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

محمدمهدی گنجی مهیاری [۱و*]، 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 آلایندگی در موتورهای اشتعال تراکمی صورت گرفته است. دی متیل اتر به علت ویژگی‌های خاصی از قبیل عدد ستان بالا و آلایندگی 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 به‌منظور بررسی مشخصه‌های عملکرد و آلایندگی موتور اشتعال تراکمی با استفاده از سوخت جایگزین دی متیل اتر، با تغییر فشار پاشش سوخت انجام‌شده 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 افـزایش مقدار بیشینه فشار و میزان کـاهش مقدار بیشینه گرمای واکنش، دما، اکسید نیتـروژن و دوده سـوخت دی متیل اتر نسبت به سوخت دیزل در حدود ۱۴ و ۷.۹، ۱۱.۷، ۷۹ و ۷۸.۷ 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

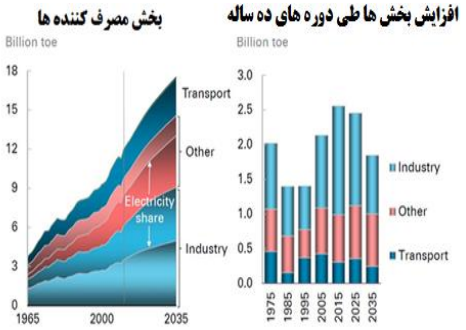
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

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 به‌اندازه‌ای است که چنانچه روند تکیه‌بر سوخت‌های فسیلی ادامه یابد در آینده نزدیک، جهان با مشکلات زیادی در موارد زیست‌محیطی و کمبود مواد اولیه مواجه خواهد شد [۱].

طـرح مصـرف انـرژی اولیه توسط بخش‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده‌شده است. در این نمودار، بخش صنعت مصرف‌کننده غالب انرژی اولیه، برای بیش از نیمی از رشد پیش‌بینی‌شده در مصرف انرژی بین سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۳۵ باقی می‌ماند. جزء اصلی بعدی مصرف‌کننده انرژی توسط بخش‌های دیگر، ازجمله 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 انجام‌شده است[۲].

با گسترش نگرانی‌های مربوط به آلودگی محیط‌زیست و همچنین کاهش منابع نفتی، دنیا به دنبـال یک سوخت غیرنفتی است که با تکنـولـوژی‌های پیشـرفته انرژی (مثـل پیـل‌های سوختی) سازگار بوده و استفاده بیشتر از انرژی را پاسخگو باشد.



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

است که با تکنولوژی‌های پیشرفته انرژی (مثل پیل‌های 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 ماشین‌های موجود تطبیق داد، قابل‌دسترس و ایمن باشد و نیز تولید آن ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. در بین چندین سوخت شناخته‌شده (متان، متانول، اتانول، دی متیل اتر و...) به نظر می‌رسد که دی متیل اتر متانول، اتانول، دی متیل اتر و...) به نظر می‌رسد که دی متیل اتر از پتانسیل بیشتری برخوردار است [۳].

علاوه بر این که می‌توان از دی متیل تر به‌عنوان یک سوخت جایگزین مناسب برای وسایل نقلیه (به علت بالا بودن عدد ستان و عدم ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی) استفاده کرد، DME[۱] قابلیت استفاده به‌عنوان سوخت خانگی بجای LPG[۲] را نیز دارد. در فرآیند احتراق موتورهای احتراق داخلی، آلاینده‌هایی تولید می‌گردد که محیط را آلوده نموده و در گرم شدن زمین، باران اسیدی، مه دود، بوی بد، مشکلات تنفسی و سایر مشکلات مربوط به‌سلامتی نقش دارد. دلایل اصلی ایجاد این آلاینده‌ها احتراق غیراکوستیک، تجزیه نیتروژن و غیر ناخالصی‌های موجود در سوخت و هوا می‌باشد. آلاینده‌های نگران‌کننده، اکسید نیتروژن NO_x، هیدروکربن‌ها HC، مونواکسید کربن CO، گوگرد و ذرات معلق کربن جامد است [۱].

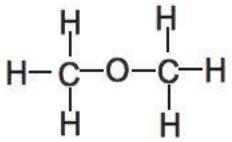
امروزه در اکثر کشورهای جهان قوانین بسیار سختی برای آلاینده‌های خروجی از موتورهای احتراق داخلی اعمال می‌گردد. به‌منظور کاهش این آلاینده‌ها و افزایش کارایی و راندمان این موتورها، تحقیقات زیادی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می‌گیرد[۴]. اکسید نیتروژن عمدتاً از ترکیب اتم‌های تجزیه‌شده مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا حاصل می‌شود که به آن اصطلاحاً اکسید نیتروژن حرارتی می‌گویند. در موتورهای احتراق داخلی مکانیزم توسعه‌یافته زلدوویچ برای تشکیل NO حرارتی در مکانیزم فوق نتیجه می‌شود؛ که مقدار غلظت NO منتشره، با دمای ماکزیمم بار سیلندر ارتباط مستقیم دارد.

فاکتورهایی که منجر به کاهش دمای ماکزیمم فرایند احتراق می‌گردد باعث کم شدن NO تشکیل‌شده نیز می‌شود. همچنین وابستگی تولید NO_x به فشار پاشش در این موتورها بسیار قابل‌توجه است [۱].

در این مطالعه بر روی موتور دیزلی چهارزمانه پاشش مستقیم کاترپیلار ۳۴۰۱ انجام شده است. این کار با مدل‌سازی روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) این موتور و تطبیق منحنی فشار سوخت دیزل به‌دست‌آمده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت، با نمودار تجربی موجود اعتبارسنجی می‌شود. سپس تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت، بر سوخت جایگزین دی متیل اتر بررسی‌شده و منحنی‌های حاصل‌شده شامل فشار، گرمای واکنش، دما و آلایندگی نشان داده خواهند شد و باحالت سوخت پایه دیزل مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- خواص فیزیکی و شیمیایی دی متیل اتر

دی متیل اتر یک سوخت تمیز است که بار بسیار کمی به محیط وارد می‌نماید و هیچ‌گونه دوده‌ای در طول احتراق تولید نمی‌نماید، به‌راحتی مایع می‌شود و دارای قابلیت حمل‌ونقل آسان است. نام‌های دیگر این ماده عبارت‌اند 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 CH_3-O-CH_3 ساده‌ترین اتر آلیفاتیکی است (شکل ۲**Error! Reference source not found.**) و خواص شیمیایی آن بسیار شبیه به گازهای نفتی مایع‌شده (LPG که ترکیبی از پروپان و بوتان است) می‌باشد. دی متیل اتر با یک شعله مرئی آبی‌رنگ می‌سوزد 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 سوخت‌های هیدروکربنی حاصل از نفت خام به‌عنوان سوخت دیزل استفاده می‌شود. به‌جز سوخت‌های مرسوم هیدروکربنی، استفاده از دیگر سوخت‌هایی که امکان تهیه آن‌ها از گاز طبیعی یا زغال‌سنگ فراهم باشد توجه محققین را به خود جلب کرده است. به‌عنوان‌مثال موضوع استفاده از متانول به‌عنوان یک سوخت جایگزین در موتورهای احتراقی مطرح می‌باشد. متانول معمولاً از مواد اولیه‌ای مثل مونواکسید کربن و هیدروژن قابل به دست آوردن است که دو ماده اخیر را نیز می‌توان از گاز طبیعی و زغال‌سنگ به دست آورد. همین‌طور این دو ماده را می‌توان از تقریباً تمامی مواد حاوی کربن نظیر محصولات کشاورزی و جنگلی نیز تأمین کرد ولی متانول دارای ارزش حرارتی پایینی بوده و درنتیجه کار آیی یک موتور احتراق داخلی با این سوخت به میزان زیادی را نیز می‌توان از گاز طبیعی و زغال‌سنگ به دست آورد. همین‌طور این دو ماده را می‌توان از تقریباً تمامی مواد حاوی کربن نظیر محصولات کشاورزی و جنگلی نیز تأمین کرد ولی متانول دارای ارزش حرارتی پایینی بوده و درنتیجه کار آیی یک موتور

[۱] Dimethyl ether

[۲] Liquefied petroleum gas

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

احتراق داخلی بـا این سوخت به میزان زیـادی پایین خواهد آمد. دی متیل اتر، در مقایسه با متانول دارای ارزش حرارتی بالاتری بوده، ضمن آنکه سمی نیز نمی‌باشد. به‌علاوه دی متیل اتر دارای خواص احتراق 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) به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های دیزل موردبررسی قرارگرفته است. دی متیل اتر دارای عدد ستان بیشتر از سوخت‌های دیزل است و به همین دلیل برای استفاده در موتورهای دیزل ایده آل است [۵].

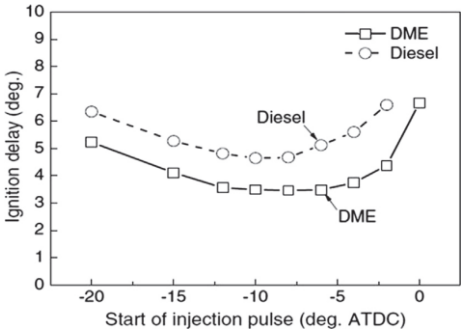
۳- تأخیر در اشتعال

میزان تبخیر سـوخت دی متیل اتـر بـالاتر از سـوخت دیـزل اسـت. نقطه‌جوش دی متیل اتر ^{o}C ۲۴.۹- است که بسیار پایین‌تر از دیزل (^{o}C ۲۶۵) 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 می‌گردد و تشکیل یک مخلوط قـابل‌انفجـار با هوا می‌دهد. گرمای نهـان دی متیل اتـر در حدود ۱۵۴٪ از سـوخت دیزل است. هنگامی‌که سـوخت دی متیل اتر به یک محفظه احتراق تزریق می‌شود، به‌سرعت 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 می‌دهد. تأخیر در اشتعال سوخت نقش مهمی در ویژگی‌های احتراق و تعیین گازهای خروجی اگزوز دارد. شکل (۳) اثر زمان پـاشش در تأخیر در اشتعال بـرای سـوخت دی متیل اتر و دیزل را نشان می‌دهد. در این شکل، تأخیر در اشتعال سـوخت دی متیل اتر کوتاه‌تر از سوخت دیـزل است [۶].

بـر اسـاس داده‌هـای تجـربـی گـزارش‌شده تـوسط یـائـو[۱] و همکـــاران [۷]، تأخیر در اشتعال دی متیل اتر می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

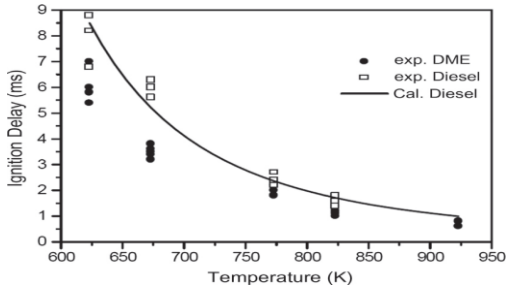
$$\tau_{id}=0.022P^{-0.316}e^{\left(\frac{4206}{T}\right)} \qquad (۱)$$

که در آن τ_{id} تأخیر در اشتعال (ms)، P فشـار سیلندر (bar) و T دمـای گاز سیلندر (K) است. آن‌ها نشـان دادند که سیستم



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

تأخیر در اشتعال وابسته قوی به دما است. علاوه بر این، در دمای بالا حدود ۹۷۳ کلوین، اثرات دما و فشار اولیه دیگر قابل‌توجه نیست. هنگام استفاده از دی متیل اتر به‌عنوان سوخت، افزایش فشار باعث کوتاه‌تر شدن زمان تأخیر در اشتعال می‌گردد، درحالی‌که کاهش دما باعث افزایش زمان تأخیر در اشتعال می‌شود. نتایج تجربی و محاسباتی برای تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتـر و دیزل، بر اساس نتایج حاصل از یائو و همکـاران [۷]، در شکل (۴) نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این آمار و ارقام نشان داده‌شده، نتایج تجربی برای مـوتورهـای دیـزل و دی متیل اتر بین ۱.۳ms - 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 جریان‌های بدون احتراق حل معادلات ناویراستوکس است. برای جریان‌های همراه با انتقال حرارت معادله انرژی اضافه می‌شود. تکمیل‌کننده این دسته از معادلات بقاء، معادله حالت و مشخصات خواص سیال می‌باشند. جریان‌های احتراقی شامل آزاد شدن انرژی حرارتی در اثر تبدیل گونه‌های شیمیایی به یکدیگر می‌باشند. این خصوصیات جریان‌های احتراقی، نیاز به مدل‌سازی 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 می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho V_i) \qquad (۲)$$

$$\rho\frac{DV_i}{Dt}=\rho\frac{\partial V_i}{\partial t}+\rho V_i\frac{\partial V_i}{\partial x_j}=\rho g_i-\frac{\partial P}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j}+\frac{\partial V_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial V_k}{\partial x_k}\right)\right] \qquad (۳)$$

$$\rho\frac{DH}{Dt}=\rho\frac{\partial H}{\partial t}+\rho V_i\frac{\partial H}{\partial x_j}=q_j+\frac{\partial P}{\partial t}+\acute{t}_{ij}\left(\frac{\partial V_j}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \qquad (۴)$$

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 سیـال می‌باشد. پـدیده اشتعـال در موتـورهـای اشتعـال تـراکمی از مدل اشتعـال خود به خودی (Auto Ignition) پیروی می‌کند. پدیده اشتعال خود به خودی هیدروکربن‌ها در موتور دیزل یک فرآیند زنجیره‌ای است که شامل چهار دسته واکنش زنجیری به نام‌های واکنش زنجیری آغازین، زنجیری انتشار، زنجیری شاخه‌دار شدن و زنجیری پایانی می‌باشد [۱]. در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل k-ε و برای مدل‌سازی احتراق از مدل اتلاف ادی ها (Eddy Dissipation) استفاده می‌گردد.

[۱] Yao

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

۴-۱- مدل احتراقی

برای مدل کردن احتراق لازم است که نرخ انجام واکنش‌های شیمیایی مشخص شود. با توجه به برهم‌کنش آشفتگی و واکنش شیمیایی، تأثیر آشفتگی بر احتراق نیز باید در نظر گرفته شود. در این مطالعه از روش اتلاف ادی برای مدل‌سازی احتراق پیش آمیخته استفاده‌شده 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 استفاده‌شده است. اثر توربولنسی بر روی نرخ انجام واکنش بر مبنای مدل مگنسن- هرتاگر طبق رابطه‌ی (۵) و (۶) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{i^1.k} = v^1_{i^1.k} M_{i^1} A\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{m_R}{v^1_{R.k} M_R} \quad (۵)$$

$$R_{i^1.k} = v^1_{i^1.k} M_{i^1} AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P m_P}{\sum_{j^1}^N v^1_{j^1.k} M_{j^1}} \quad (۶)$$

که در آن $v^1_{j^1.k}$ ضریب استکیومتریک گونه i 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 استفاده‌شده است. در این شبیه‌سازی ابتدا سوخت مایع به حالت گازی تبدیل‌شده و سپس احتراق صورت می‌گیرد. تبخیر ذرات سوخت، پس از رسیدن دمای ذرات به دمای جوش، آغازشده و تا پایان یافتن در نظر گرفته‌شده است:

$$2C_{10.8}H_{18.7} + 30.95O_2 \rightarrow 21.6CO_2 + 18.7H_2 \quad (۷)$$

$$C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O \quad (۸)$$

۴-۲- تأخیر در اشتعال

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

$$\tau_{id} = \left(\frac{0.36+0.22\bar{S}_p}{6N}\right) \exp\left[E_a\left(\frac{1}{RT} - \frac{1}{17.190}\right) + \left(\frac{21.2}{p-12.4}\right)^{0.63}\right] \quad (۹)$$

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:

$$E_a = \frac{618840}{CN+25} \quad (۱۰)$$

که در آن CN عدد ستان سوخت است [۹].

۴-۳- جدایش سوخت

مشکل اصلی در شبیه‌سازی افشانهٔ سوخت در احتراق دیزل، تعیین و تطبیق سازوکار حاکم بر فرآیندهای جدایش می‌باشد. در این شبیه‌سازی از الگوی جدایش WAVE استفاده‌شده است. این الگو را برای اولین بار ریتز پیشنهاد کرده است. در این الگو قطر ذرات تزریق‌شده برابر با قطر خروجی سوراخ افشانه در نظر گرفته می‌شود. بررسی جدایش سوخت تزریق‌شده 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 به‌صورت استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود با استفاده از نظریه خطی مرتبه اول و با فرض جابه‌جایی‌های اولیه بسیار کوچک به‌صورت تقارن محوری بر روی سطح فواره سوخت انجام می‌شود. در معادله پراکندگی الگوی WAVE نرخ بیشینه رشد امواج ناپایدار (Ω) و طول‌موج (Λ) متعلق به آن، به خواص فیزیکی مایع و گاز (سوخت و هوا) برمی‌گردند که این وابستگی با استفاده از نظریه امواج سطحی کلوین - هلمهوتز (K-H) به‌صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شود [۱۰].

$$\frac{\Lambda}{r} = 9.02 \frac{(1+0.45oh^{0.5})(1+0.4Ta^{0.7})}{(1+0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (۱۱)$$

$$\Omega\left[\frac{\rho_1 r^3}{\sigma}\right]^{0.5} = \frac{(0.34+0.38We_2^{1.5})}{(1+oh)(1+1.4Ta^{0.6})} \quad (۱۲)$$

درحالی‌که

$$oh = {We_1}^{0.5} / Re_1 \quad (۱۳)$$

$$Te = oh \times {We_2}^{0.5} \quad (۱۴)$$

$$We_1 = \rho_1 U^2 a / \sigma \quad (۱۵)$$

$$We_2 = \rho_2 U^2 a / \sigma \quad (۱۶)$$

$$Re_1 = U \times a / \vartheta_1 \quad (۱۷)$$

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

$$r = B_0 \Lambda \quad (۱۸)$$

زمان متلاشی شدن جت سوختی نیز به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \frac{3.762 B_1 a}{\Lambda \Omega} \quad (۱۹)$$

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

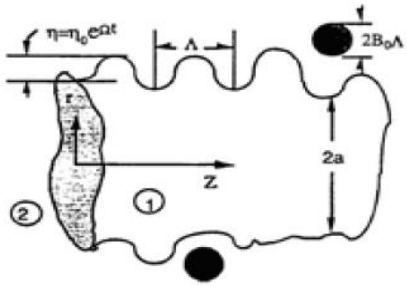
$$\frac{da}{dt} = -(a-r)/\tau \quad (۲۰)$$

در روابط فوق مقادیر ثابت‌های B_0 و B_1 برابر مقادیر زیر انتخاب‌شده است:

B_0 : به‌منظور 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 آشفتگی اولیه ایجادشده داخل دماغه‌ی افشانه وابسته است.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

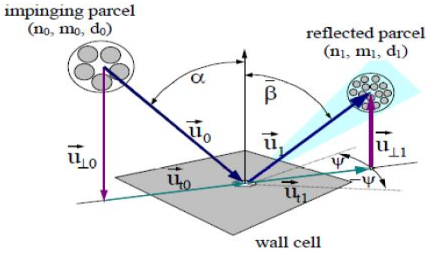


شکل ۵: نمایی از امواج سطحی و جدایش قطرات از سطح فوران سوخت

اورارک و آمسدم[۱] مقدار $B_1 = \sqrt{3}$ را پیشنهاد کردند. رتیز این نظریه را برای محدوده‌ی تجزیه‌ی قطره سریع (با سرعت‌بالا) نیز به کاربرد و مقدار $B_1 = 10$ را در معادلات شبیه‌سازی فواره استفاده کرده است. داده‌های رنجر و نیکولز[۲] برای تجزیه‌ی قطره سریع مقدار $B_1 = 8$ را پیشنهاد می‌کند؛ بنابراین مقدار مطمئنی برای این ثابت وجود ندارد. بخشی از علت این اختلاف بدان برمی‌گردد که تحلیل‌های گذشته قبلی شتاب قطرات را بعد از وارد شدن آن‌ها به داخل جریان گازی با سرعت نسبی تند در نظر نگرفته‌اند. این شتاب سرعت نسبی بین قطره و گاز را کاهش می‌دهد که منجر به طول‌موج‌های درازتر و زمان‌های شکست طولانی‌تر می‌شود [۱۱]. در مقاله حاضر این ثابت برابر ۱۰ می‌باشد.

۴-۴- مدل برخورد جت سوختی به دیواره

برخورد سوخت با دیواره‌ی سیلندر و یا پیستون از دیگر مسائلی است که باید به آن توجه داشت. بخشی از سوخت که به دیواره می‌رسد، تبخیر نمی‌شود، درنتیجه بر فرآیند احتراق تأثیر منفی گذاشته و باعث ایجاد آلایندگی می‌شود. 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 گرفته‌شده که بر طبق این مدل فرض می‌شود در شرایط کاری موتور، یک‌لایه بخار بین قطرات و دیواره تشکیل‌شده و بسته به عدد وبر قطره باعث برگشتن یا لغزیدن قطرات روی دیواره می‌شود. معیار انتقال بین این دو رژیم عدد وبر بحرانی ۸۰ می‌باشد.



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 پس‌زده می‌شود. سرعت قطره پس از برخورد تابع عدد وبر بعد از برخورد می‌باشد که خود تابعی از عدد وبر قطره قبل از برخورد می‌باشد. رابطه ریاضی عدد وبر قبل و بعد از برخورد قطره به دیواره به‌صورت زیر می‌باشد.

$$We_{out} = 0.687We_{in}(e^{-0.44We_{in}}) \quad (۲۱)$$

ب) عدد وبر بزرگ‌تر از عدد بحرانی: در این حالت بزرگی سرعت پس از برخورد تغییر نمی‌کند اما زاویه انعکاس تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، زاویه انعکاس β معمولاً بین صفر و ۱۸۰ درجه می‌باشد. زاویه محیط Ψ نیز که بین ۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه می‌باشد، تـــوسط یک تابع توزیع احتمال تعیین می‌شود.

$$\Psi = -\frac{\pi}{k}\ln[1 - p(1 - e^{-k})] \quad (۲۲)$$

در معادله بالا، عدد تصادفی p بین صفر و یک می‌باشد و پارامتر k از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sin\alpha = \left(\frac{e^k+1}{e^k-1}\right)\frac{1}{1+\left(\frac{\pi}{k}\right)^2} \quad (۲۳)$$

اندازه قطره پس از برخورد نیز در عددهای وبر مختلف بدین‌صورت می‌باشد [۱۲].

$$\begin{cases} we < 50 \Rightarrow d_1 = d_0 \\ 50 \le we \le 300 \Rightarrow d_1 = d_0 . f(We_{in}) \\ We > 300 \Rightarrow d_1 = 0.2\, d_0 \end{cases} \quad (۲۴)$$

۵-۴- تشکیل اکسیدهای نیتروژن NO_x

اکسیدهای نیتروژن در موتورهـای دیزل شامل اکسید نیتروژن NO و مقدار کمی دی‌اکسید نیتروژن NO_2 می‌باشند. دی‌اکسید نیتروژن از اکسید نیتروژن حاصل می‌شود. منابع اصلی شکل‌گیری آلایندهٔ NO را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- NO گرمایی که به‌واسطه تجزیه مولکول‌های هوا و نیتروژن شکل می‌گیرد.
- NO سریع که براثر هجوم هیدروکربن‌ها به نیتروژن موجود در هوا شکل می‌گیرد.
- NO سوخت که براثر نیتروژن موجود در سوخت شکل می‌گیرد.

از شکل‌گیری NO سوخت در موتورهای درو نسوز می‌توان صرف‌نظر نمود. نرخ شکل‌گیری NO سریع در مقایسه با NO گرمایی بسیار کوچک است. در موتور، فشار استوانه در خلال فرایند احتراق افزایش می‌یابد و به دنبال آن گازهای سوخته شده در دمای بسیار گرم متراکم می‌شوند و تمام این اتفاقات دقیقاً پس از احتراق رخ می‌دهد. به همین دلیل نرخ شکل‌گیری NO گرمایی در مقایسه با انواع دیگر چشمگیر است.

برای بررسی سینتیک تشکیل NO از الگوی زلدویچ استفاده می‌شود. آنچه به‌طورکلی پذیرفته‌شده این است که در احتراق مخلوط تقریباً درست (استوکیومتریک)، معادلات حاکم بر شکل‌گیری اکسید نیتروژن از مولکول‌های نیتروژن هوا بدین‌صورت خواهد بود [۱۰]:

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (۲۵)$$

$$O + N_2 \rightarrow NO + N \quad (۲۶)$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (۲۷)$$

با در نظر گرفتن حالت شبه‌پایدار برای غلظت نیتروژن رابطه زیر برای محاسبه تشکیل NO از طریق مکانیزم حرارتی ارائه می‌شود.

[۱] Orourke & Amsdem
[۲] Ranger & Nicholls

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2K_1[O][N_2]\frac{\left(1-\frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_2[N_2]k_2[O_2]}\right)}{\left(1+\frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]+k_3[OH]}\right)} \quad (۲۸)$$

که نرخ‌های واکنش

$k_1 = 1.8\times10^8 e^{-38370/T}$
$k_{-1} = 3.8\times10^7 e^{-425/T}$
$k_2 = 1.8\times10^4 T e^{-4680/T}$
$k_{-2} = 3.81\times10^3 T e^{-20820/T}$
$k_3 = 7.81\times10^7 e^{-450/T}$

بر مبنای محاسبات هانسون و سلیمیان به‌دست‌آمده است. غلظت [O] بر اساس محاسبات شبه تعادلی به دست می‌آید.

$$[O] = 36.64T^{0.5}[O_2]^{0.5}\exp(-27123/T) \quad (۲۹)$$

مکانیزم سریع که توسط فنیمور شناسایی شد. بر این مبنا که رادیکال‌های هیدروکربن در ناحیه ابتدایی احتراق با مولکول‌های نیتروژن واکنش می‌دهد. این نوع مکانیزم از مکانیزم حرارتی پیچیده‌تر می‌باشد و در هنگامی‌که دمای محفظه احتراق پایین باشد و یا احتراق به‌صورت 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 به‌صورت 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) قابل‌محاسبه است.

$$\frac{d[NO]}{dt} = fk'_{pr}[O_2]^a[N_2][fuel]\exp\left(\frac{-E'_a}{RT}\right) \quad (۳۰)$$

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

$$k'_{pr} = 6.4\times10^6(RT/p)^{a+1} \quad (۳۱)$$

$$a = \begin{cases} 1.0 & X_{O_2} \le 4.1\times10^{-3} \\ -3.95 - 0.9\ln X_{O_2}, & 4.1\times10^{-3} \le X_{O_2} \le 1.11\times10^{-2} \\ -0.935 - 0.1\ln X_{O_2}, & 1.11\times10^{-2} < X_{O_2} < 0.03 \\ 0 & X_{O_2} \ge 0.03 \end{cases} \quad (۳۲)$$

۴-۶- تشکیل دوده (Soot)

واژهٔ دوده تعریف مشخص برای یک مادهٔ خاص نیست اما در حالت کلی، دوده مادهٔ 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 موردنیاز 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 به‌صورت 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.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho Y_{soot}) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}Y_{soot}) = \nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{Pr_{t\,soot}}\nabla Y_{soot}\right) + R_{soot} \quad (۳۳)$$

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.

$$R_{soot} = R_{soot\,form} - R_{soot\,comb} \quad (۳۴)$$

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

$$R_{soot\,form} = C_S P_{fuel}\varphi^r\exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (۳۵)$$

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.

$$R_1 = A\rho Y_{Soot}\frac{\varepsilon}{k} \quad (۳۶)$$

$$R_2 = A\rho\left(\frac{Y_{Ox}}{v_{Soot}}\right)\left(\frac{Y_{Soot}v_{Soot}}{Y_{Soot}v_{Soot}+Y_{Fuel}v_{Fuel}}\right)\frac{\varepsilon}{k} \quad (۳۷)$$

در روابط فوق، Y_{OX} و Y_{Fuel} به ترتیب کسر جرمی اکسنده 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 به‌صورت مستقیم پاشیده می‌شود. به علت بالا بودن دما و فشار در محفظه سیلندر (به علت تراکم) سوخت به‌صورت خودکار بعد از کمی تأخیر مشتعل می‌شود و احتراق به‌صورت کامل انجام می‌شود، لذا این نوع احتراق از نوع غیر هم‌آمیخته می‌باشد.

تحلیل عددی موردنظر 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 داده‌شده است [۱۲].

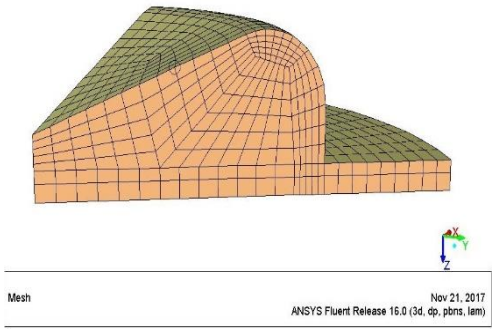
جدول ۱: مشخصات موتور دیزل کترپیلار ۳۴۰۱ [۱۲]

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 سوراخ انژکتور	۶

ازآنجایی‌که 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)

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

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. تجزیه‌وتحلیل این امر باید به‌دقت در الگوسازی جریان سیال در نظر گرفته شود تا شرایط احتراق واقعی در موتور هر چه‌بهتر شبیه‌سازی شود. محاسبات در یک سیکل بسته از زمان بسته شدن سوپاپ ورودی (IVC[۱]) در ۲۱۳ درجه میل‌لنگ تا زمان بازشدن سوپاپ خروجی (EVO[۲]) در ۴۸۰ درجه میل‌لنگ انجام می‌گیرد. لذا از مدل شبکه پویا[۳] در نرم‌افزار فلوئنت استفاده‌شده 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.



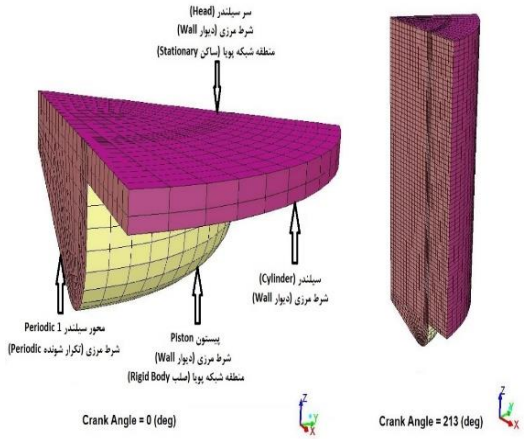
شکل ۷: شبکه‌بندی موتور مورد آزمایش برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا

جدول ۲: تعداد و نوع مش‌های مورداستفاده در پژوهش حاضر

تعداد گره‌ها	۳۰۰۵
تعداد رویه‌های سطحی	۷۷۶۳
تعداد کل سلول‌ها	۲۴۰۰

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 داده‌شده است. در پروژه‌ی حاضر از مدل‌های Species و Discrete Phase استفاده‌شده است که توانایی شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی احتراق، محاسبات ترکیب گازها، آلاینده‌ها و شبیه‌سازی اسپری سوخت را دارند. در مدل Species شبیه‌سازی احتراق در موتور دیزل در قسمت Species Transport نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation بر پایه مدل مگنسن -هرتاگر استفاده‌شده است. همچنین واکنش‌های شیمیایی احتراق نیز در این مدل تعریف می‌شوند. در قسمت‌های Autoignition، NO_x و Soot مکانیزم های مربوط به خود اشتعالی و آلاینده‌های NO_x و Soot تعریف می‌گردند.

در مدل Discrete Phase شبیه‌سازی افشانهٔ سوخت در احتراق، تعیین و تطبیق سازوکار حاکم بر فرآیندهای جدایش می‌باشد. در این شبیه‌سازی از الگوی جدایش WAVE استفاده‌شده 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.



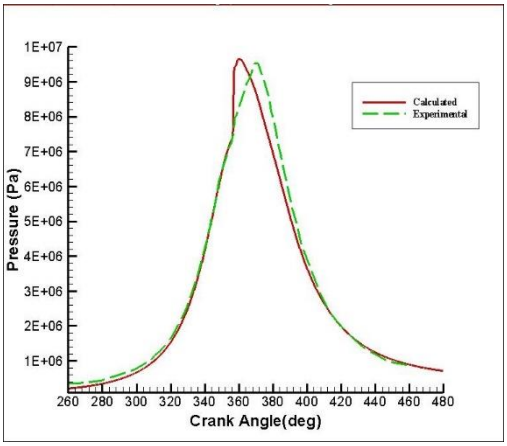
شکل ۸: نوع شرایط مرزی سطوح بر روی شبکه و نوع مناطق شبکه پویا برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا و نمایش مدل در ۲۱۳ درجه نقطه مرگ بالا

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 تشابه سازی صورت گرفته با نرم‌افزار مقایسه شده که البته به عبارتی اعتبار سنجی 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 ۹۵۳۲۳۷۴ 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 موردبررسی و تحلیل سیالاتی آن به‌دست‌آمده است. در این شکل در حدود ۱.۲٪ خطا بین بیشینه فشار عددی و تجربی نشان می‌دهد.

[۱] Intake Valve Close
[۲] Exhaust Valve Open
[۳] Dynamic Mesh
[۴] Layering
[۵] Dynamic Mesh Zones
[۶] Boundary Conditions

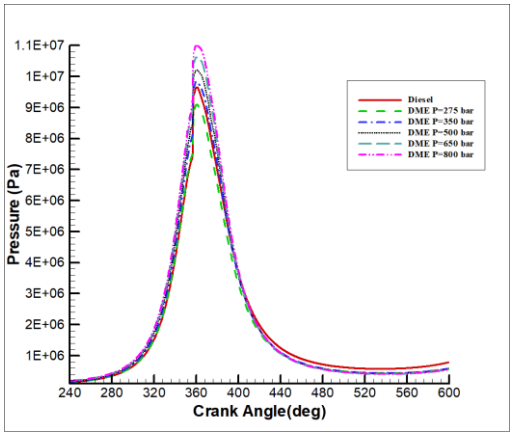
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]



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

۹- بررسی منحنی‌های فشار و گرمای واکنش

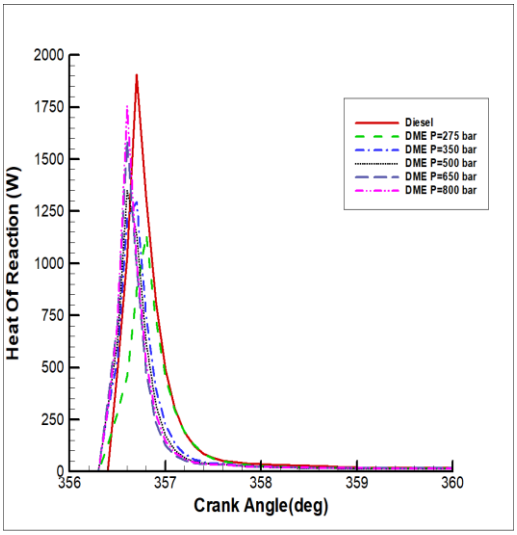
شکل (۱۰) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی فشار متوسط داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. زمان تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر به دلیل داشتن عدد ستان بالا کوتاه‌تر از سوخت دیزل است. این امر باعث می‌شود زمان تأخیر در محفظه احتراق کمتر شده و لذا میزان انباشته شدن سوخت نیز کمتر می‌شود که این مسئله باعث شده تا فشار ماکزیمم سیکل کمتر و درنتیجه 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 به‌تبع آن، مخلوط سوخت و هوای بیشتری برای مرحله احتراق پیش آمیخته فراهم می‌شود که این امر موجب افزایش ناگهانی فشار داخل محفظه احتراق می‌گردد.

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 درنتیجه مخلوط سوخت و هوا سریع‌ترتشکیل 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

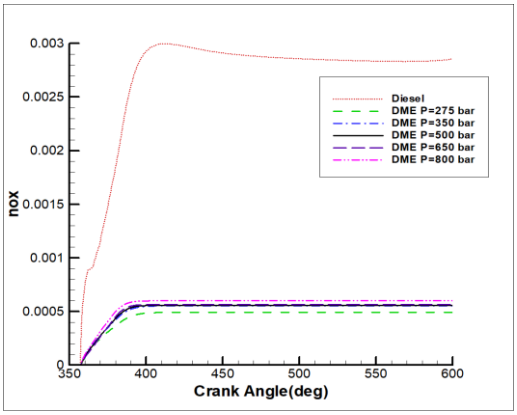
۱۰- آلاینده‌ی NO_x

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 موردبررسی را نشان می‌دهد. مولکول‌های نیتروژن در اثر دمای بالا (بالاتر از ۱۶۲۲ درجه کلوین) تجزیه و با اکسیژن هوا یا سوخت ترکیب‌شده 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

[۱] Heat of Reaction

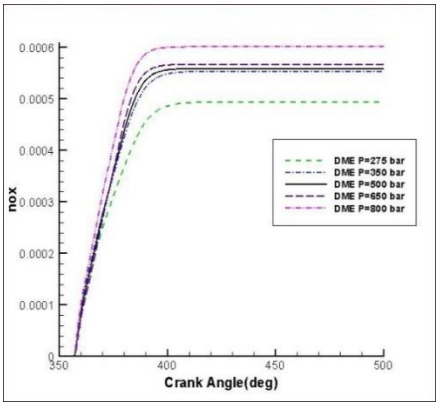
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

اصطلاحاً اکسید نیتروژن حرارتی می‌گویند که در موتورهای احتراق داخلی تشکیل NO به‌صورت مطالب فوق است.



شکل ۱۲: چگونگی شکل‌گیری NO_x در موتور در مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر

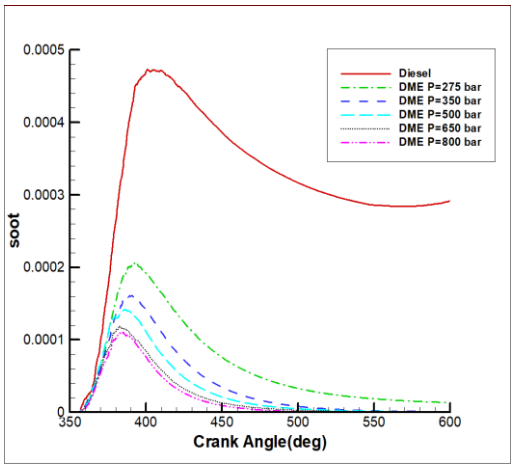
همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش فشار پاشش سوخت دی متیل اتر میزان آلاینده NO_x افزایش می‌یابد. با افزایش فشار پاشش ذرات سوخت ریزتر می‌شود و در واقع اتمیزاسیون سوخت بهتر می‌شود و منطقه پیش آمیخته سریع‌تر ایجاد می‌شود و گردافشانی سوخت بهتر صورت می‌گیرد، این امر باعث تبخیر بهتر سوخت و در نتیجه تشکیل بهتر و سریع‌تر مخلوط سوخت و هوا می‌شود. با توجه به اینکه میزان سوخت مصرفی در هر چرخه ثابت نگه‌داشته شده است، این امر باعث می‌شود که مخلوط سوخت و هوای بیشتری با افزایش فشار پاشش در مرحله احتراق پیش- آمیخته محترق شود. چون عامل تشکیل‌دهنده NO_x اصولاً به قسمت احتراق پیش آمیخته برمی‌گردد و با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود هنگامی‌که فشار پاشش سوخت افزایش‌یافته، سهم احتراق پیش آمیخته افزایش می‌یابد. روشن است که اولین بخش گازهای سوخته عامل اصلی افزایش میزان آلاینده NO_x می‌شود که آن‌هم از احتراق پیش آمیخته نشأت می‌گیرد.



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

۱۱- آلاینده‌ی Soot

شکل (۱۴) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر چگونگی شکل‌گیری Soot در موتور موردبررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابتدا آلاینده دوده به‌شدت افزایش و سپس کاهش می‌یابد که علت افزایش اول را می‌توان ناشی از احتراق پیش آمیخته دانست که تأثیری بر خروجی دوده نهایی ندارد زیرا هنگامی‌که احتراق پیش آمیخته رخ می‌دهد اکسیژن در دسترس در اطراف شعله به‌شدت کاهش می‌یابد که منجر به این افزایش اولیه می‌شود ولی باگذشت زمان و پیش رفتن شعله در داخل محفظه در حدود ۳۰ الی ۴۰ درجه میل‌لنگ بعد از نقطه مکث بالا اکسایش دوده شروع می‌شود.

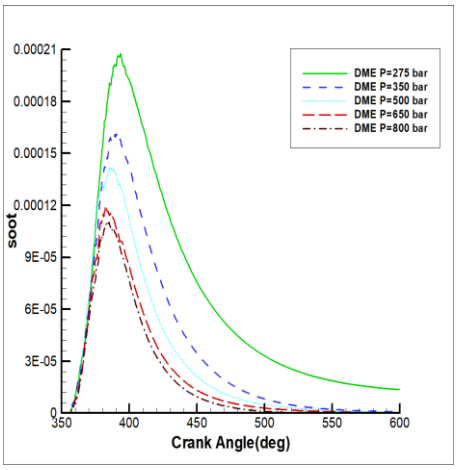


شکل ۱۴: چگونگی شکل‌گیری Soot در موتور در مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر

در واقع قسمتی که به آلاینده دوده برمی‌گردد احتراق نفوذی است و باگذشت زمان در هنگام احتراق نفوذی ذرات کربن با اکسیژنی که بعداً در اختیار مولکول‌ها قرار می‌گیرند، ترکیب و مصرف می‌شوند. مهم‌ترین پارامترهایی که روی میزان تولید Soot تأثیر می‌گذارد عبارت‌اند از نسبت C/H, دما و فشار. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده می‌شود هنگامی‌که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می‌یابد میزان آلاینده دوده

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

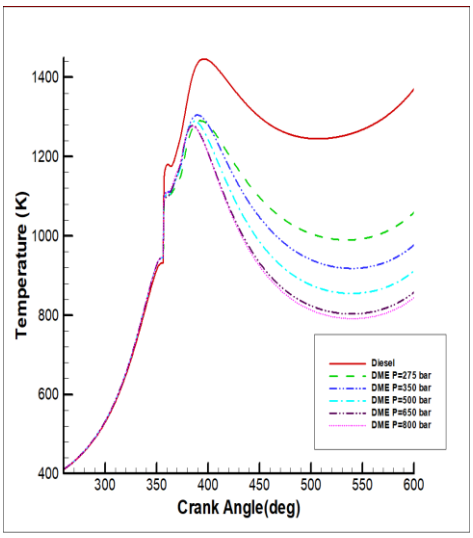
نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که با افزایش فشار پاشش، کیفیت احتراق در حالت کلی به علت بهبود اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا بهبودیافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجیه می‌باشد.



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. هنگامی‌که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می‌یابد میزان دمای محفظه احتراق نیز به‌تدریج 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 بهبودیافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۱۶: مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی دمای داخل

۱۳- نتیجه‌گیری

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 به‌تبع 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 درنتیجه 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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

ریزتر می‌شود و در واقع گردافشانی سوخت بهتر صورت می‌گیرد، این امر باعث تبخیر بهتر سوخت و در نتیجه تشکیل بهتر و سریع‌تر مخلوط سوخت و هوا می‌شود. با توجه به اینکه میزان سوخت مصرفی در هر چرخه ثابت نگه‌داشته شده است، این امر باعث می‌شود که مخلوط سوخت و هوای بیشتری با افزایش فشار پاشش در مرحله احتراق پیش- آمیخته محترق شود. چون عامل تشکیل‌دهنده NO_x اصولاً به قسمت احتراق پیش آمیخته برمی‌گردد و هنگامی‌که فشار پاشش سوخت افزایش‌یافته، سهم احتراق پیش آمیخته افزایش می‌یابد. روشن است که اولین بخش گازهای سوخته عامل اصلی افزایش میزان آلاینده NO_x می‌شود که آن‌هم از احتراق پیش آمیخته نشأت می‌گیرد. 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 به‌شدت افزایش و سپس کاهش می‌یابد که علت افزایش اول را می‌توان ناشی از احتراق پیش آمیخته دانست که تأثیری بر خروجی دوده نهایی ندارد زیرا هنگامی‌که احتراق پیش آمیخته رخ می‌دهد اکسیژن در دسترس در اطراف شعله به‌شدت کاهش می‌یابد که منجر به این افزایش اولیه می‌شود ولی باگذشت زمان و پیش رفتن شعله در داخل محفظه در حدود ۳۰ الی ۴۰ درجه میل‌لنگ بعد از نقطه مکث بالا اکسایش دوده شروع می‌شود. مهم‌ترین پارامترهایی که روی میزان تولید Soot تأثیر می‌گذارد عبارت‌اند از نسبت C/H, دما و فشار. مقدار بیشینه آلاینده دوده در دی متیل اتر نسبت به دیزل به مقدار ۵۹.۴٪ کاهش می‌یابد. هنگامی‌که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می‌یابد میزان آلاینده دوده 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 بهبودیافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجیه می‌باشد. 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 آزادشده‌ی سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل پایین‌تر است. مقدار کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق در سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل به مقدار ۱۰.۸٪ کاهش می‌یابد. عامل اصلی کاهش دمای ماکزیمم محفظه احتراق را می‌توان ارزش حرارتی پایین‌تر سوخت دی متیل اتر نسبت به دیزل دانست. هنگامی‌که فشار پاشش سوخت دی متیل اتر افزایش می‌یابد میزان دمای محفظه احتراق نیز به‌تدریج 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 بهبودیافته و در نتیجه بهبود احتراق نفوذی می‌شود این موضوع قابل توجیه می‌باشد. 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	
فشار سیلندر، bar	P
دمای گاز سیلندر، K	T
سرعت سیال، ms^{-1}	V
شتاب گرانشی، ms^{-2}	g
آنتالپی سکون سیال، J	H
چشمه حرارتی، J	q
تغییرات زمانی، s	ΔT
جرم ذره‌ی سیال، Kg	m
عدد رینولدز	Re
عدد وبر	We
انرژی جنبشی توربولانت، m^2s^{-2}	k
دما، K	T
انرژی فعال‌سازی، $Jmol^{-1}$	E_a
دور موتور، rpm	N
عدد ستان سوخت	CN
کسر جرمی دوده	Y_{soot}
عدد پرانتل آشفته انتقال دوده	$Pr_{t\,soot}$
نرخ تولید دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$	R_{soot}
نرخ تشکیل دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$	$R_{soot\,form}$
نرخ احتراق دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$	$R_{soot\,comb}$
ثابت تشکیل دوده، $KgN^{-1}m^{-1}s^{-1}$	C_s
کسر جرمی اکسنده	Y_{OX}
کسر جرمی سوخت	Y_{fuel}
علائم یونانی	
تأخیر در اشتعال، ms	τ_{id}
چگالی سیال، Kgm^{-3}	ρ
نسبت هم ارزی	φ
لزجت سیال، $kgm^{-1}s^{-1}$	μ
ضریب هدایت حرارتی، $Wm^{-2}K^{-1}$	λ
تنش برشی، Nm^{-2}	τ
نرخ بیشینه رشد امواج ناپایدار	Ω
نرخ اتلافات، m^2s^{-3}	ε
عدد پرانتل توربولانت	σ_k
عدد پرانتل اتلافات	σ_ε

مراجع

۱. امیر عابدی، مهسا و دیگران " شبیه‌سازی عددی مشخصه‌های احتراقی و آلایندگی موتور دیزلی تزریق مستقیم با سوخت‌های جایگزین هپتان نرمال و دی متیل اتر "، *کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی*، استانبول: موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا، ۱۳۹۴

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]

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 رابک، 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 (Phi ladelphia, 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

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 آلایندگی موتورهای اشتعال به‌عنوان سوخت جایگزین (DME) تراکمی با کاربرد دی متیل اتر "، *کنفرانس مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی*، تهران: موسسه همایش صنعت، ۱۳۸۹

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.5.4]