



پایش زمان بندی احتراق گاز طبیعی در موتور تراکمی همگن با افزودن گاز سنتزی با شبیه سازی سینتیک شیمیایی

سینا وشتانی^۱، مسعود ریحانیان^۲، سمیرا اکبری^۳، وحید حسینی^{۴*}

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، voshtani@mech.sharif.edu

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، m_reyhaniyan@mech.sharif.edu

^۳دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، samira_akbari89@yahoo.com

^۴دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، vhosseini@sharif.edu

*نویسنده مسؤل، شماره تماس: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۵۸۵

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ بهمن ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۵ اسفند ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

موتور اشتعال تراکمی همگن

شبیه سازی تک ناحیه ای

زمان آغاز احتراق

پایش احتراق

گاز سنتزی

چکیده

موتورهای اشتعالی تراکمی همگن به علت قابلیت بازدهی حرارتی بزرگ، کاهش شدید آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و کاهش مصرف سوخت در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بزرگ‌ترین معضل این موتورها، پایش احتراق است که در محدوده عملکردی باریکی میان ضربه و بدسوزی اتفاق می‌افتد. گاز طبیعی از سوخت‌های پرکاربرد در موتورهای احتراق داخلی است. استفاده از گاز طبیعی در موتورهای تراکمی همگن، به علت تمایل ضعیف آن به خود اشتعالی، دشوار است و در نتیجه در بررسی پایش احتراق باید از روش‌هایی نظیر افزودن گاز سنتزی استفاده کرد.

در این مقاله، شبیه سازی صفر بعدی تک ناحیه ای به طور مستقل برای پیش بینی زمان بندی احتراق و اثر اضافه کردن گاز سنتزی استفاده شد. این گاز دارای ترکیب متغیری از کربن مونوکسید و هیدروژن است که به عنوان عامل پایش احتراق است. برای صحت سنجی از نتایج تجربی حاصل از موتور تک استوانه CFR استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن گاز سنتزی و در کنار آن تغییر درصد هیدروژن در ترکیب گاز سنتزی، با تغییر خواص ترمودینامیکی و خواص شیمیایی احتراق، باعث تغییر زمان شروع احتراق می‌گردد و می‌تواند روش مناسبی برای پایش احتراق در موتور HCCI به دست دهد که باعث گسترده شدن محدوده کاری موتور، افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت خصوصاً در مخلوط‌های فقیرتر و دمای ورودی خنک‌تر، می‌شود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

در مقاله حاضر، از شبیه سازی تک منطقه‌ای صفر بعدی با سازوکار مفصل شیمیایی (شامل ۳۲۵ واکنش و ۵۳ گونه) با فرض مخلوط سوخت و هوای همگن، خواص ترمودینامیکی یکنواخت در محفظه و متغیر با زمان، با سوخت گاز طبیعی (CNG) برای پیش‌بینی و پایش زمان شروع احتراق با تغییرات ترکیب درصد گاز سنتزی (RG) از صفر تا ۴۰ درصد و تغییر نسبت H_2 در ترکیب $RG (CO-H_2)$ از صفر تا ۱۰۰ درصد بررسی شد و نتایج حاکی از آن است که افزایش مقدار RG و افزایش ترکیب درصد H_2 موجب می‌شود احتراق زودتر رخ دهد که امکان استفاده از غنای کمتر و مخلوط رقیق‌تر با دمای ورودی خنک‌تر و نسبت تراکم کوچک‌تر برای عملکرد موتور را فراهم می‌کند. این نتایج حاصل از تغییر خواص ترمودینامیکی و سینتیکی در مخلوط به طور مجزاست.

(۲) شبیه سازی سینتیکی-ترمودینامیکی موتور HCCI

شبیه‌سازی عددی موتور HCCI بر اساس سینتیک مفصل شیمیایی سوخت با برنامه‌ای مجزا در نرم‌افزار Matlab نوشته شده است. سوخت در این موتور گاز طبیعی است که عمده آن از متان با عدد اکتان ۱۲۰ تشکیل شده و دارای احتراق تک مرحله‌ای است. چون مولکول‌های متان در برابر خود اشتعالی از خود مقاومت قوی نشان می‌دهند، نیازمند دمای احتراق گرم و گرمای آزاد شده بیشتر در مرحله تراکم است که باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.

برای جلوگیری از ضربه و تغییر زمان‌بندی احتراق، روش پایشی نیاز است. سازوکار در نظر گرفته شده برای سینتیک شیمیایی گاز طبیعی GRI MECH 3.0 [۹] است. فرضیات شبیه سازی بدین شرح است:

- دما، فشار و ترکیب محصولات درون استوانه همواره از معادله گاز کامل پیروی می‌کند.
- شبیه سازی برای یک چرخه بسته موتور که از زمان باز شدن دریچه ورود هوا تا بسته شدن دریچه خروج دود است.
- برای کل سامانه (درون استوانه) یک دما، فشار و ترکیب مخلوط یکسان برقرار است.
- محاسبه انتقال حرارت از گازهای درون استوانه به دیواره با تقریب خوبی از معادله اصلاح شده ووشنی برای موتور HCCI استفاده می‌شود (شامل انتقال حرارت ساده جابجایی و تشعشع است).
- قانون بقای جرم درون استوانه همواره برقرار است و در نتیجه نشتی به خارج از استوانه وجود ندارد.
- واکنش‌های شیمیایی وابسته به سازوکار در دمای خنک‌تر از 700 K غیر فعال است.

موتورهای اشتعالی تراکمی همگن به عنوان نسل جدیدی از موتورهای احتراق داخلی معرفی شده‌اند که هدف اصلی آن دستیابی به کاهش آلاینده‌های خروجی نظیر NO_x است که در پی آن بهبود بازدهی و کاهش مصرف سوخت مورد توجه قرار گرفته است. در این موتورها، سوخت و هوا به طور همگن وارد محفظه احتراق می‌شود و از نقاط مختلف درون محفظه، خود اشتعالی بدون تشکیل شعله آغاز می‌گردد و مخلوط همگن سوخت و هوا که معمولاً رقیق است، با گرمای آزاد شده از احتراق مشتعل می‌شود. به علت رقیق بودن مخلوط و احتراق ناگهانی، بازده حرارتی، بزرگ و دمای احتراق خنک است که باعث کاهش آلاینده NO_x می‌گردد.

در بررسی و پیاده‌سازی احتراق HCCI، مشکلاتی وجود دارد که مهم‌ترین آن نبود ابزاری مشخص در پیش‌بینی و پایش احتراق است. علت آن وابستگی احتراق به واکنش‌پذیری مخلوط و اثر سینتیک شیمیایی است. علاوه بر آن، محدوده باریک احتراق بین ضربه و بد سوزی اهمیت پایش زمان‌بندی را در این موتورها دوچندان می‌کند. روش‌های مختلفی برای پایش زمان‌بندی احتراق ارائه شده است که به دو دسته کلی تقسیم می‌شود. دسته اول: تغییرات خواص ترمودینامیکی مخلوط که مستقیماً به دمای مخلوط وابسته است. برای مثال اولین کارها در این زمینه تحقیق فلاورز و همکاران [۱] است که تغییر مناسب دمای ورودی با سوخت پروپان باعث گردیده احتراق زودتر رخ دهد.

همچنین مطالعات جامع دیگر با بررسی و تغییر شرایط مختلف اولیه نظیر دمای ورودی، غنا، درصد EGR با سوخت دی متیل اتر (DME) با شبیه سازی تک منطقه‌ای و شرایط بهینه برای کارکرد و پایش احتراق به دست آمده است [۲-۳].

دسته دوم پایش زمان احتراق وابسته به تغییر خواص واکنش‌پذیری مخلوط تحت سینتیک شیمیایی است مانند اختلاط دو یا چند سوخت به طور همزمان با خواص اشتعال‌پذیری مختلف [۴] و یا استفاده از افزودنی‌هایی نظیر گاز سنتزی (RG) ناشی از تجزیه سوخت هیدروکربنی.

چون ذخیره و حمل و نقل چند سوخت عملاً دشوار است، از روش افزودن گاز سنتزی که نیاز به حمل چند سوخت را برطرف می‌کند و علاوه بر آن نسبت به تغییر خواص سیکیل بخوبی واکنش نشان می‌دهد، استفاده می‌گردد. از اولین کارهای جدی افزودن RG در موتور HCCI به توسط شودو [۵] که با افزودن CO ، H_2 به دی متیل اتر بوده، انجام گرفت. همچنین مگاراتی و تسولاکی [۶] با افزودن آن به گاز طبیعی متوجه تغییرات قابل توجهی در زمان و دوره احتراق شدند که باعث کاهش PM ، NO_x می‌گشت و بعد از آن حسینی و چکل [۷-۸] در مجموعه ای کامل از تحقیقات تجربی اثر افزودن RG را بر سوخت‌ها با اکتان بزرگ و کوچک، به طور مجزا بررسی کردند.

در معادله ۶ عبارت $(\sum_{k=1}^N a_{k,i} [X_k])$ تنها هنگامی که ذره واسط^۱

(M) در واکنش شیمیایی است، ظاهر می‌شود و در غیر این صورت مقدار آن برابر ۱ است.

ج- معادله حالت

برای محاسبه فشار لحظه به لحظه درون استوانه از معادله (۷) استفاده می‌شود:

$$PV = \sum_{i=1}^{N_R} N_i RT \quad (7)$$

د- معادله بقای انرژی

در شبیه سازی تک منطقه‌ای صفر بعدی، محفظه احتراق را حجم پایش در نظر می‌گیرند و ابتدا از قانون اول ترمودینامیک به صورت معادله (۸) استفاده می‌شود:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

برای به دست آوردن تغییرات دمای درون استوانه معادله انرژی به صورت معادله (۹) بازنویسی می‌گردد.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho C_V} \sum_{i=1}^{N_R} U_i \dot{\omega}_i W_i - \frac{P}{MC_V} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{mC_V} \frac{dQ}{dt} \quad (9)$$

در معادله ۹ چگالی گاز درون استوانه ρ و U_i و $\dot{\omega}_i$ بترتیب نرخ تولید و انرژی درونی گونه i ام است.

ه- معادله بقای جرم

جرم درون استوانه در یک چرخه بسته از IVC تا EVO ثابت باقی می‌ماند و از نشستی استوانه صرف نظر شده است.

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (10)$$

۲-۲) محاسبه خواص ترمودینامیکی و انتقال حرارت

ضرایب خواص ترمودینامیکی از جداول NASA استفاده شده است که بدین صورت محاسبه می‌شوند:

$$C_{pk}^0 = a_{1k} + a_{2k}T + a_{3k}T^2 + a_{4k}T^3 + a_{5k}T^4 \quad (11)$$

$$\frac{H_k^0}{R_u T} = a_{1k} + \frac{a_{2k}}{2}T + \frac{a_{3k}}{3}T^2 + \frac{a_{4k}}{4}T^3 + \frac{a_{5k}}{5}T^4 + \frac{a_{6k}}{6}T^5 \quad (12)$$

$$\frac{S_k^0}{R_u} = a_{1,k} \ln T_k + \sum_{n=2}^7 \frac{a_{nk} T_k^{(n-1)}}{n-1} + a_{n+2,k} \quad (13)$$

برای تعیین مقدار $\frac{dQ}{dt}$ در معادله انرژی از معادلات مرسوم انتقال

حرارت مثل معادله ووشنی [۱۰] که ضرایب آن برای موتور HCCI اصلاح گردید، استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی موتور CFR

bore × stroke (mm)	82.6×114.3
connecting Rod (cm)	25.4
engine speed (rpm)	800
IVC (cad)	34
EVO (cad)	320
displacement (cm ³)	612
compression ratio	16 to 21
atmospheric pressure (kPa)	93.5 ± 0.7
throttle	fully open

۱-۲) معادلات حاکم در شبیه سازی تک منطقه‌ای

معادلات حاکم شامل معادلات بقا، معادله حرکت سمبه و معادله گاز کامل است و بررسی رفتار احتراقی درون محفظه با این معادلات و با فرض اینکه مقادیر ترمودینامیکی در تمام استوانه یکسان و همه اجزا گازی شکل اند و جرم سامانه ثابت بماند انجام می‌شود. معادلات به طور مجزا بدین شرح است:

الف- معادله حرکت سمبه

$$V = V_c (1 + \frac{r_c - 1}{2} (R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta})) \quad (1)$$

تغییر حجم محفظه احتراق به صورت معادله دیفرانسیلی طبق معادله (۲) است [۱۰].

$$\frac{dV}{dt} = V_c (\frac{r_c - 1}{2} (\sin \theta \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{2} \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta})) \quad (2)$$

ب- محاسبات سینتیک شیمیایی

برای بیان سازوکار فرایند احتراقی از یک مجموعه واکنش شیمیایی که به صورت کلی معادله (۳) در نظر گرفته شده است، استفاده می‌شود.

$$\sum_{k=1}^N v'_{k,i} S_i \leftrightarrow \sum_{k=1}^N v''_{k,i} S_i \quad (3)$$

معادله بقای گونه‌ها به صورت معادله (۴) است که بر اساس تغییر کسر جرمی گونه‌ها با برقراری بقای جرم در نظر گرفته شده است.

$$\frac{dY_i}{dt} = \frac{W_i \dot{\omega}_i}{\rho} \quad (4)$$

نرخ تولید هر گونه با استفاده از معادلات سینتیک شیمیایی و ضرایب آرنیوس بدین شرح به دست می‌آید:

$$\omega_{k,i} = (\sum_{k=1}^N a_{k,i} [X_k]) (v_{k,i}^* - v_{k,i}') \quad (5)$$

$$\times (k_{f,i} \prod_{k=1}^N [X_k]^{v_{k,i}'} - k_{r,i} \prod_{k=1}^N [X_k]^{v_{k,i}^*})$$

k_f و k_r بترتیب نرخ واکنش رفت و برگشت اند که از معادلات آرنیوس و تعادل شیمیایی بدین شرح حاصل می‌شود:

$$k_{f,i} = A_i T^{B_i} \exp(\frac{-E_i}{R_u T}) \quad (6)$$

¹ Third body

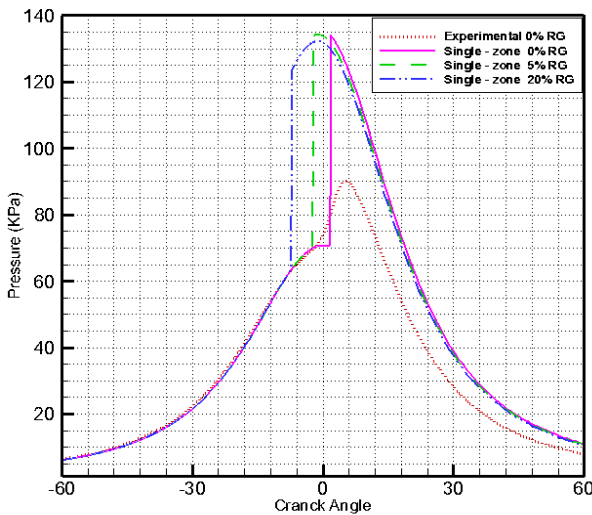
مقدار $dp3lim$ با توجه به داده‌های آزمایشگاهی انجام شده برای موتور CFR برابر $\frac{kPa}{CAD^3}$ ۵ به دست آمده است [۱۲]. در نتیجه برای محاسبه زمان شروع احتراق از این معادله استفاده می‌شود:

$$\frac{d^3 P}{d\theta^3} \geq \frac{d^3 P}{d\theta^3} \Big|_{lim}$$

البته زمان شروع احتراق برای حالت آزمایشگاهی در معادله قبل، با نظریه تحلیل آزادسازی گرما و $RG\%$ برابر CA ۰٫۶ محاسبه شد که در مقایسه با مقدار عددی با خطای ۰٫۵ درجه لنگ قابل قبول است.

۴) بحث بر نتایج

پیش‌بینی درست زمان شروع احتراق که در شبیه سازی تک منطقه‌ای انجام شده است، این امکان را برای پایش زمان‌بندی احتراق فراهم می‌کند، به طوری که با استفاده از روش‌های مختلف به منظور افزایش بازدهی، جلوگیری از ضربه شدید و کاهش آلایندگی می‌توان زمان شروع احتراق را به طور بهینه‌ای تغییر داد. روش‌های مستقیم برای تغییر زمان‌بندی احتراق معمولاً از انعطاف پذیری مناسبی برای پایش احتراق برخوردار نیستند.



شکل ۱: مقایسه فشار بر حسب درجه لنگ نتایج تجربی و شبیه سازی برای موتوری با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵ و برای درصدهای مختلف RG

جدول ۲: مقایسه زمان آغاز احتراق برای مقادیر مختلف RG با استفاده از دو نظریه متفاوت

Single-zone	RG%	SOC	SOC
		(heat release analysis)	(third derivative method)
	۰٪	0.1CA	-0.4CA
$\lambda = 3.95$	۵٪	-3.3CA	-3.7CA
	۲۰٪	-8CA	-8.5CA

$$\frac{dQ}{dt} = -q_{convection} - q_{radiation} \quad (14)$$

$$\frac{dQ}{dt} = 0.00326 B^{-0.2} P^{0.8} T^{-0.53} (T_m - T_{wall}) + C(T_m^4 - T_{wall}^4) \quad (15)$$

$$W = C_1 S_P + C_2 \frac{V_d T_{ig}}{P_{ig} V_{ig}} (P - P_{mot}) \quad (16)$$

۳) صحت‌سنجی

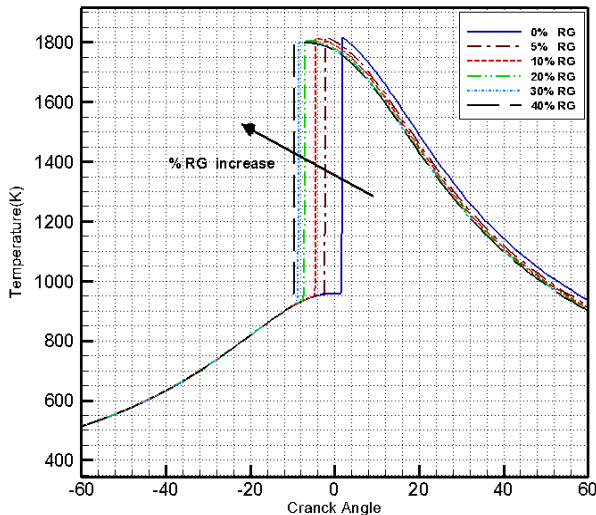
نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از مقاله‌های پیشین [۷-۸] که بر روی موتور CFR با سوخت گاز طبیعی دمای ورودی ۱۴۰ درجه سانتیگراد، نسبت تراکم ۱۷٫۵، غنای ۰٫۲۵، دمای دیوار ۴۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت دورانی ۸۰۰ RPM با نتایج شبیه سازی تک منطقه‌ای در شکل (۱) مقایسه شده است.

با تطابق شرایط اولیه، روند تغییرات فشار برای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده در شکل (۱) قابل مشاهده است. در مرحله تراکم و در مرحله احتراق تا قبل از شروع احتراق اصلی که مقدار عمده سوخت در آن مرحله مصرف می‌شود، روند یکسانی از تغییرات برای نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. تنها در مرحله احتراق اصلی است که مقدار بیشینه فشار درون استوانه با آزادسازی گرمای واکنش در مدت زمان کوتاه‌تر به مراتب بیشتر از مقدار آزمایشگاهی به دست آمده است؛ که علت آن فرضیات ساده شبیه سازی تک منطقه‌ای از جمله در نظر گرفتن دما، فشار و غلظت یکسان برای تمام ترکیبات درون محفظه است. این فرضیات باعث احتراق سریعتر و آزادسازی انرژی بیشتر در زمان کمتر می‌شوند و در نتیجه فشار بیشینه بزرگتری حاصل می‌شود. هر چند برای به دست آوردن و پیش‌بینی مقادیر صحیح آلاینده‌ها و متغیرهای عملکردی موتور، توسعه شبیه سازی چند منطقه‌ای ضروری است اما به دست آوردن تطابق مناسب زمان شروع احتراق با نتایج آزمایشگاهی با شبیه سازی تک منطقه‌ای با دقت خوبی صورت می‌پذیرد.

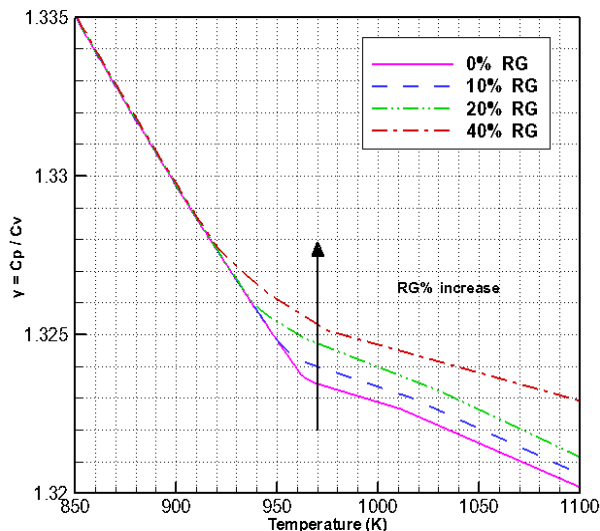
نحوه تغییرات زمان شروع احتراق نیز در شکل (۱) به طور دقیق در جدول (۱) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت RG زمان شروع احتراق SOC، به سمت دور شدن از نقطه مکث بالا TDC حرکت می‌کند.

برای محاسبه زمان شروع احتراق می‌توان از دو تعریف استفاده کرد: (الف) زمان شروع احتراق برابر درجه لنگی که در آن ۱۰٪ از بیشینه انتقال حرارت ناخالص آزاد شود تعریف می‌شود. همچنین دوره احتراق برابر تغییر درجه لنگی است که در آن از ۱۰٪ تا ۹۰٪ انتقال حرارت ناخالص (GHR) آزاد می‌شود [۱۱] و (ب) زمان شروع احتراق، درجه لنگی است که در آن مشتق سوم فشار از مقدار مشخصی بزرگتر است و با توجه به مشخصات هر موتور به طور تجربی محاسبه می‌شود:

$$dp3Lim = \frac{d^3 P}{d\theta^3} \Big|_{ign} = \frac{d^3 P}{d\theta^3} \Big|_{lim} \frac{kPa}{CAD^3}$$



شکل ۲: تغییرات دما با زاویه لنگ به ازای درصد مختلف RG برای موتورهای با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵



شکل ۳: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه دما به ازای مقادیر مختلف RG برای موتورهای با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵

واکنش‌های قبل نشان می‌دهد گونه میانی OH با تولید در واکنش‌های ۴۶، ۳۸ و ۱۱ گونه فعال موثر برای شروع احتراق اصلی است. در شکل (۴) نیز اثر نرخ تولید و مصرف این گونه میانی و تطابق آن با زمان احتراق اصلی نشان داده شده است. مطابق شکل ۴ گونه OH همزمان با خود اشتعالی و مصرف سوخت، تولید و بلافاصله در واکنش‌های مانند واکنش‌های نامبرده شده مصرف می‌شود؛ اما در حالتی که RG به سوخت افزوده می‌شود به علت افزایش غلظت H_2 ، غلظت گونه‌هایی میانی دیگر نظیر H_2O_2 و HO_2 قبل از احتراق به شدت افزایش می‌یابد.

به طور مثال روش تغییر دمای ورودی برای پایش زمان شروع احتراق از یک چرخه به چرخه‌های دیگر بسیار آهسته است و یا روش تغییر نسبت تراکم استوانه برای پایش زمان احتراق نیاز به فناوری پیچیده همراه با هزینه گزاف دارد. استفاده از روش جدید و بهینه تحت عنوان استفاده از گاز سنتزی RG که از سوخت اصلی حاصل می‌شود، دارای انعطاف پذیری و کاربرد بیشتری در پایش احتراق HCCI است. ترکیب گاز طبیعی به صورت معمولی ترکیبی از H_2 ۷۵٪ و CO ۲۵٪ است. مقدار گاز سنتزی وارد شده نسبت به سوخت ورودی، بر مبنای جرمی سنجیده می‌شود و از معادله (۱۵) بدست می‌آید.

$$\% RG = \frac{m_{RG}}{m_{RG} + m_{fuel}} \times 100 \quad (15)$$

برای شرایط کاری ذکر شده در قسمت قبل تغییر درصد جرمی RG از صفر تا ۴۰٪ بررسی شد و اثر آن در شکل ۲ بر شروع احتراق چشمگیر است. با توجه به شکل ۲ در غنای ثابت، افزایش سهم جرمی گاز سنتزی (RG) در غناهای ثابت و کم (مخلوط رقیق) باعث شده احتراق از محدوده بدسوزی خارج شود و با پیشروی شروع احتراق، بازده آن افزایش یابد.

تغییر زمان احتراق با اضافه کردن RG ناشی از دو دلیل عمده است:

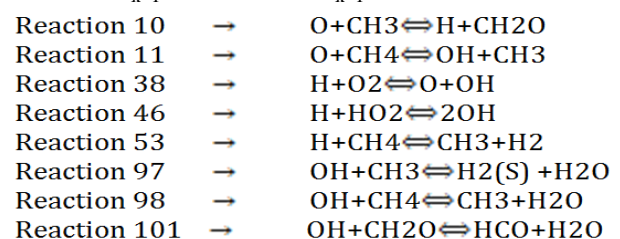
الف- تغییر خواص ترمودینامیکی مخلوط گونه‌ها

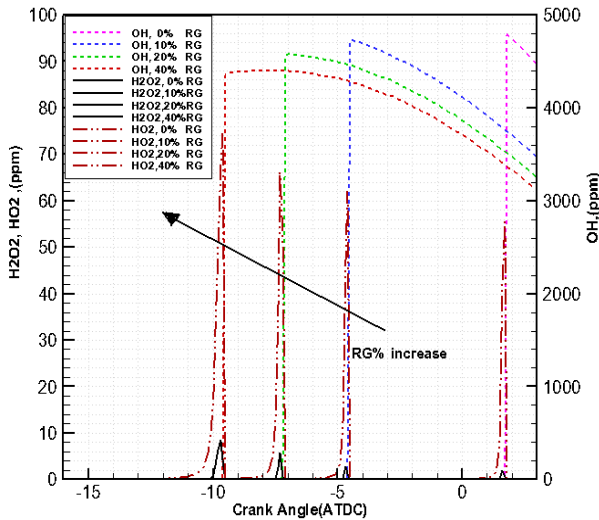
چون احتراق متان تک مرحله‌ای است، گونه‌های فعال میانی قبل از احتراق به اندازه کافی تشکیل نمی‌شوند. در نتیجه عامل مهارکننده احتراق در این حالت، دمای انتهای تراکم است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار RG مقدار نسبت گرمای ویژه (γ) در انتهای مرحله تراکم افزایش می‌یابد که دلیل آن جایگزینی مولکول دو اتمی RG است که در دمای یکسان مقدار γ بزرگتری نسبت به مولکول متان دارد. افزایش مقدار نسبت گرمای ویژه موجب می‌شود دمای انتهای مرحله تراکم افزایش یابد و در نتیجه شروع احتراق که در این حالت مستقیماً وابسته به این دما است، زودتر اتفاق بیفتد.

ب- تغییر خواص سینتیک شیمیایی مخلوط گونه‌ها

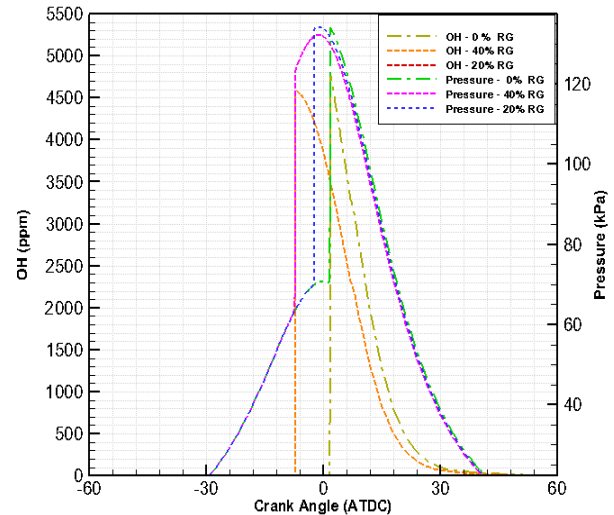
افزودن RG به جای سوخت اولیه، شیمی واکنش‌های احتراقی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و مسیر و نرخ واکنش‌ها را تغییر می‌دهد. ابتدا با بررسی سازوکار GRI MECH 3.0 واکنش‌هایی که سریعترین نرخ واکنش را در زمان احتراق اصلی دارند بدین صورت به دست آمدند:

$$q_i = (k_{f,i} \prod_{k=1}^N [X_K]^{v_{k,i}} - k_{r,i} \prod_{k=1}^N [X_K]^{v_{k,i}})$$

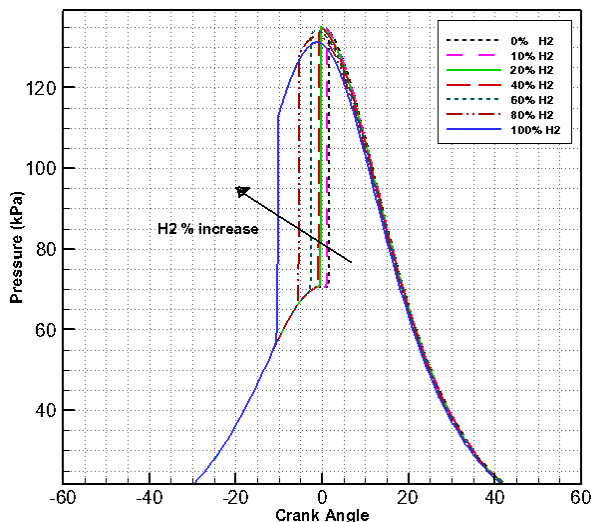




شکل ۵: تغییرات غلظت گونه‌های OH، H₂O₂، HO₂ با زاویه لنگ به ازای مقادیرهای RG مختلف برای موتوری با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵



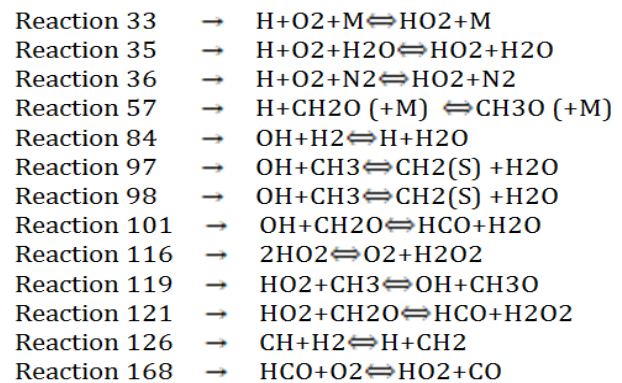
شکل ۴: تغییر غلظت گونه فعال OH و فشار با زاویه لنگ برای مقادیر RG مختلف برای موتوری با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵



شکل ۶: تغییرات فشار با زاویه لنگ با افزایش غلظت H₂ در گاز سنتزی برای موتوری با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵

در شکل ۷ رفتار تغییرات نرخ دمایی برای مقایسه دقیق‌تر دو اثر ترمودینامیکی و سینتیکی ناشی از افزودن RG نشان داده شده است. زمان شروع احتراق با افزودن ۱۰٪ RG جلو می‌افتد و با افزودن مقدار آن تا ۴۰٪ این روند ادامه دارد اما اثر آن کمتر است؛ در واقع با افزودن مقدار مشخص RG سینتیک شیمیایی بسرعت نسبت به افزودن RG واکنش نشان داده و دلیل آن اشباع شدن سریع شیمی واکنش‌ها با مقدار معینی H₂ است. در نتیجه این رفتار غیر خطی، اثر سینتیکی ناشی از افزودن RG باعث محدودیت عملکرد در پایش احتراق از این طریق می‌گردد و پیش‌بینی رفتار آغاز احتراق را بیشتر بر پایه تغییرات ترمودینامیکی (افزایش نسبت گرمای ویژه مخلوط) توجیه می‌کند.

البته، این موضوع با توجه به افزایش نرخ انجام این واکنش‌ها قبل از احتراق اصلی تصدیق می‌گردد:



بنابراین غلظت گونه‌های H₂O₂، HO₂ به عنوان شاخصی برای فعال‌سازی سینتیک شیمیایی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ تغییرات این گونه‌های فعال را با افزایش مقدار RG و تأثیر آن بر آغاز واکنش‌های شیمیایی را نشان می‌دهد. در حالتی که RG وجود ندارد غلظت گونه‌ی H₂O₂ بسیار ناچیز است؛ غلظت گونه H₂O₂ دارای مقدار بیشینه ۲.۰۱ (ppm) است اما با افزایش غلظت H₂ بر اثر اضافه کردن RG غلظت گونه H₂O₂ به مقدار بیشینه ۸.۵۷ (ppm) می‌رسد. چون قسمت عمده اثر سینتیکی افزودن RG تنها بر اثر وجود گونه H₂ در ترکیب آن است، با افزایش نسبت H₂ در ترکیب RG با توجه به شکل ۶ می‌توان اثری مشابه افزودن RG در مخلوط سوخت و هوا مشاهده کرد.

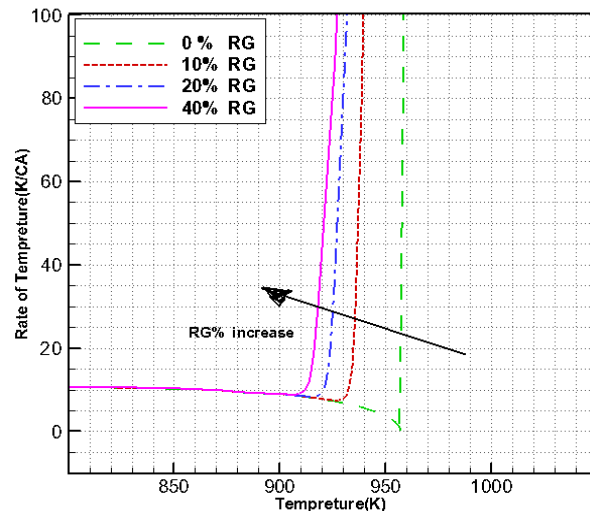
طبق شکل ۶ افزایش H₂ در ترکیب RG ۱۰٪ بررسی شد که نشان می‌دهد زمان آغاز احتراق زودتر اتفاق می‌افتد. در نتیجه با تغییر ترکیب RG به سمت هیدروژن بیشتر می‌توان درصد کمتری از RG را برای پایش احتراق استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

در پایان از راهنمایی‌ها و همکاری‌های دکتر خوشبختی و گروه تحقیقاتی ایشان در دانشگاه صنعتی سهند تبریز قدردانی به عمل می‌آید.

References

- [1] D. Flowers, S.M. Aceves, J. Martinez-Frias, J.R. Smith, M. Au, J. Girard, R. Dibble, Operation of a four-cylinder 1.9 L propane-fueled homogeneous charge compression ignition engine: Basic operating, SAE International, Paper No. 2001-01-1895, 2001
- [2] S.N. Shahangian, S.A. Jazayeri, Effect of initial temperature and EGR on combustion and performance characteristics of homogenous charge compression ignition engine fueled with dimethyl ether, The Journal of Engine Research, Vol. 14, No. 7, 2009
- [3] O. Jahanian, S.A. Jazayeri, A comprehensive study on natural gas HCCI engine response to different initial conditions via a thermo-kinetic engine model, ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, Switzerland, 2009
- [4] A.K. Amjad, R. Khoshbakhi Saray, Availability analysis of n-heptane and natural gas blends combustion in HCCI engines, Energy, Vol. 36, No. 12, pp. 6900-6909, 2011
- [5] T. Shudo, Y. Ono, T. Takahashi, Influence of hydrogen and carbon monoxide on HCCI combustion of dimethyl ether, SAE International, Paper No. 2002-01-2828, 2002
- [6] A. Tsolakis, A. Megaritis, Partially premixed charge compression ignition engine with on-board H₂ production by exhaust gas fuel reforming of diesel and biodiesel, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 731-745, 2005
- [7] V. Hosseini, M.D. Checkel, Effect of reformer gas on HCCI combustion, Part I: High octane fuels, SAE International, Paper No. 2007-01-0208, 2007
- [8] V. Hosseini, M. Checkel, Effect of reformer gas on HCCI combustion, Part II: Low octane fuels, SAE International, Paper No. 2007-01-0206, 2007
- [9] <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech>
- [10] J.B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Inc., 1988
- [11] V. Hosseini, Reformer gas application in HCCI combustion engine, PhD Thesis, University of Alberta, Canada, 2008
- [12] M. Shahbakhti, Modeling and experimental study of an HCCI engine for combustion timing control, PhD Thesis, University of Alberta, Canada, 2009



شکل ۷: تغییرات نرخ دما بر حسب دما به ازای مقدار مختلف RG برای موتوری با نسبت تراکم ۱۷٫۵ و غنای ۰٫۲۵

۵) نتیجه‌گیری

بررسی پایش زمان احتراق با روش افزودن RG یک روش مؤثر و قابل حصول است که با افزایش مقدار آن در مخلوط احتراق زودتر و حداکثر فشار نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه امکان استفاده از این موتور را در نسبت تراکم‌های کوچکتر برای جلوگیری از ضربه، با دمای ورودی خنکتر (بدون پیش‌گرمایش) و با غنای کوچکتر فراهم می‌کند. در واقع از بد سوزی ناشی از کم بودن انرژی لازم برای احتراق جلوگیری می‌کند.

تغییر نسبت مقدار هیدروژن در ترکیب RG نیز مانند افزودن مقدار جرمی RG در مخلوط موجب می‌شود احتراق پیش بیفتد؛ که ناشی از خواص اشتعال‌پذیری مولکول هیدروژن و تأثیر آن بر فعال‌سازی واکنش‌های مؤثر و تولید گونه‌های فعال برای شروع واکنش است. بنابراین با افزایش مقدار H₂ در مخلوط می‌توان بازه گسترده‌تری را با افزودن مقدار مشخص از RG برای خود اشتعالی مهار کرد.

شبیه‌سازی ترمودینامیکی - سینتیکی صفر بعدی تک منطقه‌ای برای پیش‌بینی و پایش زمان شروع احتراق مناسب است اما به علت فرضیات ساده شده در شبیه‌سازی، فشار بیشینه و دمای درون استوانه، انتشار آلاینده‌هایی نظیر NO_x, CO, HC طول دوره احتراق و گرمای آزاد شده واقعی را بدرستی پیش‌بینی نمی‌کند. در نتیجه در تحقیقات آینده با توسعه شبیه‌سازی تک منطقه‌ای و استفاده از شبیه‌سازی چند منطقه‌ای، قابلیت بررسی این متغیرها و پایش بیشتر احتراق فراهم می‌گردد.



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Controlling natural gas combustion timing in HCCI engine with synthetic gas enrichment using a chemical kinetic model

S. Voshtani¹, M. Reyhanian², S. Akbari³, V. Hosseini^{4*}

¹Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, voshtani@mech.sharif.edu

²Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, m_reyhanian@mech.sharif.edu

³Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, samira_akbari89@yahoo.com

⁴Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, vhosseini@sharif.edu

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-66165585

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 February 2014

Accepted: 16 March 2014

Keywords:

Homogeneous charge
compression ignition
Single-zone model
Start of combustion
Combustion control
Reformer gas enrichment

ABSTRACT

In recent years, HCCI engines have been in the center of attentions due to their high thermal efficiency, low emission rate (e.g. NO_x) and low fuel consumption. The main drawback in these engines is the combustion control, which happens in a limited operation range between the knock and misfiring. The natural gas is a commonly used fuel in internal combustion engines (ICE). However, using the natural gas in HCCI engines is challenging due to its low tendency to the self-ignition. Hence, approaches like the reformer gas enrichment should be employed.

In this paper, a zero-dimensional model was introduced in order to predict combustion timing and investigate effects of the variable composition reformer gas with different contents of H₂ and CO. Experimental results from a single-cylinder CFR engine was used to validate the proposed model. Results showed that the addition of synthetic gas (RG) and changes in the H₂ content of RG could affect ignition timing and could be used in the combustion control in HCCI engines, which expanded the limit of the operation, increased the engine efficiency and reduced the fuel consumption especially in lower air/fuel ratio and the inlet temperature.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.