

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

محمد مهدی گنجی مهباری<sup>۱\*</sup>، مهدی حمزه ای<sup>۲</sup>

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 ۷۰.۹، ۱۱.۷ و 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 مکانات: (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].

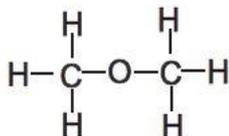
با گسترش نگرانی‌های مربوط به آلودگی محیط‌زیست و همچنین کاهش منابع نفتی، دنیا به دنبال یک سوخت غیرنفتی است که با تکنولوژی‌های پیشرفته انرژی (مثل پیل‌های سوختی) سازگار بوده و استفاده بیشتر از انرژی را پاسخگو باشد.

فاکتورهایی که منجر به کاهش دمای ماکزیمم فرایند احتراق می‌گردد باعث کم شدن NO تشکیل شده نیز می‌شود. همچنین وابستگی تولید NO<sub>x</sub> به فشار پاشش در این موتورها بسیار قابل توجه است [۱].

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

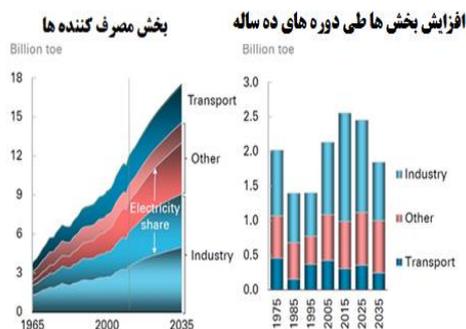
## ۲- خواص فیزیکی و شیمیایی دی متیل اتر

دی متیل اتر یک سوخت تمیز است که بار بسیار کمی به محیط وارد می‌نماید و هیچ‌گونه دوده‌ای در طول احتراق تولید نمی‌نماید، به راحتی مایع می‌شود و دارای قابلیت حمل و نقل آسان است. نام‌های 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 CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub> ساده‌ترین اتر آلیفاتیک است (شکل ۲). خواص شیمیایی آن بسیار شبیه به گازهای نفتی مایع شده (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 به عنوان سوخت دیزل استفاده می‌شود. به جز سوخت‌های مرسوم هیدروکربنی، استفاده از دیگر سوخت‌هایی که امکان تهیه آن‌ها 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 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 زغال سنگ 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 در نتیجه کار آبی یک موتور احتراق داخلی با این سوخت به میزان زیادی را نیز می‌توان از گاز طبیعی و زغال سنگ 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 در نتیجه کار آبی یک موتور



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، 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 می‌رسد که دی متیل اتر (متانول، اتانول، دی متیل اتر و...) به نظر می‌رسد که دی متیل اتر از پتانسیل بیشتری برخوردار است [۲].

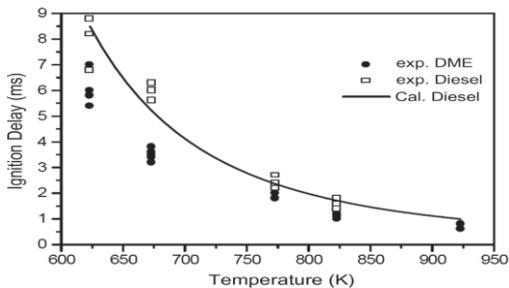
علاوه بر این که می‌توان از دی متیل اتر به عنوان یک سوخت جایگزین مناسب برای وسایل نقلیه (به علت بالا بودن عدد ستان و عدم ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی) استفاده کرد،<sup>۱</sup> DME قابلیت استفاده به عنوان سوخت خانگی بجای LPG<sup>۲</sup> را نیز دارد. در فرآیند احتراق موتورهای احتراق داخلی، آلاینده‌هایی تولید می‌گردد که محیط را آلوده نموده و در گرم شدن زمین، باران اسیدی، مه دود، بوی بد، مشکلات تنفسی و سایر مشکلات مربوط به سلامتی 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<sub>x</sub>، 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. به منظور کاهش این آلاینده‌ها و افزایش کارایی و راندمان این موتورها، تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می‌گیرد [۴]. اکسید نیتروژن عمدتاً از ترکیب اتم‌های تجزیه شده مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا حاصل می‌شود که به آن اصطلاحاً اکسید نیتروژن حرارتی می‌گویند. در موتورهای احتراق داخلی مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ برای تشکیل NO حرارتی در مکانیزم فوق نتیجه می‌شود؛ که مقدار غلظت NO منتشره، با دمای ماکزیمم بار سیلندر ارتباط مستقیم دارد.

<sup>۱</sup> Dimethyl ether

<sup>۲</sup> Liquefied petroleum gas

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 ۱.۳ms - ۲.۳ms 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:

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

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

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

که در این معادلات  $\rho$  چگالی سیال،  $V$  سرعت سیال،  $g$  شتاب گرانشی،  $\mu$  لزجت سیال،  $P$  فشار سیال،  $H$  آنالپی سکون سیال،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی،  $q$  چشمه حرارتی و  $\tau$  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 فرآیند 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 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) 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

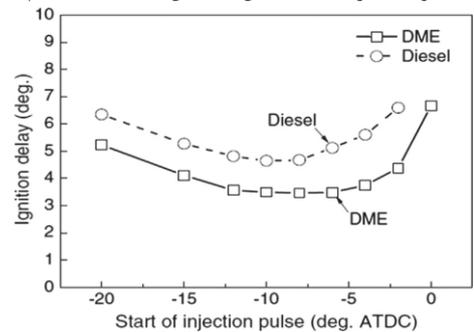
میزان تبخیر سوخت دی متیل اتر بالاتر از سوخت دیزل است. نقطه جوش دی متیل اتر  $24.9^\circ\text{C}$  است که بسیار پایین تر از دیزل ( $265^\circ\text{C}$ ) است؛ بنابراین، اگر غلظت دی متیل اتر در محیط از حد پایین اشتعال آن (مقدار ۳.۴ درصد حجمی دی متیل اتر) بیشتر گردد بلافاصله به بخار تبدیل می گردد و تشکیل 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<sup>۱</sup> و همکاران [۷]، تأخیر در اشتعال دی متیل اتر می تواند به صورت زیر نوشته شود:

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

که در آن  $\tau_{id}$  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]

<sup>۱</sup> Yao

۴-۱- مدل احتراقی

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 ( $\Omega$ ) و طول موج ( $\Lambda$ ) متعلق به آن، به خواص فیزیکی مایع و گاز (سوخت و هوا) برمی‌گردند که این وابستگی با استفاده از نظریه امواج سطحی کلونین - 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

آشفتگی اولیه ایجاد شده داخل دماغه‌ی افشانه وابسته است.

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 استفاده شده است.

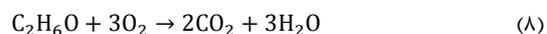
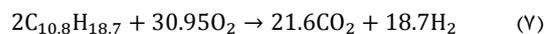
در جریان‌های آشفته همراه با واکنش‌های شیمیایی نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation محاسبه و در ترم چشمه معادله انتقال گونه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation بر پایه مدل مگنسن-هرتاگر استفاده شده است. اثر توربولنسی بر روی نرخ انجام واکنش بر مبنای مدل مگنسن-هرتاگر طبق رابطه‌ی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

$$R_{i^1,k} = v_{i^1,k}^1 M_{i^1} A \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{m_R}{v_{R,k}^1 M_R} \quad (5)$$

$$R_{i^1,k} = v_{i^1,k}^1 M_{i^1} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p m_p}{\sum_{j^1} v_{j^1,k}^1 M_{j^1}} \quad (6)$$

که در آن  $v_{i^1,k}^1$  ضریب استکیومتریکی 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 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 دمای 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  $\tau_{id}$  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

قطره پس از برخورد تابع عدد و بر بعد از برخورد می‌باشد که خود تابعی از عدد و بر قطره قبل از برخورد می‌باشد. رابطه ریاضی عدد و بر قبل و بعد از برخورد قطره به دیواره به صورت زیر می‌باشد.

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

(ب) عدد و بر 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  $\beta$  معمولاً بین صفر و  $180^\circ$  درجه می‌باشد. زاویه محیط  $\Psi$  نیز که بین  $-180^\circ$  تا  $+180^\circ$  درجه می‌باشد، توسط یک تابع توزیع احتمال تعیین می‌شود.

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

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

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

اندازه قطره پس از برخورد نیز در عددهای و بر مختلف بدین صورت می‌باشد [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 دی‌اکسید نیتروژن  $NO_2$  می‌باشند. دی‌اکسید نیتروژن از اکسید نیتروژن حاصل می‌شود. منابع اصلی شکل‌گیری آلاینده  $NO$  را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

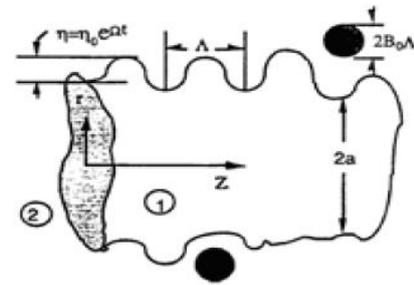
- $NO$  گرمایی که به واسطه تجزیه مولکول‌های هوا و نیتروژن شکل می‌گیرد.
- $NO$  سریع که بر اثر هجوم هیدروکربن‌ها به نیتروژن موجود در هوا شکل می‌گیرد.

•  $NO$  سوخت که بر اثر 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 به‌طور کلی پذیرفته شده این است که در احتراق مخلوط تقریباً درست (استوکیومتریک)، معادلات حاکم بر شکل‌گیری اکسید نیتروژن از مولکول‌های 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 می‌شود.

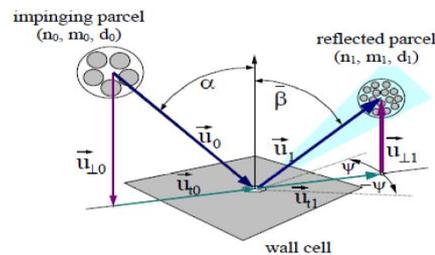


شکل ۵: نمایی از امواج سطحی و جدایش قطرات از سطح فوران سوخت

اورارک و آمسدم<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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، در نتیجه بر فرآیند احتراق تأثیر منفی گذاشته و باعث ایجاد آلاینده‌ی 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 گرفته شده که بر طبق این مدل فرض می‌شود در شرایط کاری موتور، یک‌لایه بخار بین قطرات و دیواره تشکیل شده و بسته به عدد و بر قطره باعث برگشتن یا لغزیدن قطرات روی دیواره می‌شود. معیار انتقال بین این دو رژیم عدد و بر بحرانی  $80$  می‌باشد.



شکل ۶: طرح‌واره برخورد دیواره به قطره

(الف) عدد و بر کمتر از عدد بحرانی: در این حالت قطره در جهت مخالف برخورد و با همان زاویه برخورد ورودی پس‌زده می‌شود. سرعت

<sup>۱</sup> Orouke & Amsdem

<sup>۲</sup> Ranger & Nicholls

گرفته شده و مدل سازی آن از طریق حل معادله انتقال (۳۳) پس از حل معادلات جریان و احتراق صورت می پذیرد.

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

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

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

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

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

در رابطه‌ی (۳۵)،  $C_s$  ثابت تشکیل دوده،  $P_{\text{fuel}}$  فشار جزئی سوخت،  $\phi$  نسبت هم ارزی و  $(E/R)$  دمای فعال سازی 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.

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

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

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

#### ۷- موتور، ایجاد هندسه، شبکه بندی مدل و پارامترهای شبیه سازی

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 هم آمیخته می‌باشد.

تحلیل عددی مورد نظر جهت انجام پروژه‌ی حاضر با استفاده از مدل‌های آماده‌ای که در دسترس می‌باشد، روی موتور دیزلی چهار زمانه پاشش مستقیم کترپیلار ۳۴۰۱ صورت می‌گیرد. مشخصات اصلی موتور یاد شده 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 مدل سازی تنها یک قطاع ۶۰ درجه از محفظه احتراق موتور، جهت کاهش زمان محاسبات مدل می‌شود. شبکه بندی موتور مورد آزمایش، در شکل (۷)

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2K_1[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[\text{NO}]^2}{k_2[\text{N}_2]k_3[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[\text{NO}]}{k_2[\text{O}_2] + k_3[\text{OH}]}\right)} \quad (28)$$

که نرخ‌های واکنش

$$k_1 = 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T}$$

$$k_{-1} = 3.8 \times 10^7 e^{-425/T}$$

$$k_2 = 1.8 \times 10^4 e^{-4680/T}$$

$$k_{-2} = 3.81 \times 10^3 e^{-20820/T}$$

$$k_3 = 7.81 \times 10^7 e^{-450/T}$$

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

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

$$[\text{O}] = 36.64 T^{0.5} [\text{O}_2]^{0.5} \exp(-27123/T) \quad (29)$$

مکانیزم سریع که توسط فنیمر شناسایی شد. بر این مبنای که رادیکال‌های هیدروکربن در ناحیه ابتدایی احتراق با مولکول‌های نیتروژن واکنش می‌دهد. این نوع مکانیزم از مکانیزم حرارتی پیچیده تر 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.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = f k'_{pr} [\text{O}_2]^a [\text{N}_2] [\text{fuel}] \exp\left(\frac{-E'_a}{RT}\right) \quad (30)$$

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].

$$k'_{pr} = 6.4 \times 10^6 (RT/p)^{a+1} \quad (31)$$

$$a = \begin{cases} 1.0 & X_{O_2} \leq 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2} & 4.1 \times 10^{-3} \leq X_{O_2} \leq 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.935 - 0.1 \ln X_{O_2} & 1.11 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0.03 \\ 0 & X_{O_2} \geq 0.03 \end{cases} \quad (32)$$

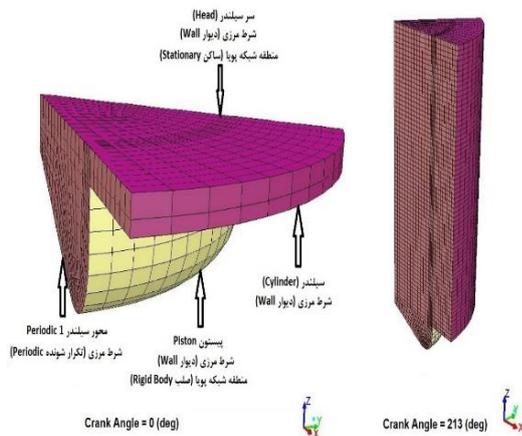
#### ۴-۶- تشکیل دوده (Soot)

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 شکل گیری  $\text{CO}_2$  و  $\text{HO}_2$  خواهد شد. مقدار اکسیژن مورد نیاز برای احتراق کامل، اکسیژن استوکیومتری  $\text{O}_{2, \text{st}}$  نامیده می‌شود. اگر مقدار اکسیژن از مقدار استوکیومتری آن کمتر باشد، شرایط مناسبی برای تشکیل دوده فراهم می‌شود [۱۰].

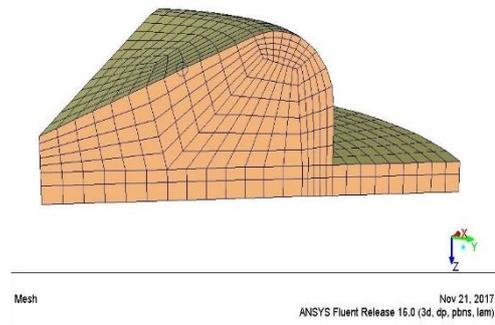
با توجه به پیچیدگی‌های سینتیک تشکیل دوده، با ساده سازی سینتیک تشکیل دوده به صورت مجزا از سینتیک احتراق در نظر

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<sup>۱</sup>) در ۲۱۳ درجه میل‌لنگ تا زمان باز شدن سوپاپ خروجی (EVO<sup>۲</sup>) در ۴۸۰ درجه میل‌لنگ انجام می‌گیرد. لذا از مدل شبکه پویا<sup>۳</sup> در نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. در این مدل روش لایه‌بندی<sup>۴</sup> انتخاب و طبق داده‌های جدول (۱) تنظیمات مربوط به مدل In-Cylinder انجام می‌گردد. پس از تعیین نوع مناطق شبکه پویا<sup>۵</sup> 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 ۷: شبکه‌بندی موتور مورد آزمایش برای محفظه‌ی احتراق در حالت نقطه مرگ بالا



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

تعداد گره‌ها	۳
تعداد رویه‌های سطحی	۷۶۳
تعداد کل سلول‌ها	۴۰۰

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 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.

نوع شرایط مرزی<sup>۶</sup> 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 فازی احتراق، محاسبات ترکیب گازها، آلاینده‌ها و شبیه‌سازی اسپری سوخت را دارند. در مدل Species شبیه‌سازی احتراق در موتور دیزل در قسمت

<sup>۱</sup> Intake Valve Close

<sup>۲</sup> Exhaust Valve Open

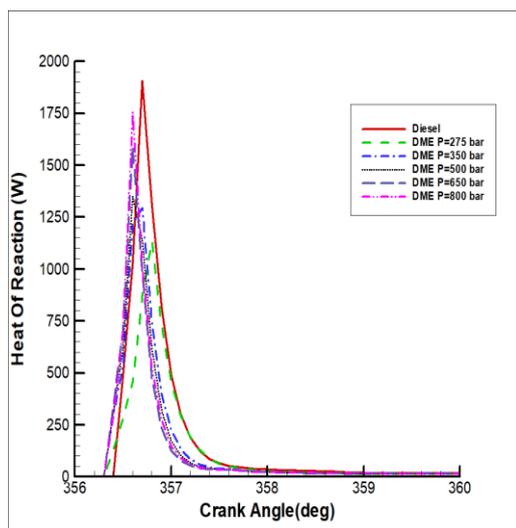
<sup>۳</sup> Dynamic Mesh

<sup>۴</sup> Layering

<sup>۵</sup> Dynamic Mesh Zones

<sup>۶</sup> Boundary Conditions

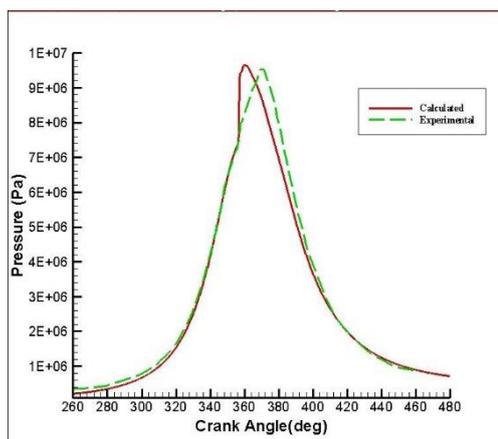
شکل (۱۱) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی گرمای واکنش<sup>۱</sup> برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنیم، نرخ آزادسازی حرارت در سوخت دی متیل اتر کمتر از دیزل می‌باشد. علت این امر این است که در سوخت دی متیل اتر به علت 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- آلاینده‌ی NO<sub>x</sub>

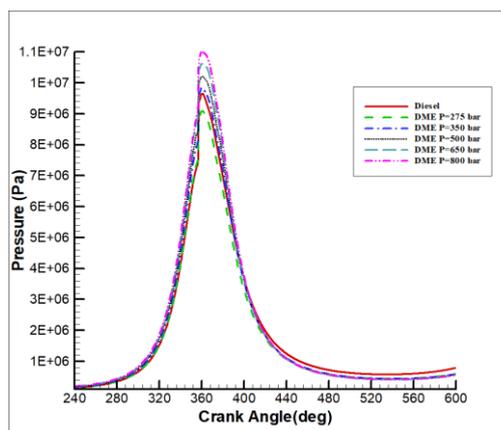
شکل (۱۲) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر چگونگی شکل‌گیری NO<sub>x</sub> در موتور مورد بررسی را نشان می‌دهد. مولکول‌های نیتروژن در اثر دمای بالا (بالا‌تر از ۱۶۲۲ درجه کلوین) تجزیه و با اکسیژن هوا یا سوخت ترکیب شده و اکسیدهای ازت را تشکیل می‌دهد. اکسید 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

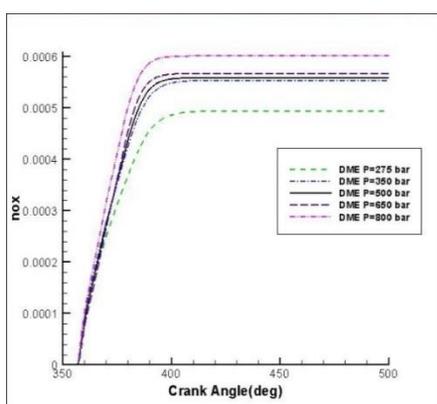
شکل (۱۰) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر روی فشار متوسط داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. زمان تأخیر در اشتعال سوخت دی متیل اتر به دلیل داشتن عدد ستان بالا کوتاه‌تر از سوخت دیزل است. این امر باعث می‌شود زمان تأخیر در محفظه احتراق کمتر شده 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.

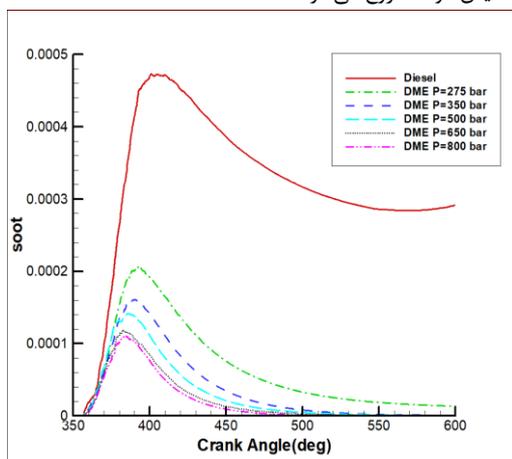
<sup>۱</sup> Heat of Reaction



شکل ۱۳: چگونگی شکل گیری NO<sub>x</sub> در موتور با تغییر فشار پاشش سوخت دی متیل اتر

#### ۱۱- آلاینده‌ی Soot

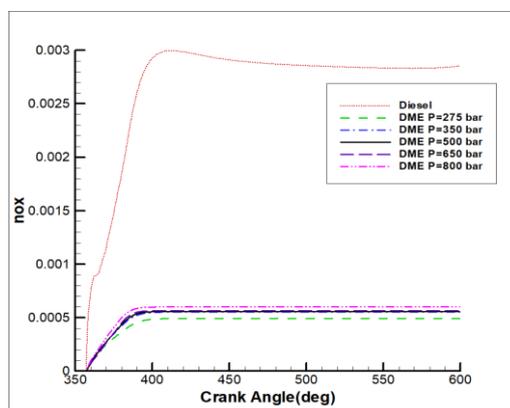
شکل (۱۴) مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر بر چگونگی شکل گیری Soot در موتور مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابتدا آلاینده دوده به شدت افزایش و سپس کاهش می‌یابد که علت افزایش اول را می‌توان ناشی از احتراق پیش آمیخته دانست که تأثیری بر خروجی دوده نهایی ندارد زیرا هنگامی که احتراق پیش آمیخته رخ می‌دهد اکسیژن در دسترس در اطراف شعله به شدت کاهش می‌یابد که منجر به این افزایش اولیه می‌شود ولی با گذشت 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 شکل گیری Soot در موتور در مقایسه بین سوخت دیزل و تأثیر تغییر فشار پاشش سوخت با استفاده از سوخت دی متیل اتر

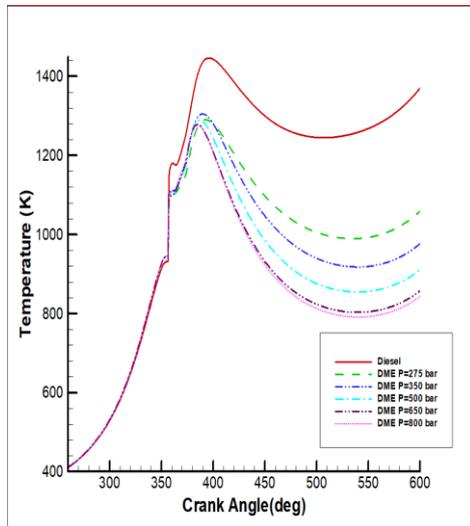
در واقع قسمتی که به آلاینده دوده برمی‌گردد احتراق نفوذی است و با گذشت زمان در هنگام احتراق نفوذی ذرات کربن با اکسیژنی که بعداً در اختیار مولکول‌ها قرار می‌گیرند، ترکیب و مصرف می‌شوند. مهم‌ترین پارامترهایی که روی میزان تولید Soot تأثیر می‌گذارد عبارت‌اند از نسبت C/H، دما و فشار. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده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

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



شکل ۱۵: چگونگی شکل گیری NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> اصولاً به قسمت احتراق پیش آمیخته برمی‌گردد و با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود هنگامی که فشار پاشش سوخت افزایش یافته، سهم احتراق پیش آمیخته افزایش می‌یابد. روشن است که اولین بخش گازهای سوخته عامل اصلی افزایش میزان آلاینده NO<sub>x</sub> می‌شود که آن‌هم از احتراق پیش آمیخته نشأت می‌گیرد.



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

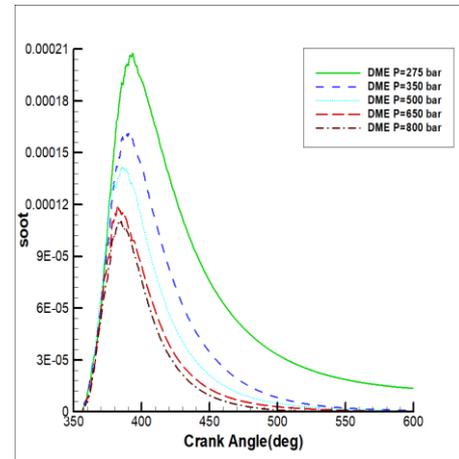
### ۱۳- نتیجه گیری

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
$\Delta T$	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
$Pr_{Tsoot}$	عدد پرائنتل آشفته انتقال دوده
$R_{soot}$	نرخ تولید دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$
$R_{soot\ form}$	نرخ تشکیل دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$
$R_{soot\ comb}$	نرخ احتراق دوده، $Kgm^{-3}s^{-1}$
$C_s$	ثابت تشکیل دوده، $KgN^{-1}m^{-1}s^{-1}$
$Y_{OX}$	کسر جرمی اکسنده
$Y_{fuel}$	کسر جرمی سوخت
علائم یونانی	
$\tau_{id}$	تأخیر در اشتعال، ms
$\rho$	چگالی سیال، $Kgm^{-3}$
$\varphi$	نسبت هم ارزی
$\mu$	لزجت سیال، $kgm^{-1}s^{-1}$
$\lambda$	ضریب هدایت حرارتی، $Wm^{-2}K^{-1}$
$\tau$	تنش برشی، $Nm^{-2}$
$\Omega$	نرخ بیشینه رشد امواج ناپایدار
$\varepsilon$	نرخ اتلافات، $m^2s^{-3}$
$\sigma_k$	عدد پرائنتل توربولانت
$\sigma_\varepsilon$	عدد پرائنتل اتلافات

ریزتر می شود و در واقع گردآفشانی 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 عبارتند 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.

## 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

## فهرست علامت ها

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 آلاینده‌گی 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 رایبک، 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