



بررسی عددی کاهش آلاینده‌گی NO_x در موتور احتعال تراکمی با پاشش مستقیم دی متیل اتر (DME)

آرش نعمتی، حسن خاتم نژاد و حسین عریانی - دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه
شهرام خلیل آریا و صمد جعفرمدار - استادیار گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه

E-mail: arash_nemati_ir@yahoo.com

چکیده: در سالهای اخیر تلاش های زیادی در جهت کاهش آلاینده‌گی ها و کاهش میزان مصرف سوخت در موتورهای احتعال تراکمی انجام گرفته است. یکی از روشهای رسیدن به این هدف استفاده از سوخت های جایگزین در این نوع از موتورهاست. دی متیل اتر (DME) به علت ویژگی های خاصی از قبیل عدد ستان بالا، دمای خود اشتعالی پایین و آلاینده‌گی ناچیز یکی از سوختهای جایگزین مناسب می باشد. در مقاله حاضر با استفاده از یک مدل CFD سه بعدی تاثیر استفاده از سوخت دی متیل اتر به جای سوخت دیزل روی فرآیند احتراق و تولید آلاینده‌گی های موتور دیزلی پاشش مستقیم بررسی شده است. مهمترین آلاینده هایی که در موتور دیزل تولید می شوند اکسید نیتروژن (NO_x) و دوده (Soot) می باشند. بعلت وجود مولکول اکسیژن در ساختار شیمیایی سوخت دی متیل اتر آلاینده Soot در خروجی موتور تقریبا صفر است. آلاینده NO_x نیز نسبت به حالت دیزل خیلی کمتر است. در این مقاله تلاش میشود روش هایی برای کاهش هر چه بیش تر آلاینده NO_x در موتور DME سوز نسبت به حالت پایه بدست آورد. نتایج این مدل با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه شده و تطابق خوبی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: دی متیل اتر، موتور احتعال تراکمی، کاهش آلاینده‌گی NO_x ، احتراق، کاهش مصرف سوخت.

Numerical Analysis of the NO_x Emission Reduction in a CI Engine with Direct Injection of DME

A.Nemati, H. Khatamnezhad and H.Oryani, M.Sc. Student, Dept. of Energy Conversion, the Faculty of Mech. Eng., Urmia University

Sh. Khalil Arya, S. Jafarmadar, Ass. Prof., Dept. of Energy Conversion, the Faculty of Mech. Eng., Urmia University

Abstract: Many efforts have been done in the recent years to decrease emission and fuel consumption in compression ignition engines. Alternative fuels are one of the best methods to meet this aim. Dimethyl ether is the one of the fuels that due to its properties such as high cetane number, low auto ignition temperature, lowest emissions due to the presence of oxygen in its molecule is one of the best alternative fuels. In this paper, combustion and emission characteristics of a CIDI engines by use of DME as an alternative fuel has been investigated via numerical simulation and CFD procedure. NO_x and Soot are the major emissions in the CIDI engines. Due to the high presence of oxygen in DME molecule Soot emission is negligible in the exhaust gas. In this paper we investigated the ways of NO_x emission reduction in a DME compression ignition engine. The results show good agreement with the literature.

Keywords: DME, IC engines, NO_x emission reduction, Combustion, fuel consumption reduction.

۱- مقدمه

کاهش همزمان آلاینده های اکسید نیتروژن (NOx) و دوده (Soot) که آلاینده های اصلی ناشی از موتور های اشتعال تراکمی هستند به یکی از مهم ترین دغدغه های سازندگان این موتورها در سال های اخیر تبدیل شده است. توانایی دی متیل اتر در کاهش همزمان این دو آلاینده بخصوص آلاینده Soot باعث مورد توجه قرار گرفتن این سوخت جایگزین شده است [1-3].

فرمول شیمیایی دی متیل اتر بصورت $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ می باشد که در آن فقط پیوندهای C-H و C-O وجود دارد و پیوند C-C نداریم. از مهمترین مزیت های DME نسبت به سوخت های دیگر عدد ستان بالا، محتوای اکسیژن بالا (34.8%)، تولید Soot فوق العاده کم بعلت داشتن اکسیژن در ساختار مولکولی خود و در نهایت ایجاد صدای کم در هنگام کارکرد موتور می باشد [4]. مزیت دیگر DME که آن را بیش تر مورد توجه قرار می دهد، امکان تولید این سوخت از منابعی چون گاز طبیعی، ذغالسنگ، زیست توده (Biomass) و پس ماندهای پالایشگاهها می باشد [5]. با توجه به غنی بودن کشورمان از منابع ذکر شده و کاهش میزان ذخایر سوخت های فسیلی، توجه به تولید و استفاده از سوخت های جدیدی همچون دی متیل اتر باید بیش از پیش در کشور مورد توجه قرار گیرد. در جدول ۱ ویژگی های DME و سوخت های دیگر از جمله سوخت های الکی با هم مقایسه شده است.

جدول ۱- مقایسه ویژگی های دی متیل اتر و سوخت های دیگر [6]

| CNG | اتانول | متانول | دیزل | DME | |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| CH_4 | $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ | $\text{CH}_3\text{-OH}$ | $\text{C}_n\text{H}_{1.8n}$ | $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ | فرمول شیمیایی |
| 50.0 | 25.0 | 19.5 | 42.5 | 27.6 | ارزش حرارتی پایین ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
| - | 0.81 | 0.79 | 0.84 | 0.66 | چگالی مایع ($\text{g} \cdot \text{ml}$) |
| - | 8 | 5 | 40-55 | >>55 | عدد ستان |
| 17.2 | 9 | 6.5 | 14.6 | 9 | نسبت هوا به سوخت استوکیومتری |
| -162 | 78 | 65 | 180-370 | -20 | دمای جوش (C) |
| 650 | 420 | 450 | 250 | 235 | دمای خوداشتعالی |
| 0 | 34.8 | 50 | 0 | 34.8 | غلظت اکسیژن برحسب % |

همانطور که از جدول فوق نیز مشخص است دمای خود اشتعالی DME پایین و در حد دمای خود اشتعالی دیزل است بنابراین می توان از DME بعنوان سوخت جایگزین در موتورهای اشتعال تراکمی استفاده کرد [2]. همانطور که گفته شد میزان تولید آلاینده Soot توسط DME تقریباً صفر است که در قسمت های بعد بیشتر روی آن بحث می شود. برای کاهش NOx یکی از بهترین روشها استفاده از روش باز خورانی گازهای خروجی (EGR) می باشد [2]. از روش های دیگر می توان ایجاد تغییر در پارامترهای پاشش سوخت برای کاهش NOx را نام برد. در مقاله حاضر ابتدا مقایسه ای بین پارامتر های احتراق و تولید آلاینده سوخت های دیزل و DME انجام شده است. سپس تاثیر استفاده از دو روش افزودن EGR و کاهش زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمود بر روی کاهش آلاینده NOx بررسی شده است.

بدین منظور در ابتدا مدل‌سازی صورت گرفته بر روی موتور نمونه دیزلی، با نتایج تجربی اعتباردهی می‌گردد و سپس بهینه‌سازی بر روی موتور نمونه انجام خواهد گرفت.

۲- تشریح مدل

رشد سریع تکنولوژی و پیدایش کامپیوترهای با سرعت و قدرت محاسباتی بالا و همچنین پیشرفت در الگوریتم‌های حل عددی، بکارگیری مدل‌های ریاضی پیچیده را به منظور توسعه سیستم‌های احتراق داخلی، جهت جلوگیری از انجام آزمایشات وقت‌گیر امکان‌پذیر ساخته است.

2-1- معادلات حاکم و مدل‌های بکاررفته

مدل حاضر یک مدل CFD سه بعدی می‌باشد. مدل احتراق بکاررفته مدل Eddy Breakup است که در آن نرخ مصرف سوخت به عنوان تابعی از ویژگی‌های محلی جریان فرض می‌شود.

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

دو ترم اول سمت راست مربوط به دسترس پذیری سوخت و اکسیژن و ترم سوم احتمال انجام واکنش بوده و بیان‌کننده این است که پخش شعله در غیاب محصولات دما بالا امکان‌پذیر نیست. مقدار مینیمم، مربوط به حضور نسبت هوا و سوخت معین برای احتراق می‌باشد. τ_R مقیاس زمانی برای اختلاط توربولانس واکنش می‌باشد و بصورت $\tau_R = \frac{k}{\varepsilon}$ تعریف می‌شود و از لحاظ فیزیکی نرخ مصرف مخلوط قابل احتراق را نشان می‌دهد [7].

برای میدان جریان از مدل توربولانت $k-\varepsilon$ که برای میدان جریان‌های با چگالی متغیر اصلاح شده استفاده می‌شود. برای اسپری سوخت مدل Wave بکار رفته که در این مدل قطر قطرات اولیه به اندازه قطر نازل بوده و زمان متلاشی شدن قطرات بصورت زیر مدل شده است:

$$\tau = \frac{3.726 \cdot C_2 \cdot r}{\Lambda \Omega} \quad (2)$$

مقدار Λ و Ω بصورت تابعی از خواص قطره و عدد بحرانی وبر می‌باشد [8].

برای پیشگویی برخورد جت سوخت با دیواره وانتقال حرارت، از مدل استاندارد توابع دیواره (Walljet) استفاده شده است. مدل تبخیر Dukowicz با فرض توزیع یکنواخت دما، به منظور بررسی انتقال حرارت و تبخیر شدن قطرات استفاده شده است [9]. برای پیشبینی میزان تولید NO_x که به تغییرات دمایی داخل سیلندر بسیار حساس است از مکانیزم تشکیل Zeldovich و برای مدل‌سازی تشکیل و اکسیدشدن Soot از مدل Kennedy, Hiroyasu, Magnussen استفاده شده است [10-11].

۲-۲- اعتباردهی مدل

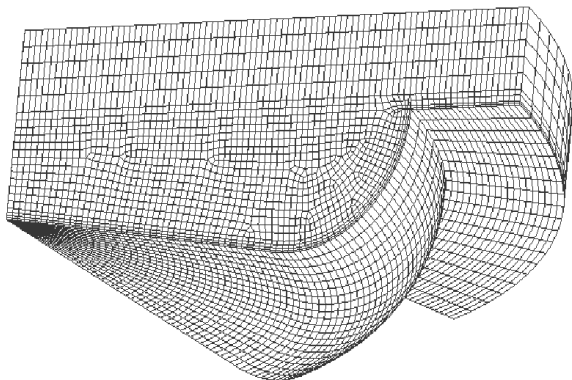
مدل حاضر با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی AVL-FIRE تهیه شده است. برای اعتباردهی مدل از موتور نمونه دیزلی سنگین Caterpillar 3406 با سوخت دیزل استفاده شده سپس این موتور توسط سوخت DME بهینه‌سازی شده است. مشخصات این موتور در جدول ۲ آورده شده:

جدول ۲- مشخصات موتور نمونه

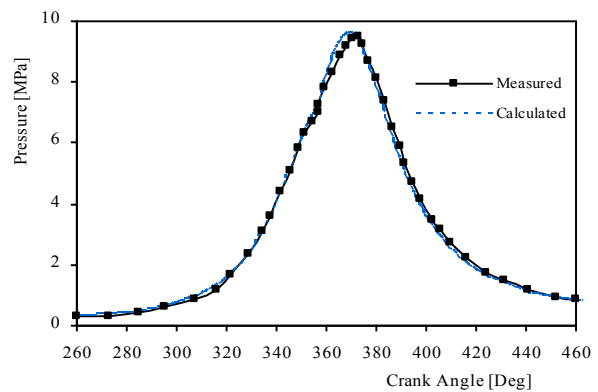
| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Caterpillar 3406 DI diesel engine | نوع موتور |
| 137.19 × 165.1 mm | قطر سیلندر × طول کورس |
| 1600 rpm | سرعت موتور |
| 15:1 | نسبت تراکم |
| 2.44 litres | حجم جابجایی |
| ۶ | تعداد سوپاپ انژکتور |
| ۱۲۵° | زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمود |
| ۸.۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا | زمان شروع پاشش سوخت |
| 90 MPa | فشار پاشش |
| ۱۴۷ درجه قبل از نقطه مرگ بالا | زمان بسته شدن سوپاپ ورودی |

همانطور که در جدول فوق مشخص است انژکتور این موتور دارای ۶ سوپاپ است از این رو برای ساده سازی و کاهش زمان محاسبات فقط $\frac{1}{6}$ محفظه سیلندر یعنی یک قطاع ۶۰ درجه مش زده شده است که در شکل ۱ نمونه ای

از این شبکه محاسباتی نشان داده شده است. در شکل ۲ مقایسه فشار داخل سیلندر بین نتایج تجربی و نتایج مدل سازی برای موتور نمونه نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود تطابق خوبی میان منحنی فشار تجربی [12] و فشار پیش بینی شده توسط مدل سازی وجود دارد.



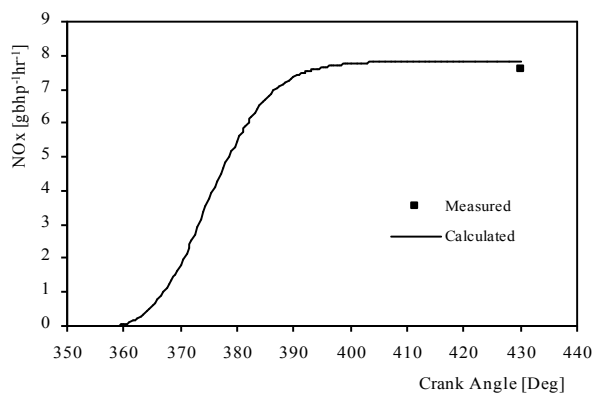
شکل ۱- ساختار شبکه محاسباتی



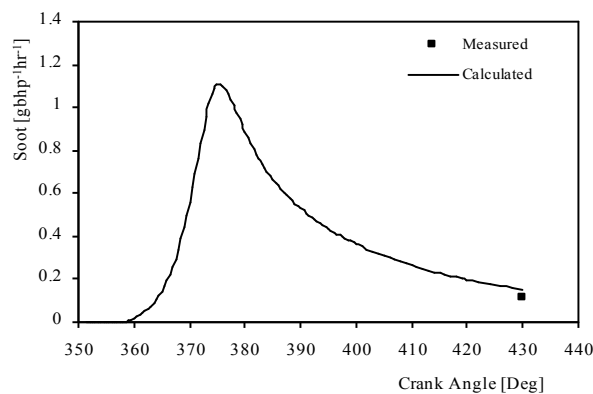
شکل ۲- مقایسه بین فشار داخل سیلندر محاسبه شده

توسط مدل سازی و تجربی [12]

شکل‌های ۳ و ۴ منحنی میزان آلاینده های NO_x و Soot پیش بینی شده توسط مدلسازی و میزان آلاینده های محاسبه شده [12] بصورت تجربی در موتور نمونه نشان می دهند.



شکل ۳- مقایسه بین NO_x محاسبه شده و تجربی [12]



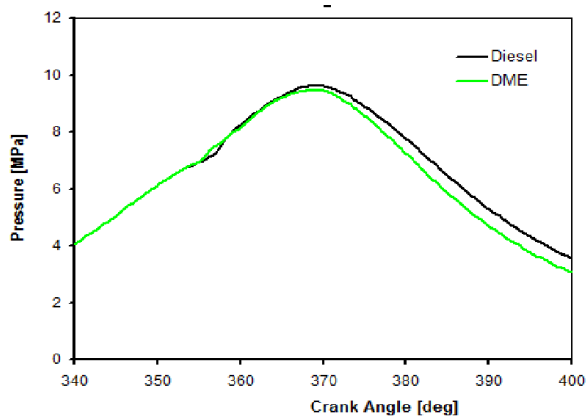
شکل ۴- مقایسه بین Soot محاسبه شده و تجربی [12]

۳- نتایج مدل

در این قسمت ابتدا مقایسه بین سوخت دیزل و سوخت DME انجام شده است. در قسمت دوم نتایج تاثیر افزودن EGR روی میزان تولید آلاینده NO_x بررسی شده و در نهایت در قسمت سوم تاثیر تغییر زاویه پاشش سوخت روی میزان تولید آلاینده NO_x تحلیل شده است.

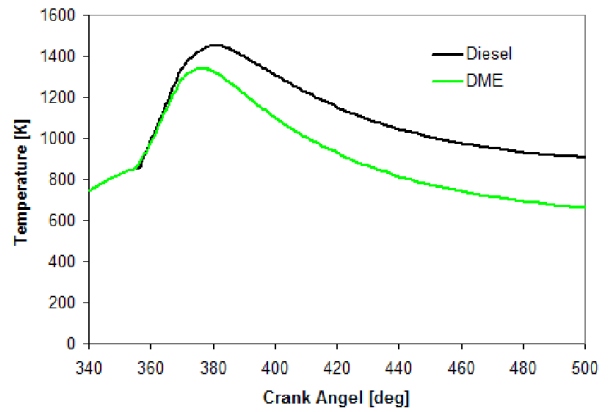
۳-۱- مقایسه سوخت دیزل و سوخت DME

در این قسمت با فرض ثابت ماندن شرایط موتور نمونه تاثیر سوخت DME روی پارامترهای احتراق و تولید آلاینده‌گی بررسی شده است. همانطور که قبلا اشاره کردیم در ساختار DME پیوند C-C وجود ندارد و انرژی کمتری صرف شکستن پیوند بین اتمهای آن می شود که سبب می شود ارزش حرارتی و حرارت آزاد شده آن نسبت به دیزل پایینتر باشد. با کاهش حرارت آزاد شده در موتور DME، دمای محفظه احتراق آن نسبت به دیزل کمتر می گردد در نتیجه مقدار بیشینه ی فشار داخل سیلندر در موتور DME کمتر از دیزل می باشد. مقایسه بین منحنی های فشار و دمای دو سوخت دیزل و DME در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی تغییرات فشار بر حسب درجه میل لنگ برای دو

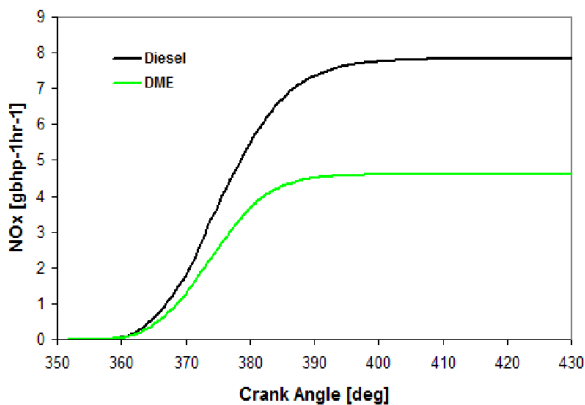
موتور دیزل و DME



شکل ۶- منحنی تغییرات دما بر حسب درجه میل لنگ برای دو موتور

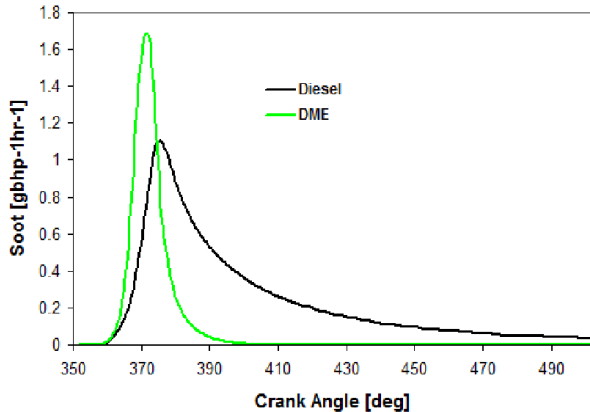
دیزل و DME

تشکیل آلاینده NOx نسبت مستقیم با دمای محفظه سیلندر دارد. هنگامی که دمای داخل محفظه افزایش می یابد، پیوند بین مولکولی O_2 و N_2 می شکند و تولید رادیکالهای N و O می کند. با افزایش دمای برخی از مناطق داخل محفظه احتراق به بالای ۲۰۰۰ کلوین، انرژی مورد نیاز برای پیوند NO تامین می شود و آلاینده NOx تولید می گردد. در شکل ۶ مشخص است که دمای محفظه سیلندر در موتور DME سوز پایینتر از موتور دیزل سوز است. از طرف دیگر اتم اکسیژنی که DME در ساختار خود دارد با اتم O تولید شده از شکستن پیوند O_2 موجود در هوا، ترکیب شده و تولید O_2 می کند که سبب می شود تا قسمت عمده ای از اتم O تبدیل به مولکول اکسیژن شود و از تولید NOx جلوگیری کند. در شکل ۷ مقایسه مابین میزان NOx تولید شده این دو موتور آورده شده است. همانطور که قبلاً گفته شد مقدار Soot در خروجی موتور DME سوز تقریباً صفر است. علت این امر هم به وجود یک اتم اکسیژن در ساختار آن بر می گردد که باعث زیاد شدن تعداد رادیکالهای اکسیژن در داخل سیلندر و ترکیب بیشتر رادیکالهای سوخت با اتم اکسیژن می گردد و تقریباً هیچ سوخت نسوخته ای در محفظه نمی ماند. البته تولید Soot در مراحل اولیه احتراق به علت تجزیه ی حرارتی بیشتر سوخت در DME بیشتر از دیزل است که در ادامه به علت حضور اتم اکسیژن در DME اکسید می گردد. در شکل ۸ منحنی های Soot نشان داده شده است. بعلت کم بودن میزان Soot خروجی در قسمتهای بعد بیشتر روی آلاینده گی NOx متمرکز می شویم.



شکل ۷- منحنی تغییرات NOx بر حسب درجه میل لنگ برای دو

موتور دیزل و DME

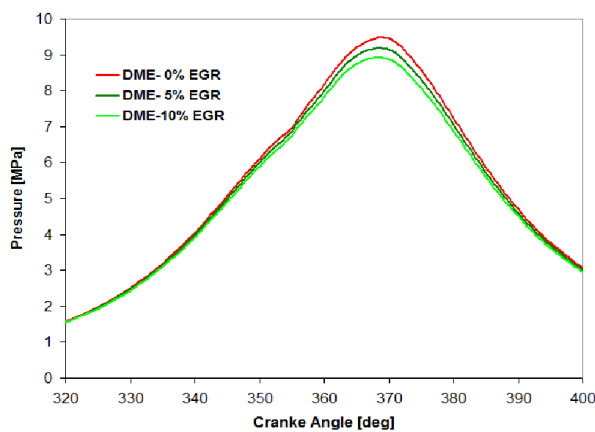


شکل ۸- منحنی تغییرات Soot بر حسب درجه میل لنگ برای دو

موتور دیزل و DME

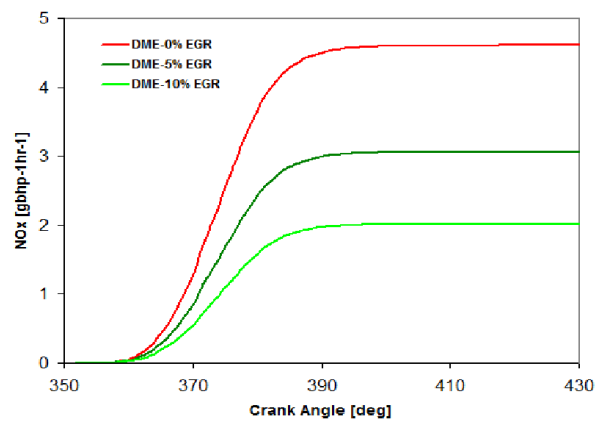
۲-۳- تاثیر افزودن EGR به موتور DME

در این قسمت بدون تغییر در پارامترهای موتور DME تاثیر افزودن EGR گرم را با درصدهای ۵ و ۱۰ درصد روی میزان تولید EGR بررسی می‌کنیم. بالا بودن دمای EGR باعث می‌شود که دمای کل گاز ورودی به سیلندر بالا رود و این امر باعث کوتاه شدن مرحله تاخیر در اشتعال شده و از اینرو زمان کمتری برای اختلاط سوخت با اکسیژن باقی می‌ماند و باعث کاهش احتراق پیش آمیخته می‌شود. از طرف دیگر EGR باعث کاهش چگالی هوای ورودی به سیلندر و در اصطلاح باعث رقیق سازی محتویات درون سیلندر می‌شود که در نتیجه نرخ احتراق دیفوزیونی نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه پیک فشار محفظه سیلندر کمتر می‌شود که البته این امر منجر به کاهش ناچیزی در توان خروجی موتور می‌شود. بعلاوه کاهش چگالی هوای ورودی به سیلندر و کاهش میزان اکسیژن در محفظه سیلندر میزان تولید NO_x با افزایش درصد EGR کاهش می‌یابد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشانگر منحنی‌های تغییرات فشار و NO_x را با افزودن درصدهای مختلف EGR نشان می‌دهد.



شکل ۹- منحنی تغییرات فشار بر حسب درجه میل لنگ برای

درصدهای مختلف EGR

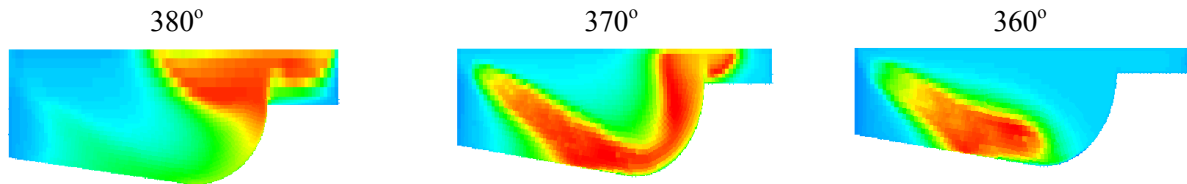
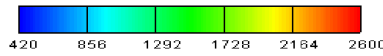
شکل ۱۰- منحنی تغییرات NO_x بر حسب درجه میل لنگ برای

درصدهای مختلف EGR

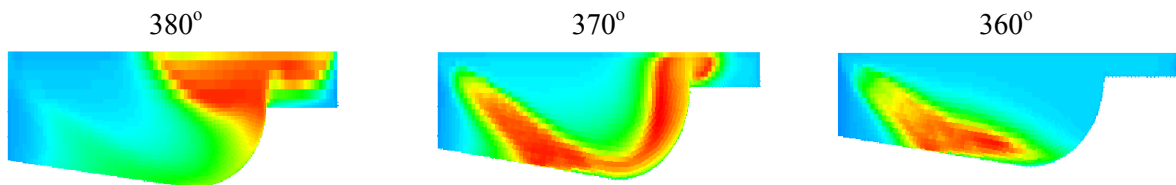
۲-۳- تاثیر تغییر زاویه پاشش سوخت

در این قسمت از مقاله تاثیر تغییر زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمود در موتور DME روی پارامترهای احتراق و آلاینده‌ی بررسی شده است. زاویه پاشش در موتور نمونه ۱۲۵ درجه نسبت به محور عمود می‌باشد و در اینجا زوایای ۱۲۰ و ۱۱۵ نیز بررسی شده است. با کاهش زاویه پاشش نسبت به محور عمود میزان برخورد جت سوخت با تاج پیستون افزایش می‌یابد در نتیجه آماده سازی سوخت کامل نشده و باعث تشکیل مناطق با نسبت سوخت به هوای بالاتر شده و احتراق ناقص انجام می‌شود. این امر باعث کاهش دمای متوسط محفظه سیلندر و در نتیجه باعث کاهش تولید آلاینده‌ی NO_x می‌شود. در این قسمت کانتورهای توزیع دمای سیلندر برای دو زاویه پاشش ۱۲۵ و ۱۱۵ درجه در درجات میل لنگ ۳۶۰ و ۳۷۰ و ۳۸۰ درجه با هم مقایسه شده اند. کاملاً واضح است که حجم مناطق دما بالا در حالت پاشش ۱۲۵ درجه بزرگتر از حالت ۱۱۵ می‌باشد.

مشاهده می شود که جت سوخت در حالت زاویه پاشش ۱۱۵ درجه زودتر با تاج پیستون برخورد می کند و شعله فرونشانده می شود و در کل دما کاهش می یابد. همچنین با کاهش زاویه پاشش سوخت، جت سوخت به منطقه توربولانس پاشیده نمی شود و از اینرو مغز جت به خوبی متلاشی نشده و اختلاط سوخت با هوا ناقصتر انجام می شود.

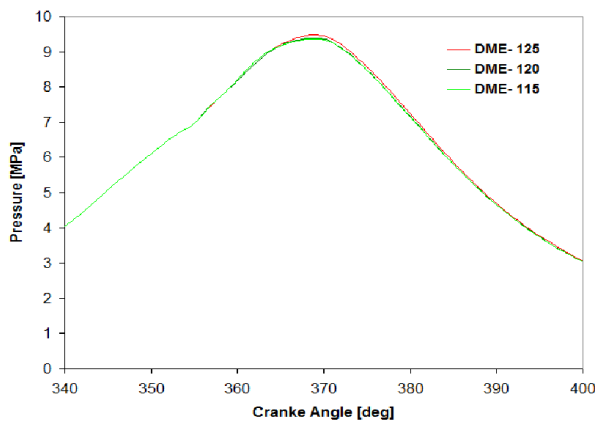


شکل ۱۱- کانتورهای توزیع دمای سیلندر برای زاویه پاشش 125° درجه در درجات میل لنگ ۳۶۰ و ۳۷۰ و ۳۸۰

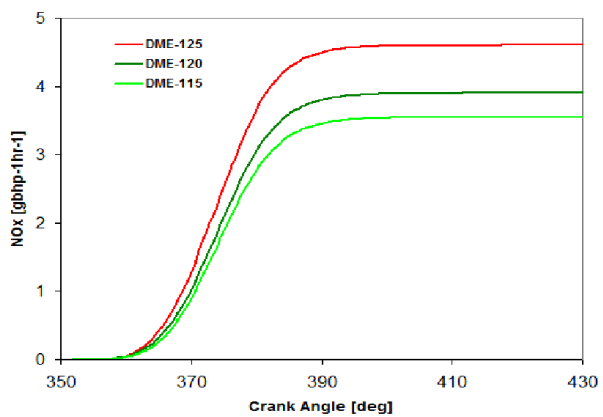


شکل ۱۲- کانتورهای توزیع دمای سیلندر برای زاویه پاشش 115° درجه در درجات میل لنگ ۳۶۰ و ۳۷۰ و ۳۸۰

در شکل 13 مشاهده می شود که با تغییر زاویه پاشش تغییر چندانی در منحنی فشار ایجاد نمی شود و حتی منحنی های فشار حالتیهای ۱۱۵ و ۱۲۰ درجه تقریباً روی هم افتاده است، از اینرو توان موتور را چندان کاهش نمی دهد.



شکل ۱۳- منحنی تغییرات فشار بر حسب درجه میل لنگ برای زوایای مختلف پاشش نسبت به محور عمود



شکل ۱۴- منحنی تغییرات NOx بر حسب درجه میل لنگ برای زوایای مختلف پاشش نسبت به محور عمود

۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این مدل را می توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- در کل سوخت DME نسبت به سوخت دیزل دارای بیک فشار و دمای پایبتری است. بعلت کمتر بودن بیک دما آلایندگی NO_x در موتور DME سوز تقریباً نصف موتور دیزل سوز است. آلایندگی Soot نیز در موتور DME بعلت وجود اکسیژن در ساختار مولکولی دی متیل اتر صفر است.

۲- با فرض ثابت ماندن تمام پارامترهای موتور DME سوز با افزودن EGR گرم، همراه با افزایش درصد EGR بعلت کاهش چگالی هوای ورودی و رقیق سازی محتویات داخل سیلندر آلایندگی NO_x کاهش می یابد که در حالت ۱۰ درصد EGR آلایندگی NO_x کمترین مقدار را دارد.

۳- با فرض ثابت ماندن تمام پارامترهای موتور DME سوز، با کاهش زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمود بعلت برخورد بیشتر و سریعتر جت سوخت با تاج پیستون احتراق ناقصتر انجام گرفته و در نتیجه دمای متوسط سیلندر پایبتر آمده و تولید آلایندگی NO_x کاهش می یابد که در حالت زاویه پاشش ۱۱۵ درجه کمترین مقدار را دارد. البته کاهش زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمود توان موتور را چندان کاهش نمی دهد.

۵- مراجع

- [1] R. Verbeek and J. Van der Weide, 'Global assessment of Dimethyl Ether comparison with other fuels', SAE Paper 971607, 1997.
- [2] Y. Sato, A. Noda, T. Sakashi and Y. Goto, 'Performance and emission characteristics of a DI diesel operated on Dimethyl Ether applying EGR with supercharging', SAE Paper 2000-01-1809, 2000.
- [3] R. Christensen, S. C. Sorenson, M. G. Jensen and K. F. Hansen, 'Engine operation on Dimethyl Ether in a naturally aspirated, DI diesel engine', SAE paper 971665, 1997
- [4] S. C. Sorensen and Sven-Erik Mikkelsen, 'Performance and emission of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat Dimethyl Ether', SAE Paper 950064, 1995.
- [5] 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.
- [6] P. Kapus ,H. Ofner, 'Development of fuel injection equipment and combustion system for DI diesels operated on dimethyl ether', SAE Paper 950062, 1995.
- [7] AVL FIRE user Manual, V. 8.3, (2004)
- [8] Tomoyuko Wakisaka, Kunikazo Ibaraki "An improvement droplet breakup model for three dimensional diesel spray simulation ." rd 3 KSME, JSME, Thermal Engineering Conference 11-167-162, 1996.
- [9] Dukowicz, J.K., Quasi-Steady Droplet Change in the Presence Of Convection, Informal Report Los Alamos Scientific Laboratory, LA7997-MS

- [10] Zeldovich, Y. B., Sadvnikov, 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] C. J. Rutland, N. Ayoub, Z. Han, et al., Diesel engine model and development and experiments, SAE paper 951200, SAE International, Warrendale, Pa, USA, 1995
- [13]