



بررسی آلاینده‌های موتوری اشتعال جرقه‌ای با سوخت مخلوط متان و هیدروژن

مهرداد افشاری^{۱*}، جعفر هاشمی داریان^۲، سید علی جزایری^۳، رضا ابراهیمی^۴، امید جهانیان^۵

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، mehrdad_afshari@sina.kntu.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، j.hashemi@sina.kntu.ac.ir

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، jazayeri@kntu.ac.ir

^۴دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، rebrahimi@kntu.ac.ir

^۵دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، jahanian@nit.ac.ir

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۳۸۱۶۶۱۳۱۱

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۰ آذر ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۲ اسفند ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

موتور اشتعال جرقه‌ای

سوخت ترکیبی

متان

هیدروژن

آلاینده‌گی

امروزه، با توجه به ذخایر گسترده گاز طبیعی در جهان و همچنین رویکرد جهانی به کاهش آلاینده‌های محیط زیست، گسترش استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک، در دستور کار بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته است. طرح‌های متنوعی برای گازسوز کردن موتورهای احتراق داخلی ارائه شده است. مخلوط کردن گاز طبیعی با سوخت‌های دیگر برای استفاده از مزایای توأم هر یک از آنها، یکی از این طرح‌هاست. یکی از این مخلوط‌ها، ترکیب متان و هیدروژن با توجه به خصوصیات منحصر به فرد هر کدام است. در این مقاله، برای بررسی عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای با سوخت مخلوط متان و هیدروژن، از شبیه‌سازی ابعادی دوناچی‌ای استفاده شده است. ترکیب شیمیایی مخلوط درون استوانه ۱۱ گونه شیمیایی است که با فرض تعادلی بودن واکنش‌ها تعیین شده اند. برای تعیین آلاینده اکسید نیتروژن و مونواکسیدکربن بترتیب از معادله سینتیکی زلدویچ توسعه یافته و معادله سینتیک شیمیایی دومرحله‌ای استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با داده‌های تجربی موجود در مراجع صحه‌گذاری شده است. تطابق این نتایج نشانده دقت مناسب شبیه‌سازی در پیش‌بینی عملکرد موتور است. اثر ترکیب‌های مختلف متان و هیدروژن با غناهای (نسبت هم‌ارزی) مختلف بر آلاینده‌ها بررسی شد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک برای وسایل نقلیه مطرح است. علاقه به استفاده از سوخت هیدروژن نیز، به عنوان سوخت جایگزین از عزم جهانی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های سنگواره ای (فسیلی) برای کاهش دی‌اکسیدکربن موجود در جو است و در سال‌های اخیر، استفاده از این سوخت در سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی بشدت افزایش یافته است.

البغدادی^۱ [۱] شبیه‌سازی دوناچه‌ای موتور خود را با استفاده از سوخت جایگزین الکل ارائه داد. استلاس^۲ و همکاران نیز از شبیه‌سازی دو ناحیه‌ای با فرض سینتیک شیمیایی، برای پیش‌بینی و مهار کوبش در تحقیق خود استفاده کردند [۲]. با بکارگیری گاز طبیعی به عنوان سوخت جایگزین برای خودروها، خیلی از محققان فعالیت خود را بر روی این سوخت متمرکز کردند. کریم^۳ و همکاران از جمله محققانی بودند که در این زمینه فعالیت‌های بسیاری انجام دادند [۳ و ۴].

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سوخت ترکیبی انجام شده است. شریستا و کریم^۴ اثر افزودن هیدروژن را به متان در موتور اشتعال جرقه‌ای بررسی کردند [۵]. باور^۵ و همکاران تحقیقات تجربی گسترده‌ای در این زمینه انجام دادند [۶]. آن‌ها مطالعه خود را بر روی چهار ترکیب مختلف متان و هیدروژن (۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ هیدروژن) بر روی موتور CFR^۶ در دو سرعت دورانی مختلف انجام دادند. پولاسک^۷ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی دو ناحیه‌ای آلاینده‌های اکسید نیتروژن را در موتور هیدروژن‌سوز بررسی کردند [۷]. ما^۸ و همکاران نیز با استفاده از شبیه‌سازی صفر بعدی، موتوری هیدروژنی را بهینه‌سازی کردند [۸]. آکانسو^۹ و همکاران تأثیرات افزودن هیدروژن را به گاز طبیعی بر عملکرد و آلاینده‌های موتور بررسی کردند [۹]. ورهلست^{۱۰} و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی چند ناحیه‌ای، موتوری اشتعال جرقه‌ای را با سوخت هیدروژن بررسی کردند [۱۰ و ۱۱].

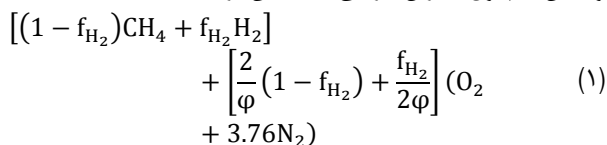
در این مقاله آلاینده‌های نامطلوب تولید شده در فرایند احتراق موتور بنزینی با سوخت مخلوط متان و هیدروژن بررسی شد. برای شبیه‌سازی موتور از شبیه‌سازی ابعادی دوناچه‌ای استفاده شده است. آلاینده‌های تولیدی در غناها و ترکیب‌های گوناگون متان و هیدروژن بررسی شده‌اند. انتقال حرارت و نرخ آزاد شدن انرژی بترتیب با روش -

های وُشنی و تابع وایب شبیه‌سازی شدند. در این مقاله علاوه مقدار آلاینده‌ها، نرخ تولید آنها و و تأثیر دما بر آلاینده‌ها بررسی شد.

(۲) روش ترکیب کردن سوخت

این مطالعه در موتور تک استوانه CFR با مشخصات جدول ۱ انجام شد. برنامه‌نویسی حل معادلات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. شرایط اولیه موتور، دمای هوای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین و فشار ۱ بار است. با توجه به شرایط اولیه، در حالت تمام بار بررسی انجام شده است.

ترکیب شیمیایی مخلوط گازهای نسوخته و ورودی به استوانه، بر اساس فقط هوا (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و همچنین سوخت ترکیبی شامل گازهای متان و هیدروژن است. به این منظور و برای شبیه‌سازی این روند و اضافه کردن هیدروژن، معادله واکنش مواد اولیه بر اساس مقدار معلوم و متغیر کسر مولی هیدروژن $f_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2} + n_{CH_4}}$ موازنه می‌کنیم [۱۲]. این واکنش، که همچنین واکنش گام اول احتراق نیز می‌باشد بدین ترتیب است [۱۲]:



جمله اول واکنش، در واقع سوخت موتور است که سوختی ترکیبی است. محصولات مفروض واکنش فوق در حالت درست^{۱۱} و در حالت غنی و رقیق، بر اساس کسر مولی هیدروژن در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۲ و ۱۳]. برای تعیین ترکیب گازهای سوخته در لحظه‌های بعد از شروع احتراق، نیاز به مقادیر اولیه‌ای خواهیم داشت، که این مقادیر در لحظه اول طبق جدول ۲ محاسبه می‌شوند و در گام‌های بعدی مقادیر لحظه قبل، به عنوان مقادیر جدید فرض خواهند شد.

جدول ۱: مشخصات هندسی موتور [۶]

مقدار	علامت اختصاری	مشخصه
۸۳ mm	B	قطر استوانه
۱۱۴ mm	L	طول پیمایش سمبه
۲۵۴ mm	l	طول دسته سمبه
۰.۶۲۲ L	V _d	حجم کل جابجایی
۳۴ aBDC	IVC	زمان بسته شدن دریچه هوا
۴۰ bBDC	EVO	زمان باز شدن دریچه دود
۲	-	تعداد دریچه
متغیر	r _c	نسبت تراکم

1 Al-Bahgdadi

2 Stelass

3 Karim

4 Bade Shrestha و Karim

5 Bauer

6 Cooperative Fuel Research

7 Polasek

8 Ma

9 Akansu

10 Verhelst

11 Stoichiometric

در معادلات ثابت تعادل فوق، X_i کسر مولی هر جزء (برابر با $\frac{n_j}{\sum_{j=1}^{11} n_j}$) است. هر k_{pi} نیز فقط تابع دماست. به وسیله چندجمله‌هایی مقادیر ثابت تعادل بر حسب دما محاسبه شده است [۱۲]. متغیر جدید $n_{12} = \sum_{j=1}^{11} n_j$ به مسأله اضافه شده است. یک معادله جدید نیز به دستگاه معادلات افزوده می‌شود [۱۲].

$$\sum_{i=1}^{11} X_i = 1 \quad (۴)$$

دستگاه ۱۲ معادله، ۱۲ مجهول به این صورت کامل می‌شود. برای حل این دستگاه غیر خطی از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. محاسبه صحیح خواص ترمودینامیکی سوخت ترکیب متان و هیدروژن در هوا، و همچنین خواص مخلوط گونه‌های تولید شده در کل چرخه، تأثیر بسیار مهمی در پیش‌بینی رفتار جبهه شعله و همچنین پیش‌بینی عملکرد موتور خواهد داشت.

با توجه به فرض گاز کامل، خواص ترمودینامیکی گونه‌های شیمیایی تنها تابع دماست و با تابعی چند جمله‌ای بیان می‌شود. در این تحقیق از معادلات چند جمله‌ای NASA [۱۲] استفاده شده است. با استفاده از این معادلات، خواص ترمودینامیکی گونه‌های شیمیایی بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$\frac{C_{p,i}}{R} = a_{i,1} + a_{i,2}T + a_{i,3}T^2 + a_{i,4}T^3 + a_{i,5}T^4$$

$$\frac{C_{v,i}}{R} = 1 - (a_{i,1} + a_{i,2}T + a_{i,3}T^2 + a_{i,4}T^3 + a_{i,5}T^4)$$

$$\frac{h_i}{RT} = a_{i,1} + a_{i,2} \frac{T}{2} + a_{i,3} \frac{T^2}{3} + a_{i,4} \frac{T^3}{4} + a_{i,5} \frac{T^4}{5} + a_{i,6} \frac{1}{T} \quad (۵)$$

$e_i = h_i - Pv_i$
در مرجع [۱۲] فهرست کاملی از ضرایب مورد نیاز برای انواع مختلف گونه‌های شیمیایی ارائه شده است.

۳-۱) مونواکسیدکربن (CO)

مونواکسیدکربن، گازی بی‌رنگ، بی‌بو و سمی است. هنگامی که اکسیژن کافی برای تبدیل تمام کربن به CO_2 وجود نداشته باشد، مقداری از سوخت نمی‌سوزد و مقداری کربن به صورت CO باقی می‌ماند. مونواکسیدکربن نه تنها به عنوان آلاینده‌ای نامطلوب تلقی می‌شود، بلکه باعث اتلاف انرژی شیمیایی، که نمی‌تواند به صورت کامل در موتور بکار گرفته شود، نیز می‌گردد. مونواکسیدکربن گازی است که می‌تواند بسوزد و انرژی حرارتی تولید کند. بیشترین مقدار مونواکسیدکربن هنگامی تولید می‌شود، که موتور با مخلوط غنی مانند راه‌اندازی موتور یا شتاب گرفتن با بار، کار کند. حتی وقتی هوا و سوخت ورودی، درست یا رقیق باشد نیز، مقداری CO در موتور تولید خواهد شد. اختلاط ضعیف، نواحی محلی غنی و احتراق ناقص، مقداری مونواکسید کربن ایجاد خواهند کرد.

جدول ۲: محصولات واکنش سوخت ترکیبی بر اساس کسر مولی هیدروژن و نسبت هم‌ارزی با فرض احتراق کامل

محصول	$\varphi < 1$	$\varphi = 1$	$\varphi > 1$
CO_2	$1 - f_{H_2}$	$1 - f_{H_2}$	$\frac{1 - f_{H_2}}{\varphi}$
H_2O	$2 - f_{H_2}$	$2 - f_{H_2}$	$\frac{2 - f_{H_2}}{\varphi}$
N_2	$\frac{3.76 \times [2 - 1.5f_{H_2}]}{\varphi}$	$3.76 \times (2 - 1.5f_{H_2})$	$\frac{3.76 \times [2 - 1.5f_{H_2}]}{\varphi}$
O_2	$(2 - 1.5f_{H_2}) \times \left[\frac{1 - \varphi}{\varphi} \right]$	0	0
H_2	0	0	$f_{H_2} \left[\frac{\varphi - 1}{\varphi} \right]$
CH_4	0	0	$(1 - f_{H_2}) \times \left[\frac{\varphi - 1}{\varphi} \right]$

۳) ترکیب گازهای سوخته و تعیین غلظت‌های تعادلی

برای تعیین محصولات واکنش سوختن، ترکیب تعادلی ۱۱ گونه شیمیایی به این صورت در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

$$(1 - f_{H_2})CH_4 + f_{H_2}H_2 + \left[\frac{2}{\varphi}(1 - f_{H_2}) + \frac{f_{H_2}}{2\varphi} \right] (O_2 + 3.76N_2) \quad (۲)$$

$$\rightarrow n_1CO_2 + n_2CO + n_3H_2O + n_4OH + n_5O_2 + n_6H_2 + n_7N_2 + n_8NO + n_9O + n_{10}H + n_{11}N$$

برای محاسبه مقادیر n_1 تا n_{11} نیاز به ۱۱ معادله است. چهار معادله از قانون بقای جرم چهار اتم H, N, C, O به دست می‌آید. هفت معادله دیگر، با توجه به فرض تعادل در محصولات واکنش، از معادلات ثابت تعادل به دست می‌آیند که بدین شرح‌اند [۶ و ۱۲]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} CO_2 \leftrightarrow CO + \frac{1}{2} O_2 & k_{p_1} = \frac{X_5^{0.5} X_2}{X_1} P^{0.5} \\ H_2 \leftrightarrow 2H & k_{p_2} = \frac{X_{10}^2}{X_6} P \\ H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 & k_{p_3} = \frac{X_5^{0.5} X_6}{X_3} P^{0.5} \\ N_2 \leftrightarrow 2N & k_{p_4} = \frac{X_{11}^2}{X_7} P \\ \frac{1}{2} N_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow NO & k_{p_5} = \frac{X_8}{X_7^{0.5} X_5^{0.5}} \\ O_2 \leftrightarrow 2O & k_{p_6} = \frac{X_9^2}{X_5} P \\ \frac{1}{2} H_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow OH & k_{p_7} = \frac{X_4}{X_6^{0.5} X_5^{0.5}} \end{array} \right. \quad (۳)$$

ساز و کار حرارتی یا زلدویج شامل دو واکنش زنجیره‌ای بدین شرح است [۱۲]:

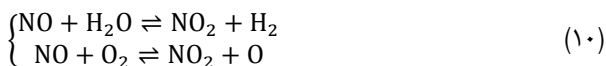


که می‌توان به آن این واکنش را اضافه نمود:



که در این حالت به آن سازوکار زلدویج توسعه یافته می‌گویند. عموماً این سازوکار به سازوکار احتراق سوخت از طریق اجزای شیمیایی O, OH, O_2 جفت می‌شود. با این وجود چنانچه قبل از تولید NO ، فرآیند احتراق سوخت تکمیل شود، این دو سازوکار مجزا از هم عمل می‌کنند. در این حالت چنانچه مقیاس‌های زمانی به اندازه کافی بزرگ باشند، می‌توان فرض کرد که غلظت N_2, O_2, O و OH ، مقادیر غلظت در حال تعادل اند و غلظت N در حالت دائمی محاسبه می‌شود که این فرضیات حل مسأله تولید NO را ساده می‌کنند. یادآوری می‌شود که سازوکار زلدویج شدیداً به دما وابسته است و معمولاً سازوکار حرارتی وقتی که دما گرمتر از ۱۷۰۰ درجه کلوین باشد، اهمیت پیدا می‌کند [۱۲]. بنابراین عموماً این سازوکار تنها بعد از تشکیل شعله در نظر گرفته می‌شود.

NO می‌تواند به نوبه خود واکنش دهد تا به طرق مختلف، NO_2 تولید کند [۱۰]:



نیترژن جو به صورت مولکول پایدار دو اتمی، در دماهای خنک وجود دارد و در هوای جو، فقط مقادیر بسیار اندکی از اکسیدهای نیترژن، یافت می‌شوند. ولی در دماهای بسیار گرم که در محفظه احتراق موتور اتفاق می‌افتد، مقداری از نیترژن دو اتمی به نیترژن تک اتمی تجزیه می‌شود که قابلیت واکنش دارد:



ثابت تعادل شیمیایی برای معادله (۱۱)، بسیار به دما وابسته است. مقادیر فراوانی نیترژن تک اتمی در محدوده دمایی بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه کلوین، در موتور تولید می‌شود. سایر گازهایی که در دماهای خنک، پایدارند ولی در دماهای گرم واکنش پذیر می‌شوند و در تشکیل NO_x شرکت می‌نمایند، شامل اکسیژن و بخار آب اند که بدین صورت شکسته می‌شوند [۸ و ۱۰]:



بررسی ثابت تعادلی واکنش (۱۱) و واکنش‌های (۱۲)، نشان می‌دهد که با افزایش دمای محفظه احتراق، واکنش تمایل بسیار بیشتری به حرکت از چپ به راست می‌یابد. هر چه دمای واکنش احتراق گرمتر باشد، نیترژن دو اتمی بیشتری به نیترژن تک اتمی تجزیه خواهد شد و NO_x بیشتری تولید می‌گردد. در دماهای خنک NO_x بسیار اندکی ایجاد می‌شود [۱۲].

لذا مقدار مونواکسیدکربن تولیدی بشدت به غنای مخلوط وابسته است. در این پژوهش، برای مطالعه این گونه شیمیایی، از شبیه‌سازی سینتیک شیمیایی استفاده شد [۱۲]. ساز و کار دو قدمی (۶) برای اکسایش مونواکسیدکربن فرض شد [۱۲]:



با این فرض که گونه‌های OH, CO_2, O_2 ، در تعادل شیمیایی‌اند، تغییر غلظت مونواکسیدکربن بدین صورت محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{V_b} \frac{dn_{CO}}{dt} &= (R_1 + R_2) \left(1 - \frac{[CO]}{[CO]_e} \right) \\ R_1 &= k_1^+ [CO]_e [OH]_e \\ k_1^+ &= 6.76 \times 10^{10} \exp\left(\frac{T}{1102}\right) \\ R_2 &= k_2^- [CO]_e [O_2]_e \\ k_2^- &= 2.5 \times 10^{12} \exp\left(\frac{-24055}{T}\right) \end{aligned} \quad (۷)$$

که n_{CO} تعداد مول مونواکسیدکربن موجود در حجم ناحیه سوخته و زیرنویس e به غلظت گونه‌ها در حالت تعادل است. با حل معادله (۷)، غلظت نهایی مونواکسیدکربن به دست می‌آید.

۲-۳) اکسیدهای نیترژن (NO_x)

گازهای خروجی موتور می‌توانند تا ۲۰۰۰ ppm از اکسیدهای نیترژن داشته باشند [۱۲]. بیشتر این مقدار مونواکسیدنیترژن (NO) است. البته مقدار کمی دی‌اکسیدنیترژن (NO_2) و مقادیر جزئی دیگری از سایر ترکیبات نیترژن و اکسیژن نیز وجود دارند. تمامی ترکیبات اکسیدهای نیترژن، با هم به صورت NO_x گروه‌بندی می‌شوند که در آن X ، نشان دهنده عدد مناسبی است. NO_x آلاینده بسیار نامطلوبی است، و مقررات محدود کننده مقدار مجاز آن، در حال سخت‌تر شدن است. NO_x در فشار محیط واکنش می‌دهد تا از آن تشکیل دهد که یکی از منابع اصلی مه‌دود نورشیمیایی^۲ است. این پدیده یکی از مشکلات عمده در بسیاری از شهرهای بزرگ جهان است. مه‌دود، از واکنش نورشیمیایی گازهای خروجی از موتور و هوای جو، در مجاورت نور خورشید تشکیل می‌شود. به دلیل اهمیت اکسیدهای نیترژن در آلودگی هوا، سازوکار تولید آن‌ها بررسی می‌شود.

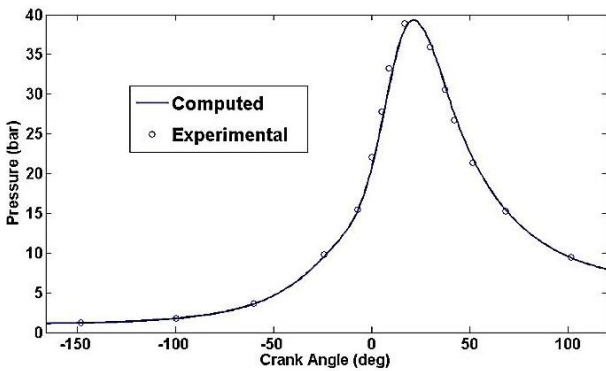
۱-۲-۳) سازوکار حرارتی یا زلدویج

سازوکار سینتیکی حرارتی یا زلدویج در محدوده دمای داغ و برای گستره نسبت تعادلی وسیعی، با اهمیت است [۱۲].

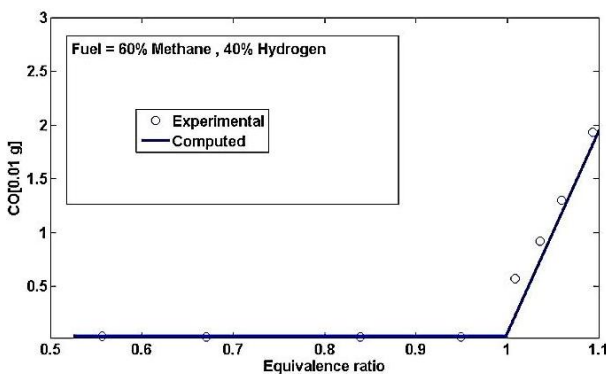
¹ Ozone

² Photochemical Smog

در شکل ۳، تغییرات مونواکسیدکربن برای سه غنای مختلف نوعی سوخت بر حسب زاویه لنگ در چرخه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش غنا نرخ تولید این گونه شیمیایی نیز افزایش می‌یابد. شکل ۴، تغییرات تولید اکسید نیتروژن را در چرخه برای سه ترکیب مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نمودار با افزایش درصد هیدروژن، اکسید نیتروژن بیشتری تولید خواهد شد. البته این اختلاف در قله نمودارها چشمگیر است ولی در انتهای مرحله انبساط و آغاز باز شدن دریچه دود، که گونه‌های شیمیایی خروجی در این لحظه به عنوان آلاینده به شمار می‌آیند، این اختلاف کمتر است. شکل ۵، تغییرات تولید اکسید نیتروژن را در چرخه برای سه غنای نوعی سوخت نشان می‌دهد. واضح است که نرخ تولید این گونه شیمیایی بشدت وابسته به غنا است. شکل ۶، تغییرات تولید اکسید نیتروژن را بر حسب غنا نشان می‌دهد که با داده‌های تجربی نیز مقایسه شده است. البته در این شکل شبیه سازی با درصدی خطا مقدار این آلاینده را پیش‌بینی کرده است.



شکل ۱: مقایسه تغییرات فشار متان در چرخه با داده‌های تجربی [۱۲] ($\theta_{SOI} = -20^\circ CA$; $N = 900 \text{ rpm}$; $r_c = 8.5$; $\phi = 0.99$)



شکل ۲: تغییرات تولید مونواکسیدکربن بر حسب غنا و مقایسه با داده‌های

تجربی [۱۲]

($N = 700 \text{ rpm}$; $r_c = 9$)

در این تحقیق برای پیش‌بینی غلظت NO_x از سازوکار زلدویچ توسعه یافته، استفاده شده است. لذا با فرض حالت پایا خواهیم داشت [۱۲]:

$$d[N]/dt \approx 0 \quad (13)$$

همچنین با فرض مقادیر غلظت تعادلی OH, O, O_2, N_2 سازوکار زلدویچ، نرخ تغییرات مول اکسید نیتروژن را بدین صورت محاسبه خواهد کرد [۱۲]:

$$\frac{1}{V_b} \frac{dn_{NO}}{dt} = \frac{2R_1 \left\{ 1 - \left(\frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\}}{1 + \left(\frac{[NO]}{[NO]_e} \right) \frac{R_1}{R_2 + R_3}}$$

$$R_1 = k_1^+ [O]_e [N_2]_e$$

$$k_1^+ = 7.6 \times 10^{13} \exp\left(\frac{-38000}{T}\right) \quad (14)$$

$$R_2 = k_2^- [O]_e [NO]_e$$

$$k_2^- = 1.5 \times 10^9 \exp\left(\frac{-19500}{T}\right)$$

$$R_3 = k_3^- [H]_e [NO]_e$$

$$k_3^- = 2 \times 10^{14} \exp\left(\frac{-23650}{T}\right)$$

۴) بحث بر روی نتایج

در شکل ۱ نمودار تغییرات فشار داخل استوانه بر حسب زاویه لنگ برای سوخت متان رسم و با نتایج تجربی مقایسه شده است. نحوه آزاد شدن انرژی با استفاده از تابع وایب شبیه سازی شده است [۱۱]. برای شبیه سازی انتقال حرارت نیز از روش وشنی استفاده شد [۱۱] و [۱۲]. فشار داخل استوانه قبل از جرقه به علت تراکم محفظه احتراق به صورت تقریباً بی‌دررو و بازگشت‌پذیر افزایش می‌یابد.

این روند پس از جرقه، تا انتهای مهلت اشتعال ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن به علت آزاد شدن انرژی احتراق، افزایش فشار چشمگیرتر می‌شود. بعد از نقطه مکث بالا، آزاد شدن انرژی عاملی برای افزایش فشار و افزایش حجم محفظه احتراق، عاملی برای کاهش فشار است. تا مدت زمانی بعد از نقطه مکث بالا، تأثیر آزاد شدن انرژی بیشتر است و فشار افزایش می‌یابد، بعد از آن تأثیر افزایش حجم محفظه احتراق غالب می‌شود و فشار کاهش می‌یابد. به همین دلیل محل وقوع بیشینه فشار کمی بعد از نقطه مکث بالا است. روند تغییرات ذکر شده در شکل بخوبی مشخص است. علاوه بر آن همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند که نشان دهنده توانایی شبیه‌سازی برای پیش‌بینی فشار محفظه احتراق است.

شکل ۲، تغییرات تولید مونواکسیدکربن را بر حسب غنا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در محدوده سوخت غنی، تولید مونواکسیدکربن شروع به افزایش می‌کند و در ادامه نیز روند صعودی دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در شکل مقایسه شده است.

¹ Isentropic

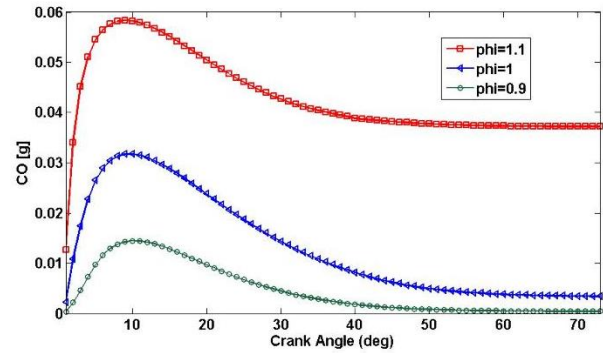
از دو نمودار فوق نتیجه می‌گیریم که تا حدود غنای ۰٫۹ مقدار این آلاینده رو به افزایش است و پس از آن این روند کاهش می‌یابد. اگر چه حداکثر دمای شعله در غنای درست ($\phi = 1$)، رخ خواهد داد ولی حداکثر NO_x در مخلوط کمی فقیر با حدود ($\phi = 90\%$)، قرار دارد. در این شرایط دمای شعله هنوز بسیار داغ است و بعلاوه مقدار اکسیژن اضافی وجود دارد که با نیتروژن، ترکیب می‌شود و اکسیدهای مختلف را تشکیل می‌دهد. به دلیل آبی نبودن واکنش‌های شیمیایی، تشکیل NO_x ، علاوه بر دما به فشار، رقت و زمان احتراق در داخل استوانه، وابسته است.

تولید آلاینده‌ها بشدت تابع دماست. در حقیقت تمام متغیرهایی که باعث تغییر در آلاینده‌ها می‌شوند مانند سرعت دورانی موتور، فشار اولیه و نسبت تراکم بر فشار و دمای درون استوانه تأثیر دارند. دما اساسی‌ترین تأثیر را در تولید آلاینده‌ها دارد لذا در شکل‌های ۷ تا ۱۲ تغییرات ترکیب گازهای سوخته در حالت تعادلی بر حسب دما بررسی شده است. نمودارها در فشار پایه ۳۰ (bar) ترسیم شده‌اند. این فشار متناظر با دمایی است که واکنش‌ها به حالت پایدار می‌رسند. همچنین مطالعه نرخ تولید، تا دمای ۴۰۰۰ کلوین گسترش یافته است. البته این مقدار دما در موتور وجود نخواهد داشت و این نمودارها تا حدود حداکثر ۲۸۰۰ کلوین برای موتورهای احتراق داخلی کاربرد دارند.

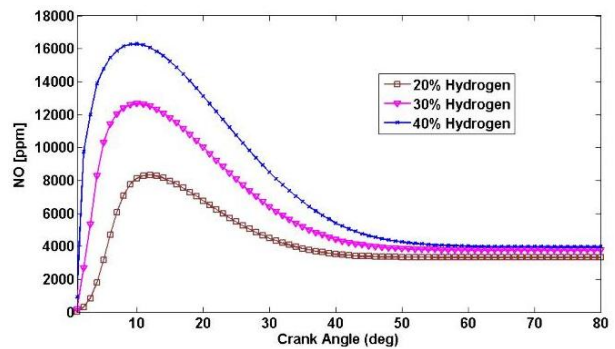
نمودارهای ۷ تا ۹ برای سوخت متان خالص در سه مخلوط فقیر (۰٫۵)، درست (۱) و غنی (۱٫۶) ترسیم شده‌اند. همین روند در نمودارهای ۱۰ تا ۱۲، این بار برای سوخت ترکیبی با ۴۰٪ هیدروژن، مشاهده می‌شود. در این نمودارها مشخص است که در هر دو سوخت با افزایش غنا، تولید آب و دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد. همچنین با گرم شدن دما در غنای مشخص، نرخ تولید هر دو گونه سیر نزولی دارد. این در حالی است که نرخ تولید گونه‌های OH، NO و CO در غنای ثابت با گرم شدن دما، افزایش می‌یابند.

افزایش اکسید نیتروژن و کاهش مونواکسیدکربن و دی‌اکسید کربن، با افزایش سهم هیدروژن در تمام غناها نیز مشهود است. البته این مقادیر راجع به حل تعادلی‌اند و برای دو گونه CO و NO مطالعه سینتیکی انجام شده است که قبلاً به آن اشاره شد.

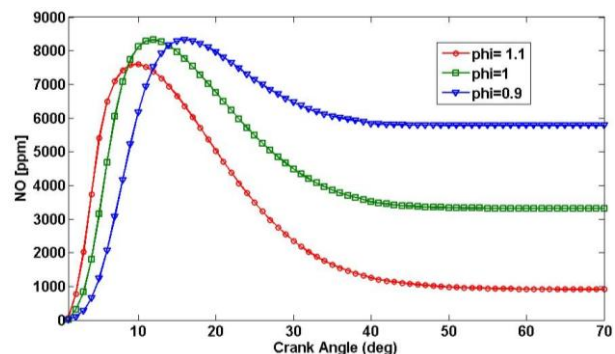
همچنین با توجه به اینکه مقادیر O، H و N در مقایسه با دیگر گونه‌ها ناچیز است و روند تولید آنها معمولاً در دماهای داغ (گرمتر از ۳۰۰۰ کلوین) افزایش می‌یابد، روند تغییرات تولید آنها در نمودارها نشان داده نشده است. همچنین اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن نیز از آنجا که اساساً آلاینده به شمار نمی‌آیند، (۷۹٪ هوا را نیتروژن تشکیل می‌دهد و یکی از مهمترین دلایل استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت نیز پاک بودن و آلاینده محسوب نشدن آن است)، روند تولید این دو گونه نیز در نمودارها نشان داده نشده است.



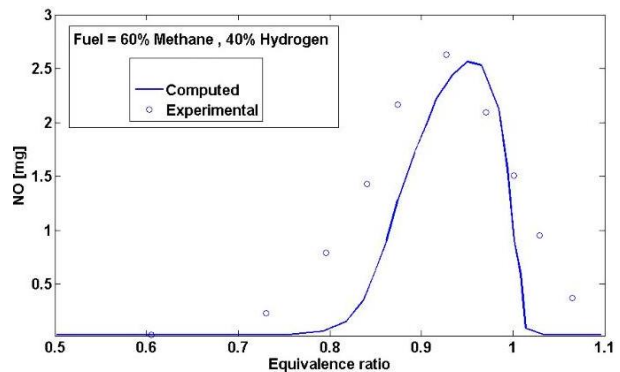
شکل ۳: تولید مونواکسیدکربن برای سه غنا با ترکیب ۲۰٪ هیدروژن ($N = 900 \text{ rpm}$; $r_c = 8.5$)



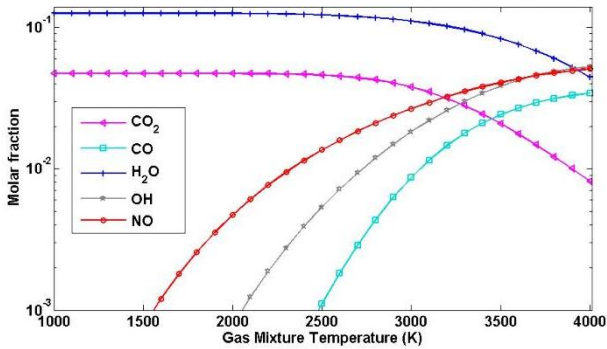
شکل ۴: تولید اکسید نیتروژن در طی چرخه برای سه ترکیب مختلف ($N = 900 \text{ rpm}$; $r_c = 8.5$; $\phi = 1$)



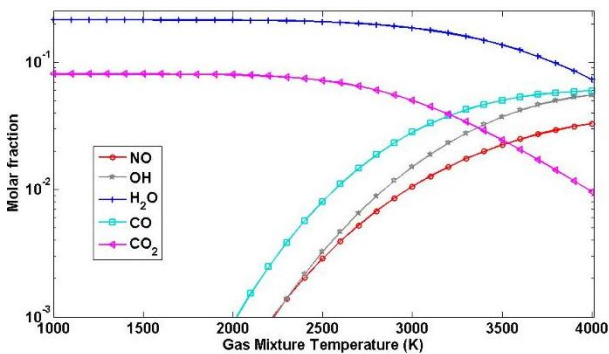
شکل ۵: تولید اکسید نیتروژن برای سه غنا با ۲۰٪ هیدروژن ($N = 900 \text{ rpm}$; $r_c = 8.5$)



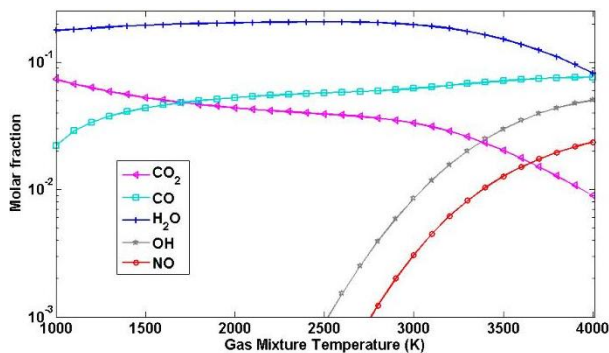
شکل ۶: مقایسه تولید اکسید نیتروژن بر حسب غنا با داده‌های تجربی [۸] ($N = 700 \text{ rpm}$; $r_c = 9$)



شکل ۱۰: گازهای سوخته بر حسب دما در حالت مخلوط فقیر در ترکیب ۴٪ هیدروژن
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 0.5$)



شکل ۱۱: گازهای سوخته بر حسب دما در حالت درست در ترکیب ۴٪ هیدروژن
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 1$)

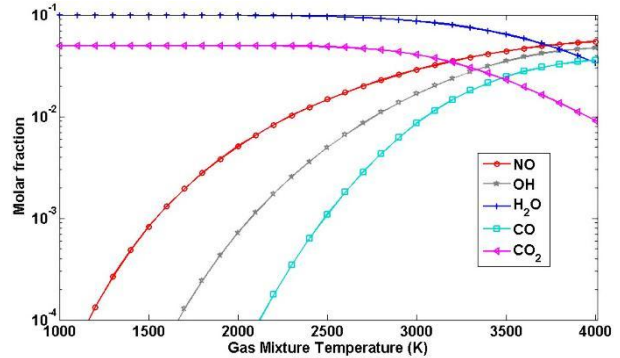


شکل ۱۲: گازهای سوخته بر حسب دما در حالت مخلوط غنی در ۴٪ هیدروژن
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 1.6$)

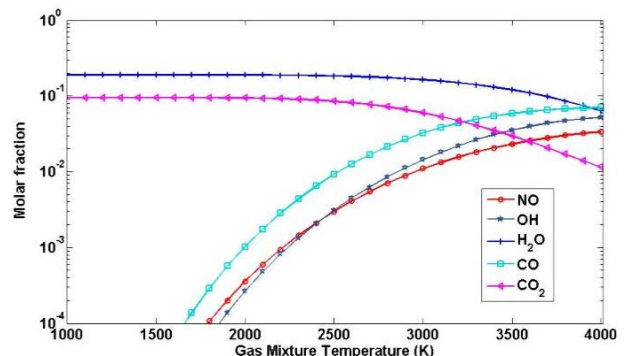
۵) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

گرم شدن دمای ناشی از اضافه نمودن هیدروژن به متان سبب افزایش آلایندگی اکسیدهای نیتروژن خواهد شد. این روند با افزایش مقدار افزودنی هیدروژن، افزایش می‌یابد. در ترکیبی مشخص، با افزایش غنا تا حدود ۰٫۹، مقدار تولید اکسید نیتروژن افزایش و بعد از آن این روند سیر نزولی دارد به طوری که بیشینه مقدار این آلایندگی در حدود غنای ۰٫۹ می‌باشد. از سوی دیگر بعلاوه وجود کربن در

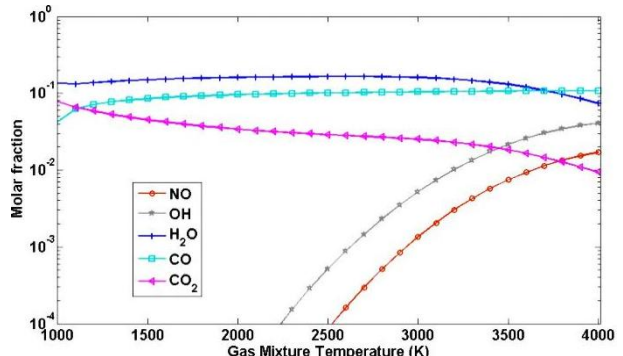
نکته بعدی، توجه به روند تولید هیدروکسیل است. هیدروکسیل ملکولی فعال^۱ است و شدیداً میل به واکنش دارد. همان‌طور که در نمودارها قابل مشاهده است، این گونه شیمیایی تقریباً به موازات NO (در یک محدوده دمایی و به مقدار تقریباً مساوی)، تولید می‌شود. به همین دلیل است که همان‌گونه که در سازوکار زلدویچ به آن اشاره شد این گونه شیمیایی نیز وارد سازوکار تولید NO_x می‌شود.



شکل ۷: گازهای سوخته بر حسب دما در حالت مخلوط فقیر برای ۱۰٪ متان
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 0.5$)



شکل ۸: گازهای سوخته بر حسب دما در حالت درست برای ۱۰٪ متان
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 1$)



شکل ۹: نمودار ترکیب گازهای سوخته بر حسب دما در حالت مخلوط غنی برای ۱۰٪ متان
($P = 30 \text{ bar}; \phi = 1.6$)

¹ Radical

References

- [1] A. Baghdadi, M. Abdul-Resul, Computer simulation for combustion exhaust emission in spark ignition engine fuelled with ethanol, Department of Mechanical Engineering, Libya, Yefren, 2002
- [2] O. Stenlaas, A. Gogan, R. Egnell, B. Sundén, The influence of nitric oxide on the occurrence of auto ignition in the end gas of the spark ignition engines, SAE International, Paper No. 2002-01-2699, 2002
- [3] G.A. Karim, J. Gao, Prediction of the performance of spark ignition gas engines including knock, SAE International, Paper No. 932823, 1993
- [4] B. Shrestha, G.A. Karim, A predictive model for gas fuelled spark ignition engine applications, SAE International, Paper No. 1999-01-3482, 1999
- [5] B. Shrestha, G.A. Karim, Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 24, pp. 577-586, 1999
- [6] J. Bauer, T.W. Forest, Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fuelled vehicles, Part 1: Effect on S.I. engine performance, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp. 55-70, 2001
- [7] S. Polasek, M. Macek, Application of advanced simulation methods and combustion with experimental modeling of hydrogen-fuelled engine emissions, SAE International, Paper No. 2002-01-5373, 2002
- [8] J.S. Ma, Y. Zhou, Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 77-83, 2003
- [9] S. Akansu, Z. Kahraman, T.N. Veziroglu, Internal combustion engines fuelled by natural gas- hydrogen mixtures, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, pp. 1527-1539, 2004
- [10] S. Verhelst, R. Sierens, A quasi-dimensional model for the power cycle of a hydrogen-fueled ICE, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 3545-3554, 2007
- [11] S. Verhelst, C.G.W. Sheppard, Multi-zone thermodynamic modeling of spark ignition engine combustion, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1326-1335, 2009
- [12] F. Perini, F. Paltrinieri, E. Mattarelli, A quasi-dimensional combustion model for performance and emissions of SI engines running on hydrogen-methane blends, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 4687-4701, 2010

ساختار هیدروژن، مقدار تولید آلاینده‌های کربن‌دار مانند مونواکسید و دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. این کاهش با افزایش مقدار افزودنی هیدروژن، بیشتر می‌شود. در یک ترکیب مشخص، با افزایش غنا و به تبع آن افزایش کربن سوخت، مقدار تولید آلاینده‌های کربن‌دار افزایش می‌یابد. ملکول فعال هیدروکسیل، تأثیر کلیدی در تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن دارد. این ملکول فعال در محدوده دمایی بسیار نزدیک به محدوده دمایی تولید اکسید نیتروژن و با نرخ تولید تقریباً یکسان با آن تولید می‌شود. با گرم شدن دما مقدار تولید این ملکول فعال افزایش می‌یابد.

اختصارات

حروف انگلیسی

<i>B</i>	قطر داخلی استوانه، mm
<i>C</i>	غلظت، ظرفیت گرمایی ویژه، $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>f</i>	کسر مولی
<i>K</i>	ثابت تعادل
<i>L</i>	جابه‌جایی سمبه، mm
<i>l</i>	طول دسته سمبه، mm
<i>N</i>	دور موتور، دور در دقیقه
<i>n</i>	تعداد مول
<i>P</i>	فشار، bar
<i>T</i>	دما، K
<i>V</i>	حجم، m^3
حروف لاتین	
θ	زاویه لنگ
φ	غنا (نسبت هم‌ارزی)
زیر نویس‌ها	
<i>c</i>	تراکم
<i>d</i>	جابه‌جایی



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Study of spark ignition engine emissions fueled by blended hydrogen and methane

M. Afshari^{1*}, J. Hashemi Daryan², S.A Jazayeri³, R. Ebrahimi⁴, O. Jahanian⁵

¹K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mehrdad_afshari@sina.kntu.ac.ir

²K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, j.hashemi@sina.kntu.ac.ir

³K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, jazayeri@kntu.ac.ir

⁴K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, rebrahimi@kntu.ac.ir

⁵Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, jahanian@nit.ac.ir

*Corresponding Author, Phone Number: +98-938-166-1311

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 December 2013

Accepted: 03 March 2014

Keywords:

Spark ignition engine

Blended fuel

Methane

Hydrogen

Emission

ABSTRACT

Nowadays, considering vast natural gas reserves in the world and also the general approach to reduce environmental contaminants, the use of the natural gas as the clean fuel has been increased in many countries. Various schemes have been offered to use the natural gas in internal combustion engines. Blending the natural gas with other fuels in order to profit their different advantages is one of plans. Due to their unique characteristics, one of blends is hydrogen and methane. In this paper, a semi-dimensional, two-zone model has been used to study the performance of the hydrogen-methane fueled spark ignition engine. The in-cylinder mixture chemical composition included 11 chemical species, which were determined by the chemical equilibrium assumption. The extended Zeldovich mechanism was used to model the nitrogen oxides concentration. In addition, in order to predict the carbon monoxide concentration, a two-stage chemical kinetic mechanism was utilized. The model validation was done by comparing the results with literature experimental studies. A good agreement between results showed that the model had a good accuracy in predicting the performance of the engine. Engine emissions were compared and thoroughly discussed in different hydrogen-methane compositions and also equivalence ratios.