرات، مدل داکوویچ^۴ است که ضرورتاً بر مبنای فرضیات کروی متقارن بودن قطره، جریان نیمه آرام فیلم گاز اطراف قطره، دمای قطره یکنواخت در طول قطر قطره، خواص فیزیکی یکنواخت سیال احاطه کننده، تعادل گرمایی مایع - بخار بروی سطح قطره شکل گرفته است

موضوع اصلی پیرامون پاشش چند مرحله ای در موتور دیزل مورد بحث است. از نظر فنی پاشش چند مرحله موضوعی نوین در موتور دیزل است چرا که با بهبود سرعت حسگرها و عملگرهای الکترومکانیکی امکان قطع و وصل پاشش در بازه های زمانی کوتاه تر میسر شده است. برای دستیابی به دانش فنی شبیه سازی پاشش چند مرحله ای در موتور دیزل ابتدا شرایط مرزی کارکرد موتور در تحقیقات مشابه استخراج می شود. سپس مدل محفظه احتراق در یک نرم افزار ایجاد می شود و شبکه محاسبات در آن معلوم می گردد. در ادامه عملکرد موتور در نرم افزار آی - سی - اف - ام - سی - اف - دی^۱ شبیه سازی می شود. در نهایت پاشش تک مرحله و چند مرحله ای شبیه سازی شده و مورد اعتبار سنجی و بحث قرار می گیرد. هدف از شبیه سازی دستیابی به نمودار فشار - زاویه لنگ و دما - زاویه لنگ در دور موتور معین است.

۲- شبیه سازی عددی

برای شبیه سازی فرآیندهای مختلف یک موتور احتراق داخلی ابتدا نیاز به تهیه مدل محفظه احتراق مورد استفاده در موتور است. به طور کلی شبیه سازی در سه مرحله انجام می شود. در مرحله اول محفظه احتراق موتور فوق توسط نرم افزار SolidWorks مدل سازی می شود. در مرحله دوم، محفظه احتراق مدل سازی شده به نرم افزار CFD-ICEM منتقل شده و فرایند ایجاد شبکه بر روی طرح مورد نظر صورت می پذیرد. این شبکه ها از نوع شش وجهی هستند. در مرحله سوم، طرح آماده شده از محفظه احتراق برای تحلیل مراحل تراکم، احتراق و انبساط به محیط نرم افزار AVL FIRE منتقل شده و تحلیل سیالاتی و احتراق بر روی مدل پس از تعریف شرایط مرزی و انجام مراحل مش متحرک صورت می پذیرد. در شکل ۱ حجم کنترل محفظه احتراق مورد نظر در محیط نرم افزار FIRE AVL نشان داده شده است.



شکل ۱- حجم کنترل احتراق مورد نظر در محیط نرم افزار FIRE AVL

معادلات مورد استفاده در نرم افزار AVL FIRE که جهت انجام محاسبات در فضای محاسباتی نرم افزار مورد استفاده قرار عبارتند از: (۱) معادله مومنتم، (۲) معادله پیوستگی، (۳) معادله انرژی و (۴) معادله توربولانس. در شبیه سازی موتور از مدل دو معادله ای توربولانت k-ε استفاده شده است. به طور کلی، در پژوهش حاضر دقت همگرایی جهت

^۴ Dukuwich Model

^۱ Icem Cfd Soft Ware

^۲ Spray Model

^۳ Wave Standard Model

۲-۲-۳- مدل تعامل پاشش - دیواره

مدلی که برای تعامل پاشش با دیواره استفاده شده، مدل وال جت وان^۱ است که این مدل در اصل بر مبنای مدل اصابت اسپری - وال^۲ است. مفهوم این مدل آن است که یک بالشتک بخار در اطراف قطره‌ها تشکیل و با دیواره سیلندر برخورد می‌کنند در نتیجه بخشی از قطرات منعکس شده و بخشی نیز در طول دیواره لیز می‌خورند. در این مدل فرض شده است که هنگام برخورد قطره با دیواره یکی از دو نتیجه بازگشت یا انعکاس قطره رخ می‌دهد که به عدد وبر وابسته است. معیار گذار این دو رژیم توسط عدد وبر بحرانی توصیف می‌شود که این عدد بحرانی برابر ۸۰ است.

۲-۳- فرآیند تولید آلایندگی اکسید نیتروژن

اکسیدهای نیتروژن در موتور دیزل، شامل اکسید نیتروژن و مقدار کمی دی‌اکسید نیتروژن هستند. دی‌اکسید نیتروژن از اکسید نیتروژن حاصل می‌گردد. منابع اصلی آلایندگی اکسید نیتروژن را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) اکسید نیتروژن گرمایی که به واسطه تجزیه مولکول‌های هوا و نیتروژن شکل می‌گیرد، (۲) اکسید نیتروژن سریع که بر اثر هجوم هیدروکربن‌ها به نیتروژن موجود در هوا شکل می‌گیرد و (۳) اکسید نیتروژن سوخت که به واسطه نیتروژن موجود در سوخت به وجود می‌آید. به خاطر کوچک بودن نرخ تشکیل اکسید نیتروژن سوخت و اکسید نیتروژن سریع، در مقایسه با اکسید نیتروژن گرمایی، از آن‌ها صرف نظر می‌شود. در موتور فشار استوانه در خلال فرایند احتراق افزایش می‌یابد و گازهای سوخته شده در دمای بالا متراکم می‌شوند. به همین دلیل نرخ شکل‌گیری اکسید نیتروژن گرمایی، در مقایسه با انواع دیگر چشمگیر است. جهت مدل‌سازی فرآیند تولید آلایندگی اکسید نیتروژن در نرم‌افزار فایر از مکانیسم زلدوویچ [۱۴] استفاده شده است.

۲-۴- تشکیل و اکسایش دوده

در این تحقیق از مدل هیرواسو [۱۵] برای تشکیل و اکسایش دوده استفاده شده است. این الگو شامل دو فرآیند شکل‌گیری و اکسایش دوده است و بر اساس آن نرخ تغییر در جرم دوده برابر با اختلاف نرخ تشکیل دوده و نرخ اکسایش آن است. نرخ شکل‌گیری و اکسایش دوده با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = k_f M_{fv} \quad (3)$$

$$K_f = A_f P^{0.5} \exp\left(\frac{-E_f}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\frac{dM_{so}}{dt} = K_o M_s X_{O_2} \quad (5)$$

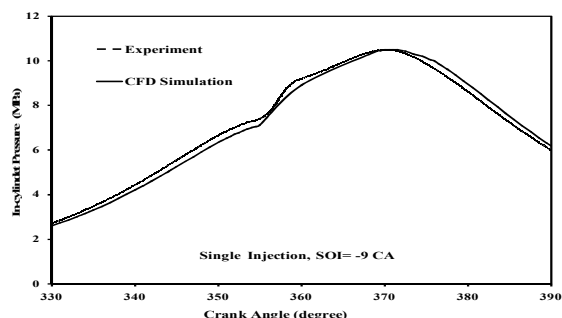
$$k_o = A_o P^{1.8} \exp\left(\frac{-E_o}{RT}\right) \quad (6)$$

در روابط بالا M_{sf} جرم دوده تشکیل شده، M_{so} جرم دوده اکسید شده، M_s تغییر جرم دوده، T دما برحسب کلوین، A_o و A_f ثابت‌های پیش توان آرینوس، P فشار برحسب بار، R ثابت عمومی گاز، E انرژی فعال‌سازی هیرواسو، M_s جرم دوده، X_{O_2} کسر مولی اکسیژن، k_o انرژی

جنبشی اغتشاش مربوط به اکسید دوده و K_f انرژی جنبشی اغتشاش مربوط به تشکیل دوده هستند.

۳- بحث و نتایج

شکل ۲، فشار موتور برحسب زاویه میل‌لنگ در سرعت ۱۴۰۰ (دور بر دقیقه)، یعنی سرعتی که به ازای آن گشتاور ماکزیمم است را نشان می‌دهد. هم‌چنین جدول شماره ۱ مشخصات کلی موتور مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار فوق توافق قابل قبولی بین نتایج عددی به‌دست‌آمده از فشار داخل سیلندر و نتایج تجربی متناظر مشاهده می‌شود.



شکل ۲- فشار داخل سیلندر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

جدول ۱- مشخصات موتور دیزل OM-355

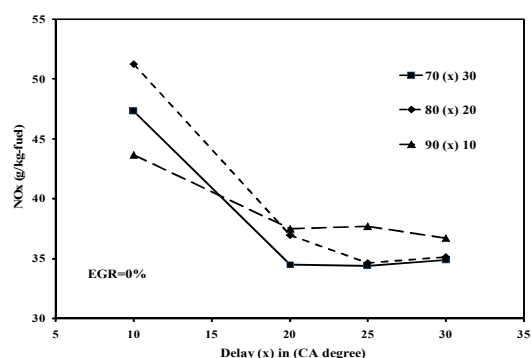
نام موتور	مرسدس بنز OM-355
نوع موتور	دیزلی سنگین چهارزمانه
تعداد سیلندر	۶ سیلندر
تعداد سوراخ‌های انژکتور	۴ عدد
قطر پیستون	۱۲۸ میلی‌متر
کورس پیستون	۱۵۰ میلی‌متر
نسبت تراکم	۱۶/۱
گنجایش	۱۱/۵۸ لیتر
فشار پاشش سوخت	۱۹۷ بار
دور موتور در حداکثر گشتاور	۱۴۰۰ دور در دقیقه
حداکثر گشتاور خروجی	۸۲۴ نیوتن متر
دور موتور در حداکثر توان	۲۲۰۰ دور در دقیقه
حداکثر توان خروجی	۲۴۰ اسب بخار

در شکل ۳ مقایسه بین آلایندگی اکسیدهای نیتروژن که توسط نرم‌افزار به‌دست‌آمده در مقایسه با مقدار تجربی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشهود است مقدار خروجی نرم‌افزار در انتهای مرحله احتراق به مقدار تجربی بسیار نزدیک است.

^۲ Spray-Wall Model

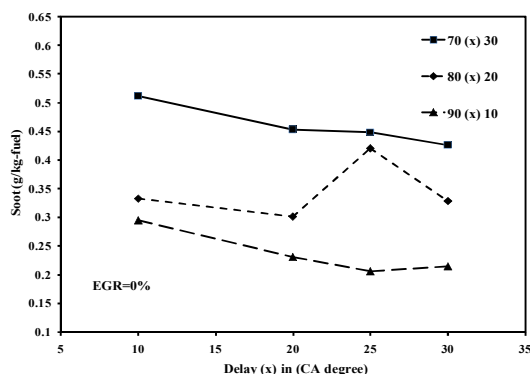
^۱ Walljet1 Spray-wall Interaction Model

در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلایندہ اکسیدهای نیتروژن برای طرح‌های مختلف پاشش چندمرحله‌ای سوخت نشان داده شده است. میزان پارامتر x که در پراکنش نشان داده شده است معرف فواصل زمانی مختلف بین دو مرحله پاشش سوخت است. چنانچه در شکل ۶ مشهود است بهترین عملکرد به لحاظ کاهش میزان آلایندہ اکسیدهای نیتروژن با استفاده از طرحی حاصل شده است که در آن ۷۰٪ سوخت در مرحله اول پاشیده شده است و ۳۰٪ مابقی سوخت در مرحله دوم پاشیده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه مقدار سوخت در پاشش ثانویه بیشتر باشد مقدار آلایندہ اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش بیشینه نرخ آزادسازی گرما و احتراق پیش آمیخته است. علاوه بر این چنانچه در شکل مشهود است اگر فاصله زمانی ۲۰ درجه میل‌لنگ بین دو مرحله پاشش در نظر گرفته شود حالت بهینه به دست خواهد آمد.



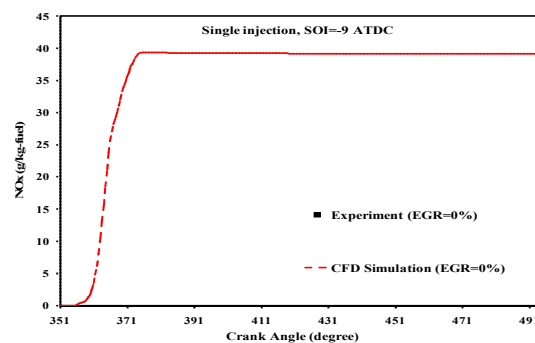
شکل ۶- آلایندہ اکسیدهای نیتروژن برای حالت‌های مختلف پاشش چندمرحله‌ای سوخت

در شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلایندہ دوده برای طرح‌های مختلف پاشش چندمرحله‌ای سوخت نشان داده شده است.



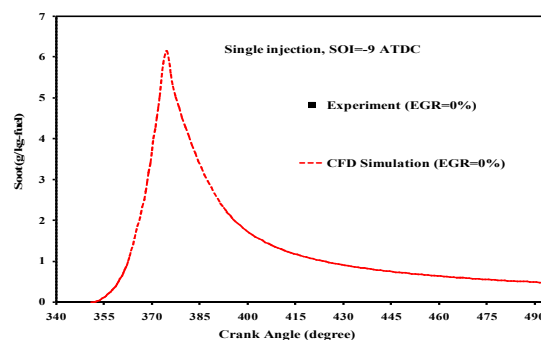
شکل ۷- آلایندہ دوده برای حالت‌های مختلف پاشش چندمرحله‌ای سوخت

چنانچه در شکل ۷ مشهود است بهترین عملکرد به لحاظ کاهش میزان آلایندہ دوده با استفاده از طرحی حاصل شده است که در آن ۹۰٪ سوخت در مرحله اول و ۱۰٪ مابقی سوخت در مرحله دوم پاشیده شده است. پاشش دومرحله‌ای سوخت نسبت به پاشش یک مرحله‌ای بدون کاهش توان موتور مقدار دوده را تا سطح زیادی کاهش می‌دهد زیرا در



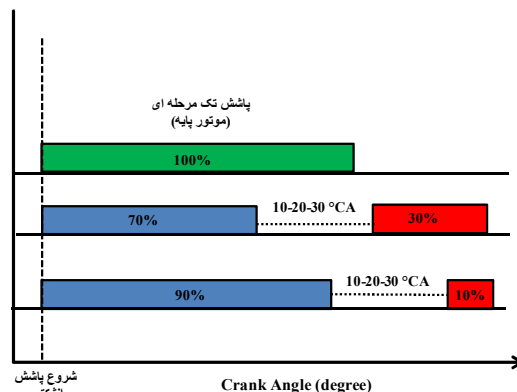
شکل ۳- آلایندہ اکسیدهای نیتروژن، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۴ به صورت مشابه، مقایسه‌ای برای میزان آلایندہ دوده انجام گرفته است. در این شکل نیز چنانچه مشهود است تطابق بسیار نزدیکی به لحاظ عددی بین خروجی نرم‌افزار و نتایج تست آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

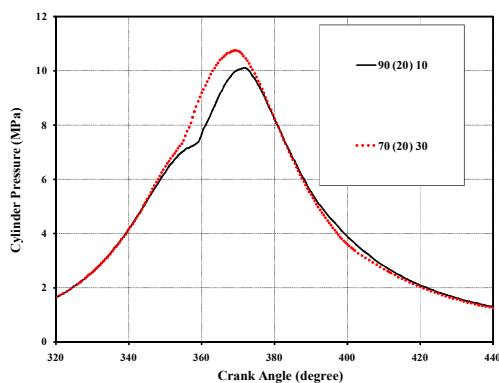


شکل ۴- آلایندہ دوده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۵ طرح کلی فرآیندهای مختلف پاشش چندمرحله‌ای که در این مطالعه به انجام رسیده است در مقایسه با پاشش تک‌مرحله‌ای در موتور پایه نشان داده شده است. در ردیف دوم از این شکل چنانچه با رنگ آبی مشخص شده است ۷۰٪ از سوخت در مرحله اول و ۳۰٪ سوخت (رنگ قرمز) در مرحله دوم پاشیده شده است. فاصله زمانی بین دو مرحله پاشش در سه حالت مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه میل‌لنگ در نظر گرفته شده است.

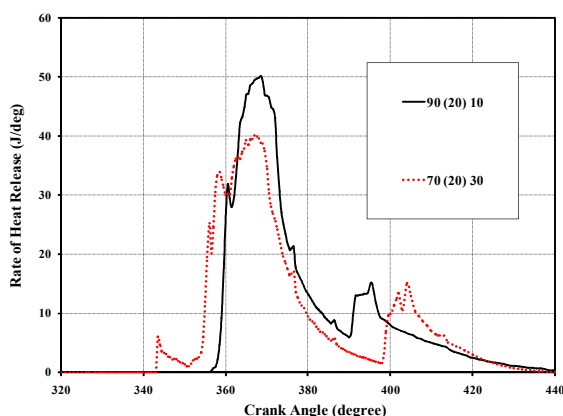


شکل ۵- طرح‌های مختلف پاشش چندمرحله‌ای سوخت در مقایسه با طرح موتور پایه



شکل ۹- فشار داخل سیلندر برای دو طرح بهینه پاشش دومرحله‌ای سوخت

در شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آهنگ آزادسازی گرما داخل سیلندر برای دو طرح بهینه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشهود است سطح آزادسازی گرما برای طرحی که در آن ۷۰ درصد سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان امکان تولید بیشتر گرما در مرحله اول تزریق، برای طرحی که میزان بیشتری سوخت را در مرحله اول پاشش به وجود می‌آورد، بیان کرد.

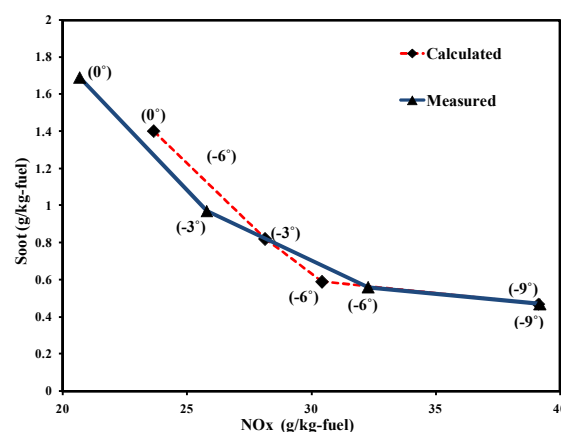


شکل ۱۰- آهنگ آزادسازی گرما برای دو طرح بهینه پاشش دومرحله‌ای سوخت

در شکل ۱۱ نتایج حاصل از شبیه‌سازی دمای داخل سیلندر برای دو طرح بهینه نشان داده شده است. در این چنانچه مشهود است سطح دمای طرحی که ۷۰ درصد سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود بیشتر است.

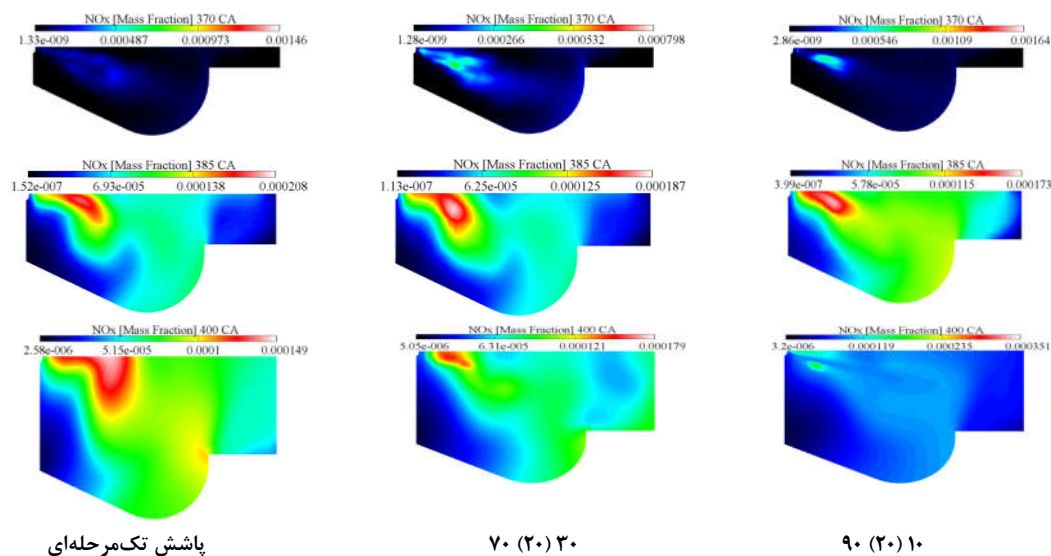
پاشش دومرحله‌ای به دلیل وقفه بین دو مرحله پاشش، ناحیه غنی از سوخت در نوک انژکتور که عامل تولید دوده است، حذف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هرچه مقدار سوخت در پالس اول پاشش بیشتر شود دوده تولیدی زمان کافی برای اکسیدشدن پیدا می‌کند، لذا مقدار نهایی آن کاهش می‌یابد؛ بنابراین در حالتی که ۹۰٪ سوخت در مرحله اول پاشش می‌شود مقدار دوده تولیدی کمتر است. علاوه بر این چنانچه در شکل مشهود است اگر فاصله زمانی ۲۵ درجه میل‌لنگ بین دو مرحله پاشش در نظر گرفته شود حالت بهینه به دست خواهد آمد.

در شکل ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلایندة دوده و اکسیدهای نیتروژن به‌طور همزمان برای حالتی که در آن ۷۰٪ سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود نشان داده شده است. ضمن اینکه در این طرح زمان اولیه پاشش سوخت به‌عنوان به متغیر بررسی شده است. همان‌گونه که از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی صورت گرفته استنباط می‌شود چنانچه مرحله اولیه شروع پاشش در زاویه ۶ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا در نظر گرفته شود حالت بهینه به دست خواهد آمد. در این حالت میزان تولید همزمان آلایندة دوده و اکسیدهای نیتروژن به کمترین مقدار خود در مقایسه با سایر حالت‌ها خواهد رسید؛ زیرا از یک طرف با کاهش سهم احتراق پیش آمیخته تولید اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد و از طرف دیگر در این فاصله زمانی دمای محفظه احتراق برای سوختن دوده تولید شده ناشی از پاشش پالس اول مناسب تر خواهد بود.

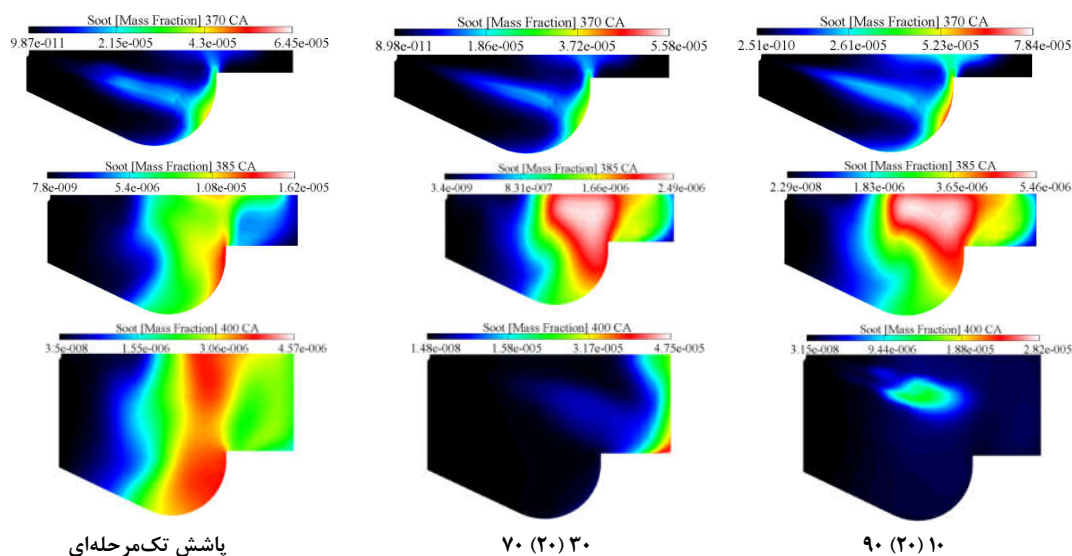


شکل ۸- آلایندة دوده و اکسیدهای نیتروژن برای حالت‌های مختلف شروع مرحله اول پاشش

در شکل ۹ نتایج حاصل از شبیه‌سازی فشار داخل سیلندر برای دو طرح بهینه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشهود است سطح فشار داخل سیلندر برای طرحی که در آن ۷۰ درصد سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود بیشتر است. علت این امر آن است که پس از شروع فرآیند احتراق به سبب باقی ماندن میزان بیشتری از سوخت (۳۰٪) جهت پاشش در مرحله دوم تزریق سوخت، امکان افزایش بیشینه فشار در این حالت بیشتر مهیا می‌گردد. از طرفی دیگر با توجه به افت فشار داخل سیلندر در برخی از حالت‌های پاشش، حالت بهینه زمانی است که قسمت بیشتر سوخت در مرحله اول تزریق شود تا توان موتور کاهش نیابد [۱۶].



شکل ۱۲- کانتر اکسیدهای نیتروژن برای دو طرح بهینه در مقایسه با طرح پاشش تک مرحله‌ای موتور پایه



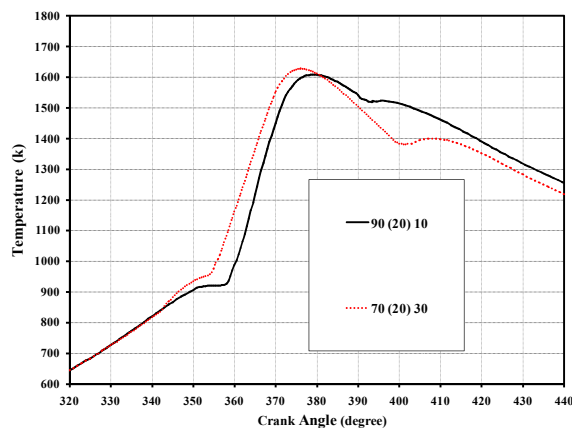
شکل ۱۳- کانتر دوده برای دو طرح بهینه در مقایسه با طرح پاشش تک مرحله‌ای موتور پایه

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کانترهای مربوط به شکل‌گیری آلاینده‌های دوده و اکسیدهای نیتروژن در دو طرح بهینه و طرح پاشش تک مرحله‌ای موتور پایه را نشان می‌دهند. چنانچه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشهود است کاهش چشمگیری در شکل‌گیری آلاینده‌های دوده و اکسیدهای نیتروژن در دو طرح پاشش بهینه در مقایسه با طرح پاشش پایه تک مرحله‌ای مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، تأثیر پاشش دومرحله‌ای سوخت بر روی عملکرد و آلاینده‌ی یک موتور دیزلی مورد بررسی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

- ۱- میزان فشار تجربی داخل سیلندر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق بسیار نزدیکی داشته که این امر نشان‌دهنده دقت بالای



شکل ۱۱- دمای داخل سیلندر برای دو طرح بهینه پاشش دومرحله‌ای سوخت

فرآیند شبیه‌سازی صورت گرفته جهت بهینه کردن سایر پارامترهای طراحی موتور از جمله پارامترهای مربوط به پاشش سوخت است.

۲- دقت پیش‌بینی آلاینده‌های تولیدی موتور شامل اکسیدهای نیتروژن و دوده در مقایسه با نتایج موجود برای طرح موتور پایه بسیار بالا است که می‌تواند دقت شبیه‌سازی را جهت انجام سایر قسمت‌های مربوط به بهینه‌سازی موتور تضمین کند.

۳- سطح فشار داخل سیلندر برای طرحی که در آن ۷۰ درصد سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود بیشتر است. علت این امر را می‌توان به این دلیل دانست که پس از شروع فرآیند احتراق به سبب باقی ماندن میزان بیشتری از سوخت (۳۰٪) جهت پاشش در مرحله دوم تزریق سوخت، امکان افزایش بیشینه فشار در این حالت بیشتر مهیا می‌گردد و از طرفی با توجه به افت فشار داخل سیلندر در برخی از حالت‌های پاشش، حالت بهینه زمانی است که قسمت بیشتر سوخت در مرحله اول تزریق شود تا توان موتور کاهش نیابد.

۴- سطح آزادسازی گرما برای طرحی که در آن ۷۰ درصد سوخت در مرحله اول پاشیده می‌شود بیشتر است. دلیل این امر می‌توان امکان تولید بیشتر گرما در مرحله اول تزریق برای طرحی که میزان بیشتری سوخت را در مرحله اول پاشش به وجود می‌آورد دانست.

۵- در تزریق دومرحله‌ای، سوخت تزریق‌شده در مرحله دوم وارد یک منطقه دما بالا و فقیر سوخت که از احتراق حاصل از مرحله اول پاشش برجای‌مانده است می‌شود. سوخت تزریق‌شده در این مرحله به‌سرعت توسط احتراق ایجادشده مصرف می‌شود و از تشکیل و انباشتگی منطقه تولید دوده جلوگیری می‌کند.

۶- نتایج نشان می‌دهد که هر چه مقدار سوخت در پاشش ثانویه بیشتر باشد مقدار آلاینده اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش بیشینه نرخ آزادسازی گرما و احتراق پیش‌آمیخته است.

۷- تزریق دومرحله‌ای بافاصله زمانی ۲۰ درجه میل‌لنگ می‌تواند باعث بهینه شدن فرآیند احتراق و کاهش میزان آلاینده‌های موتور گردد.

۵- نمادها

A ثابت پیش‌توان آرنوس

C ثابت تجربی

E انرژی فعال‌سازی هیدروکربن

K انرژی جنبشی اغتشاش

M جرم (kg)

P فشار (MPa)

r دوره کسری شیمیایی

R ثابت عمومی گاز

S نرخ مصرف سوخت

y دسترس‌پذیری

Y کسر جرمی

X کسر مولی اکسیژن

$\bar{p}$ نرخ چگالی

τ_R مدت زمان اختلاط توربولانس

زیرنویس‌ها

f تشکیل دوده

f_u سوخت

f_v تبخیر دوده

o اکسید دوده

ox اکسیژن

pr محصولات احتراق

R اختلاط توربولانس

s دوده

sf دوده تشکیل‌شده

so دوده اکسیدشده

۶- مراجع

- [1] Fotrosi, Yahya.2009, Modeling of a Spark Ignition Engine Combustion: A Computational and Experimental Study of Combustion Process Effect on NOx Emission, Asian Journal of Applied Sciences 2 (4):318-330
- [2] Fotrosi, Yahya.2011, Simulation of Combustion and Emission Characteristics in a HSDI Diesel Engine, Proceeding of Combustion Institute – Canadian Section, Spring Technical Meeting, University of Manitoba, Winnipeg, May 8-11.
- [3] Wickman, D.D. Tanin, K.V. Senecal, P.K. Reitz, R.D. Gebert, K. Barkhi RL, Beck NJ.2000, "Methods and Results from the Development of a 2600 bar BiFuel Injection System", SAE Technical Paper.
- [4] Agosta, V.D. Hammer, S.S.1975, "Vaporization Response of Evaporating Droplets with Finite thermal Conductivity, NASA CR-2510.
- [5] Muss, J. Nguyen, T.V.1991, "User Manual of Rocket Combustor Interactive Design (ROCCID) and Analysis Computer Program", NASA CR-187110.
- [6] Priem, R.J. and Breisacher, K.J.1995, "Calculations of Combustion Response Profiles and Oscillations, Progress in AIAA, V. 169.
- [7] Fallah.M,Mohammadpourfard.M,"Experimental investigation of effects of engine cooling temperature, EGR and injection timing to reduce NOx emissions in the diesel engines", Journal of Modarres Mechanical Engineering, January 20, 2012.
- [8] Bashi.M,Abdi Aghdam.E,"Experimental study on the effect of cycles in unburned hydrocarbon emissions in a spark ignition engine", Eighth Conference Combustion Engines,2014.
- [9] Jafari.B, Pourfallah.M,Mirsalim.M,Gangi,D, "The Effect of Different Injection Configuration on Combustion and Emissions Formation in a Heavy Duty Diesel Engine",Journal Scientific Research Engine,No 16,2010.
- [10] Ommi.F,pourghasemi.k,Esfahanian.V,Mirmohammadi .A,"Investigation on Effect of Multiple Injection on Performance and Emission Reduction in a DI Diesel Engine,Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering).AJSR - ME,Tehran,Iran,2011(In Persian).
- [11] Khabbaz.S.A, khoshbakhti saray.R, Theoretical Investigation of the Effect of Injection Pressure, Duration and Time Injection on Combustion, Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine, The Journal of Engine Research,Vol. 19, Summer 2010.

- [12] Zehni.A, Pirouzpanah.V, Jafarmedar.S, The Effect of combustion and Emission Reduction in DI and Doual fuel Diesel Engine, The Journal of Engine Research,2008.
- [13] Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H. "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. Sixteenth International Symposium on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute.
- [14] Zeldovich, Y. B. Sadovnikov, P. Y. and Frank-Kamenetskii, D. A. Oxidation of Nitrogen in Combustion. Translation by M. Shelef, Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.
- [15] Hiroyasu, H. and Nishida, K. "Simplified Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a DI Diesel Engine. SAE 890269, 1989.
- [16] Poorghasemi.k,Ommi.F, Esfahanian.V,Tanabi,H, "Investigation of the Soot and NO Emission Reduction Mechanism in DI Diesel Engines by Means of Split Injection Strategy",Journal - Combustion Research, Issue Three,2011.