

تحلیل و بررسی تأثیر استفاده از سوخت دی متیل اتر بر عملکرد یک موتور احتراق داخلی اشتعال تراکمی

محمد مهدی گنجی مهباری^{۱*}، مهدی حمزه ای^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

دریافت: تابستان ۹۹ پذیرش: تابستان ۹۹

چکیده

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در جهت کاهش آلاینده‌گی در موتورهای اشتعال تراکمی صورت گرفته است. دی متیل اتر به علت ویژگی‌های خاصی از قبیل عدد ستان بالا و آلاینده‌گی ناچیز یکی از روش‌های رسیدن به این هدف می‌باشد. همچنین یکی از پارامترهایی که نقش مهمی در بهبود احتراق و عملکرد موتور دارد فشار پاشش سوخت است. در پژوهش حاضر یک مطالعه عددی به منظور بررسی مشخصه‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور اشتعال تراکمی با استفاده از سوخت جایگزین دی متیل اتر، با تغییر فشار پاشش سوخت انجام شده است. در این تحقیق مشخصه‌های احتراقی موتور دیزلی چهار سیلندر تزریق مستقیم، با مشخصه‌های فیزیکی معین با نرم‌افزار ANSYS Fluent شبیه‌سازی می‌شود. استفاده از سوخت دی متیل اتر با افزایش فشار پاشش سوخت تا ۸۰۰ بار میزان افزایش مقدار بیشینه فشار و میزان کاهش مقدار بیشینه گرمای واکنش، دما، اکسید نیتروژن و دوده سوخت دی متیل اتر نسبت به سوخت دیزل در حدود ۱۴ و ۷۰۹، ۱۱۰۷، ۷۹ و ۷۸۰۷ درصد است.

Abstract

In recent years, many efforts have been made to reduce pollution in compression ignition engines. Dimethyl ether is one of the methods to achieve this goal due to its special properties such as high Cetane number and low pollution. Also, one of the parameters that plays an important role in improving combustion and engine performance is fuel injection pressure. In the present study, a numerical study was performed to investigate the performance and pollution characteristics of a compression ignition engine using alternating fuel diesel fuel by changing the fuel injection pressure. In this study, the combustion characteristics of a four-cylinder direct injection diesel engine are simulated with specific physical characteristics with ANSYS Fluent software. Using Dimethyl ether fuel by increasing the fuel injection pressure up to 800 bar, increase in the maximum pressure and decrease in the maximum amount of reaction heat, temperature, nitrogen oxide and soot in Dimethyl ether fuel compared to diesel fuel is about 14 and 7.9, 11.7, 79 and 78.7 percent.

*عهده‌دار مکاتبات: (g_abadan@yahoo.com)

کلمات کلیدی: دی متیل اتر، فشار پاشش سوخت، موتور اشتعال تراکمی، آلاینده، عملکرد موتور

Key words: Dimethyl ether, fuel injection pressure, compression ignition engine, pollution, engine performance

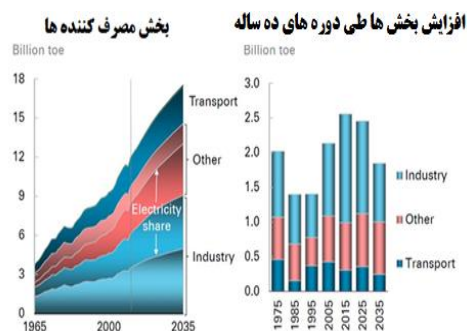
۱- مقدمه

محدود بودن سوخت‌های فسیلی، گران بودن و ضررهای ناشی استفاده از آن، باعث شده که انسان به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و سوخت‌های جایگزین روی بیاورد. در حال حاضر میزان تقریبی حجم ذخایر نفتی جهان به اندازه‌ای است که چنانچه روند تکیه بر سوخت‌های فسیلی ادامه یابد در آینده نزدیک، جهان با مشکلات زیادی در موارد زیست‌محیطی و کمبود مواد اولیه مواجه خواهد شد [۱].

طرح مصرف انرژی اولیه توسط بخش‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. در این نمودار، بخش صنعت مصرف‌کننده غالب انرژی اولیه، برای بیش از نیمی از رشد پیش‌بینی شده در مصرف انرژی

بین سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۳۵ باقی می‌ماند. جزء اصلی بعدی مصرف‌کننده انرژی توسط بخش‌های دیگر، از جمله مسکونی، خدمات و کشاورزی است. بخش سوم پیش‌بینی برای کمک به رشد در مصرف انرژی، بخش حمل‌ونقل است؛ بنابراین، مطالعات متعددی در زمینه بررسی منابع مختلف انرژی جایگزین برای موتورهای حمل‌ونقل، مانند سوخت‌های جایگزین برای موتورهای احتراق تراکمی انجام شده است [۲].

با گسترش نگرانی‌های مربوط به آلودگی محیط‌زیست و همچنین کاهش منابع نفتی، دنیا به دنبال یک سوخت غیرنفتی است که با تکنولوژی‌های پیشرفته انرژی (مثل پیل‌های سوختی) سازگار بوده و استفاده بیشتر از انرژی را پاسخگو باشد.



شکل ۱: طرح مصرف انرژی اولیه توسط بخش های مختلف [۲]

است که با تکنولوژی های پیشرفته انرژی (مثل پیل های سوختی) سازگار بوده و استفاده بیشتر از انرژی را پاسخگو باشد. یک سوخت مناسب سوختی خواهد بود که تولید آلاینده ننماید، قابلیت تولید از مواد اولیه غیرنفتی را داشته باشد، بتوان این سوخت جدید را با ساختار ماشین های موجود تطبیق داد، قابل دسترس و ایمن باشد و نیز تولید آن از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. در بین چندین سوخت شناخته شده (متان، متانول، اتانول، دی متیل اتر و...) به نظر می رسد که دی متیل اتر (متانول، اتانول، دی متیل اتر و...) به نظر می رسد که دی متیل اتر از پتانسیل بیشتری برخوردار است [۳].

علاوه بر این که می توان از دی متیل تر به عنوان یک سوخت جایگزین مناسب برای وسایل نقلیه (به علت بالا بودن عدد ستان و عدم ایجاد آلودگی های زیست محیطی) استفاده کرد، DME^۱ قابلیت استفاده به عنوان سوخت خانگی بجای LPG^۲ را نیز دارد. در فرآیند احتراق موتورهای احتراق داخلی، آلاینده هایی تولید می گردد که محیط را آلوده نموده و در گرم شدن زمین، باران اسیدی، مه دود، بوی بد، مشکلات تنفسی و سایر مشکلات مربوط به سلامتی نقش دارد. دلایل اصلی ایجاد این آلاینده ها احتراق غیراکوستیک، تجزیه نیتروژن و غیر ناخالصی های موجود در سوخت و هوا می باشد. آلاینده های نگران کننده، اکسید نیتروژن NO_x، هیدروکربن ها HC، مونواکسید کربن CO، گوگرد و ذرات معلق کربن جامد است [۱].

امروزه در اکثر کشورهای جهان قوانین بسیار سختی برای آلاینده های خروجی از موتورهای احتراق داخلی اعمال می گردد. به منظور کاهش این آلاینده ها و افزایش کارایی و راندمان این موتورها، تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می گیرد [۴]. اکسید نیتروژن عمدتاً از ترکیب اتم های تجزیه شده مولکول های اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا حاصل می شود که به آن اصطلاحاً اکسید نیتروژن حرارتی می گویند. در موتورهای احتراق داخلی مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ برای تشکیل NO حرارتی در مکانیزم فوق نتیجه می شود؛ که مقدار غلظت NO منتشره، با دمای ماکزیمم بار سیلندر ارتباط مستقیم دارد.

^۱ Dimethyl ether

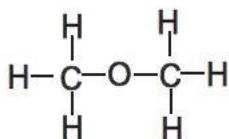
^۲ Liquefied petroleum gas

فاکتورهایی که منجر به کاهش دمای ماکزیمم فرایند احتراق می گردد باعث کم شدن NO تشکیل شده نیز می شود. همچنین وابستگی تولید NO_x به فشار پاشش در این موتورها بسیار قابل توجه است [۱].

در این مطالعه بر روی موتور دیزلی چهارزمانه پاشش مستقیم کاترپیلار ۳۴۰۱ انجام شده است. این کار با مدل سازی روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) این موتور و تطبیق منحنی فشار سوخت دیزل به دست آمده از نرم افزار انسیس فلونت، با نمودار تجربی موجود اعتبارسنجی می شود. سپس تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت، بر سوخت جایگزین دی متیل اتر بررسی شده و منحنی های حاصل شده شامل فشار، گرمای واکنش، دما و آلاینده گی نشان داده خواهند شد و با حالت سوخت پایه دیزل مورد مقایسه قرار می گیرد.

۲- خواص فیزیکی و شیمیایی دی متیل اتر

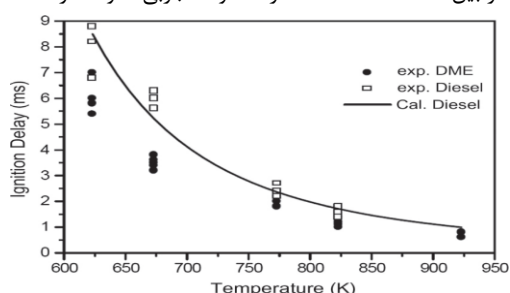
دی متیل اتر یک سوخت تمیز است که بار بسیار کمی به محیط وارد می نماید و هیچ گونه دوده ای در طول احتراق تولید نمی نماید، به راحتی مایع می شود و دارای قابلیت حمل و نقل آسان است. نام های دیگر این ماده عبارتند از: متان اکسی بیس، متیل اتر، متوکسی متان، اتر چوب، دی متیل اکسید و دیمل. دی متیل اتر (DME) یا متوکسی متان با فرمول شیمیایی CH₃-O-CH₃ ساده ترین اتر آلیفاتیک است (شکل ۲). خواص شیمیایی آن بسیار شبیه به گازهای نفتی مایع شده (LPG) که ترکیبی از پروپان و بوتان است) می باشد. دی متیل اتر با یک شعله مرئی آبی رنگ می سوزد و نیازمند زدایش بو نیست زیرا یک اتر شیرین مثل عطرها است [۳].



شکل ۲: ساختار شیمیایی مولکول دی متیل اتر [۳]

در حال حاضر عمدتاً از سوخت های هیدروکربنی حاصل از نفت خام به عنوان سوخت دیزل استفاده می شود. به جز سوخت های مرسوم هیدروکربنی، استفاده از دیگر سوخت هایی که امکان تهیه آن ها از گاز طبیعی یا زغال سنگ فراهم باشد توجه محققین را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال موضوع استفاده از متانول به عنوان یک سوخت جایگزین در موتورهای احتراقی مطرح می باشد. متانول معمولاً از مواد اولیه ای مثل مونواکسید کربن و هیدروژن قابل به دست آوردن است که دو ماده اخیر را نیز می توان از گاز طبیعی و زغال سنگ به دست آورد. همین طور این دو ماده را می توان از تقریباً تمامی مواد حاوی کربن نظیر محصولات کشاورزی و جنگلی نیز تأمین کرد ولی متانول دارای ارزش حرارتی پایینی بوده و در نتیجه کار آیی یک موتور احتراق داخلی با این سوخت به میزان زیادی را نیز می توان از گاز طبیعی و زغال سنگ به دست آورد. همین طور این دو ماده را می توان از تقریباً تمامی مواد حاوی کربن نظیر محصولات کشاورزی و جنگلی نیز تأمین کرد ولی متانول دارای ارزش حرارتی پایینی بوده و در نتیجه کار آیی یک موتور

تأخیر در اشتعال وابسته قوی به دما است. علاوه بر این، در دمای بالا حدود ۹۷۳ کلوین، اثرات دما و فشار اولیه دیگر قابل توجه نیست. هنگام استفاده از دی متیل اتر به عنوان سوخت، افزایش فشار باعث کوتاه تر شدن زمان تأخیر در اشتعال می گردد، در حالی که کاهش دما باعث افزایش زمان تأخیر در اشتعال می شود. نتایج تجربی و محاسباتی برای تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر و دیزل، بر اساس نتایج حاصل از یائو و همکاران [۷]، در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که در این آمار و ارقام نشان داده شده، نتایج تجربی برای موتورهای دیزل و دی متیل اتر بین ۱.۳ ms - ۲.۳ ms در محدوده تجربی تفاوت دارند.



شکل ۴: نتایج تجربی و محاسباتی برای تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر و دیزل [۷]

۴- معادلات حاکم

نقطه شروع محاسبات در جریان های بدون احتراق حل معادلات ناویراستوکس است. برای جریان های همراه با انتقال حرارت معادله انرژی اضافه می شود. تکمیل کننده این دسته از معادلات بقاء، معادله حالت و مشخصات خواص سیال می باشند. جریان های احتراقی شامل آزاد شدن انرژی حرارتی در اثر تبدیل گونه های شیمیایی به یکدیگر می باشند. این خصوصیات جریان های احتراقی، نیاز به مدل سازی فرایند احتراق و اضافه نمودن آن به معادلات ناویراستوکس دارند.

شکل کلی معادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی را به ترتیب برای یک حجم کنترل می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_j) \quad (2)$$

$$\rho \frac{DV_i}{Dt} = \rho \frac{\partial V_i}{\partial t} + \rho V_i \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (3)$$

$$\rho \frac{DH}{Dt} = \rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho V_i \frac{\partial H}{\partial x_j} = q_j + \frac{\partial p}{\partial t} + \dot{\epsilon}_{ij} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

که در این معادلات ρ چگالی سیال، V سرعت سیال، g شتاب گرانشی، μ لزجت سیال، P فشار سیال، H آنتالپی سکون سیال، λ ضریب هدایت حرارتی، q چشمه حرارتی و τ تنش برشی سیال می باشد. پدیده اشتعال در موتورهای اشتعال تراکمی از مدل اشتعال خود به خودی (Auto Ignition) پیروی می کند. پدیده اشتعال خود به خودی هیدروکربن ها در موتور دیزل یک فرایند زنجیره ای است که شامل چهار دسته واکنش زنجیری به نام های واکنش زنجیری آغازین، زنجیری انتشار، زنجیری شاخه دار شدن و زنجیری پایانی می باشد [۱]. در مطالعه حاضر برای مدل سازی آشفتنگی از مدل $k-\epsilon$ و برای مدل سازی احتراق از مدل اتلاف ادی ها (Eddy Dissipation) استفاده می گردد.

احتراق داخلی با این سوخت به میزان زیادی پایین خواهد آمد. دی متیل اتر، در مقایسه با متانول دارای ارزش حرارتی بالاتری بوده، ضمن آنکه سمی نیز نمی باشد. به علاوه دی متیل اتر دارای خواص احتراقی پاک بوده و گازهای حاصل از احتراق آن عاری از ذرات جامد است. از سال ۱۹۹۰ تاکنون استفاده از دی متیل اتر با عدد ستان (۵۵-۶۰) به عنوان جایگزینی برای سوخت های دیزل مورد بررسی قرار گرفته است. دی متیل اتر دارای عدد ستان بیشتر از سوخت های دیزل است و به همین دلیل برای استفاده در موتورهای دیزل ایده آل است [۵].

۳- تأخیر در اشتعال

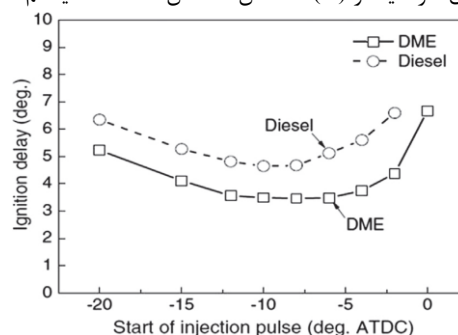
میزان تبخیر سوخت دی متیل اتر بالاتر از سوخت دیزل است. نقطه جوش دی متیل اتر 24.9°C است که بسیار پایین تر از دیزل (265°C) است؛ بنابراین، اگر غلظت دی متیل اتر در محیط از حد پایین اشتعال آن (مقدار ۳.۴ درصد حجمی دی متیل اتر) بیشتر گردد بلافاصله به بخار تبدیل می گردد و تشکیل یک مخلوط قابل انفجار با هوا می دهد. گرمای نهان دی متیل اتر در حدود ۱۵۴٪ از سوخت دیزل است. هنگامی که سوخت دی متیل اتر به یک محفظه احتراق تزریق می شود، به سرعت تبخیر شده که به دلیل دمای جوش پایین آن است. دمای جوش پایین اختلاط سریع بخار سوخت را افزایش و تأخیر در اشتعال را کاهش می دهد. تأخیر در اشتعال سوخت نقش مهمی در ویژگی های احتراق و تعیین گازهای خروجی اگزوز دارد. شکل (۳) اثر زمان پاشش در تأخیر در اشتعال برای سوخت دی متیل اتر و دیزل را نشان می دهد. در این شکل، تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر کوتاه تر از سوخت دیزل است [۶].

بر اساس داده های تجربی گزارش شده توسط یائو^۱ و همکاران [۷]، تأخیر در اشتعال دی متیل اتر می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\tau_{id} = 0.022 P^{-0.316} e^{\left(\frac{4206}{T}\right)} \quad (1)$$

که در آن τ_{id} تأخیر در اشتعال (ms)، P فشار سیلندر (bar)

و T دمای گاز سیلندر (K) است. آن ها نشان دادند که سیستم



شکل ۳: اثر زمان پاشش در تأخیر در اشتعال برای سوخت دی متیل اتر و دیزل [۶]

^۱ Yao

۴-۱- مدل احتراقی

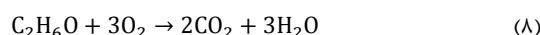
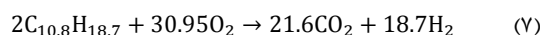
برای مدل کردن احتراق لازم است که نرخ انجام واکنش‌های شیمیایی مشخص شود. با توجه به برهم‌کنش آشفته‌گی و واکنش شیمیایی، تأثیر آشفته‌گی بر احتراق نیز باید در نظر گرفته شود. در این مطالعه از روش اتلاف ادی برای مدل‌سازی احتراق پیش آمیخته استفاده شده است.

در جریان‌های آشفته همراه با واکنش‌های شیمیایی نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation محاسبه و در ترم چشمه معادله انتقال گونه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation بر پایه مدل مگنسن-هرتاگر استفاده شده است. اثر توربولنسی بر روی نرخ انجام واکنش بر مبنای مدل مگنسن-هرتاگر طبق رابطه‌ی (۵) و (۶) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{i1,k} = v_{i1,k}^1 M_{i1} A_p \frac{\varepsilon}{k v_{R,k}^1 M_R} \quad (5)$$

$$R_{i1,k} = v_{i1,k}^1 M_{i1} A_B \rho \frac{\varepsilon}{k \sum_{j=1}^N v_{j1,k}^1 M_{j1}} \quad (6)$$

که در آن $v_{i1,k}^1$ ضریب استکیومتری که در k می‌باشد [۸]. در این پژوهش فرمول شیمیایی سوخت دیزل معادل $C_{10.8}H_{18.7}$ و سوخت دی متیل اتر معادل C_2H_6O فرض شده و برای احتراق آن‌ها از مدل یک مرحله ایمگنسن-هرتاگر استفاده شده است. در این شبیه‌سازی ابتدا سوخت مایع به حالت گازی تبدیل شده و سپس احتراق صورت می‌گیرد. تبخیر ذرات سوخت، پس از رسیدن ذرات به دمای جوش، آغاز شده و تا پایان یافتن در نظر گرفته شده است:



۴-۲- تأخیر در اشتعال

برای مدل‌سازی تأخیر در اشتعال این بررسی از مدل Auto ignition Model استفاده شده است. جهت محاسبه تأخیر در اشتعال طبق روشی که توسط هاردنبرگ و هیز ارائه گردیده است به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{id} = \left(\frac{0.36 + 0.22 \bar{S}_p}{6N} \right) \exp \left[E_a \left(\frac{1}{RT} - \frac{1}{17.190} \right) + \left(\frac{21.2}{p - 12.4} \right)^{0.63} \right] \quad (9)$$

که در آن τ_{id} برحسب متر ثانیه، N دور موتور برحسب دور بر دقیقه و E_a انرژی فعال‌سازی می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_a = \frac{618840}{CN + 25} \quad (10)$$

که در آن CN عدد ستان سوخت است [۹].

۴-۳- جدایش سوخت

مشکل اصلی در شبیه‌سازی افشانه سوخت در احتراق دیزل، تعیین و تطبیق سازوکار حاکم بر فرآیندهای جدایش می‌باشد. در این شبیه‌سازی از الگوی جدایش WAVE استفاده شده است. این الگو را برای اولین بار ریتز پیشنهاد کرده است. در این الگو قطر ذرات تزریق شده برابر با قطر خروجی سوراخ افشانه در نظر گرفته می‌شود. بررسی جدایش

سوخت تزریق شده و ذرات حاصل از جدایش با توجه به تحلیل پایداری فواره مایع انجام می‌شود. در این الگو برخلاف الگوهای دیگر نیازی به تعیین توزیع اولیه اندازه ذرات در خروجی افشانه نمی‌باشد.

تحلیل افشانه که به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود با استفاده از نظریه خطی مرتبه اول و با فرض جابه‌جایی‌های اولیه بسیار کوچک به صورت تقارن محوری بر روی سطح فواره سوخت انجام می‌شود. در معادله پراکندگی الگوی WAVE نرخ بیشینه رشد امواج ناپایدار (Ω) و طول موج (Λ) متعلق به آن، به خواص فیزیکی مایع و گاز (سوخت و هوا) برمی‌گردند که این وابستگی با استفاده از نظریه امواج سطحی کلون - هلمهوتز (K-H) به صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شود [۱۰].

$$\frac{\Lambda}{r} = 9.02 \frac{(1+0.45oh^{0.5})(1+0.4Ta^{0.7})}{(1+0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (11)$$

$$\Omega \left[\frac{\rho_1 r^3}{\sigma} \right]^{0.5} = \frac{(0.34+0.38We_2^{1.5})}{(1+oh)(1+1.4Ta^{0.6})} \quad (12)$$

درحالی‌که

$$oh = We_1^{0.5} / Re_1 \quad (13)$$

$$Te = oh \times We_2^{0.5} \quad (14)$$

$$We_1 = \rho_1 U^2 a / \sigma \quad (15)$$

$$We_2 = \rho_2 U^2 a / \sigma \quad (16)$$

$$Re_1 = U \times a / \nu_1 \quad (17)$$

می‌باشند. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، قطرات کوچک جدید با اندازه r که از طول موج امواج ناپایدار محاسبه می‌شوند قطره اصلی اولیه را ترک می‌کنند:

$$r = B_0 \Lambda \quad (18)$$

زمان متلاشی شدن جت سوختی نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \frac{3.762 B_1 a}{\Lambda \Omega} \quad (19)$$

نرخ تغییر اندازه مشخصه قطرات ناپایدار اولیه از معادله (۲۰)

محاسبه می‌شود:

$$\frac{da}{dt} = -(a - r) / \tau \quad (20)$$

در روابط فوق مقادیر ثابت‌های B_0 و B_1 برابر مقادیر زیر انتخاب شده

است:

B_0 : به منظور ارائه یک توافق مناسب با اندازه قطره پایدار در

افشانه‌ها ۰/۶۱ انتخاب می‌شود.

B_1 : ثابت زمانی الگو می‌باشد که به ویژگی‌های افشانه و میزان

آشفته‌گی اولیه ایجاد شده داخل دماغه افشانه وابسته است.

قطره پس از برخورد تابع عدد وبر بعد از برخورد می باشد که خود تابعی از عدد وبر قطره قبل از برخورد می باشد. رابطه ریاضی عدد وبر قبل و بعد از برخورد قطره به دیواره به صورت زیر می باشد.

$$We_{out} = 0.687 We_{in} (e^{-0.44 We_{in}}) \quad (21)$$

(ب) عدد وبر بزرگتر از عدد بحرانی: در این حالت بزرگی سرعت پس از برخورد تغییر نمی کند اما زاویه انعکاس تغییر می کند. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، زاویه انعکاس β معمولاً بین صفر و 180° درجه می باشد. زاویه محیط Ψ نیز که بین $180^\circ -$ تا $180^\circ +$ درجه می باشد، توسط یک تابع توزیع احتمال تعیین می شود.

$$\Psi = -\frac{\pi}{k} \ln[1 - p(1 - e^{-k})] \quad (22)$$

در معادله بالا، عدد تصادفی p بین صفر و یک می باشد و پارامتر k رابطه زیر به دست می آید:

$$\sin \alpha = \left(\frac{e^{k+1}}{e^k - 1} \right) \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{k} \right)^2} \quad (23)$$

اندازه قطره پس از برخورد نیز در عددهای وبر مختلف بدین صورت می باشد [۱۲].

$$\begin{cases} we < 50 \Rightarrow d_1 = d_0 \\ 50 \leq we \leq 300 \Rightarrow d_1 = d_0 \cdot f(We_{in}) \\ We > 300 \Rightarrow d_1 = 0.2 d_0 \end{cases} \quad (24)$$

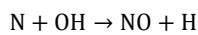
۴-۵- تشکیل اکسیدهای نیتروژن NO_x

اکسیدهای نیتروژن در موتورهای دیزل شامل اکسید نیتروژن NO و مقدار کمی دی اکسید نیتروژن NO_2 می باشند. دی اکسید نیتروژن از اکسید نیتروژن حاصل می شود. منابع اصلی شکل گیری آلاینده NO را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

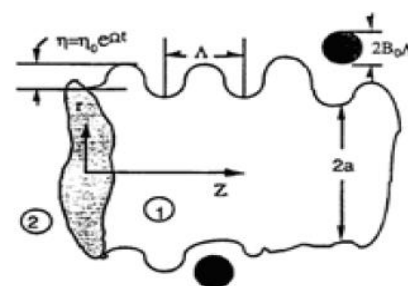
- NO گرمایی که به واسطه تجزیه مولکول های هوا و نیتروژن شکل می گیرد.
- NO سریع که بر اثر هجوم هیدروکربن ها به نیتروژن موجود در هوا شکل می گیرد.

• NO سوخت که بر اثر نیتروژن موجود در سوخت شکل می گیرد. از شکل گیری NO سوخت در موتورهای درو نسوز می توان صرف نظر نمود. نرخ شکل گیری NO سریع در مقایسه با NO گرمایی بسیار کوچک است. در موتور، فشار استوانه در خلال فرایند احتراق افزایش می یابد و به دنبال آن گازهای سوخته شده در دمای بسیار گرم متراکم می شوند و تمام این اتفاقات دقیقاً پس از احتراق رخ می دهد. به همین دلیل نرخ شکل گیری NO گرمایی در مقایسه با انواع دیگر چشمگیر است.

برای بررسی سینتیک تشکیل NO از الگوی زلدویچ استفاده می شود. آنچه به طور کلی پذیرفته شده این است که در احتراق مخلوط تقریباً درست (استوکیومتریک)، معادلات حاکم بر شکل گیری اکسید نیتروژن از مولکول های نیتروژن هوا بدین صورت خواهد بود [۱۰]:



با در نظر گرفتن حالت شبه پایدار برای غلظت نیتروژن رابطه زیر برای محاسبه تشکیل NO از طریق مکانیزم حرارتی ارائه می شود.

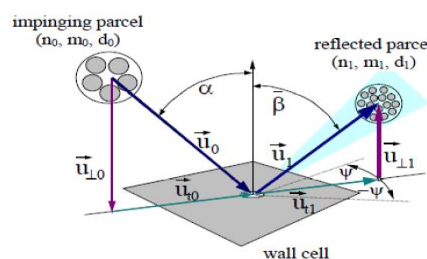


شکل ۵: نمایی از امواج سطحی و جدایش قطرات از سطح فوران سوخت

اورارک و آمسدم^۱ مقدار $B_1 = \sqrt{3}$ را پیشنهاد کردند. رتیز این نظریه را برای محدوده تجزیه قطره سریع (با سرعت بالا) نیز به کاربرد و مقدار $B_1 = 10$ را در معادلات شبیه سازی فواره استفاده کرده است. داده های رنجر و نیکولز^۲ برای تجزیه قطره سریع مقدار $B_1 = 8$ را پیشنهاد می کند؛ بنابراین مقدار مطمئنی برای این ثابت وجود ندارد. بخشی از علت این اختلاف بدان برمی گردد که تحلیل های گذشته قبلی شتاب قطرات را بعد از وارد شدن آن ها به داخل جریان گازی با سرعت نسبی تند در نظر نگرفته اند. این شتاب سرعت نسبی بین قطره و گاز را کاهش می دهد که منجر به طول موج های درازتر و زمان های شکست طولانی تر می شود [۱۱]. در مقاله حاضر این ثابت برابر ۱۰ می باشد.

۴-۴- مدل برخورد جت سوختی به دیواره

برخورد سوخت با دیواره سیلندر و یا پیستون از دیگر مسائلی است که باید به آن توجه داشت. بخشی از سوخت که به دیواره می رسد، تبخیر نمی شود، در نتیجه بر فرایند احتراق تأثیر منفی گذاشته و باعث ایجاد آلاینده می شود. رفتار سوخت در تصادم با دیواره به پارامترهایی از قبیل سرعت و قطر ذرات، زبری سطح دیواره و دمای آن بستگی دارد. برای پیشگویی برخورد قطرات سوخت به دیواره، مدل Wall Jet (شکل ۶) در نظر گرفته شده که بر طبق این مدل فرض می شود در شرایط کاری موتور، یک لایه بخار بین قطرات و دیواره تشکیل شده و بسته به عدد وبر قطره باعث برگشتن یا لغزیدن قطرات روی دیواره می شود. معیار انتقال بین این دو رژیم عدد وبر بحرانی ۸۰ می باشد.



شکل ۶: طرحواره برخورد دیواره به قطره

الف) عدد وبر کمتر از عدد بحرانی: در این حالت قطره در جهت مخالف برخورد و با همان زاویه برخورد ورودی پس زده می شود. سرعت

^۱ Orourke & Amsdem

^۲ Ranger & Nicholls

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2K_1[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_2[N_2]k_2[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2] + k_3[OH]}\right)} \quad (28)$$

که نرخ‌های واکنش

$$\begin{aligned} k_1 &= 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T} \\ k_{-1} &= 3.8 \times 10^7 e^{-425/T} \\ k_2 &= 1.8 \times 10^4 Te^{-4680/T} \\ k_{-2} &= 3.81 \times 10^3 Te^{-20820/T} \\ k_3 &= 7.81 \times 10^7 e^{-450/T} \end{aligned}$$

بر مبنای محاسبات هانسون و سلیمیان به دست آمده است. غلظت

[O] بر اساس محاسبات شبه تعادلی به دست می‌آید.

$$[O] = 36.64T^{0.5}[O_2]^{0.5} \exp(-27123/T) \quad (29)$$

مکانیزم سریع که توسط فنیمور شناسایی شد. بر این مبنای که رادیکال‌های هیدروکربن در ناحیه ابتدایی احتراق با مولکول‌های نیتروژن واکنش می‌دهد. این نوع مکانیزم از مکانیزم حرارتی پیچیده‌تر می‌باشد و در هنگامی که دمای محفظه احتراق پایین باشد و یا احتراق به صورت غنی و یا فقیر انجام شود، نقش عمده‌ای در تولید اکسید نیتروژن ایفا می‌کند. در مکانیزم سریع مولکول‌های نیتروژن هوا با رادیکال‌های CH که در جبهه شعله به صورت میان واکنش تشکیل می‌شوند واکنش می‌دهند و جزء سیانید نیتروژن را تشکیل می‌دهد (HCN) که در مرحله بعد با نیتروژن واکنش می‌دهد و اکسید نیتروژن را تشکیل می‌دهد [۱۳]. در مکانیزم سریع، نرخ تولید اکسید نیتروژن از رابطه (۳۰) قابل محاسبه است.

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{pr}[O_2]^a [N_2][fuel] \exp\left(\frac{-E'_a}{RT}\right) \quad (30)$$

در رابطه‌ی (۳۰) f به صورت تابعی از نسبت هم ارزی و k'_{pr} به صورت تابعی از دما و فشار است. همچنین E'_a برابر با 303474.125 (J/mol) و a عبارتی است که به شرایط شعله بستگی دارد [۱۴].

$$\begin{aligned} k'_{pr} &= 6.4 \times 10^6 (RT/p)^{a+1} \quad (31) \\ a &= \begin{cases} 1.0 & X_{O_2} \leq 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2}, & 4.1 \times 10^{-3} < X_{O_2} \leq 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.935 - 0.1 \ln X_{O_2}, & 1.11 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0.03 \\ 0 & X_{O_2} \geq 0.03 \end{cases} \quad (32) \end{aligned}$$

۴-۶- تشکیل دوده (Soot)

واژه دوده تعریف مشخص برای یک ماده خاص نیست اما در حالت کلی، دوده ماده جامدی است که شامل هشت قسمت کربن و یک قسمت هیدروژن می‌باشد. تحت شرایط دمای گرم و مخلوط غنی، همانند آنچه در موتور دیزل اتفاق می‌افتد، سوخت‌های هیدروکربنی تمایل قوی برای تشکیل ذرات دوده از خود نشان می‌دهند. معمولاً تحت شرایط کارکرد موتور، بیشترین مقدار دوده در مراحل اولیه احتراق شکل می‌گیرد و سپس به دلیل اکسایش مقدار آن رو به کاهش می‌رود. در شرایط ایده آل، احتراق سوخت هیدروکربنی سبب شکل‌گیری CO_2 و HO_2 خواهد شد. مقدار اکسیژن مورد نیاز برای احتراق کامل، اکسیژن استوکیومتری $O_{2,st}$ نامیده می‌شود. اگر مقدار اکسیژن از مقدار استوکیومتری آن کمتر باشد، شرایط مناسبی برای تشکیل دوده فراهم می‌شود [۱۰].

با توجه به پیچیدگی‌های سینتیک تشکیل دوده، با ساده‌سازی سینتیک تشکیل دوده به صورت مجزا از سینتیک احتراق در نظر

گرفته‌شده و مدل‌سازی آن از طریق حل معادله انتقال (۳۳) پس از حل معادلات جریان و احتراق صورت می‌پذیرد.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho Y_{soot}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_{soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Pr_{t,soot}} \nabla Y_{soot} \right) + R_{soot} \quad (33)$$

در رابطه‌ی فوق، Y_{soot} کسر جرمی دوده، $Pr_{t,soot}$ عدد پرانتل آشفته برای انتقال دوده و R_{soot} نرخ تولید دوده می‌باشد. نرخ خالص تولید دوده (R_{soot})، از تفاوت میان نرخ تشکیل آن ($R_{soot, form}$) و نرخ احتراق آن ($R_{soot, comb}$) طبق رابطه (۳۴) به دست می‌آید.

$$R_{soot} = R_{soot, form} - R_{soot, comb} \quad (34)$$

نرخ تشکیل دوده طبق رابطه‌ی تجربی (۳۵) به دست می‌آید.

$$R_{soot, form} = C_s P_{fuel} \phi^r \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (35)$$

در رابطه‌ی (۳۵)، C_s ثابت تشکیل دوده، P_{fuel} فشار جزئی سوخت، ϕ نسبت هم ارزی و (E/R) دمای فعال‌سازی است؛ همچنین r مقادیر ثابت توان نسبت هم ارزی است. نرخ احتراق دوده، از حداقل دو عبارت که در روابط (۳۶) و (۳۷) آورده شده است، به دست می‌آید.

$$R_1 = A \rho Y_{soot} \frac{E}{k} \quad (36)$$

$$R_2 = A \rho \left(\frac{Y_{ox}}{Y_{soot}} \right) \left(\frac{Y_{soot} V_{soot}}{Y_{soot} V_{soot} + Y_{fuel} V_{fuel}} \right) \frac{E}{k} \quad (37)$$

در روابط فوق، Y_{ox} و Y_{fuel} به ترتیب کسر جرمی اکسند و سوخت و A ، V_{soot} و V_{fuel} ثوابتی تجربی هستند [۱۵].

۷- موتور، ایجاد هندسه، شبکه‌بندی مدل و پارامترهای شبیه‌سازی

در موتورهای دیزل زمانی که پیستون در نقطه مرگ بالا قرار دارد، سوخت به صورت مستقیم پاشیده می‌شود. به علت بالا بودن دما و فشار در محفظه سیلندر (به علت تراکم) سوخت به صورت خودکار بعد از کمی تأخیر مشتعل می‌شود و احتراق به صورت کامل انجام می‌شود، لذا این نوع احتراق از نوع غیر هم‌آمیخته می‌باشد.

تحلیل عددی مورد نظر جهت انجام پروژه‌ی حاضر با استفاده از مدل‌های آماده‌ای که در دسترس می‌باشد، روی موتور دیزلی چهارزمانه پاشش مستقیم کترپیلار ۳۴۰۱ صورت می‌گیرد. مشخصات اصلی موتور یادشده در جدول (۱) نمایش داده شده است [۱۲].

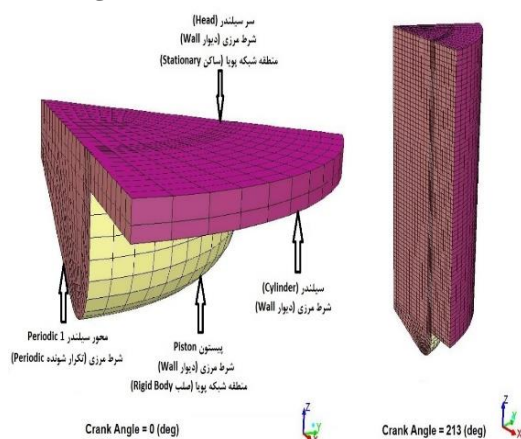
جدول ۱: مشخصات موتور دیزل کترپیلار ۳۴۰۱ [۱۲]

مدل موتور	کترپیلار ۳۴۰۱
نوع موتور	موتور دیزلی تزریق مستقیم
قطر پیستون	۱۳۷.۱۹ میلی‌متر
کورس پیستون	۱۶۵.۱ میلی‌متر
گنجایش	۲.۴۴۱ لیتر
نسبت تراکم	۱۵:۱
طول دسته شاتون	۲۶۱.۶۲ میلی‌متر
سرعت موتور	۱۶۰۰ دور در دقیقه
تعداد انژکتور	۶ سوراخ

از آنجایی که نازل انژکتور دارای ۶ سوراخ می‌باشد، جهت مدل‌سازی تنها یک قطاع ۶۰ درجه از محفظه احتراق موتور، جهت کاهش زمان محاسبات مدل می‌شود. شبکه‌بندی موتور مورد آزمایش، در شکل (۷)

برای محفظه‌ی احتراق در نقطه مرگ بالا نشان می‌دهد. همچنین تعداد و نوع مش‌ها طبق جدول (۲) می‌باشد. در بررسی جریان هوا در موتور، محفظه احتراق تغییر حجم می‌دهد. تجزیه و تحلیل این امر باید به دقت در الگوسازی جریان سیال در نظر گرفته شود تا شرایط احتراق واقعی در موتور هر چه بهتر شبیه‌سازی شود. محاسبات در یک سیکل بسته از زمان بسته شدن سوپاپ ورودی (IVC^۱) در ۲۱۳ درجه میل‌لنگ تا زمان باز شدن سوپاپ خروجی (EVO^۲) در ۴۸۰ درجه میل‌لنگ انجام می‌گیرد. لذا از مدل شبکه پویا^۳ در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. در این مدل روش لایه‌بندی^۴ انتخاب و طبق داده‌های جدول (۱) تنظیمات مربوط به مدل In-Cylinder انجام می‌گردد. پس از تعیین نوع مناطق شبکه پویا^۵ و اجرای شبکه پویا مدل در حالت ۲۱۳ درجه نقطه مرگ بالا قرار می‌گیرد.

در مدل Discrete Phase شبیه‌سازی افشانه سوخت در احتراق، تعیین و تطبیق سازوکار حاکم بر فرآیندهای جدایش می‌باشد. در این شبیه‌سازی از الگوی جدایش WAVE استفاده شده است. محل تزریق سوخت از خروجی اوریفیس به داخل محفظه‌ی احتراق، نقطه (0.5004, 0.2499, 177.292) می‌باشد که کاملاً داخل محفظه‌ی احتراق قرار می‌گیرد. نازل فقط یک سوراخ دارد و زاویه‌ی پاشش سوخت ۱۰ درجه نسبت به افق (محور X) بوده و پاشش در زاویه‌ی ۳۵۲ درجه‌ی میل‌لنگ (۸ درجه قبل از TDC) صورت می‌گیرد.

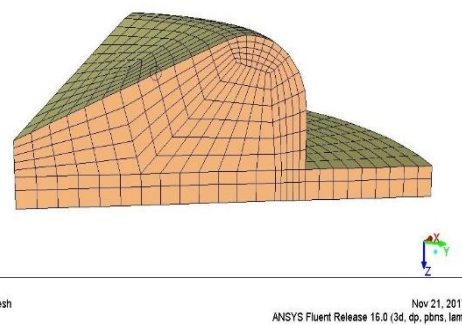


شکل ۸: نوع شرایط مرزی سطوح بر روی شبکه و نوع مناطق شبکه پویا برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا و نمایش مدل در ۲۱۳ درجه نقطه مرگ بالا

۸- اعتبارسنجی نتایج

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی باید این نتایج، با نتایج حاصل از آزمون موتور مقایسه شود. مقایسه با توجه به داده‌های تجربی [۱۶] در حالت تزریق مستقیم سوخت دیزل در حالت پایه در بار کامل (۱۶۰۰ rpm) با تشابه‌سازی صورت گرفته با نرم‌افزار مقایسه شده که البته به عبارتی اعتبارسنجی شده است. حداکثر فشار داخل سیلندر حاصل از شبیه‌سازی ۹۶۲۸۸۰۹ پاسکال است که در موقعیت ۰.۹ درجه بعد از نقطه

مرگ بالا رخ می‌دهد و در مقایسه با حداکثر فشار داخل سیلندر تجربی ۹۵۲۳۳۷۴ پاسکال و در موقعیت ۹.۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا توافق خوبی را نشان می‌دهد. شکل (۹) نشان می‌دهد که تطبیق قابل قبولی بین نمودار تجربی موتور مورد بررسی و تحلیل سیالاتی آن به دست آمده است. در این شکل در حدود ۱.۲٪ خطا بین بیشینه فشار عددی و تجربی نشان می‌دهد.



شکل ۷: شبکه‌بندی موتور مورد آزمایش برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا

جدول ۲: تعداد و نوع مش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

۳	تعداد گره‌ها
۰۰۵	
۷	تعداد رویه‌های
۷۶۳	سطحی
۲	تعداد کل
۴۰۰	سلول‌ها

نوع شرایط مرزی^۶ سطوح بر روی شبکه و نوع مناطق شبکه پویا، در شکل (۸) برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا و نمایش مدل در ۲۱۳ درجه نقطه مرگ بالا نشان داده شده است. در پروژه‌ی حاضر از مدل‌های Species و Discrete Phase استفاده شده است که توانایی شبیه‌سازی جریان‌های چند فاز احتراق، محاسبات ترکیب گازها، آلاینده‌ها و شبیه‌سازی اسپری سوخت را دارند. در مدل Species شبیه‌سازی احتراق در موتور دیزل در قسمت

^۱ Intake Valve Close

^۲ Exhaust Valve Open

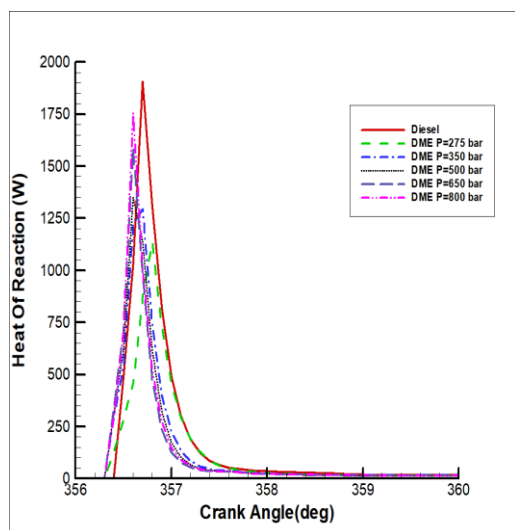
^۳ Dynamic Mesh

^۴ Layering

^۵ Dynamic Mesh Zones

^۶ Boundary Conditions

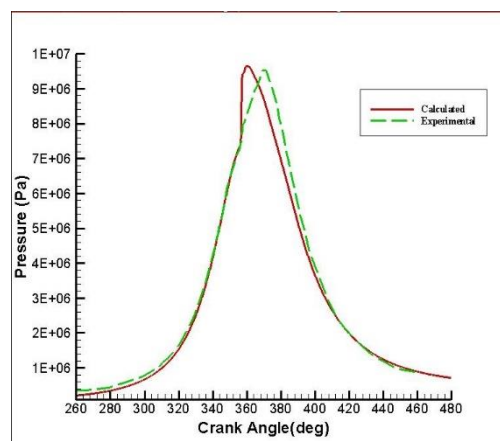
شکل (۱۱) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی گرمای واکنش^۱ برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنیم، نرخ آزادسازی حرارت در سوخت دی متیل اتر کمتر از دیزل می‌باشد. علت این امر این است که در سوخت دی متیل اتر به علت حضور یک اتم اکسیژن و عدم وجود پیوند C-C، انرژی کمتری صرف شکستن پیوند بین اتم‌های آن می‌شود که سبب می‌گردد ارزش حرارتی و حرارت آزادشده‌ی آن نسبت به دیزل پایین‌تر باشد. با افزایش فشار پاشش میزان مهلت اشتعال کاهش می‌یابد که این بدان علت است که با افزایش فشار پاشش، سرعت شکست قطرات بیشتر می‌شود و در آن، میزان تبخیر سوخت بیشتر و در نتیجه مخلوط سوخت و هوا سریع‌تر تشکیل می‌شود. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود به علت ثابت ماندن میزان مصرف سوخت و افزایش سرعت پاشش، در یک‌زمان مشخص، سوخت پاشیده شده بیشتری با افزایش فشار پاشش سوخت، محترق می‌شود که این موضوع باعث کوتاه‌تر شدن طول احتراق نفوذی و همچنین افزایش بیشینه احتراق پیش آمیخته می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی گرمای واکنش برحسب زاویه لنگ

۱۰- آلاینده NO_x

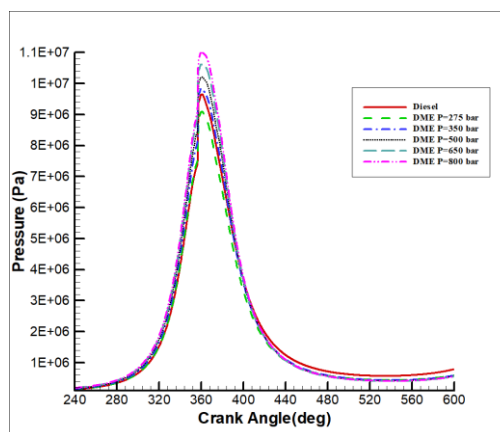
شکل (۱۲) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر چگونگی شکل‌گیری NO_x در موتور مورد بررسی را نشان می‌دهد. مولکول‌های نیتروژن در اثر دمای بالا (بالا‌تر از ۱۶۲۲ درجه کلوین) تجزیه و با اکسیژن هوا یا سوخت ترکیب شده و اکسیدهای ازت را تشکیل می‌دهد. اکسید نیتروژن عمدتاً از ترکیب اتم‌های تجزیه‌شده مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا حاصل می‌شود که به آن



شکل ۹: اعتبارسنجی نتایج عددی با استفاده از نمودار تجربی فشار موجود در منبع [۱۶]

۹- بررسی منحنی‌های فشار و گرمای واکنش

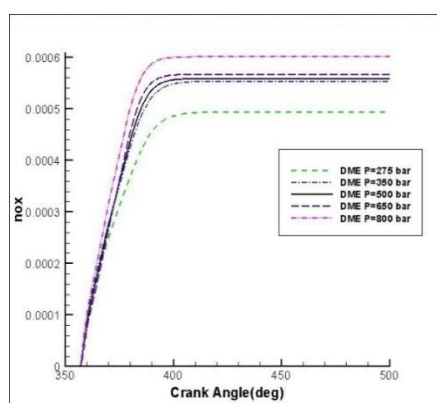
شکل (۱۰) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی فشار متوسط داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. زمان تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر به دلیل داشتن عدد ستان بالا کوتاه‌تر از سوخت دیزل است. این امر باعث می‌شود زمان تأخیر در محفظه احتراق کمتر شده و لذا میزان انباشته شدن سوخت نیز کمتر می‌شود که این مسئله باعث شده تا فشار ماکزیمم سیکل کمتر و در نتیجه میدان‌های حرارتی بالا ناشی از افزایش ناگهانی فشار که اثرات منفی بر پیستون و سیلندر شده از دیزل کمتر است. با افزایش فشار پاشش، بیشینه مقدار فشار



شکل ۱۰: مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی فشار داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ

داخل استوانه افزایش می‌یابد. زیرا افزایش فشار پاشش باعث تشکیل سریع مخلوط سوخت و هوا در مرحله زمان تأخیر در اشتعال می‌شود و به تبع آن، مخلوط سوخت و هوای بیشتری برای مرحله احتراق پیش آمیخته فراهم می‌شود که این امر موجب افزایش ناگهانی فشار داخل محفظه احتراق می‌گردد.

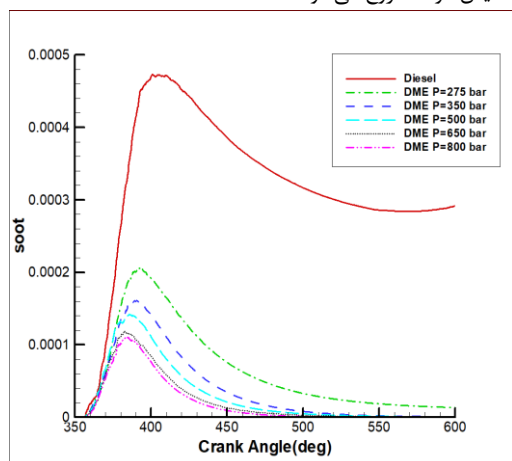
^۱ Heat of Reaction



شکل ۱۳: چگونگی شکل گیری NO_x در موتور با تغییر فشار پاشش سوخت دی متیل اتر

۱۱- آلاینده ی Soot

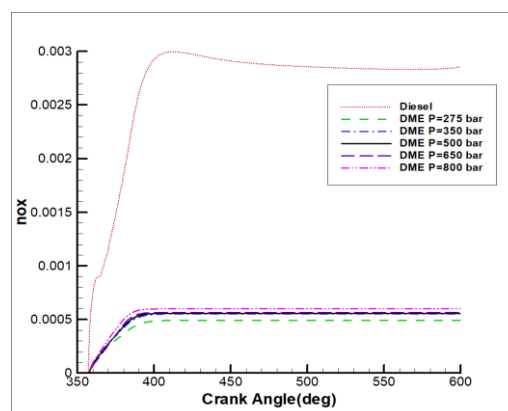
شکل (۱۴) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر چگونگی شکل گیری Soot در موتور مورد بررسی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود ابتدا آلاینده دوده به شدت افزایش و سپس کاهش می یابد که علت افزایش اول را می توان ناشی از احتراق پیش آمیخته دانست که تأثیری بر خروجی دوده نهایی ندارد زیرا هنگامی که احتراق پیش آمیخته رخ می دهد اکسیژن در دسترس در اطراف شعله به شدت کاهش می یابد که منجر به این افزایش اولیه می شود ولی با گذشت زمان و پیش رفتن شعله در داخل محفظه در حدود ۳۰ الی ۴۰ درجه میل لنگ بعد از نقطه مکت بالا اکسایش دوده شروع می شود.



شکل ۱۴: چگونگی شکل گیری Soot در موتور در مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر

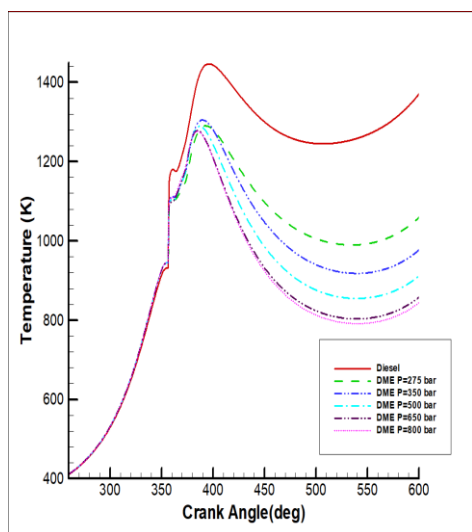
در واقع قسمتی که به آلاینده دوده برمی گردد احتراق نفوذی است و با گذشت زمان در هنگام احتراق نفوذی ذرات کربن با اکسیژنی که بعداً در اختیار مولکول ها قرار می گیرند، ترکیب و مصرف می شوند. مهم ترین پارامترهایی که روی میزان تولید Soot تأثیر می گذارد عبارتند از نسبت C/H، دما و فشار. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده می شود هنگامی که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می یابد میزان آلاینده دوده

اصطلاحاً اکسید نیتروژن حرارتی می گویند که در موتورهای احتراق داخلی تشکیل NO به صورت مطالب فوق است.



شکل ۱۵: چگونگی شکل گیری NO_x در موتور در مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر

همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود با افزایش فشار پاشش سوخت دی متیل اتر میزان آلاینده NO_x افزایش می یابد. با افزایش فشار پاشش ذرات سوخت ریزتر می شود و در واقع اتمیزاسیون سوخت بهتر می شود و منطقه پیش آمیخته سریع تر ایجاد می شود و گردافشانی سوخت بهتر صورت می گیرد، این امر باعث تبخیر بهتر سوخت و در نتیجه تشکیل بهتر و سریع تر مخلوط سوخت و هوا می شود. با توجه به اینکه میزان سوخت مصرفی در هر چرخه ثابت نگه داشته شده است، این امر باعث می شود که مخلوط سوخت و هوای بیشتری با افزایش فشار پاشش در مرحله احتراق پیش- آمیخته محترق شود. چون عامل تشکیل دهنده NO_x اصولاً به قسمت احتراق پیش آمیخته برمی گردد و با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می شود هنگامی که فشار پاشش سوخت افزایش یافته، سهم احتراق پیش آمیخته افزایش می یابد. روشن است که اولین بخش گازهای سوخته عامل اصلی افزایش میزان آلاینده NO_x می شود که آن هم از احتراق پیش آمیخته نشأت می گیرد.



شکل ۱۴: مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی دمای داخل

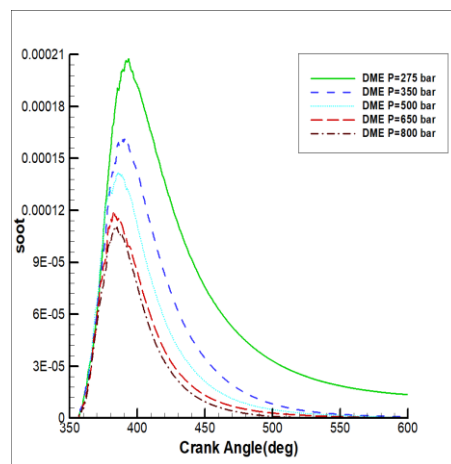
۱۳- نتیجه گیری

فشار ماکزیمم محفظه‌ی احتراق در اشتعال سوخت دی متیل اتر از دیزل کمتر است. میزان کاهش بیشینه فشار سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل در حدود ۶.۸٪ است. با افزایش فشار پاشش سوخت دی متیل اتر، بیشینه مقدار فشار داخل استوانه افزایش می‌یابد. زیرا افزایش فشار پاشش باعث تشکیل سریع مخلوط سوخت و هوا در مرحله زمان تأخیر در اشتعال می‌شود و به تبع آن، مخلوط سوخت و هوای بیشتری برای مرحله احتراق پیش آمیخته فراهم می‌شود که این امر موجب افزایش ناگهانی فشار داخل محفظه احتراق می‌گردد. در کل با افزایش فشار پاشش سوخت از ۲۷۵ bar تا ۸۰۰ bar میزان افزایش بیشینه فشار در حدود ۲۲.۳٪ است.

نرخ آزادسازی حرارت در سوخت دی متیل اتر کمتر از دیزل می‌باشد. علت این امر این است که در سوخت دی متیل اتر به علت حضور یک اتم اکسیژن و عدم وجود پیوند C-C، انرژی کمتری صرف شکستن پیوند بین اتم‌های آن می‌شود که سبب می‌گردد ارزش حرارتی و حرارت آزادشده‌ی آن نسبت به دیزل پایین‌تر باشد. میزان کاهش بیشینه نرخ آزادسازی حرارت سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل در حدود ۴۰.۳٪ است. با افزایش فشار پاشش میزان مهلت اشتعال کاهش می‌یابد که این بدان علت است که با افزایش فشار پاشش، سرعت شکست قطرات بیشتر می‌شود و در آن، میزان تبخیر سوخت بیشتر و در نتیجه مخلوط سوخت و هوا سریع‌تر تشکیل می‌شود. با افزایش سرعت پاشش، در یک‌زمان مشخص، سوخت پاشیده شده بیشتری با افزایش فشار پاشش سوخت، محترق می‌شود که این موضوع باعث کوتاه‌تر شدن طول احتراق نفوذی و همچنین افزایش بیشینه احتراق پیش آمیخته می‌شود. در کل با افزایش فشار پاشش سوخت از ۲۷۵ bar تا ۸۰۰ bar میزان افزایش بیشینه نرخ آزادسازی حرارت در حدود ۵۴.۴٪ است.

با بررسی نمودارهای حاصل برای NO_x ، مقدار آن در دی متیل اتر نسبت به دیزل به مقدار ۸۲.۷٪ کاهش می‌یابد. با افزایش فشار پاشش سوخت دی متیل اتر میزان آلاینده NO_x افزایش می‌یابد. ذرات سوخت

نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که با افزایش فشار پاشش، کیفیت احتراق در حالت کلی به علت بهبود اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بهبود یافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجه می‌باشد.



شکل ۱۵: چگونگی شکل‌گیری Soot در موتور با تغییر فشار پاشش سوخت دی متیل اتر

۱۲- بررسی منحنی دما

شکل (۱۶) مقایسه دمای محفظه احتراق بین سوخت دیزل و دی متیل اتر با تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت دی متیل اتر برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به علت حضور یک اتم اکسیژن و عدم وجود پیوند C-C، انرژی کمتری صرف شکستن پیوند بین اتم‌های آن می‌شود که سبب می‌گردد ارزش حرارتی و حرارت آزادشده‌ی آن نسبت به دیزل پایین‌تر باشد. با کاهش حرارت آزادشده در دی متیل اتر، دمای محفظه احتراق آن نسبت به دیزل کمتر می‌گردد. عامل اصلی کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق را می‌توان ارزش حرارتی پایین‌تر سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل دانست. برای دریافت انرژی معادل سوخت دیزل باید دبی جرمی

بیشتر دی متیل اتر وارد محفظه احتراق گردد تا افت ارزش حرارتی را جبران سازد. هنگامی که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می‌یابد میزان دمای محفظه احتراق نیز به تدریج کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که با افزایش فشار پاشش، کیفیت احتراق در حالت کلی به علت بهبود اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بهبود یافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجه می‌باشد.

V	سرعت سیال، ms^{-1}
g	شتاب گرانشی، ms^{-2}
H	آنتالپی سکون سیال، J
q	چشمه حرارتی، J
ΔT	تغییرات زمانی، s
m	جرم ذره ی سیال، Kg
Re	عدد رینولدز
We	عدد وبر
k	انرژی جنبشی توربولانت، m^2s^{-2}
T	دما، K
E_a	انرژی فعال سازی، Jmol^{-1}
N	دور موتور، rpm
CN	عدد ستان سوخت
Y_{soot}	کسر جرمی دوده
$Pr_{t soot}$	عدد پرائنتل آشفته انتقال دوده
R_{soot}	نرخ تولید دوده، $\text{Kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$R_{soot form}$	نرخ تشکیل دوده، $\text{Kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$R_{soot comb}$	نرخ احتراق دوده، $\text{Kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$
C_s	ثابت تشکیل دوده، $\text{Kg N}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$
Y_{OX}	کسر جرمی اکسند
Y_{fuel}	کسر جرمی سوخت
علائم یونانی	
τ_{id}	تاخیر در اشتعال، ms
ρ	چگالی سیال، Kg m^{-3}
φ	نسبت هم ارزی
μ	لزجت سیال، $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$
λ	ضریب هدایت حرارتی، $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
τ	تنش برشی، Nm^{-2}
Ω	نرخ بیشینه رشد امواج ناپایدار
ε	نرخ اتلافات، m^2s^{-3}
σ_k	عدد پرائنتل توربولانت
σ_ε	عدد پرائنتل اتلافات

مراجع

۱. امیر عابدی، مهسا و دیگران " شبیه سازی عددی مشخصه های احتراقی و آلاینده گی موتور دیزلی تزریق مستقیم با سوخت های جایگزین هپتان نرمال و دی متیل اتر "، کنفرانس بین المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، استانبول: موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا، ۱۳۹۴

ریزتر می شود و در واقع گردافشانی سوخت بهتر صورت می گیرد، این امر باعث تبخیر بهتر سوخت و در نتیجه تشکیل بهتر و سریع تر مخلوط سوخت و هوا می شود. با توجه به اینکه میزان سوخت مصرفی در هر چرخه ثابت نگه داشته شده است، این امر باعث می شود که مخلوط سوخت و هوای بیشتری با افزایش فشار پاشش در مرحله احتراق پیش- آمیخته محترق شود. چون عامل تشکیل دهنده NO_x اصولاً به قسمت احتراق پیش آمیخته برمی گردد و هنگامی که فشار پاشش سوخت افزایش یافته، سهم احتراق پیش آمیخته افزایش می یابد. روشن است که اولین بخش گازهای سوخته عامل اصلی افزایش میزان آلاینده NO_x می شود که آن هم از احتراق پیش آمیخته نشأت می گیرد. در کل با افزایش فشار پاشش سوخت از ۲۷۵ bar تا ۸۰۰ bar میزان افزایش اکسید نیتروژن در حدود ۲۱.۷۶٪ است.

آلاینده دوده ابتدا به شدت افزایش و سپس کاهش می یابد که علت افزایش اول را می توان ناشی از احتراق پیش آمیخته دانست که تأثیری بر خروجی دوده نهایی ندارد زیرا هنگامی که احتراق پیش آمیخته رخ می دهد اکسیژن در دسترس در اطراف شعله به شدت کاهش می یابد که منجر به این افزایش اولیه می شود ولی با گذشت زمان و پیش رفتن شعله در داخل محفظه در حدود ۳۰ الی ۴۰ درجه میل لنگ بعد از نقطه مکث بالا اکسایش دوده شروع می شود. مهم ترین پارامترهایی که روی میزان تولید Soot تأثیر می گذارد عبارت اند از نسبت C/H، دما و فشار. مقدار بیشینه آلاینده دوده در دی متیل اتر نسبت به دیزل به مقدار ۵۹.۴٪ کاهش می یابد. هنگامی که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می یابد میزان آلاینده دوده نیز کاهش می یابد. با توجه به این که با افزایش فشار پاشش، کیفیت احتراق در حالت کلی به علت بهبود اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بهبود یافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می شود این موضوع قابل توجیه می باشد. در کل با افزایش فشار پاشش سوخت از ۲۷۵ bar تا ۸۰۰ bar میزان کاهش بیشینه دوده در حدود ۴۷.۶٪ است.

ارزش حرارتی و حرارت آزادشده ی سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل پایین تر است. مقدار کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق در سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل به مقدار ۱۰.۸٪ کاهش می یابد. عامل اصلی کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق را می توان ارزش حرارتی پایین تر سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل دانست. هنگامی که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می یابد میزان دمای محفظه احتراق نیز به تدریج کاهش می یابد. با توجه به این که با افزایش فشار پاشش، کیفیت احتراق در حالت کلی به علت بهبود اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بهبود یافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می شود این موضوع قابل توجیه می باشد. در کل با افزایش فشار پاشش سوخت از ۲۷۵ bar تا ۸۰۰ bar میزان کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق در حدود ۱٪ است.

فهرست علامتها

علائم انگلیسی	
P	فشار سیلندر، bar
T	دمای گاز سیلندر، K

۱۴. امیدی کاشانی، بهزاد، "ساخت مدل ریاضی برای پیش‌بینی نشر آلاینده‌ها در موتور دیزل - گاز"، *اولین همایش موتورهای درون‌سوز*، ۱۳۷۸

۱۵. رسولی، مینا، محمودی مهر، جواد "کمینه‌سازی تولید آلاینده‌ها در کنار بیشینه‌سازی تابش از یک شعله گاز طبیعی با هوای مرحله‌ای شده"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، مهر ۱۳۹۵

۱۶. جعفر مدار، صمد و دیگران "بررسی تأثیر شاخص‌های پاشش سوخت در کاهش آلاینده‌های موتورهای اشتعال به‌عنوان سوخت جایگزین (DME) تراکمی با کاربرد دی متیل اتر"، *کنفرانس مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی*، تهران: موسسه همایش صنعت، ۱۳۸۹

2. British Petroleum (BP), "BP energy outlook 2035", 2014 (January)

۳. رئوف، فرشته، تقی زاده، مجید، "بررسی روش‌های تهیه دی متیل اتر از زیست‌توده"، *پنجمین همایش ملی مدیریت پسماند*، ۱۳۸۹

۴. پاک رایک، ویلارد، "مبانی مهندسی موتورهای احتراق داخلی"، ترجمه صنایع، سپهر، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۳

5. Ohno, Y., Inoue, N., Ogawa, T., "Slurry Phase Synthesis and Utilization of Dimethyl Ether", *NKK Technical Review*, NO. 85, 2001, pp. 23-28

6. Kim, M.Y., et al., "Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system", *Fuel*, 2008, NO. 87, pp. 2779-2786

7. Yao, M., et al., "Experimental study on combustion process of dimethyl ether", *SAE tech paper*, 2003, SAE 2003-01-3194

8. Magnussen B.F, Hjertager B.H, "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", In 16th Int. Symposium on Combustion (Philadelphia, PA: The Combustion Institute), 1976

9. ANSYS FLUENT User's Manual, Version 2016

۱۰. جعفری، بهرام و دیگران "تأثیر انواع پیکربندی پاشش سوخت بر احتراق و شکل‌گیری آلاینده‌ها در موتور دیزل سنگین"، *فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، تابستان ۱۳۸۹*

۱۱. خباز، سید علیرضا، خوشبختی سرای، رحیم، "بررسی نظری تأثیر فشار، زمان و طول پاشش سوخت دیزل بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی از موتور دیزلی پاشش مستقیم"، *فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، پاییز ۱۳۸۸*

۱۲. اللهیاری، میثم و دیگران "بررسی تأثیر تزریق چندمرحله‌ای سوخت بر آلاینده‌ها و عملکرد موتور دیزل سنگین و همچنین بکار بردن سوخت جایگزین دی متیل اتر"، *اولین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران*، زاهدان: دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۱

۱۳. زینی وند، حامد "بررسی عددی جریان دو فاز واکنشی در یک محفظه احتراق مدل جت-پایدار"، *چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران*، دانشگاه کاشان، بهمن ۱۳۹۰