

بررسی عددی تاثیر افزودن دی‌متیل‌اتر به متان بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور اشتعال تراکمی شارژ همگن

حسین ازوجی^۱، روزبه شفقت^{۲*} و امید جهانیان^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، hezaji@stu.nit.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، rshafaghat@nit.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، jahanian@nit.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۸/۱۴، پذیرش: ۹۶/۹/۱۶)

چکیده: احتراق اشتعال تراکمی شارژ همگن، به دلیل بازده حرارتی بالا و آلاینده‌گی کم، به‌عنوان نسل جدید موتورهای احتراق داخلی مورد توجه قرار گرفته است. کنترل این نوع احتراق دشوار است، زیرا این امر توسط سینتیک شیمیایی مخلوط هوا و سوخت صورت می‌گیرد. در این مطالعه، یک مخلوط همگن از گاز طبیعی و هوا در یک موتور اشتعال تراکمی برای کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و بهبود بهره‌وری حرارتی استفاده و برای کنترل زمان اشتعال و احتراق، مقدار کمی دی‌متیل‌اتر با گاز طبیعی مخلوط شد. یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی همراه با سینتیک شیمیایی برای بررسی اثر دما، فشار، نسبت هم‌ارزی بر احتراق و آلاینده‌گی موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند با استفاده از این مخلوط می‌توان موتور را در یک محدوده بار گسترده راه‌اندازی کرد و با افزودن مقدار محدودی دی‌متیل‌اتر بازده حرارتی را افزایش داد. از نتایج مهم دیگر این مطالعه می‌توان به بهبود زمان شروع احتراق، افزایش بیشینه فشار و کاهش چشمگیر انتشار اکسیدهای نیتروژن در اثر افزودن دی‌متیل‌اتر اشاره کرد.

کلیدواژه‌گان: موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن، دی‌متیل‌اتر، متان، سوخت ترکیبی

مقدمه

موتورهای احتراق داخلی منبع تولید قدرت در وسایل نقلیه، کشتی‌ها، تجهیزات ساخت‌وساز و ماشین‌آلات کشاورزی‌اند. این موتورها میزان بسیار زیادی سوخت فسیلی مصرف می‌کنند و موجب انتشار مقادیر بالایی از گازهای خطرناک مانند کربن‌مونواکسید (CO)، کربن‌دی‌اکسید (CO₂)، اکسید نیتروژن (NO) و نیز ذرات معلق^۱ (PM) در جو می‌شوند. در دو دهه اخیر، بیشترین میزان تحقیقات بر روی طراحی و تولید موتورهای احتراق داخلی با بهره‌وری سوخت بالا و آلاینده‌گی پایین و نیز تولید سوخت‌های تجدیدپذیر متمرکز شده است.

موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن^۲ (HCCI) نسل جدیدی از موتورهای احتراق داخلی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی کم هستند. در این موتورها مخلوطی همگن از هوا و سوخت بدون نیاز به شمع تا رسیدن به نقطه خوداشتعالی متراکم می‌شود و احتراق آغاز می‌شود. احتراق HCCI قابلیت استفاده از نسبت تراکم بالا را فراهم می‌کند و دارای بازه احتراقی کوتاه‌تر و نرخ سوختن سریع‌تری است. این احتراق، به دلیل دمای پایین و کاهش افت حرارتی ناشی از تشعشع، بازده حرارتی بالایی دارد. در احتراق HCCI جبهه شعله و نواحی داغ حاصل از مخلوط غنی وجود ندارد؛ بنابراین دوده‌ای تشکیل نمی‌شود. همچنین، به دلیل

1. Particulate matter
2. Homogeneous Charge Compression Ignition

دمای پایین و توزیع یکنواخت دمای توده گاز، تولید اکسید نیتروژن به مقدار بسیار کمی محدود می‌شود [۱]. موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن می‌توانند مصرف سوخت را ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش دهند [۲،۳]. انعطاف‌پذیری در مصرف سوخت‌های مختلف و همچنین امکان تولید این موتورها با ایجاد تغییرات نسبتاً ساده در موتورهای دیزل موجود و عدم نیاز به بازطراحی کلی موتور از دیگر مزایای مهم این موتورهاست [۴-۶]. با وجود مزایای اشاره‌شده، به‌کارگیری این موتورها با چالش‌هایی نیز همراه است. برخی از مهم‌ترین این چالش‌ها عبارت‌اند از [۷،۹-۹]:

- محدودبودن ناحیه عملکردی در محدوده بین احتراق ناقص^۱ و کوبش^۲
- تولید قابل توجه آلاینده‌های کربن مونوکسید و هیدروکربن‌های نسوخته
- دشواری کنترل زمان شروع احتراق
- آماده‌سازی و تهیه مخلوط همگن
- نرخ شدید افزایش فشار و صدای زیاد احتراق

راهکارهای زیادی برای کنترل احتراق اشتعال تراکمی سوخت همگن پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به به‌کارگیری نسبت تراکم متغیر [۱۰ و ۱۱]، تغییر دمای ورودی [۱۲-۱۴]، استفاده از گازهای خروجی برگشتی [۱۵-۱۷]، به‌کارگیری راهکارهای مختلف باز و بسته‌شدن سوپاپ‌ها [۱۹]، استفاده از دو سوخت با خصوصیات احتراقی مختلف [۲۰] و غیره اشاره کرد. گاز طبیعی^۳ یکی از سوخت‌هایی است که به‌دلیل قیمت مناسب و دسترسی آسان مورد توجه قرار گرفته است. این سوخت قابلیت بسیار مناسبی برای مخلوط‌شدن با هوا دارد که به همین روی برای استفاده در موتورهای HCCI مورد توجه قرار گرفته است. با وجود مزیت‌های ذکرشده، گاز طبیعی، به‌دلیل قابلیت خوداشتعالی ضعیف، معمولاً به‌صورت ترکیب با سوخت‌هایی با خواص احتراقی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱].

دی‌متیل اتر^۴ (DME) ایزومر اتانول است و با وجود اینکه می‌توان آن را از زیست‌توده، اتانول و سوخت‌های فسیلی به‌دست آورد، در حال حاضر، منبع اصلی مورد توجه برای تولید آن گاز طبیعی است. DME عدد ستان بالایی دارد که نشان‌دهنده کارایی آن در احتراق اشتعال تراکمی است. بهره‌وری انرژی و توانایی تولید قدرت DME مشابه سوخت دیزل است. همچنین، به‌دلیل عدم وجود پیوندهای کربن-کربن، برخلاف سوخت دیزل، عملاً انتشار ذرات معلق اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه هزینه مورد نیاز برای فیلترهای ذرات معلق در هنگام استفاده از سوخت دیزل را از بین می‌رود. البته، چگالی انرژی DME نصف چگالی انرژی سوخت دیزل است. بنابراین، در صورت استفاده از آن به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزل، مخزنی با حجم دوبرابر مخازن مورد استفاده در موتورهای دیزل معمولی مورد نیاز است [۲۲].

سوخت متان عدد ستان پایین و در نتیجه دمای خوداشتعالی بالایی دارد که این امر پیش‌گرمایش را در موتورهایی که از سوخت متان استفاده می‌کنند ضروری می‌سازد. اما، با توجه به عدد ستان بالا و قابلیت خوداشتعالی مناسب این سوخت می‌توان از ترکیب متان و DME جهت رفع معضل کنترل زمان احتراق و پیش‌گرمایش سوخت‌های گازی استفاده کرد. جدول ۱ مشخصات متان و DME را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات سوخت‌ها [۲۳]

Table 1- Properties of the fuels

Fuel	DME	Methane
Chemical structure	CH ₃ OCH ₃	CH ₄
Cetane number	55	0
Boiling point	-24 C	-161/5 C
Stoichiometric A/F ratio	16/82	9
Lower calorific value	28/8 (MJ/kg)	50/3 (MJ/kg)

1. Misfire
2. Knock
3. Natural gas
4. Dimethyl Ether

کوساکا و همکاران احتراق گاز طبیعی در موتورهای HCCI را با استفاده از یک مدل چندبعدی بررسی کردند. آن‌ها برای بررسی سینتیک مفصل شیمیایی، مکانیزمی شامل ۱۵۱ گونه شیمیایی و ۵۰۱ واکنش اساسی را مورد استفاده قرار دادند. نتایج این بررسی بهبودی را در پیش‌بینی حداکثر دما و فشار چرخه در مقایسه با پیش‌بینی‌های مدل بی‌بعد نشان داد [۲۱].

سانگ و همکاران تاثیر نسبت تراکم بر عملکرد موتور، احتراق و آلاینده‌گی را در یک موتور HCCI با سوخت دی‌متیل‌اتر بررسی کردند. آن‌ها به‌علت تبخیرپذیری و عدد ستان بالا، دی‌متیل‌اتر را انتخاب کردند و دریافتند که نسبت تراکم، تاثیر مستقیمی روی دما و فشار دارد [۲۴].

یینگ و همکاران احتراق و آلاینده‌گی یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با پاشش مستقیم را با استفاده از یک موتور تک‌سیلندر با سوخت دی‌متیل‌اتر بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با پاشش مستقیم با سوخت دی‌متیل‌اتر در یک گستره وسیع‌تر و با بازده ترمزی بالاتر عمل می‌کند [۲۵].

شیباتا و همکاران کنترل احتراق موتور HCCI به وسیله سوخت دی‌متیل‌اتر-اتانول و گازهای خروجی برگشتی را بررسی و اعلام کردند که اضافه کردن اتانول و گازهای خروجی برگشتی توانایی به‌تعویق انداختن زاویه میل‌لنگ مربوط به مصرف ۵۰ درصد از سوخت (CA50) و گسترش محدوده عملکردی موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن همراه با بازده بالا و آلاینده‌گی کم را داراست [۲۶].

ساتو و همکاران تاثیر تغییر میزان دی‌متیل‌اتر بر احتراق موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن را در یک موتور با سوخت دوگانه دی‌متیل‌اتر-متان بررسی کردند [۲۷]. هانگ و همکاران با بررسی عددی احتراق موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با سوخت دی‌متیل‌اتر دریافتند که با کاهش نسبت هم‌آرزی، میزان کربن مونوکسید افزایش می‌یابد، اما زمانی که نسبت هم‌آرزی بسیار کوچک است، میزان کربن مونوکسید کاهش می‌یابد [۲۸].

در این مطالعه، تاثیر افزودن دی‌متیل‌اتر به متان بر تغییرات پارامترهای عملکردی از جمله فشار، دما و نرخ حرارت آزاد شده و نیز آلاینده‌گی موتور HCCI با استفاده از CFD و با به‌کارگیری سینتیک کامل شیمیایی بررسی شد. با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های گذشته از تحلیل‌های ترمودینامیکی بهره گرفته‌اند، این پژوهش به‌صورت عددی و با روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار AVL FIRE کوپل شده با نرم‌افزار کمکین جهت بررسی سینتیک کامل شیمیایی صورت پذیرفته است. معادلات حاکم شامل معادلات بقا، پیوستگی و معادلات مدل اغتشاش‌اند. یک سازوکار سینتیک کامل شیمیایی شامل ۸۳ گونه و ۳۶۰ واکنش در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹].

مشخصات موتور

موتور مورد بررسی در این مطالعه یک موتور دیزل سنگین CAT3500 بوده که مشخصات این موتور در جدول ۲ تشریح شده است [۳۰].

جدول ۲- مشخصات موتور [۳۰]

Table 2- engine specification

Parameters	Specification
Bore	170(mm)
Stroke	190(mm)
Compression Ratio	17
Engine Speed	1500(rpm)
IVC	20(ABDC)
EVO	40(BBDC)

توضیحات مدل

با توجه به متقارن بودن هندسه موتور و جهت کاهش زمان محاسبات، برای ایجاد شبکه محاسباتی از یک‌هشتم هندسه استفاده شد. میانگین اندازه سلول‌ها 1 mm و گام زمانی محاسبات 0/2 درجه لنگ¹ است. فشار اولیه 2 bar و دمای اولیه (در زمان بسته‌شدن سوپاپ ورودی) 430 K است. در کلیه ترکیب‌ها با درصدهای مختلف دی‌متیل‌اتر و متان، نسبت هم‌ارزی کلی سوخت ترکیبی 0/3 است. این مطالعه یک چرخه بسته یعنی از زمان بسته‌شدن سوپاپ ورودی تا زمان بازشدن سوپاپ خروجی را شبیه‌سازی می‌کند. برای شبیه‌سازی اثرات اغتشاشی از مدل k-ε استفاده شده است. شکل‌های 1 و 2 شبکه محاسباتی را در نقطه مرگ پایین و نقطه مرگ بالا نشان می‌دهد.

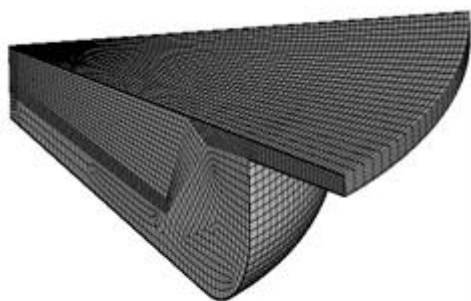


Figure 2- generate mesh at TDC

شکل ۲- مش محاسباتی محفظه احتراق در نقطه مرگ بالا

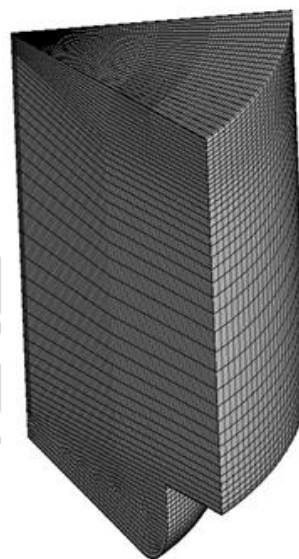


Figure 1- generate mesh at BDC

شکل ۱- مش محاسباتی محفظه احتراق در نقطه مرگ پایین

معادلات حاکم

معادلات حاکم در این مدل شامل دو بخش معادلات ناویر استوکس و معادلات سینتیک شیمیایی است [۳۱].

بخش اول: معادلات ناویر استوکس

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D(\rho U_i)}{Dt} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{D(\rho H)}{Dt} = \rho \dot{q}_s + \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_j \tau_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{D(\rho C)}{Dt} = \rho \dot{r} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_1 \frac{\partial C}{\partial x_j} - \rho c u_i \right) \quad (4)$$

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = P + G - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

1. Crank angle degree

$$\frac{D(\rho\varepsilon)}{Dt} = \left(C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} + C_{\varepsilon 4} k \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

$$P = -2\mu_t S : S - \frac{2}{3} [\mu_t (trS) + k] (trS) \quad (7)$$

$$G = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \nabla P \quad (8)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

بخش دوم: معادلات سینتیک شیمیایی

$$\sum_{i=1}^{N_S} v'_{k,i} S_i + TB \square \sum_{i=1}^{N_S} v''_{k,i} S_i + TB \quad (10)$$

$$RR_k = \left(\sum_{i=1}^{N_S} a_{k,i} [TB_i] \right) \left(K_{f,k} \prod_{i=1}^{N_S} [S_i]^{v'_{k,i}} - K_{b,k} \prod_{i=1}^{N_S} [S_i]^{v''_{k,i}} \right) \quad (11)$$

$$K = A_{Ar} T^\beta \exp\left[\frac{-E_a}{R_u T}\right] \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_i = \sum_{k=1}^{N_R} RR_k (v'_{k,i} - v''_{k,i}) \quad (13)$$

استقلال از شبکه

شکل ۳ استقلال از شبکه را بر مبنای نمودار فشار نشان می‌دهد. برای این منظور نمودارهای فشار حاصل از محاسبات با تعداد سلول‌های ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ با هم مقایسه شدند و با توجه به اختلاف ناچیز بین نتایج حاصل از تعداد ۱۵۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ تعداد ۱۵۰۰۰ سلول برای انجام محاسبات انتخاب شد. جدول ۳ مشخصات شبکه بندی‌های مختلف انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها را نشان می‌دهد.

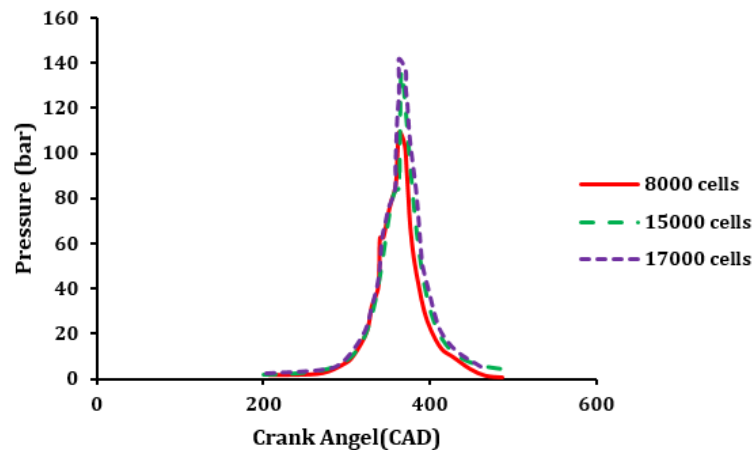


Figure 3- Mesh independency based on the in-cylinder pressure history

شکل ۳- استقلال از شبکه بر مبنای نمودار فشار

جدول ۳- مشخصات شبکه بندی‌های انجام شده

Table 3- Results of the mesh independence study		
Case	Number of Cells	Max Pressure (bar)
1	8000	108.027
2	15000	136.236
3	17000	141.170

اعتبارسنجی

مدل بررسی شده با استفاده از داده‌های تجربی منتشرشده موتور CAT 3500، با سوخت گاز طبیعی، اعتبارسنجی شده است. آزمایش‌های تجربی شامل مطالعات فایولند و همکاران [۳۰] است. این آزمایش‌ها در دمای ۴۳۰ k، فشار ۲ bar و نسبت هم‌ارزی ۰/۳ انجام شده است.

با توجه به شکل ۴، منحنی فشار داخل سیلندر به‌دست آمده از شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشته و محل و اندازه بیشینه فشار را به‌خوبی پیش‌بینی کرده است.

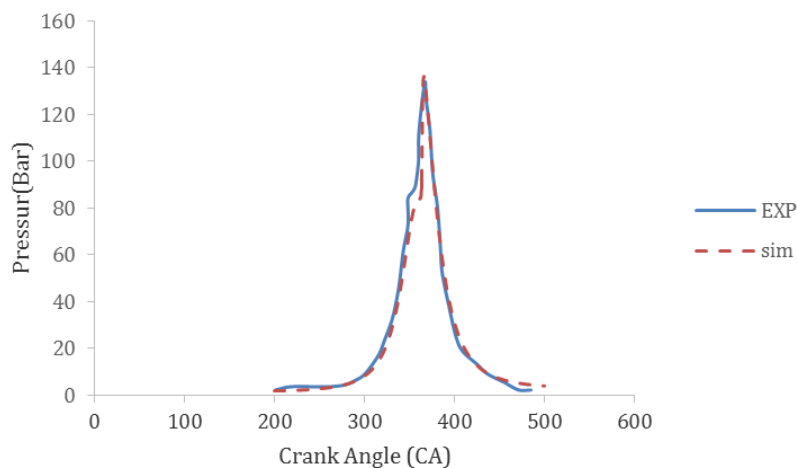


Figure 4- Comparison of measured and predicted in-cylinder pressure histories
(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2bar, N=1500rpm, phi=0.3)

شکل ۴- اعتبارسنجی منحنی فشار داخل سیلندر با داده‌های تجربی

نتایج

در این بخش، تاثیر تغییر درصد دی‌متیل‌اتر و متان در مخلوط بر فشار، دما، نرخ آزادسازی گرما و نیز کسر جرمی گونه‌های CO₂، CO و NO تحلیل و بررسی شده است. همچنین، از کانتورهای دما و NO برای بررسی توزیع دما و آلاینده NO در محفظه احتراق استفاده شده است.

شکل ۵ نمودار فشار را در نسبت هم‌ارزی ۰/۳ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، با افزایش میزان دی‌متیل‌اتر تا ۲۰٪ مولی، تفاوت چندانی در زمان شروع احتراق رخ نمی‌دهد. اما، با افزایش بیشتر میزان دی‌متیل‌اتر، احتراق سریع‌تر شروع می‌شود و اندازه بیشینه فشار نسبت به حالت بدون دی‌متیل‌اتر بسیار بیشتر می‌شود. تفاوت زمان احتراق در ۰ درصد تا ۲۰ درصد دی‌متیل‌اتر قابل ملاحظه نیست، اما با افزایش دی‌متیل‌اتر از ۲۰ درصد تا ۳۰ درصد تفاوت چشمگیری در زمان شروع احتراق رخ می‌دهد. از ۳۰ درصد تا ۴۰ درصد، علی‌رغم ادامه این روند، یعنی پیش‌افتادن زمان احتراق، میزان آن قابل توجه نیست. با افزایش درصد دی‌متیل‌اتر، آزادسازی حرارت در واکنش‌های دمابالابال^۱ (HTR) سریع‌تر رخ می‌دهد و بازه احتراق کوچک‌تر می‌شود که دلیل آن پیش‌افتادن احتراق و انجام واکنش‌های اصلی در دما و فشار پایین‌تر است.

شکل ۶ دمای داخل سیلندر را در زوایای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش درصد دی‌متیل‌اتر در ترکیب، بیشینه دما در زاویه لنگ کم‌تری رخ می‌دهد. بیشینه دما در حالت بدون دی‌متیل‌اتر بیشتر بوده، در نتیجه افزودن دی‌متیل‌اتر موجب کاهش

تولید آلاینده اکسید نیتروژن می‌شود. با وجود این، پس از افزودن دی‌متیل‌اتر نیز، با افزایش درصد آن در ترکیب، دما به تدریج بالا می‌رود.

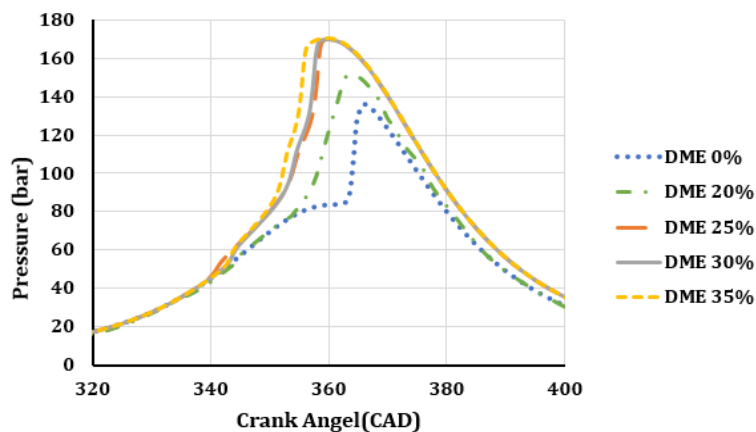


Figure 5- predicted in-cylinder pressure
(T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2bar, N=1500rpm, phi=0.3)

شکل ۵- فشار برحسب زاویه لنگ

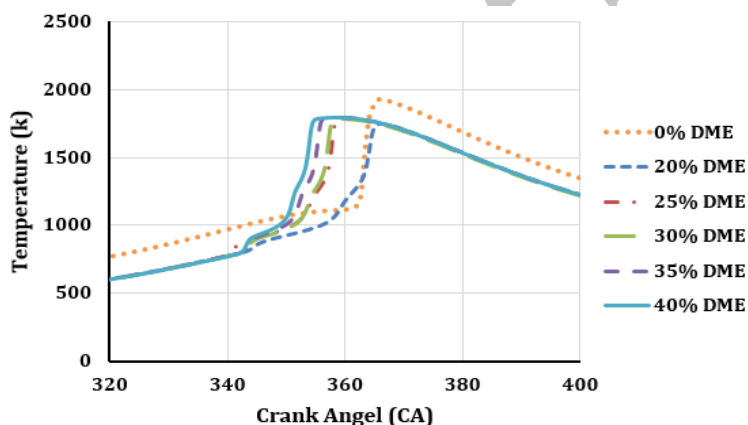


Figure 6- predicted in-cylinder Temperature
(phi=0.3, T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2bar, N=1500rpm)

شکل ۶- دما برحسب زاویه لنگ

شکل ۷ نمودار نرخ آزادسازی گرما برحسب زاویه لنگ را برای ترکیب‌هایی با درصدهای مختلفی از دی‌متیل‌اتر و متان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا، با افزودن دی‌متیل‌اتر تا ۲۰ درصد مولی، مرحله واکنش‌های دم‌پایین^۱ (LTR) در حدود ۳۴۴ درجه لنگ و مراحل دوگانه واکنش‌های دم‌بالا (HTR) به ترتیب در حدود ۳۵۹ و ۳۶۵ درجه لنگ رخ می‌دهد. با افزودن بیش از ۲۰ درصد دی‌متیل‌اتر، LTR از یک تا دو درجه لنگ و مراحل HTR نیز از ۵ تا ۹ درجه پیش می‌افتند. با افزایش میزان دی‌متیل‌اتر، بازه احتراق کوتاه‌تر شده، نرخ واکنش‌های دم‌بالا کاهش می‌یابد که دلیل آن پیش‌افتادن احتراق و انجام واکنش‌های اصلی در دما و فشار پایین‌تر است. افزایش درصد دی‌متیل‌اتر در مخلوط موجب آغاز سریع‌تر احتراق و افزایش مقدار حرارت آزاد شده در واکنش‌های دم‌پایین می‌شود.

1. Low temperature reactions

مشاهده می‌شود که احتراق (با بیش از ۲۵ درصد دی‌متیل‌اتر) از حدود زاویه ۳۴۱ درجه لنگ آغاز می‌شود که این امر ناشی از عدد ستان بالا و تمایل زیاد دی‌متیل‌اتر به خوداشتعالی است. نکته مهم دیگر شکل‌گیری مطلوب احتراق با دمای اولیه ۳۳۰ کلوین است؛ در حالی که در شرایط استفاده از متان خالص تا دمای ۴۱۰ کلوین احتراقی انجام نشد. همان‌طور که در شکل پیداست، با افزودن دی‌متیل‌اتر (بیش از ۲۰ درصد)، احتراق زودتر رخ می‌دهد و موجب صرف انرژی در تولید کار منفی می‌شود.

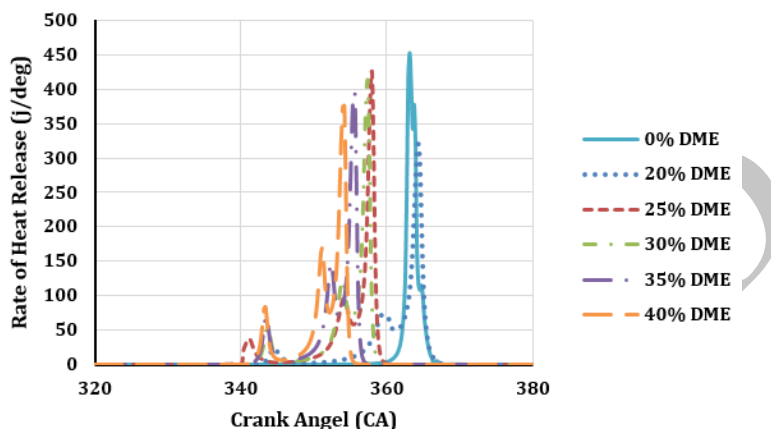


Figure 7- Computational heat release rate
($\phi=0.3$, $T_{iwc}=430K$, $P_{iwc}=2bar$, $N=1500rpm$)
شکل ۷- نرخ آزادسازی گرما برحسب زاویه لنگ

شکل ۸ آلاینده‌ی نیتروژن مونوکسید را در زوایای مختلف لنگ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در بازه واکنش‌های دمابالا، تولید NO افزایش می‌یابد و مقدار بیشینه آن در همان زاویه لنگی اتفاق می‌افتد که حداکثر حرارت آزاد شده نیز در آن زاویه روی می‌دهد. همچنین، مشاهده می‌شود میزان تولید آلاینده NO در حالت مخلوط دی‌متیل‌اتر و متان بسیار کم‌تر از حالت متان خالص است که این امر را می‌توان مهم‌ترین مزیت استفاده از دی‌متیل‌اتر دانست. البته، با افزایش دی‌متیل‌اتر، میزان تولید NO نیز افزایش می‌یابد که برای جلوگیری از افزایش بیش از حد این آلاینده، افزودن دی‌متیل‌اتر نباید از حد خاصی فراتر رود.

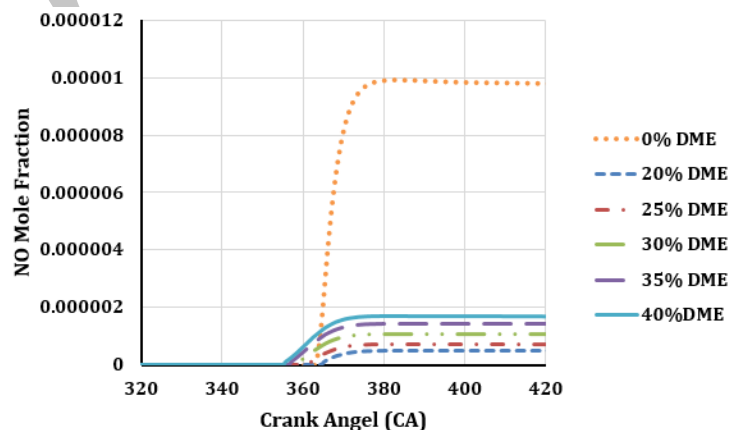


Figure 8- NO Molar fraction
($\phi=0.3$, $T_{iwc}=430K$, $P_{iwc}=2bar$, $N=1500rpm$)
شکل ۸- اثرات تغییر درصد دی‌متیل‌اتر و متان روی کسر مولی NO برحسب زاویه لنگ

شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ اثرات تغییر درصد دی‌متیل اتر و متان روی کسر جرمی CO، CO₂، CH₄ و DME را برحسب زاویه لنگ نشان می‌دهند. در شکل ۱۱، DME ۳۰ درصد از کسر مولی مخلوط را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که در این شکل پیداست، میزان قابل توجهی از CO در نتیجه مرحله اول احتراق شکل می‌گیرد. اکسیداسیون CO زمانی اتفاق می‌افتد که متان و دی‌متیل اتر تقریباً به‌طور کامل مصرف شده‌اند. متان احتراق دومرحله‌ای را به‌شکل محسوسی تجربه نمی‌کند و اکسیداسیون CO در نتیجه دمای بالای حاصل از احتراق مرحله اول DME اتفاق می‌افتد.

کانتور دما

شکل ۱۲ کانتور دما را در زوایای مختلف لنگ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل پیداست، توزیع دما تقریباً در تمام نقاط هندسه همگن است؛ این امر با توجه به تعریف احتراق HCCI کاملاً مورد انتظار بوده، دلیلی بر صحت مدل شبیه‌سازی است.

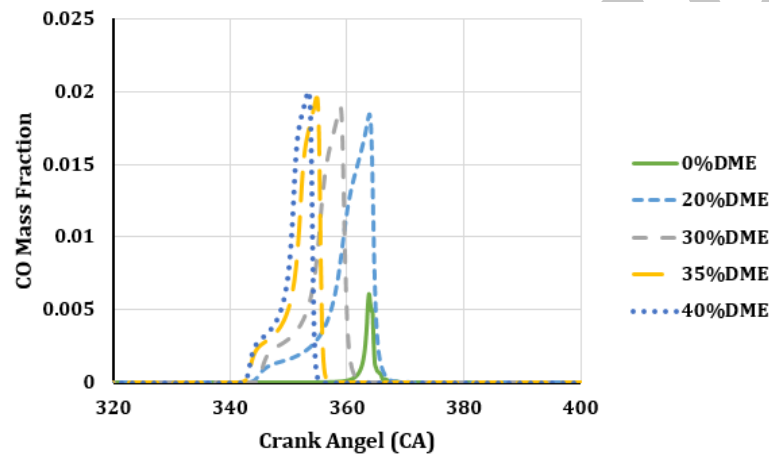


Figure 9- CO Mass fraction
($\phi=0.3$, $T_{ivc}=430K$, $P_{ivc}=2bar$, $N=1500rpm$)
شکل ۹- کسر جرمی CO برحسب زاویه لنگ

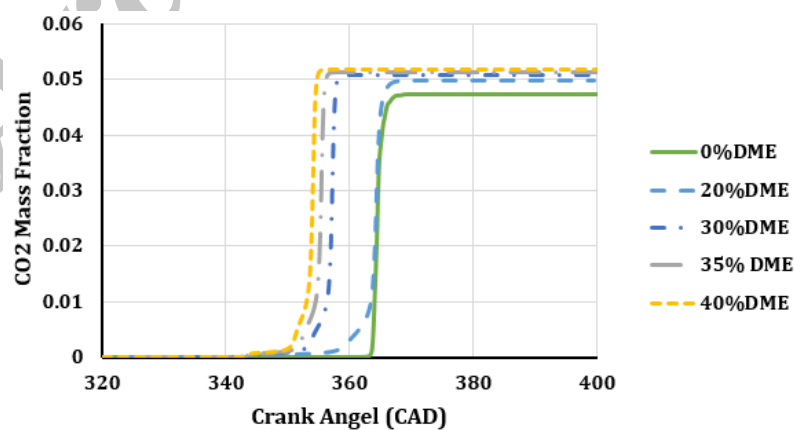


Figure 10- CO₂ Mass fraction
($\phi=0.3$, $T_{ivc}=430K$, $P_{ivc}=2bar$, $N=1500rpm$)
شکل ۱۰- کسر جرمی CO₂ برحسب زاویه لنگ

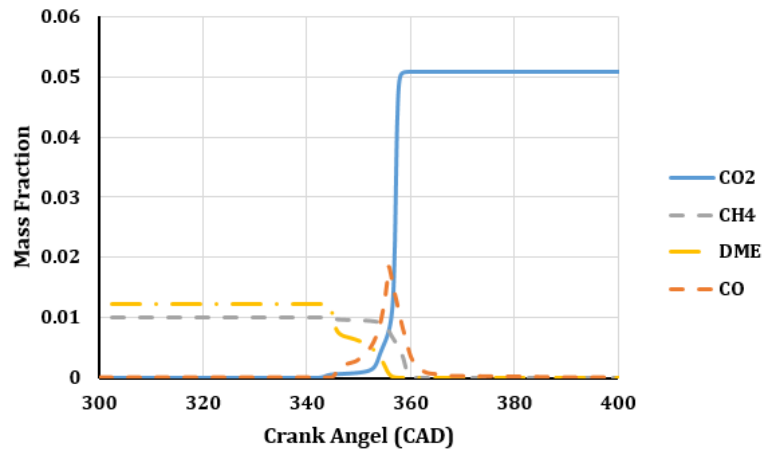


Figure 11- Fuels and Emmissions Mass fraction (phi=0.3, T_{ivc}=430K, P_{ivc}=2bar, N=1500rpm)
 شکل ۱۱- کسر جرمی سوخت و آلاینده‌ها برحسب زاویه لنگ

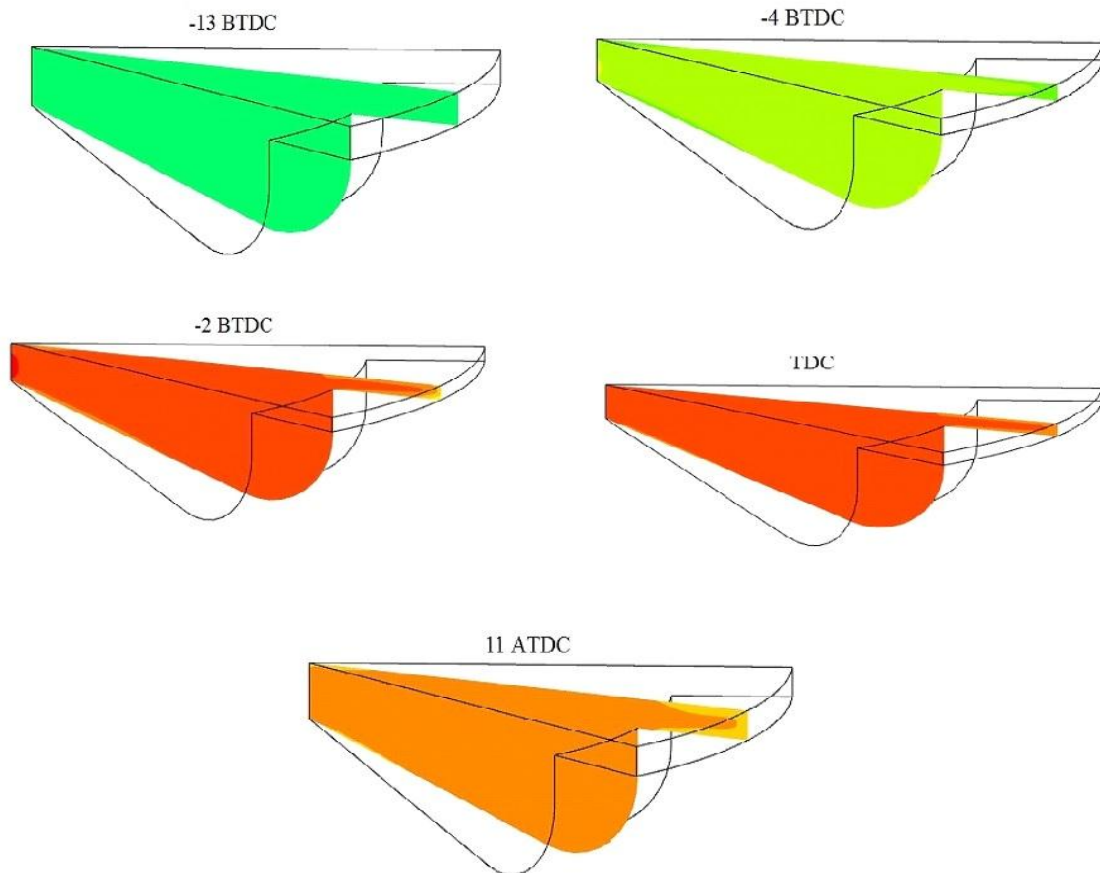


Figure 12- Temperature contour
 شکل ۱۲- کانتور دما در زوایای مختلف لنگ

کانتور NO

شکل ۱۳ کانتور NO را در زوایای مختلف لنگ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در زاوای لنگ کم، با توجه به پایین بودن دمای داخل سیلندر، میزان تولید NO بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. اما، با افزایش دما، به‌ویژه بعد از نقطه مرگ بالا، میزان تولید NO نیز افزایش می‌یابد.

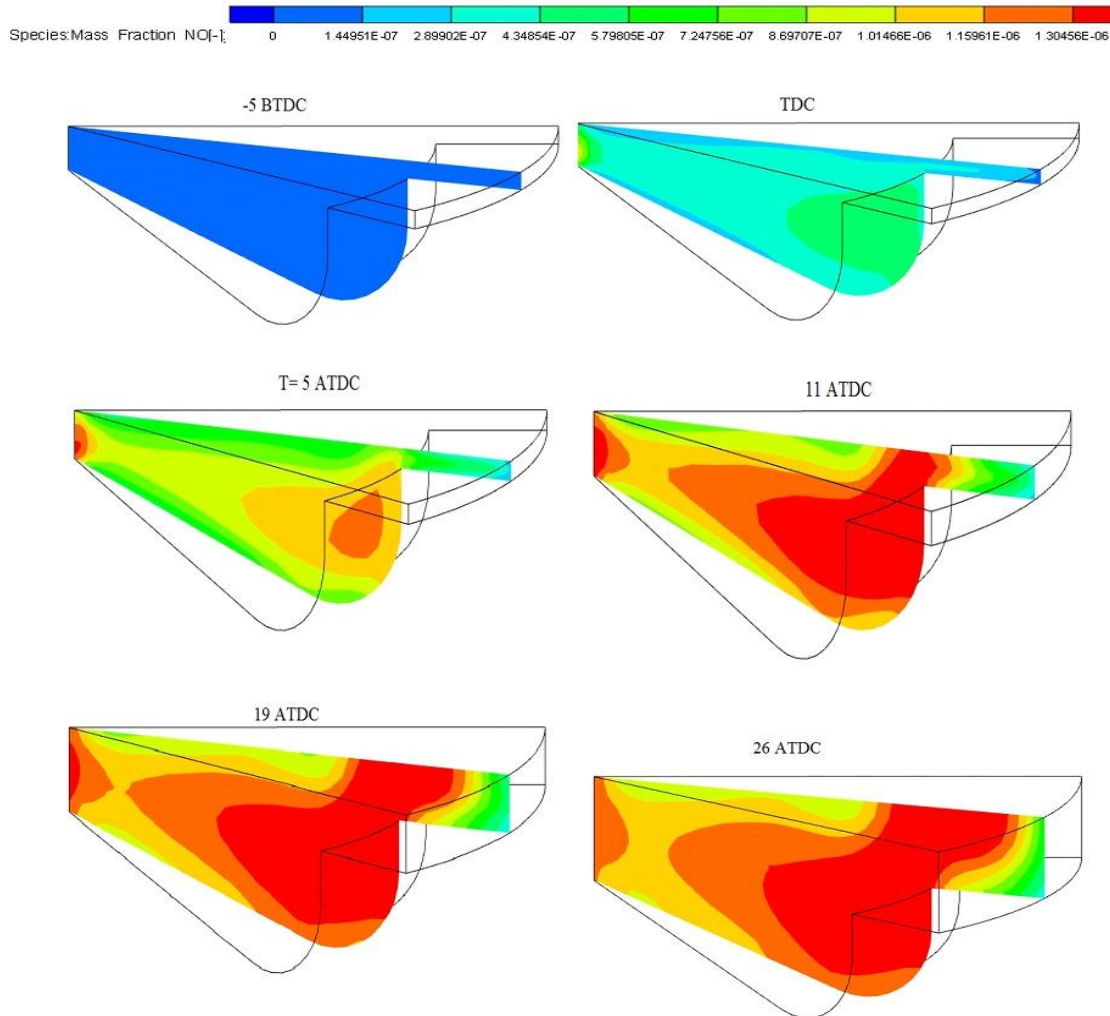


Figure 13- NO contour
شکل ۱۳- کانتور NO در زوایای مختلف لنگ

نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی احتراق HCCI، با سوخت ترکیبی دی‌متیل اتر و متان، به کمک نرم‌افزار AVL FIRE به صورت کوپل با کمکین انجام شد. ابتدا، نتایج با داده‌های تجربی مقایسه و سپس تاثیر تغییر درصد دی‌متیل اتر بر پارامترهای عملکردی مختلف بررسی شد. مهم‌ترین نتایج این بررسی‌ها به شرح زیر است:

- با افزایش میزان دی‌متیل اتر بازه احتراق کوتاه‌تر شده، نرخ واکنش‌های دما بالا کاهش می‌یابد که دلیل آن پیش‌افتادن احتراق و انجام واکنش‌های اصلی در دما و فشار پایین‌تر است.

- با افزودن دی‌متیل‌اتر بیش از ۲۰ درصد احتراق زودتر رخ می‌دهد و موجب صرف انرژی در تولید کار منفی می‌شود. بنابراین، یافتن میزان بهینه افزودن DME به متان جهت اجتناب از اتلاف کار تولیدی ضروری است.
- میزان تولید آلاینده NO در حالت مخلوط دی‌متیل‌اتر و متان بسیار کمتر (تقریباً یک‌پنجم برابر) از حالت متان خالص است که این امر را می‌توان مهم‌ترین مزیت استفاده از دی‌متیل‌اتر دانست. البته، با افزایش دی‌متیل‌اتر، میزان تولید NO نیز افزایش می‌یابد که جهت جلوگیری از افزایش بیش از حد این آلاینده افزودن دی‌متیل‌اتر نباید از حد خاصی فراتر رود.
- با توجه به کاهش چشمگیر آلاینده NO، با افزودن DME و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ناشی از اتلاف کار در مرحله تراکم و همچنین پدیده کوبش، که برای هر موتور میزان خاصی دارد، می‌توان با در نظر گرفتن هر سه پارامتر ذکر شده بهترین حالت عملکردی را یافت.
- با افزایش میزان نسبت هم‌ارزی، مقدار تمام پارامترهای عملکردی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، میزان کسر جرمی سوخت افزایش می‌یابد. اما، برخلاف احتراق متان خالص و به دلیل تمایل بالای دی‌متیل‌اتر به خوداشتعالی، احتراق در زاویه لنگ کمتری اتفاق می‌افتد.
- با افزایش فشار ورودی مقدار سوخت و هوای بیش‌تری متراکم و ظرفیت شیمیایی موجود ناشی از سوخت بیش‌تر می‌شود و در نتیجه میزان حرارت آزاد شده افزایش می‌یابد و دما و فشار بالاتری به دست می‌آید.
- با افزایش دمای ورودی، به علت افزایش سرعت واکنش‌ها، زمان شروع احتراق پیش می‌افتد و میزان بیشنه دما و بیشینه فشار افزایش می‌یابد.
- افزایش تمامی پارامترهای مورد بررسی موجب افزایش دما و در نتیجه افزایش تولید NO می‌شود.

منابع

1. P. M. Najt and D. E. Foster, "Compression-ignited homogeneous charge combustion," Society of Automotive Engineers, 830264, 1983.
2. M. Keshavarz and S. A. Jazayeri, "Performance of Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) engine with premixed methane/air supported by DME for electrical power generation application," *ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2006.
3. T. W. Ryan and C. Matheaus, "Fuel requirements for HCCI engine operation," Society of Automotive Engineers, 2003-01-3181.
4. S. M. Aceves, D. Flowers, J. M. Frias, F. E. Loza, W. J. Pitz and R. Dibble, "Fuel and additive characterization for HCCI combustion," Society of Automotive Engineers, 2003-01-4181.
5. D. Kawano, H. Naito, H. Suzuki, H. Ishii, S. Hori and Y. Goto, "Effects of fuel properties on combustion and exhaust emissions of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine," Society of Automotive Engineers, 2004-01-6691
6. J. B. Masurier, F. Foucher, G. Dayma and P. Dagaut, "Effect of additives on combustion characteristics of a natural gas fueled HCCI engine," *SAE Technical* 2014-01-2662.
7. X. C. W. Chen and Z. Huang, "Study on the ignition, combustion, and emissions of HCCI engines fueled with primary reference fuels," *Society of Automotive Engineers*, 2005-01-0155.
8. L. U. XC, W. Chen and Z. Huang, "Study on the ignition, combustion, and emissions of HCCI engines fueled with primary reference fuels," Society of Automotive Engineers, 2005-01-0155.
9. J. X. Hou and X. Q. Qiao, "Characterization of knocking combustion in HCCI DME engine using wavelet packet transform," *Appl. Energy*, 87, 2010, pp. 1239-1246.
10. S. Yamaoka and et al., "HCCI operation control in a multi-cylinder gasoline engine," *SAE Technical Paper* 2005-01-0120, 2005
11. J. Hyvonen, "Operating Conditions using Spark Assisted HCCI Combustion during Combustion Mode Transfer to SI in a Multi-Cylinder VCR- HCCI Engine," *SAE paper*, 2005-01-0109.
12. K., Yoshida, Koseki T and H. Shoji, "Diversified combustion analysis of homogeneous charge compression ignition engine with Dimethyl Ether," *JSAE Transactions*, 36, No. 4, 2007, pp. 39-44.
13. J. Willand, R. Nieberding, G. Vent, and C. Enderle, "The knocking syndrome -its cure and its potential," *SAE paper* 982483, 1998.
14. T. Omura, and N. Iida, "A study on combustion control by using internal and external EGR for HCCI engines fuelled with DME," *SAE paper*, 2006-32-0045.

15. M. Kaneko, K. Morikawa, J. Itoh, and Y. Saishu, "Study on homogeneous charge compression ignition gasoline engines" *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 46, 2003, pp. 31-36.
16. J. A. Eng, W. A. Leppard, and T. M. Sloane, "The Effects of POx on the Autoignition Chemistry of n-Heptane and Isooctane in an HCCI Engine," *SAE paper*, 2002-01-2861.
17. T. Urushihara, K. Hiraya, A. Kakuhou, and T. Itoh, "Expansion of HCCI operating region by the combination of direct fuel injection, negative valve overlap and internal fuel reformation," *SAE paper*, 2003-01-0749.
18. Y. Urata, M. Awasaka, J. Takanashi, T. Kakinuma, T. Hakozaiki and A. Umamoto, "A study of gasoline-fuelled HCCI engine equipped with an electromagnetic valve train," *SAE paper*, 2004-01-1898.
19. H. Persson, M. Agrell, J. O. Olsson, B. Johansson and H. Ström, "The effect of intake temperature on HCCI operation using negative valve overlap," *SAE Paper*, 2004-01-0944.
20. H. Shoji, Y. Tosaka, K. Yoshida and A. Saima, "Radical behavior in preflame reactions under knocking operation in a spark ignition engine," *SAE paper* 942061, 1994.
21. J. Kusaka and et al, "Predicting homogeneous charge compression ignition characteristics of various hydrocarbons," *Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine Symposium*, Korea, 1999.
22. https://www.afdc.energy.gov/fuels/emerging_dme.html, Accessed Jan 3, 2017.
23. M. Konno and, Z. Chen, "Ignition mechanisms of HCCI combustion process fueled with Methane/DME composite fuel," *SAE Paper*, 2005-01-0182.
24. R. Song and et al, "Effects of compression ratio on the combustion characteristics of a homogeneous charge compression ignition engine," *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 1, No. 4, 2007, pp. 463-467.
25. W. Ying and et al, "Study of HCCI-DI combustion and emissions in a DME engine," *Fuel*, 88, No. 11, 2009, pp. 2255-2261.
26. G. Shibata, and H. Ogawa, "HCCI combustion control by DME-ethanol binary fuel and EGR," *SAE Technical Paper* 2012-01-1577, 2012.
27. S. Sato, S. P. Kweon, D. Yamashita and N. Iida, "Influence of the mixing ratio of double componential fuels on HCCI combustion," *Int. J. Automot. Technol.*, 7, No. 3, 2006, pp. 251-952.
28. C. Huang, M. Yao, X. Lu and Z. Huang, "Study of dimethyl ether homogeneous charge compression ignition combustion process using a multi-dimensional computational fluid dynamics model," *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2009, pp. 1814-1822.
29. G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg and et al, 2000, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, Accessed Jan 3, 2017.
30. S. B. Fiveland and N. A. Dennis, "Development and validation of a quasi-dimensional model for HCCI engine performance and emissions studies under turbocharged conditions," *SAE Technical Paper Series*, 2002-01-1757.
31. K. K. Kou, *Principles of combustion*, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., 1986.

English Abstract

The effect of adding DME to methane on HCCI combustion performance and emissions

Hosein Ezoji¹, Rozbeh Shafaghat^{2*} and Omid Jahanian³

1-Mechanical Engineering Department, Babol noshirvani university of technology, Babol, Iran, hezoji@stu.nit.ac.ir

2- Mechanical Engineering Department, Babol noshirvani university of technology, Babol, Iran, rshafaghat@nit.ac.ir

3- Mechanical Engineering Department, Babol noshirvani university of technology, Babol, Iran, jahanian@nit.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2017.10.03, Received in revised form: 2017.11.05, Accepted: 2017.12.07)

Homogeneous charge compression ignition (HCCI) is regarded as the next generation combustion trend in terms of high thermal efficiency and low emissions. It is difficult to control autoignition and combustion because they are controlled primarily by the chemical kinetics of air/fuel mixture. In this study, a homogeneous mixture of natural-gas and air was used in a compression ignition engine to reduce NOx emissions and improve thermal efficiency. In order to control ignition timing and combustion, a small amount of Dimethyl Ether (DME) was mixed with the natural-gas. In this paper, a multi-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model coupled with chemical kinetics mechanisms was applied to investigate the effects of various temperatures, pressures, equivalence ratios and fuel compositions on the combustion performance and emission characteristics of an HCCI engine. The mixture could run the engine quietly and smoothly over a wide range of loads. Under the present test conditions, finite amount of DME was necessary in order to achieve ignition of the mixture. In addition, thermal efficiency was higher than that of methane fueled engine, when the DME proportion was optimized. NOx emissions were extremely low, however, the emissions of total unburned hydrocarbon were high.

Keywords: HCCI, DME, Fuel composition