



## مطالعه عددی فرآیند احتراق و کاهش آلاینده‌ها در یک موتور دیزلی با پاشش مستقیم

### متیل اتر (DME) به عنوان سوخت جایگزین

حسن خاتم نژاد - دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه ارومیه

شهرام خلیل آریا و صمد جعفرمدار - استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

فرشاد کیاقبادی - دانشجوی کارشناسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت

E-mail: [n.khatamnejad@gmail.com](mailto:n.khatamnejad@gmail.com)

چکیده: کاهش همزمان آلاینده‌های اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) و دوده (Soot) به منظور رعایت استانداردهای آلاینده‌ها، از معضلات مهم در زمینه توسعه موتورهای دیزلی محسوب می‌شوند. دی‌متیل‌اتر (DME) یکی از سوخت‌هایی است که به علت برخی ویژگی‌ها از قبیل عدد ستان بالا، دمای خود اشتعالی پایین، آلاینده‌ها ناچیز و خواص فیزیکی مشابه با گازهای نفتی مایع (LPG) به عنوان سوخت جایگزین خوب در موتورهای اشتعال تراکمی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی و به روش CFD احتراق و آلاینده‌ها موتورهای اشتعال تراکمی با پاشش مستقیم دی‌متیل‌اتر به عنوان سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل با نتایج حاصل از سوخت دیزل معمول مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر فشار سیلندر، نرخ آزادسازی حرارت و دمای متوسط گاز داخل سیلندر در موتورهای DME کمتر از موتورهای دیزل می‌باشد. همچنین انتشار آلاینده‌های اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) و دوده (Soot) نسبت به موتورهای دیزلی معمولی کاهش محسوس می‌یابد.

واژه های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، احتراق، سوخت رقیق، هوای داغ و رقیق، کوره، صرفه جویی انرژی.

## Numerical Study of Combustion and Emissions in a Diesel Engine with DI of Di-methyl Ether (DME) as an Alternative Fuel

H. Khatamnezhad, M.S. Student Dept. of Mech. Eng., the Faculty of Eng., Ouremeh University

S. Khalil Arya and S. Jafarmadar, Ass. Prof., the Faculty of Eng., Ouremeh University

F. Kiaghobady, M.S. Student Dept. of Rail Eng., Iran University of Science and Technology

**Abstract:** To meet the requirements of regulations on exhaust emissions, the simultaneous reduction of  $\text{NO}_x$  and soot emissions is the major challenges of the diesel engine development. Di-methyl ether (DME) is the one of the fuels that due to their properties so as high cetane number, low auto ignition temperature, lowest emissions and similar physical properties to the liquid petroleum gas (LPG), has been attracting attention as an alternative fuel. In this paper, combustion and emission characteristics of CIDI engines by use of DME as an alternative fuel has been investigated via numerical simulation and CFD procedure and the results have been compared to diesel fuelled engine. The results indicate the peak values of the in-cylinder pressure, heat release rate and temperature in the DME fuelled engine is lower than that of the diesel engine. Also  $\text{NO}_x$  and soot emissions from DME fuelled engine are reduced in compared to diesel engine, obviously.

**Keywords:** Ether (DME), Alternative Fuel, CI engines, Combustion and Emission.

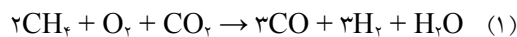
## ۱- مقدمه

به همراه گرایش به سمت هوای پاکیزه و وابستگی کمتر به فرآورده‌های نفتی وارداتی، علاقه به مصرف سوخت‌های جایگزین در صنعت حمل و نقل، در سال‌های اخیر روبه افزایش بوده است. از جمله این سوختها می‌توان از انواع الکل‌ها به- خصوص متانول و اتانول، دی‌متیل اتر، گاز طبیعی فشرده (CNG) و گاز نفتی مایع (LPG) نام برد [۱].

گاز مایع دی‌متیل اتر با فرمول شیمیایی  $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$  به عنوان یک سوخت ساده و سبک اکسیژن‌دار که قابلیت استفاده در موتورهای سیکل دیزل را دارد مطرح می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات DME و دیزل با هم مقایسه شده است. از ویژگی‌های مهم DME محتوی اکسیژن بالا، دمای جوش پایین و عدد ستان بالای آن می‌باشد. اما ارزش حرارتی و لزجت آن نسبت به دیزل کمتر می‌باشد. نسبت جرمی هوا به سوخت DME در حالت واکنش احتراق استوکیومتری یک معادل ۹ است که این مقدار از سوخت معمول دیزل کمتر می‌باشد. دلیل کم شدن این نسبت وجود یک اتم اکسیژن در ساختار ملکولی DME است که این اتم اکسیژن در واکنش احتراق شرکت نمی‌کند [۲].

از ویژگی‌های دیگر DME، استحصال آن از منابع طبیعی شامل ذغالسنگ، زیست توده (Biomass) و گاز طبیعی می‌باشد. با در نظر گرفتن اینکه منابع گاز طبیعی در ایران به وفور وجود دارد و ایران به عنوان دومین کشور تولید کننده گاز طبیعی در جهان مطرح است، می‌توان با تولید DME از گاز طبیعی، از آن به عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی استفاده نمود. مراحل تولید دی‌متیل اتر از گاز طبیعی بصورت زیر می‌باشد:

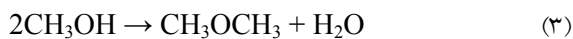
الف) تهیه منوکسید کربن از گاز طبیعی



ب) تهیه متانول از گاز منوکسید کربن



ج) فرآیند آب زدائی از متانول



خواص فیزیکی DME مشابه LPG می‌باشد. لذا مخازن ذخیره LPG و همچنین فناوری‌های بکار رفته در توزیع، انتقال و مصرف آن، برای DME نیز قابل استفاده می‌باشد. پیوندهای بین مولکولی در آنها با انرژی فعال سازی نسبتاً کمتری شکسته و مولکول به رادیکال تبدیل می‌شود. این ویژگی موجب زیاد شدن عدد ستان این مواد می‌شود و در نتیجه بر خلاف LPG و CNG و الکل‌ها برای شروع واکنش احتراقی نیازی به جرقه ندارد و از این سوخت می‌توان براحتی در موتورهای اشتعال ترکیبی استفاده کرد [۳،۴].

بنابراین در کار حاضر، استفاده از DME به عنوان سوخت جایگزین به منظور کاهش همزمان آلاینده های  $\text{NO}_x$  و Soot در موتورهای اشتعال ترکیبی پاشش مستقیم مورد بررسی قرار خواهد گرفت و با نتایج حاصل از موتور دیزلی مقایسه خواهد شد. بدین منظور در ابتدا مدلسازی صورت گرفته بر روی موتور نمونه دیزلی، با نتایج تجربی اعتباردهی می‌گردد و سپس بهینه سازی بر روی موتور نمونه انجام خواهد گرفت است.

## ۲- شرح مدلسازی عددی

## ۲-۱- مدل‌های احتراق و اسپری سوخت و آلاینده‌گی

مدلسازی احتراق در موتور دیزلی، به دلیل فرآیندهای پیچیده زیادی که بصورت همزمان در محفظه احتراق صورت می‌گیرد، از قبیل پاشش سوخت، جدایش اسپری، تبخیر، خوداشتعالی، احتراق و تولید درهمی، تشکیل

## ۲-۲- روش محاسبات

مدلسازی عددی موتور دیزلی سنگین Caterpillar 3406 با جزئیات شرح داده شده در جدول (۲) با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی AVL-FIRE انجام می‌شود. بعلاوه اینک نازل انژکتور دارای ۶ سوراخ می‌باشد، تنها یک قطاع ۶۰ درجه از محفظه احتراق، برای کاهش زمان محاسبات مدل می‌شود. شکل (۱) این شبکه عددی را در نقطه مرگ بالا نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۲) و (۳) بترتیب مقایسه فشار داخل سیلندر و نرخ آزادسازی حرارت بین نتایج تجربی و نتایج مدلسازی برای حالت تزریق سوخت تک‌مرحله‌ای و با شروع پاشش ۸/۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا برای موتور نمونه نشان داده شده است. بطوریکه مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان منحنی فشار تجربی [۱۲] و فشار پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی وجود دارد. در نمودار نرخ آزادسازی حرارت نیز حداکثر احتراق پیش‌آمیخته بخوبی پیش‌بینی شده و روند منحنی در قسمت احتراق پخشی با نتایج تجربی [۱۲] همخوانی دارد.

شکل‌های (۴) و (۵) منحنی میزان آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و Soot پیش‌بینی شده توسط مدلسازی و میزان آلاینده‌های محاسبه شده بصورت تجربی [۱۲] در موتور نمونه دیزلی را نشان می‌دهند.

## ۳- نتایج و بحث

تطابق خوب میان نتایج محاسبه شده توسط مدل و نتایج تجربی [۱۲] در حالت کارکرد موتور نمونه دیزلی، اعتماد لازم

مخلوط و انتقال حرارت بسیار مشکل می‌باشد. مدل درهمی بکاررفته  $k-\varepsilon$  می‌باشد که برای جریان‌های با چگالی متغیر اصلاح شده است.

الگوی Shell برای مدلسازی خوداشتعالی بکار گرفته می‌شود [۵،۶]. فرآیند احتراق با استفاده از مدل Eddy Breakup مدل می‌شود. در این مدل، نرخ مصرف سوخت به عنوان تابعی از ویژگی‌های محلی جریان معرفی می‌شود [۷]. در این مدل کمترین نرخ توزیع سوخت، اکسیژن و محصولات به عنوان نرخ واکنش سوخت در نظر گرفته می‌شود و معادله انتقال برای جزء جرمی سوخت به صورت زیر می‌شود:

$$S_{fi} = -\rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \min \left[ C_R m_{fi}, C_R \frac{m_{ox}}{s}, C'_R \frac{m_{pr}}{I+s} \right] \quad (4)$$

در معادله بالا  $k$  انرژی جنبشی درهمی و  $\varepsilon$  نرخ توزیع  $k$  می‌باشد.  $m_{pr}$ ،  $m_{ox}$ ،  $m_{fi}$  بترتیب جزء جرمی سوخت، اکسیژن و محصولات می‌باشد.  $C'_R$  و  $C_R$  به عنوان ثابت‌های مدل در نظر گرفته می‌شوند. مدل استاندارد Wave برای شرح جدایش اولیه و ثانویه بکاررفته است [۸]. در این مدل قطر قطرات خروجی از نوک نازل با قطر نازل برابر در نظر گرفته می‌شود. مدل تبخیر Dukowicz با فرض توزیع یکنواخت دما، برای بررسی انتقال حرارت و تبخیر شدن قطرات استفاده شده است [۹]. در این مدلسازی، مدل Zeldovich برای مکانیزم تشکیل  $\text{NO}_x$  بکار گرفته می‌شود [۱۰]. تولید  $\text{NO}_x$  به تغییرات دمایی در داخل سیلندر بسیار حساس می‌باشد و در این مدل تشکیل اکسید نیتروژن یک واکنش وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود. مدل Kennedy Hiroyasu, Magnussen برای مدلسازی تشکیل و اکسیدشدن Soot بکار می‌رود [۱۱].

این امر می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. هنگامی که دمای داخل محفظه افزایش می‌یابد، پیوند بین مولکولی  $O_2$  و  $N_2$  شکسته شده و تولید رادیکال‌های  $N$  و  $O$  می‌شود. با افزایش دمای برخی از مناطق داخل محفظه احتراق به بالای  $2000K$ ، انرژی مورد نیاز برای پیوند  $NO$  تامین می‌شود و  $NO_x$  تولید می‌گردد. با توجه به شکل (۸) مقدار بیشینه دمای متوسط داخل سیلندر در موتور  $DME$  پایین‌تر از دیزل می‌باشد و متناظر آن تولید  $NO_x$  هم در آن کمتر است که از مزایای سوخت  $DME$  به‌شمار می‌آید. بطوریکه در بخش‌های قبلی نیز اشاره رفت،  $DME$  دارای یک اتم اکسیژن در ساختار خود می‌باشد. این اتم با اتم  $O$  تولید شده از پیوند  $O_2$  موجود در هوا، ترکیب شده و تولید  $O_2$  می‌کند که سبب می‌شود تا قسمت عمده‌ای از اتم  $O$  تبدیل به مولکول اکسیژن شود و از تولید  $NO_x$  جلوگیری کند. همچنین وجود این اتم اکسیژن در سوخت باعث احتراق کامل سوخت می‌گردد و همین امر باعث می‌شود که فشار محفظه احتراق بیهوده بالا نرود و متناظر آن دما هم زیاد نمی‌شود و تولید  $NO_x$  نیز کاهش می‌یابد.

بطور که از شکل (۱۰) مشهود است، مقدار آلاینده  $Soot$  در موتور  $DME$  تقریباً به صفر رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که  $DME$  تقریباً بطور کامل می‌سوزد و درصد سوخت نسوخته بسیار پایین است و تقریباً صفر می‌باشد. علت این امر ساختار سوخت  $DME$  می‌باشد و باز هم به‌وجود یک اتم اکسیژن در ساختار آن بر می‌گردد که باعث زیاد شدن تعداد رادیکال‌های اکسیژن در داخل سیلندر و ترکیب بیشتر رادیکال‌های سوخت با اتم اکسیژن می‌گردد و تقریباً هیچ سوخت نسوخته‌ای در محفظه نمی‌ماند. البته تولید  $Soot$  در مراحل اولیه احتراق به‌علت تجزیه حرارتی بیشتر سوخت در  $DME$  بیشتر از دیزل است که در ادامه به علت حضور اتم اکسیژن در  $DME$  اکسید می‌گردد.

برای صحت پیش‌بینی مدل در شرایط مختلف کاری را به ما می‌دهد. محاسبات در یک سیکل بسته از زمان بسته شدن سوپاپ ورودی ( $IVC$ ) در  $213$  درجه میل‌لنگ تا زمان باز شدن سوپاپ خروجی ( $EVO$ ) در  $494$  درجه میل‌لنگ انجام می‌گیرد.

در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) بترتیب مقایسه بین فشار متوسط داخل سیلندر، نرخ آزادسازی حرارت و دمای متوسط داخل سیلندر میان موتور دیزلی و موتور  $DME$  نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم، نرخ آزادسازی حرارت در  $DME$  کمتر از دیزل می‌باشد. علت این امر بدلیل وجود یک اتم اکسیژن در ساختمان مولکولی  $DME$  است و عدم وجود پیوند  $C-C$ ، انرژی کمتری صرف شکستن پیوند بین اتم‌های آن می‌شود که سبب می‌شود ارزش حرارتی و حرارت آزاد شده آن نسبت به دیزل پایین‌تر باشد. با کاهش حرارت آزاد شده در  $DME$ ، دمای محفظه احتراق آن نسبت به دیزل کمتر می‌گردد. در نتیجه مقدار بیشینه فشار داخل سیلندر در موتور  $DME$  کمتر از دیزل می‌باشد. همچنین  $DME$  به‌دلیل برخوردار بودن از عدد ستان بالا (بیشتر از ۵۵)، زمان تاخیر در اشتعال کمتری نسبت به دیزل دارد و لذا میزان مخلوط سوخت و هوای تشکیل شده در زمان تاخیر در اشتعال کمتر می‌شود و به‌همین دلیل، مطابق شکل (۷) احتراق پیش‌آمیخته در موتور  $DME$  زودتر از موتور دیزلی شروع می‌شود. این مسئله سبب می‌شود تا مقدار بیشینه احتراق پیش‌آمیخته در موتور  $DME$  کمتر از موتور دیزلی شود و در نتیجه میدان‌های حرارتی بالا و فشار ماکزیمم نسبت به موتور دیزل کمتر باشد.

شکل (۹) مقایسه بین تولید آلاینده  $NO_x$  بین موتور دیزل و  $DME$  را نشان می‌دهد. بطوریکه مشاهده می‌شود، مقدار تولید  $NO_x$  در موتور  $DME$  نسبت به دیزل به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و تقریباً به نصف مقدار آن در دیزل رسیده است که

اکسیژن در مولکول دی متیل اتر اکسید می‌شود و در نهایت جرم Soot تولید شده نزدیک به صفر می‌شود.

#### ۵- مراجع

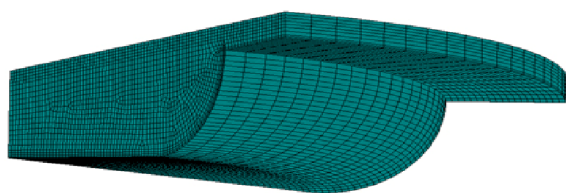
- [1] Sorensen, S. C. and Mikkelsen, S. E., "Performance and emission of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat Dimethyl Ether", SAE Paper 950064, 1995.
- [2] Ofner H, Gill D W, Krotscheck C, "Dimethyl ether as fuel for CI engines a new technology and its environmental potential", SAE Paper 981158, 1998.
- [3] Tsuchiya T, Sato Y. , "Development of DME engine for heavy-duty Truck", SAE Paper 2006-01-0052; 2006.
- [4] Junhua WU, Zhen HUANG, Xinqi QIAO, Jun LU, Junjun ZHANG, Liang ZHANG., "Study of combustion and emission characteristics of turbocharged diesel engine fuelled with dimethylether", Higher Education Press and Springer-Verlag 2008.
- [5] Halstead, M., Kirsch, L., Quinn, C., The Auto Ignition of Hydrocarbon Fueled at High Temperatures and Pressures-Fitting of a Mathematical Model, Combustion Flame Vol. 30, (1977), 45-60.
- [6] AVL FIRE user Manual, V. 8.3, (2004).
- [7] Versteeg, Malalasekera An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Mc Grow- Hill Book Company, ISBN 964-454-375-0, 1995.
- [8] Liu, A.B. and Reitz, R.D., Modeling the Effects of Drop Drag and Break-up on Fuel Sprays, SAE Paper, No. 930072, 1993.
- [9] Dukowicz, J.K., Quasi-Steady Droplet Change in the Presence Of Convection, Informal Report Los Alamos Scientific Laboratory, LA7997-MS.

در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) کانتورهای  $\text{NO}_x$  و Soot در یک صفحه عمودی از مرکز اسپری در  $370^\circ$  و  $385^\circ$  میل‌لنگ در موتور دیزل و DME آورده شده است. بطوریکه مشاهده می‌شود در هر دو حالت میزان تولید  $\text{NO}_x$  در موتور DME کمتر از دیزل می‌باشد. اما در موتور DME در  $370^\circ$  به‌علت تجزیه حرارتی بیشتر دی متیل اتر Soot بیشتری تولید می‌شود که در ادامه بواسطه حضور اتم اکسیژن، اکسید می‌شود.

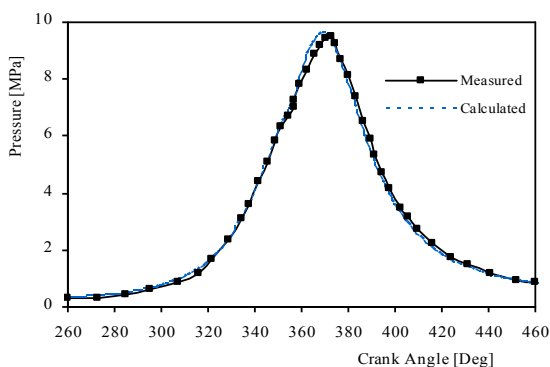
#### ۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی تاثیر استفاده از سوخت جایگزین DME بر روی احتراق و آلاینده‌گی در یک موتور احتراق تراکمی با پاشش مستقیم بررسی گردید. بدین منظور ابتدا موتور دیزل مورد مطالعه (Caterpillar 3406) انتخاب و سپس با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی AVL-FIRE مدل‌سازی عددی محفظه احتراق موتور مذکور انجام گردید. نتایج مدل‌سازی شامل منحنی فشار داخل سیلندر، نرخ آزادسازی حرارت و میزان آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و Soot تطابق خوبی با نتایج تجربی [۱۲] نشان داد که نشان دهنده صحت مدل‌سازی عددی صورت گرفته بود.

نتایج نشان می‌دهند که در موتور با سوخت DME نسبت به دیزلی، مقادیر حداکثر فشار و نرخ آزادسازی حرارت و دمای متوسط سیلندر کمتر می‌باشد. این موضوع باعث عدد ستان بالاتر DME و احتراق پیش‌آمیخته کمتر است که در نتیجه سبب می‌شود تا میدان‌های حرارتی بالا و فشار ماکزیمم نسبت به موتور دیزل کمتر باشد. تولید  $\text{NO}_x$  در موتور DME در تمام مراحل احتراق، به علت دمای پایین‌تر مخلوط داخل محفظه و وابستگی تولید  $\text{NO}_x$  به دما، کمتر می‌باشد. تولید Soot در موتور DME در مراحل اولیه احتراق باعث تجزیه حرارتی بیشتر سوخت، افزایش می‌یابد که در ادامه احتراق به‌دلیل حضور یک اتم

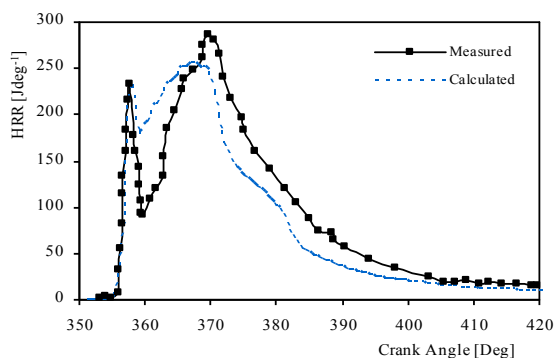


شکل (۱): ساختار شبکه محاسباتی



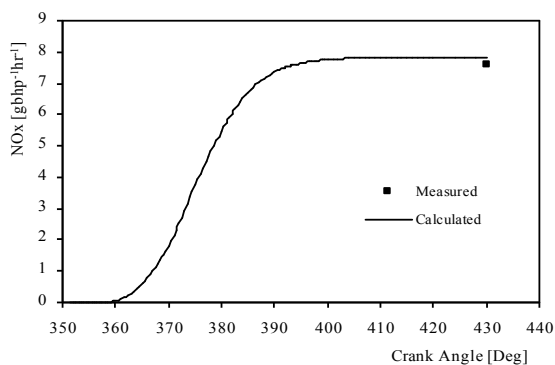
شکل (۲): مقایسه بین فشار داخل سیلندر محاسبه شده توسط

مدلسازی و تجربی [۱۲]



شکل (۳): مقایسه بین نرخ آزادسازی حرارت محاسبه شده

توسط مدلسازی و تجربی [۱۲]



شکل (۴): مقایسه بین NO<sub>x</sub> محاسبه شده و تجربی [۱۲]

[10] Zeldovich, Y. B., Sadochnikov, P. Y. and Frank-Kamenetskii, D. A., Oxidation of Nitrogen in Combustion, Translation by M. Shelef, Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.

[11] Heywood, J.B. 1976, Pollutant Formation and Control in Spark-Ignition Engines, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 1, pp. 135-164, 1976.

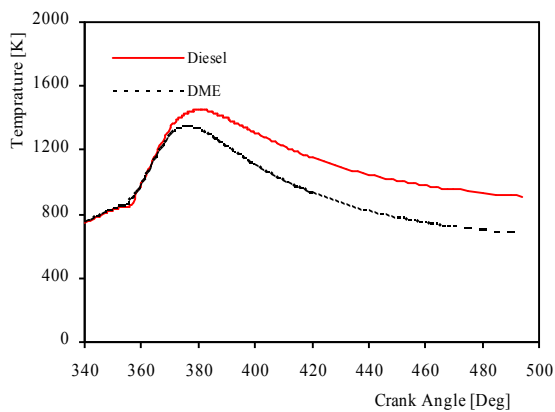
[12] Rutland, C. J., N. Ayoub, Z. Han, et al., Diesel engine model and development and experiments, SAE paper 951200, SAE International, Warrendale, Pa, USA, 1995.

جدول (۱): خواص ترمو فیزیکی و شیمیایی دی متیل اتر و دیزل

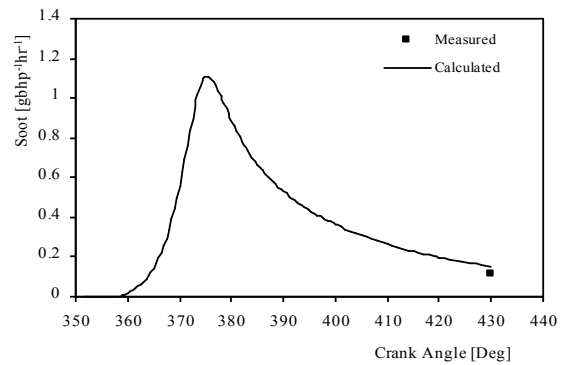
ویژگی	دیزل	دی متیل اتر
فرمول شیمیایی	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>1.8n</sub>
وزن مولکولی (g)	46.07	190-220
دمای جوش (°C)	-24.9	180-360
چگالی مایع (g/cm <sup>3</sup> )	0.668	0.84
فشار بخار (MPa)	0.51(20°C)	<0.001(20°C)
ارزش حرارتی پایین (MJ/kg)	28.4	42.5
عدد ستان	55-66	40-55
دمای خوداشتعالی (°C)	235	250
غلظت اکسیژن (%)	34.8	0
نسبت هوا به سوخت استوکیومتری	9.0	14.6

جدول (۲) مشخصات موتور

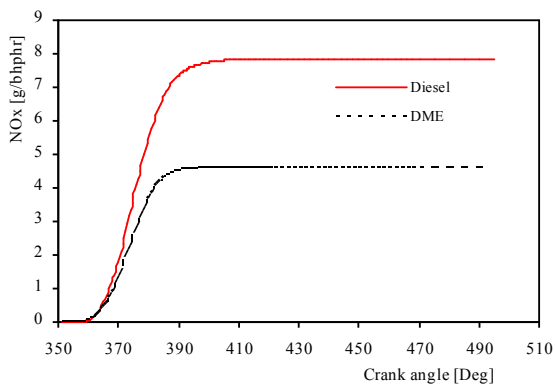
نوع موتور	Caterpillar 3406 DI diesel engine
سرعت موتور	1600 rpm
طول کورس × قطر	137.19 × 165.1 mm
حجم جابجایی	2.44 litres
قدرت	39 kW (52 hp)
نسبت تراکم	15:1
تعداد سوراخ انژکتور	6



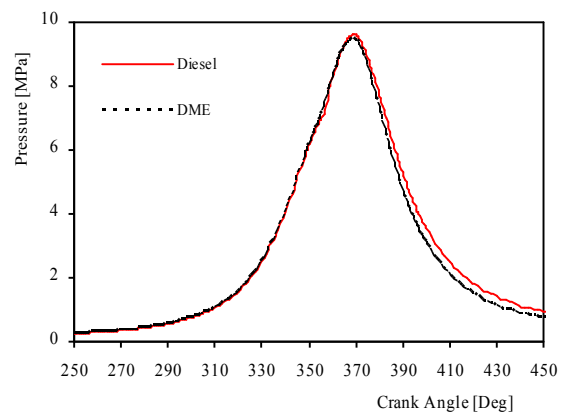
شکل (۸): مقایسه بین دمای متوسط داخل سیلندر در موتور دیزل و DME



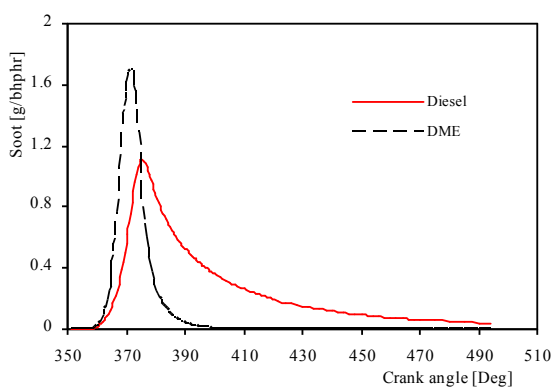
شکل (۵): مقایسه بین Soot محاسبه شده و تجربی [۱۲]



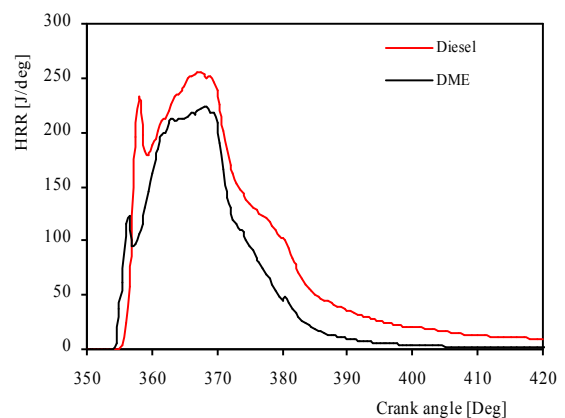
شکل (۹): مقایسه بین تولید آلاینده NO<sub>x</sub> در موتور دیزل و DME



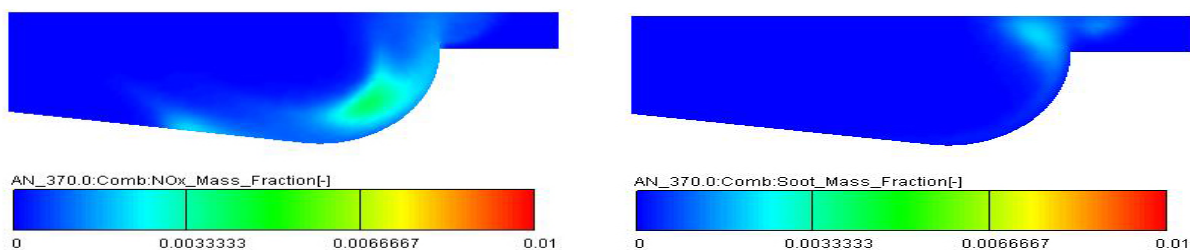
شکل (۶): مقایسه بین فشار متوسط داخل سیلندر در موتور دیزل و DME



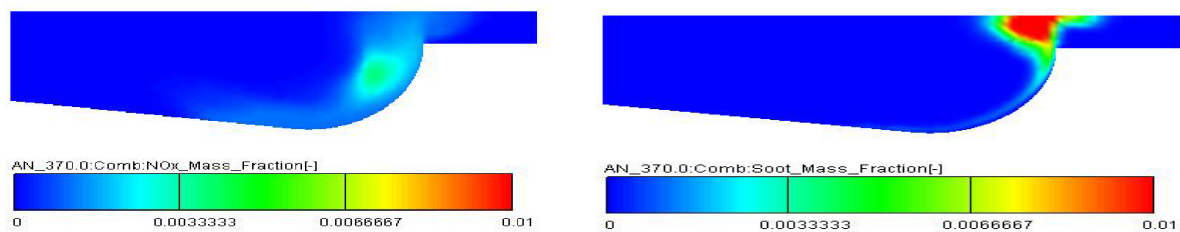
شکل (۱۰): مقایسه بین تولید آلاینده Soot در موتور دیزل و DME



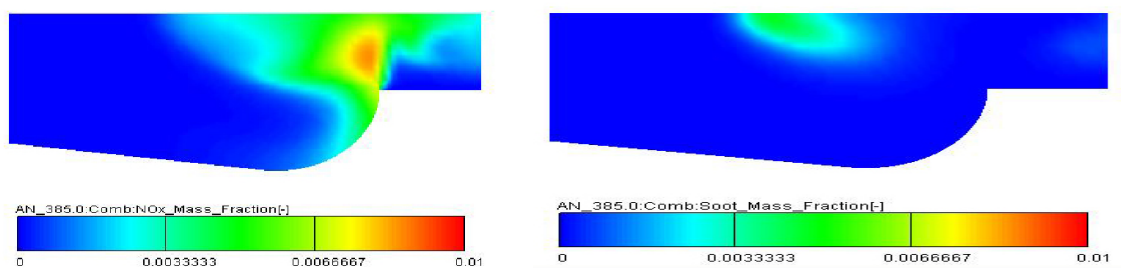
شکل (۷): مقایسه بین نرخ آزادسازی حرارت در موتور دیزل و DME



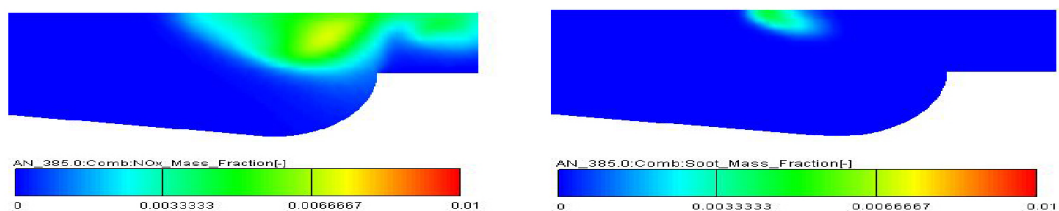
شکل (۱۱): کانتور تولید  $\text{NO}_x$  و Soot در موتور دیزل در  $370^\circ$  میل لنگ



شکل (۱۲): کانتور تولید  $\text{NO}_x$  و Soot در موتور DME در  $370^\circ$  میل لنگ



شکل (۱۳): کانتور تولید  $\text{NO}_x$  و Soot در موتور دیزلی در  $385^\circ$  میل لنگ



شکل (۱۴): کانتور تولید  $\text{NO}_x$  و Soot در موتور DME در  $385^\circ$  میل لنگ