

## تأثیر فرمالدهید بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با سوخت گاز طبیعی

امید جهانیان\* و سید علی جزایری\*\*

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۷، پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۲۵)

در این مقاله با استفاده از یک مدل ترمودینامیکی و در نظر گرفتن سینتیک تفصیلی شیمیایی به بررسی عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن با سوخت گاز طبیعی پرداخته شده است. سپس تأثیر افزودن مقادیر مختلف فرمالدهید به سوخت، بر روی متغیرهای عملکردی موتور مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با افزودن فرمالدهید به سوخت، محدوده کاری موتور را تغییر داد. از سوی دیگر برای هر شرایط کاری موتور، مقدار افزودنی بهینه‌ای وجود دارد که تحت آن مقدار، کار و توان موتور به بیشینه خود می‌رسد. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از این افزودنی، مخلوط هوا و سوخت در دمای پایین‌تری محترق می‌شود، بنابراین می‌توان دمای ورودی مخلوط را کاهش داد و به این ترتیب با افزایش بازده حجمی، به کارایی بالاتری دست یافت.

واژگان کلیدی: موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن، شروع احتراق، گاز طبیعی، فرمالدهید

### مقدمه

ایده «اشتعال تراکمی سوخت همگن» (Homogeneous Charge Compression Ignition - HCCI) در موتورهای درونسوز برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ توسط اونیشی و همکارانش [۱] برای موتورهای دو زمانه مطرح شد. آن‌ها دریافته بودند که مترکم کردن مخلوط همگن هوا و سوخت تا حد بروز خوداشتعالی می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش آلایندگی و مصرف سوخت موتور، داشته باشد. این ایده در ابتدا با عنوان «احتراق ترمواتمسفری فعال» (ATAC) شناخته می‌شد و به سرعت در موتور 10GC محصول موسسه موتور پاک ژاپن (NiCE) برای ژنراتورهای ساکن به کار رفت [۲]. تحقیقات ناگوچی و همکارانش [۲] نشان داد که این ایده برای حالت بار جزئی (Part Load) بسیار مناسب است. در سال ۱۹۸۳، نجت و همکارانش [۳] این ایده را برای موتورهای چهار زمانه توسعه دادند و سرانجام در سال ۱۹۸۹، ترینگ [۴] با اطلاق عنوان HCCI به این ایده و شرح کامل خصوصیات، مزایا و معایب آن، دریچه‌ای جدید در راه گسترش موتورهای درونسوز گشود. ایده احتراق HCCI توانسته است با کنار هم قرار دادن ویژگی‌های مثبت هر یک از موتورهای اشتعال جرقه‌ای (SI) و اشتعال تراکمی (CI)، قابلیت ویژه‌ای در کاهش میزان آلایندگی و مصرف سوخت داشته باشد. کاهش چشمگیر NOx و ذرات معلق به همراه بازده گرمایی بالا و قابلیت استفاده از سوخت‌های متنوع سبب شده است که تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود [۵]. علی‌رغم تمام مزایای ذکر شده، باید در نظر داشت که به کارگیری موتورهای HCCI با مشکلاتی نظیر کنترل زمان احتراق و آماده‌سازی مخلوط همگن هوا و سوخت مواجه است که مستلزم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه است [۶]. یکی از راه‌های رفع مشکل آماده‌سازی مخلوط، استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت است. گاز طبیعی از نظر شیمیایی پایدار است و به راحتی می‌تواند مخلوط همگن با هوا تشکیل دهد. ساختار مولکولی ساده گاز طبیعی نسبت به هیدروکربن‌های سنگین‌تر نظیر بنزین و گازوییل سبب می‌شود تا گونه‌های شیمیایی میانی کمتری در خلال احتراق آن تشکیل شوند و آلایندگی‌های خروجی تا حد چشمگیری کاهش پیدا کنند. همچنین با توجه به مقاومت آن در برابر خوداشتعالی، می‌توان نسبت تراکم موتور را تا حد بیشتری افزایش داد و به

\* دانشجوی دکتری - نویسنده مخاطب (ایمیل: O\_Jahanian@alborz.kntu.ac.ir)

\*\* استادیار (ایمیل: Jazayeri@kntu.ac.ir)

این ترتیب بازدهی گرمایی نیز بالا می‌رود [۷ و ۸]. برای بررسی نحوه عملکرد موتورهای HCCI علاوه بر تجربیات آزمایشگاهی، می‌توان از روش شبیه‌سازی موتور نیز استفاده کرد. در این روش، مدل‌های مختلف ریاضی برای شبیه‌سازی فرایندهای صورت گرفته در یک موتور HCCI به کار برده می‌شود. هر یک از این مدل‌ها مزایا و معایب ویژه خود را دارند. مرجع [۹] مقایسه جامعی بین همه این روش‌ها ارائه کرده است.

در موتورهای HCCI گاز طبیعی سوز معمولاً از افزودنی‌هایی نظیر پروپان، بوتان، پروکسید هیدروژن، فرمالدهید و ... استفاده می‌شود که هر یک بنا به ویژگی‌ها و محدودیت‌های خود دارای کاربرد هستند. فرمالدهید یکی از پرکاربردترین افزودنی‌های گاز طبیعی است که در فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی [۱۰-۱۵] استفاده شده است. کنتارو و همکارانش [۱۰] نشان دادند برای کنترل احتراق موتورهای HCCI می‌توان از فرمالدهید که بر روی نرخ تولید یا از بین رفتن رادیکال‌های هیدروکسیل تأثیر زیادی دارد، استفاده کرد. مورسی و همکارانش [۱۱ و ۱۲] نیز در تحقیقات محاسباتی خود نشان دادند که استفاده از فرمالدهید به عنوان افزودنی سوخت گاز طبیعی در موتورهای HCCI، باعث می‌شود که مخلوط هوا و سوخت زودتر به نقطه خوداشتعالی برسد. چن و میکی [۱۳] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که فرمالدهید، میزان گرمادهی واکنش‌های دما پایین سازوکار سوختن دی متیل اتر را کاهش می‌دهد و سبب پیش‌رسی احتراق می‌شود.

هدف اصلی این مقاله، بررسی دقیق عملکرد، محدوده کاری و تعیین زمان شروع احتراق یک موتور HCCI گاز طبیعی سوز با استفاده از افزودنی فرمالدهید است. برای این کار یک مدل ریاضی صفر بعدی تک ناحیه‌ای با در نظر گرفتن سینتیک کامل شیمیایی (۵۳ گونه شیمیایی به همراه ۳۲۵ واکنش) تولید شده است. معادلات حاکم بر مدل به دقت شرح داده شده و سپس روش‌های مختلف تعیین زمان شروع احتراق همچنین نحوه محاسبه نسبت هم‌ارزی سوخت‌های اکسیژن‌دار ارائه شده است. مدل استفاده شده ابتدا با استفاده از نتایج تجربی موجود در مراجع و همچنین نتایج حاصل از نرم‌افزار CHEMKIN<sup>®</sup> صحت‌گذاری و توانمندی آن در پیش‌بینی زمان شروع احتراق نشان داده می‌شود. سپس با اضافه نمودن مقادیر مختلف فرمالدهید به سوخت، تغییرات زمان شروع احتراق و کارایی موتور به دقت بررسی می‌شود. این بررسی‌ها در شرایط دمای ورودی متفاوت و همچنین مقادیر مختلف افزودنی انجام می‌شود.

## فرمالدهید

فرمالدهید ترکیبی شیمیایی با فرمول  $\text{CH}_2\text{O}$  است که در درده‌بندی مواد آلی، ساده‌ترین آلدئید به شمار می‌رود. فرمالدهید را معمولاً از تریوکسان و پلمیر پارافرمالدهید به دست می‌آورند. فرمالدهید یکی از گونه‌های شیمیایی میانی سازوکار احتراق متان (اصلی‌ترین جزء گاز طبیعی) به شمار می‌رود و افزودن آن به گاز طبیعی می‌تواند سرعت واکنش‌های احتراقی را افزایش دهد، به همین دلیل از آن به عنوان یکی از افزودنی‌های گاز طبیعی استفاده می‌شود. جدول (۱) ویژگی‌های این ماده و مقایسه‌ای از آن با سایر ترکیبات موجود در گاز طبیعی را ارائه می‌دهد. بیش از ۹۵ درصد ترکیب گاز طبیعی شامل متان، اتان و پروپان است. در طبقه‌بندی سازمان‌های بهداشتی و زیست محیطی، فرمالدهید جزء دسته مواد خطرناک (Hazardous) به شمار می‌رود. مقادیر بیش از ۰/۱ ppm این ماده در هوا باعث سوزش چشم و غشاء مخاطی می‌شود. به همین دلیل قوانین سخت‌گیرانه‌ای در مورد آن اعمال شده است. در معتبرترین دستورالعمل که مربوط به آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA) است، مقدار مجاز آن در محیط ۱۶ ppb اعلام شده است [۱۷].

جدول ۱- ویژگی‌های فرمالدهید و مقایسه آن با اجزای اصلی گاز طبیعی [۱۶]

ویژگی‌ها	فرمالدهید	متان	اتان	پروپان
فرمول	$\text{CH}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$
جرم مولی (g/mole)	۳۰/۰۲۶	۱۶/۰۴۲	۳۰/۰۶۹	۴۴/۰۹۶
دمای خوداشتعالی (°C)	۴۳۰	۵۹۵	۵۱۵	۴۷۰
محدوده انفجاری (%)	۷-۷۳	۵-۱۵	۳-۱۲/۵	۲-۹/۵

## مدلسازی ترمودینامیکی موتور HCCI

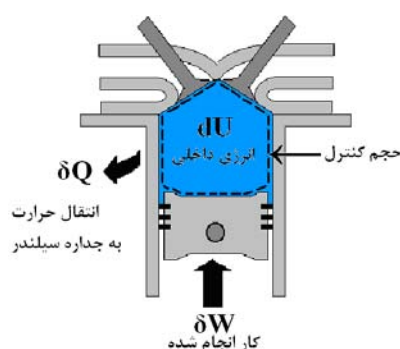
در این مقاله برای مدلسازی موتور HCCI با سوخت گاز طبیعی از شیوه صفر بعدی تک ناحیه‌ای با در نظر گرفتن سینتیک تفصیلی شیمیایی استفاده شده است. فرضیات اساسی مدل عبارت‌اند از:

- موتور HCCI مورد بررسی تک سیلندر و چهار زمانه است.
  - فقط سیکل بسته موتور، از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی (IVC) تا باز شدن سوپاپ خروجی (EVO)، در نظر گرفته می‌شود.
  - کل محفظه احتراق به صورت یک ناحیه با دما و فشار یکنواخت فرض می‌شود.
  - محتویات داخل سیلندر در تمامی مراحل به صورت ترکیب گاز کامل فرض می‌شوند.
  - از گازهای ناشی (Blow By) صرف نظر می‌شود.
  - مخلوط هوا و سوخت در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی همگن فرض می‌شود.
  - برای در نظر گرفتن میزان انتقال گرما به جداره سیلندر از رابطه اصلاح شده وشنی استفاده می‌شود.
- به منظور بررسی دقیق ویژگی‌های احتراقی، از سینتیک تفصیلی شیمیایی استفاده شده است. سازوکار در نظر گرفته شده در مقاله حاضر، GRI 3.0 [۱۸] است که شامل ۳۲۵ واکنش مقدماتی و ۵۳ گونه شیمیایی است. این سازوکار با دربرداشتن واکنش‌های اکسایش متان، اتان، پروپان و فرمالدهید، همچنین در نظر گرفتن سازوکار زلدویچ توسعه یافته برای تعیین آلاینده NOx، بهترین گزینه برای بررسی احتراق گاز طبیعی به شمار می‌رود.

مدلسازی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB<sup>®</sup> انجام شده است. برای تعیین ثابت‌های موجود در معادلات احتراقی یک مدول منبع باز (Open Source Module) که به راحتی در محیط MATLAB<sup>®</sup> قابل استفاده است به کار گرفته شده است. این مدول که Cantera<sup>®</sup> نام دارد قادر است با توجه به شرایط ترمودینامیکی مخلوط مقادیر عددی متغیرهایی نظیر سرعت هر یک از واکنش‌های سازوکار و نرخ تولید گونه‌های شیمیایی را محاسبه کند. مدول حاضر به راحتی قادر است به سایر نرم‌افزارها متصل شده و همچنین قابلیت استفاده از کلیه سازوکارهای موجود در کتابخانه نرم‌افزار CHEMKIN<sup>®</sup> را دارد.

## معادلات حاکم

در مدل صفر بعدی تک ناحیه‌ای، کل محفظه احتراق به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود سپس معادله بقای انرژی برای این ناحیه حل می‌شود. شکل (۱) جمله‌های معادله بقای انرژی در این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۱- حجم کنترل در مدلسازی تک ناحیه‌ای و جمله‌های معادله بقای انرژی

قانون اول ترمودینامیک برای این حجم کنترل به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود. در این رابطه  $Q$  میزان انتقال گرما،  $W$  کار انجام شده و  $U$  انرژی داخلی سیستم است.

$$\delta Q - \delta W = dU \quad (1)$$

با توجه به روابط ترمودینامیکی تعریف شده برای مخلوط گونه‌های مختلف شیمیایی، معادله (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\delta Q - PdV = mdu + m \sum_{i=1}^{N_s} u_i dy_i \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $P$  فشار درون سیلندر،  $V$  حجم لحظه‌ای محفظه احتراق،  $m$  جرم،  $u$  انرژی درونی مخصوص و  $y$  کسر جرمی گونه‌های شیمیایی است.  $N_s$  نیز نمایانگر تعداد کل گونه‌های شیمیایی است که در سینتیک در نظر گرفته شده برای این مدل‌سازی برابر ۵۳ است. با فرض اینکه میزان انتقال گرما فقط ناشی از اتلاف گرمایی به جداره سیلندر است و مخلوط داخل سیلندر نیز گاز کامل است و همچنین در نظر گرفتن  $t$  به عنوان زمان،  $T$  به عنوان دما و  $C_v$  به عنوان ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت، به دست می‌آید:

$$\frac{dq}{dt} - P \frac{dV}{dt} = mC_v \frac{dT}{dt} + m \sum_{i=1}^{N_s} u_i \frac{dy_i}{dt} \quad (3)$$

اگر رابطه بالا برای تعیین تغییرات دما مرتب شود، اولین معادله دیفرانسیلی مدل ترمودینامیکی تک ناحیه‌ای به دست می‌آید. در این رابطه  $\rho$  نشان دهنده جرم حجمی مخلوط داخل سیلندر است. معادله (۴) بیان می‌کند که تغییرات دمای داخل سیلندر ناشی از دو فرایند مهم انرژی عبوری از مرز حجم کنترل و تغییر ساختار تشکیل دهنده سیستم است.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V} \left( \frac{dq}{dt} - P \frac{dV}{dt} \right) - \rho \sum_{i=1}^{N_s} u_i \frac{dy_i}{dt} \quad (4)$$

پس از اعمال قانون بقای انرژی، باید قانون بقای جرم را در نظر گرفت. در سیستم‌هایی که با واکنش شیمیایی همراه هستند، قانون بقای جرم به صورت قانون بقای گونه‌های شیمیایی بیان می‌شود. نرخ تغییرات جرمی گونه‌های شیمیایی به صورت معادله (۵) تعیین می‌شود. در این معادله  $M_i$  جرم مولی گونه شیمیایی  $i$ ام و  $\dot{\omega}_i$  نرخ تولید یا از بین رفتن گونه شیمیایی  $i$ ام است.

$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{M_i \dot{\omega}_i}{\rho} \quad (5)$$

این معادلات به تعداد گونه‌های شیمیایی موجود، هستند و باید در کنار معادله دیفرانسیل دما به صورت همزمان حل شوند. برای یافتن نرخ تولید یا از بین رفتن یک گونه شیمیایی در یک مخلوط گازهای کامل واکنش‌پذیر، به یک مجموعه از واکنش‌های شیمیایی برای بیان سازوکار فرایند انجام شده و نیز روابط نرخ سینتیک واکنش نیاز است. یک واکنش مقدماتی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.



قانون کنش جرم برای این واکنش بیان می‌کند که نرخ پیشرفت واکنش در هر جهت متناسب با حاصل ضرب غلظت هر یک از گونه‌های واکنش دهنده در همان جهت به نمای ضرایب استوکیومتریک آن‌هاست. برای واکنش مقدماتی بالا، نرخ پیشرفت واکنش در جهت رفت و برگشت برابر است با:

$$RR_f = k_f [A]^a [B]^b \quad (7)$$

$$RR_b = k_b [C]^c \quad (8)$$

و به این ترتیب نرخ کلی انجام واکنش به صورت زیر به دست می‌آید.

$$RR = k_f [A]^a [B]^b - k_b [C]^c \quad (9)$$

در رابطه‌های بالا، علامت کروشه برای بیان غلظت مولی گونه‌های شیمیایی به کار رفته است و  $k$  ثابت نرخ نامیده می‌شود که توسط معادله (۱۰)، رابطه آرنیوس، تعیین می‌شود. در رابطه آرنیوس  $A_{Ar}$  و  $\beta$  ثابت‌های وابسته به واکنش و  $E_a$  نیز انرژی فعالسازی آن است.  $R_u$  ثابت جهانی گازهاست [۱۹].

$$k = A_{Ar} T^\beta \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right) \quad (10)$$

سازوکار یک واکنش شیمیایی از تعدادی واکنش مقدماتی (که ویژگی‌های آن در بالا ذکر شد) تشکیل می‌شود. این واکنش‌های مقدماتی به نوبه خود به دو نوع واکنش ساده و واکنش همراه با جسم سوم تقسیم می‌شوند. یک واکنش مقدماتی ساده را می‌توان به صورت عمومی زیر در نظر گرفت.

$$\sum_{k=1}^{N_s} v'_{k,i} S_i \rightleftharpoons \sum_{k=1}^{N_s} v''_{k,i} S_i \quad i=1,2,\dots,N_R \quad (11)$$

در این رابطه  $S$  معرف هر یک از گونه‌های شیمیایی است.  $v'$  و  $v''$  نیز ضرایب استوکیومتریک گونه‌های شیمیایی در واکنش‌های رفت و برگشت هستند.  $N_R$  تعداد کل واکنش‌های مقدماتی را نشان می‌دهد. برای هر واکنش مقدماتی ساده نرخ پیشرفت واکنش به رابطه زیر تعمیم می‌یابد.

$$RR_i = k_{f,i} \prod_{k=1}^{N_s} [S_k]^{v'_{k,i}} - k_{b,i} \prod_{k=1}^{N_s} [S_k]^{v''_{k,i}} \quad (12)$$

برخی از واکنش‌ها ( به ویژه واکنش‌های تجزیه یا ترکیب مجدد) برای انجام نیازمند یک جسم سوم هستند. از آنجا که برای محاسبه نرخ پیشرفت این گونه واکنش‌ها، به غلظت مؤثر جسم سوم نیاز است، معادله نرخ با رابطه (۱۲) تفاوت خواهد داشت. یک واکنش همراه با جسم سوم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sum_{k=1}^{N_s} v'_{k,i} S_i + TB \rightleftharpoons \sum_{k=1}^{N_s} v''_{k,i} S_i + TB \quad (13)$$

غلظت مؤثر جسم سوم شامل غلظت هر یک از گونه‌های شیمیایی موجود در واکنش با در نظر گرفتن ضریب تقویت آن‌هاست. بنابراین نرخ پیشرفت یک واکنش مقدماتی همراه با جسم سوم به صورت معادله (۱۴) به دست می‌آید. ضرایب مورد نیاز را نیز می‌توان از اطلاعات NASA برای هر نیاز [۲۰] به دست آورد.

$$RR_i = \left( \sum_{k=1}^{N_s} a_{k,i} [TB_k] \right) \left( k_{f,i} \prod_{k=1}^{N_s} [S_k]^{v'_{k,i}} - k_{b,i} \prod_{k=1}^{N_s} [S_k]^{v''_{k,i}} \right) \quad (14)$$

با در نظر گرفتن تمامی موارد بالا، نرخ تولید یا از بین رفتن هر یک از گونه‌های شیمیایی در هر لحظه با توجه به سازوکار واکنش، توسط رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^{N_R} RR_i (v'_{k,i} - v''_{k,i}) \quad (15)$$

برای بسته شدن مجموعه معادلات مورد نیاز، علاوه بر نرخ تغییرات دما و جرم گونه‌های شیمیایی به یک معادله دیگر نیاز است. این معادله مربوط به تغییرات حجم سیلندر است که از روابط کلاسیک موتور به دست می‌آید [۲۱].

$$V = V_c \left( 1 + \frac{r_c - 1}{2} \left( R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta} \right) \right) \quad (16)$$

برای تعیین  $dq/dt$  نیز معمولاً از روابط انتقال گرمای کلاسیک مانند وشنی استفاده می‌شود، اما با توجه به نرخ سریع واکنش در موتورهای HCCI، در این مقاله از رابطه اصلاح شده وشنی که برای موتورهای HCCI معرفی شده [۲۲] استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{dq}{dt} = hA(T - T_w) \quad (17)$$

در این رابطه  $A$  سطح انتقال گرمای جداره سیلندر،  $T_w$  دمای جداره سیلندر و  $h$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی معادل است که توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$h = 129.8 L^{-0.2} P^{0.8} T^{-0.55} (2.28 S_p + f(P))^{0.8} \quad (18)$$

$$f(P) = 3.34 \times 10^{-4} \frac{V_d T_r}{P V_r} (P - P_{mot})$$

در رابطه فوق  $L$  ارتفاع لحظه‌ای محفظه احتراق،  $S_p$  سرعت متوسط پیستون،  $r$  زیرنویس مربوط به نقطه مرجع (لحظه بسته شدن سوپاپ هوا)،  $V_d$  حجم جابه‌جایی و  $P_{mot}$  فشار موتورگردانی است.

## تعیین زمان شروع احتراق

یکی از مهم‌ترین متغیرهای موثر بر کارایی موتورهای HCCI، زمان شروع احتراق (SOC - Start of Combustion) است. برای تعیین زمان شروع احتراق در موتورهای HCCI از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایب ویژه خود هستند و برای استفاده از آن‌ها نیاز به اطلاعات اولیه مختلفی است. عمده‌ترین شیوه‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- معرفی یک حد آستانه‌ای دما برای شروع احتراق
- محاسبه مشتق مرتبه سوم فشار نسبت به زاویه لنگ [۲۳]
- استفاده از انتگرال کوبش [۲۴و۵]
- الگوهای سینتیک کاهش یافته نظیر شل [۲۵]، هو و کک [۲۵] و ... یا الگوهای سینتیک تفصیلی [۲۶و۷]

معرفی حد آستانه‌ای دما برای شروع احتراق، دقت بسیار پایینی دارد. تعیین دمای آستانه‌ای احتراق به متغیرهای بسیار متعددی بستگی دارد که استفاده از آن را مشکل می‌سازد. در روش دوم، معمولاً مقدار عددی  $d^3P/d\theta^3$  در هر لحظه از مرحله تراکم محاسبه می‌شود و رسیدن آن به یک حد بحرانی، به عنوان زمان شروع احتراق در نظر گرفته می‌شود. این حد بحرانی با توجه به نوع موتور و نوع سوخت می‌تواند تغییر کند. در روش انتگرال کوبش، تابعی انتگرالی بر حسب دما و فشار درون سیلندر، نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ ) و ... تعریف می‌شود که مقدار آن در هر لحظه محاسبه شده و زمان شروع احتراق با رسیدن مقدار انتگرال به عدد ۱، تعیین می‌شود. ضرایب موجود در این رابطه انتگرالی باید با توجه به نوع سوخت و هندسه موتور تعیین شوند. برای استفاده از این دو روش احتیاجی به در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی احتراق نیست و با معادلات ساده قانون اول می‌توان مدل را ایجاد کرد. وابستگی مدل به نوع موتور و همچنین سوخت مورد استفاده، از معایب این روش به شمار می‌رود. در روش‌های شل، و هو و کک، از سازوکار سینتیک کاهش یافته احتراق سوخت استفاده می‌شود. توضیحات مفصل در این رابطه را می‌توان در مرجع [۲۵] مشاهده کرد. در روش آخر که در این مقاله استفاده شده است از سینتیک تفصیلی شیمیایی سوخت استفاده می‌شود. در این روش با مطالعه دقیق واکنش‌های مقدماتی موجود، رادیکال‌هایی که نقش اساسی در آزادسازی انرژی و پیشبرد واکنش احتراق دارند، شناسایی شده و زمان شروع احتراق بر مبنای کسر مولی این رادیکال‌ها در مخلوط تعیین می‌شود. این روش یکی از دقیق‌ترین روش‌های موجود برای تعیین زمان شروع احتراق است [۲۶،۷] که برای به کارگیری آن باید حتماً سینتیک تفصیلی شیمیایی در مدل در نظر گرفته شده باشد. در بخش نتایج توضیحات مفصلی در مورد استفاده از این روش ارائه شده است.

## تعیین نسبت هم‌ارزی

تعیین نسبت هوا به سوخت استوکیومتریکی به صورت کامل به ترکیب سوخت بستگی دارد. سوخت گاز طبیعی در نظر گرفته شده برای این تحقیق (با توجه به ترکیب غالب گاز طبیعی ایران) دارای ۸۹ درصد متان، ۴/۵ درصد اتان، ۱/۵ درصد پروپان، ۴/۷۵ درصد نیتروژن و ۰/۲۵ درصد دی‌اکسید کربن است [۲۸]. این مقادیر درصد حجمی هر یک از گونه‌ها را نشان می‌دهد و در این مقاله، مقدار فرمالدهید اضافه شده نیز به صورت درصدی از حجم سوخت بیان می‌شود. بدین ترتیب با فرض اینکه کسر حجمی فرمالدهید در سوخت با  $x_f$  نشان داده شود، می‌توان نشان داد نسبت هوا به سوخت استوکیومتریکی به صورت زیر خواهد بود.

$$(A/F)_{st} = 9.58 - 4.82x_f \quad (19)$$

با توجه به اینکه وجود فرمالدهید سبب می‌شود این ترکیب در رده سوخت‌های اکسیژن‌دار قرار گیرد، برای تعیین نسبت هم‌ارزی از ظرفیت (Valence) اتم‌های موجود در آن استفاده شده است [۲۹]. در این روش مقادیر ظرفیت‌های اتم‌های کربن برابر +۴، اتم‌های هیدروژن برابر +۱، اتم‌های اکسیژن برابر -۲ و اتم‌های نیتروژن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. نسبت هم‌ارزی واقعی حاصل تقسیم مجموع ظرفیت‌های مثبت طرف واکنش‌دهنده بر مجموع ظرفیت‌های منفی آن است.

$$\phi = \frac{\sum V^+}{\sum V^-} = \frac{n_C \times 4 + n_H}{n_O \times 2} \quad (20)$$

## صحه‌گذاری مدل

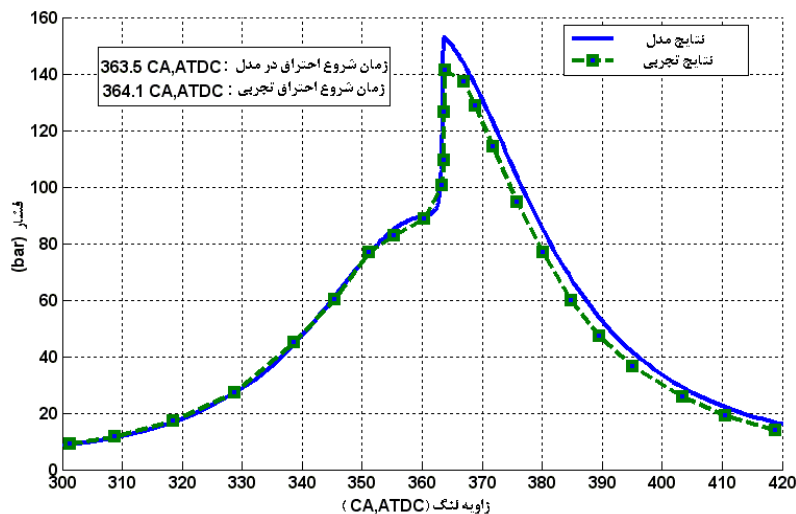
برای صحه‌گذاری و اطمینان از دقت نتایج مدل صفر بعدی تک ناحیه‌ای ایجاد شده، از داده‌های تجربی موجود در مراجع استفاده شده است. فرایند صحه‌گذاری مدل حاضر در کارهای قبلی نویسندگان به تفصیل مورد اشاره قرار گرفته است [۳۰-۳۲] با این حال نتایج صحه‌گذاری مربوط به موتوری که در این مقاله مطالعه شده، در این بخش ذکر می‌شود. ویژگی‌های هندسی و شرایط عملکردی موتور در جدول (۲) ارائه شده است. سوخت در نظر گرفته شده در این قسمت متان خالص است.

جدول ۲- ویژگی‌های هندسی و شرایط عملکردی موتور Caterpillar 3500، بر گرفته از مرجع [۲۶]

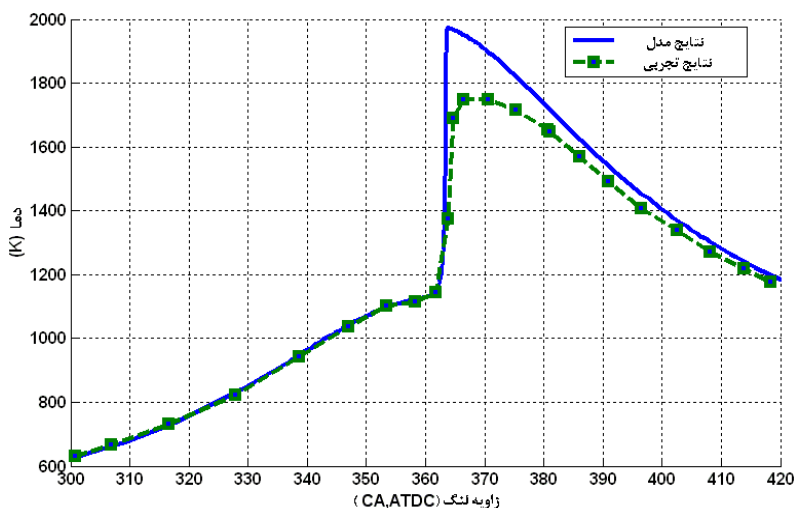
ویژگی‌ها	مقدار	خصوصیات	مقدار
قطر سیلندر (mm)	۱۷۰	نسبت تراکم	۱۷
طول کورس (mm)	۱۹۰	بسته شدن سوپاپ ورودی (ATDC)	۲۰
طول شاتون (mm)	۳۵۰	باز شدن سوپاپ دود (BBDC)	۴۰
نسبت طول شاتون به شعاع لنگ	۳/۶۸	دمای جداره سیلندر (K)	۴۰۰

شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) روند تغییرات فشار و دمای درون سیلندر نسبت به زاویه لنگ را در دو حالت مختلف کارکردی موتور نشان می‌دهد. داده‌های تجربی از مرجع [۲۶] استخراج شده است.

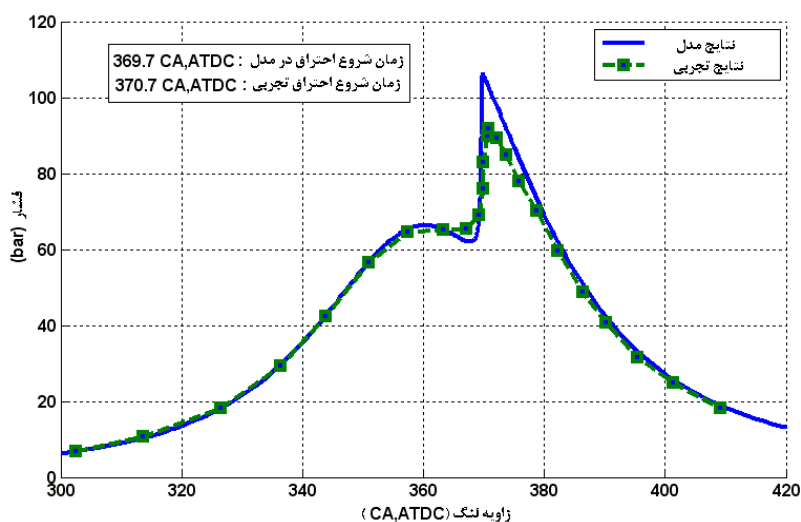
زمان شروع احتراق یکی از متغیرهای اساسی در تعیین دقت مدل است. برای مقایسه این متغیر، از شیوه مشتق سوم فشار نسبت به زاویه لنگ استفاده شد. در حالت مربوط به شکل (۲)، زمان شروع احتراق پیش‌بینی شده توسط مدل در حدود  $0/6CA$  زودتر از نتایج تجربی است و برای حالت مربوط به شکل (۴)، این اختلاف به حدود  $0/1CA$  می‌رسد. همان‌گونه که دیده می‌شود، مدل تک ناحیه‌ای حاضر قادر است با دقت مناسبی زمان شروع احتراق را پیش‌بینی کند.



شکل ۲- تغییرات فشار درون سیلندر، فشار ورودی ۲ bar، سرعت موتور ۱۵۰۰ rpm و نسبت هم‌ارزی ۰/۳



شکل ۳- تغییرات دمای درون سیلندر، فشار ورودی ۲ bar، سرعت موتور ۱۵۰۰ rpm و نسبت هم‌ارزی ۰/۳



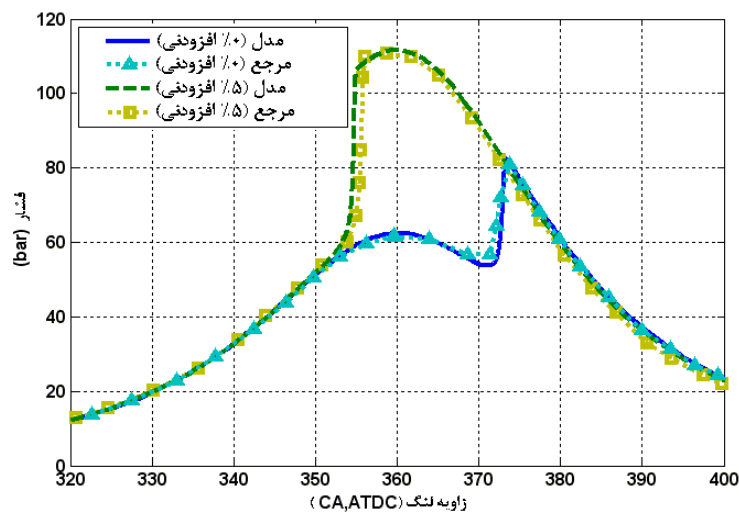
شکل ۴- تغییرات فشار درون سیلندر، فشار ورودی ۱/۵ bar، سرعت موتور ۱۵۰۰ rpm و نسبت هم‌ارزی ۰/۳

همچنین همان‌گونه که از شکل‌ها بر می‌آید، مدل تک ناحیه‌ای تا حد مناسبی قابلیت پیش‌بینی روند عملکرد موتور HCCI را دارد. مقدار بیشینه فشار و دما، زیادتر از حد واقعی محاسبه می‌شود و همچنین زمان وقوع بیشینه فشار و دما اندکی زودتر روی می‌دهد. این رویه در همه شرایط دیده می‌شود. این اختلاف اصولاً به دو دلیل روی می‌دهد:

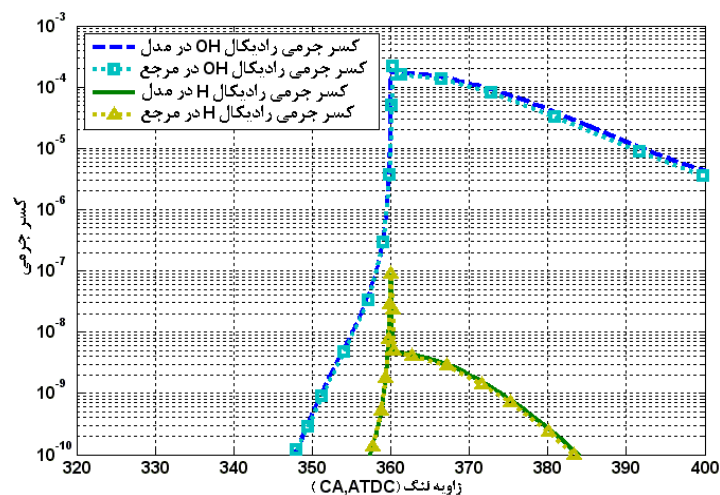
- مدل تک ناحیه‌ای، کلیه ویژگی‌های ترمودینامیکی محتویات محفظه احتراق را به صورت همگن فرض می‌کند در حالی که از زمان IVC، اندکی ناهمگنی در دمای مخلوط هوا و سوخت وجود دارد و از طرف دیگر در هنگام احتراق نیز، نواحی نزدیک به جداره سیلندر به علت انتقال گرمای بیشتر، دارای دمای پایین‌تری نسبت به مناطق مرکزی‌اند.
- احتراق HCCI اصولاً در زمان کوتاه، دمای پایین و فشار بالا صورت می‌گیرد، به همین دلیل بخش کوچکی از سوخت وارد شکاف رینگ‌ها شده و وارد فاز احتراق نمی‌شود. از سوی دیگر در مدل‌های تک ناحیه‌ای فرایند نشستی گازها نیز در نظر گرفته نمی‌شود. به دلیل صرف‌نظر کردن از این قسمت‌ها، نتایج حاصل از مدل تفاوت‌هایی با رفتار واقعی خواهد داشت. علاوه بر این مشکل، مدل تک ناحیه‌ای قادر به محاسبه دقیق CO و آلاینده‌های هیدروکربنی نیست، زیرا این مقادیر بستگی زیادی به شکاف‌های سیلندر و حجم گاز نسوخته دارند [۹]. اما با وجود این موارد، مدل تک ناحیه‌ای به دلیل سرعت بسیار مناسب، تعیین دقیق زمان شروع احتراق و محاسبه NOx با دقت مناسب، در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷-۹ و ۲۶].



مدل‌های صفر بعدی تک ناحیه‌ای برای بررسی مقایسه‌ای تأثیر متغیرهایی نظیر ترکیب‌های مختلف سوخت، دمای چندراهه ورودی، پرخوران و ... به کار می‌رود و از آنجا که در این بررسی‌ها، تغییرات نسبی مورد نظر است، خطاهای مدل قابل چشمپوشی است و عدم قطعیت آن در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرد [۱۲]. با توجه به این که در این تحقیق نیز بررسی‌های مقایسه‌ای مد نظر بوده است، از این مدل استفاده شده است. لازم به ذکر است که کلیه نتایج ارائه شده در این مقاله در شرایط پیش‌فرض موتور مورد بررسی، یعنی سرعت ۱۵۰۰ rpm، نسبت هم‌ارزی ۰/۳ و فشار ورودی ۲ bar به دست آمده‌اند. برای اطمینان از صحت عملکرد مدل ایجاد شده در تعیین غلظت گونه‌های میانی و همچنین اثرات استفاده از فرمالدهید، فرایند صحه‌گذاری با استفاده از نتایج نرم‌افزار CHEMKIN<sup>®</sup> نیز انجام شد. برای این منظور از نتایج موجود در مراجع [۱۱] و [۱۲] استفاده شد. شکل (۵) نمودار تغییرات فشار درون سیلندر برای دو حالت بدون افزودنی و ۵ درصد فرمالدهید را نشان می‌دهد. در شکل (۶) نیز نمودار تغییرات رادیکال‌های هیدروژن (H) و هیدروکسیل (OH) در نزدیکی نقطه احتراق ارائه شده است.



شکل ۵- تغییرات فشار درون سیلندر، مقایسه نتایج مدل با نرم‌افزار CHEMKIN<sup>®</sup>



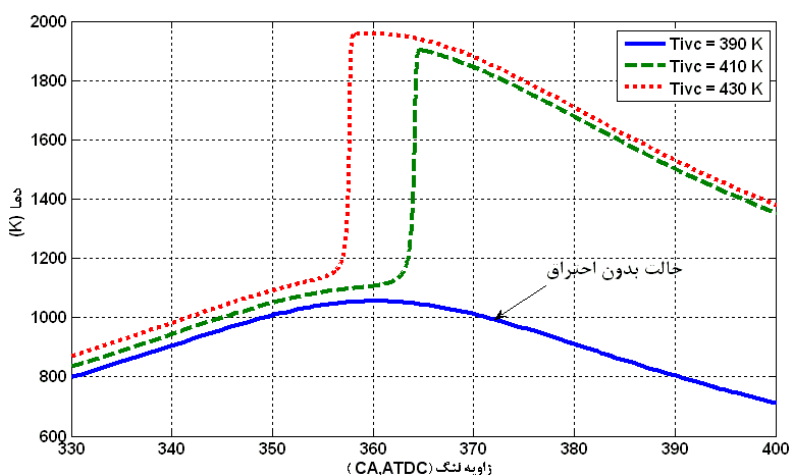
شکل ۶- تغییرات کسر مولی رادیکال‌های هیدروژن و هیدروکسیل، مقایسه نتایج مدل با نرم‌افزار CHEMKIN<sup>®</sup>

همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، جواب‌های حاصل از مدل حاضر و نرم‌افزار به صورت کامل با یکدیگر تطابق دارند زیرا در هر دو حالت از معادلات یکسانی برای مدل‌سازی موتور HCCI استفاده شده است. تفاوت‌های جزئی بین نتایج ناشی از روش‌های ریاضی متفاوت حل عددی معادلات حاکم و استفاده از گام‌های زمانی متفاوت است.

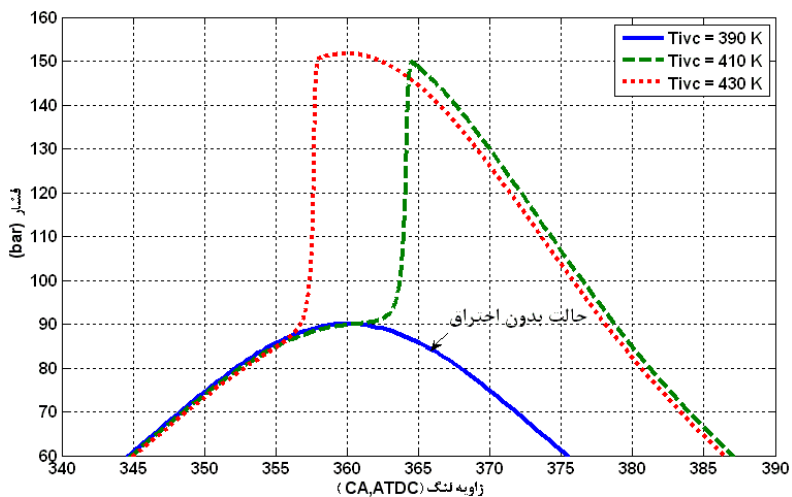
در انجام این مقایسه باید به این نکته نیز توجه داشت که مدل حاضر که در محیط MATLAB® ایجاد شده، قابلیت اتصال به سایر کدها به منظور بررسی‌های موضوعی را دارد و همچنین می‌توان به راحتی از آن در سیستم‌های کنترلی استفاده کرد.

## بحث و بررسی نتایج

پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، ابتدا عملکرد موتور بدون افزودن فرمالدهید بررسی شد. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب تغییرات دما و فشار درون سیلندر را برای سه حالت مختلف دمای ورودی (دما در لحظه بسته شدن سوپاپ هوا) نشان می‌دهد.



شکل ۷- تغییرات دمای درون سیلندر برای سه حالت مختلف دمای ورودی



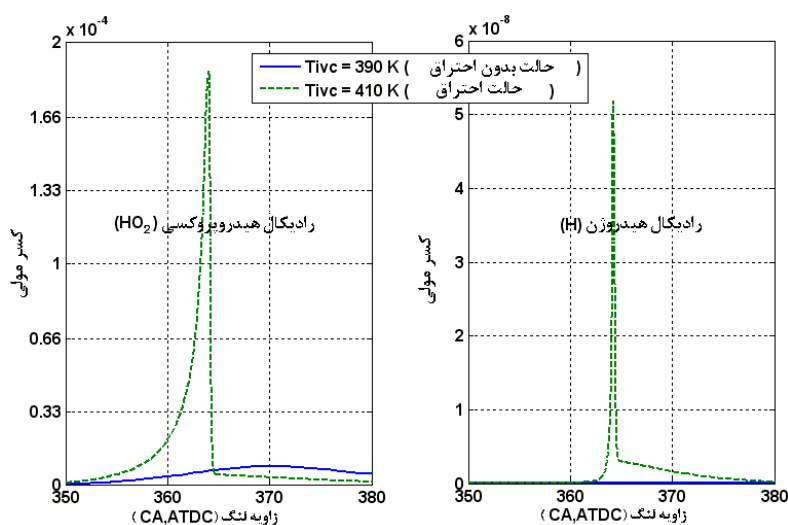
شکل ۸- تغییرات فشار درون سیلندر برای سه حالت مختلف دمای ورودی

همان‌طور که دیده می‌شود در حالت  $T_{IVC} = 390K$  اصولاً احتراقی روی نمی‌دهد. دلیل این پدیده، نرسیدن دما و فشار مخلوط هوا و سوخت به حد خوداشتعالی است. در این حالت معمولاً گفته می‌شود که موتور در خارج از محدوده عملکردی خود قرار دارد. در حالت  $T_{IVC} = 410K$  احتراق روی می‌دهد و زمان شروع آن اندکی پس از نقطه مرگ بالا واقع می‌شود. با افزایش دمای ورودی به حد  $T_{IVC} = 430K$  احتراق قبل از نقطه مرگ بالا اتفاق می‌افتد و مقدار بیشینه دما و فشار نیز نسبت به حالت قبل بیشتر می‌شود. دیده می‌شود که می‌توان با تغییر دمای ورودی مخلوط، تا حدود بسیار زیادی فرایند احتراق را

کنترل کرد. این کار در موتورهای HCCI با پیش گرم کردن هوای ورودی یا استفاده از EGR گرم امکان پذیر است. البته باید این نکته را در نظر داشت که افزایش دمای مخلوط ورودی از بازده حجمی موتور و به تبع آن از بازده کلی موتور خواهد کاست. متان، اصلی ترین جزء گاز طبیعی است. در حالت کلی، اکسایش دما پایین متان طبق واکنش های زیر آغاز می شود.

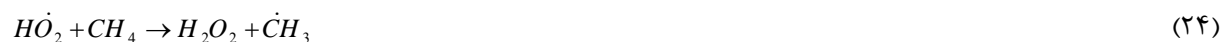


برای اطمینان از این موضوع، نمودار تغییرات غلظت رادیکال هیدروپروکسی ( $\dot{H}O_2$ ) و رادیکال هیدروژن ( $\dot{H}$ ) برای شرایط بدون احتراق ( $T_{IVC} = 390K$ ) و با احتراق ( $T_{IVC} = 410K$ )، در شکل (۹) رسم شده است. همان گونه که در شکل دیده می شود، در حالتی که احتراق رخ می دهد، غلظت این رادیکال ها به شدت افزایش پیدا می کند اما در حالت بدون احتراق، تغییرات غلظت این رادیکال ها بسیار کم و حاصل افزایش دمای ناشی از کاهش حجم محفظه سیلندر است.



شکل ۹- تغییرات غلظت رادیکال های هیدروژن و هیدروپروکسی در دو حالت با احتراق و بدون احتراق

رادیکال هیدروپروکسی و رادیکال هیدروژن به سرعت واکنش داده و با تولید رادیکال هیدروکسیل ( $\dot{O}H$ ) و پروکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) زنجیره واکنش ها را پیش می برند.



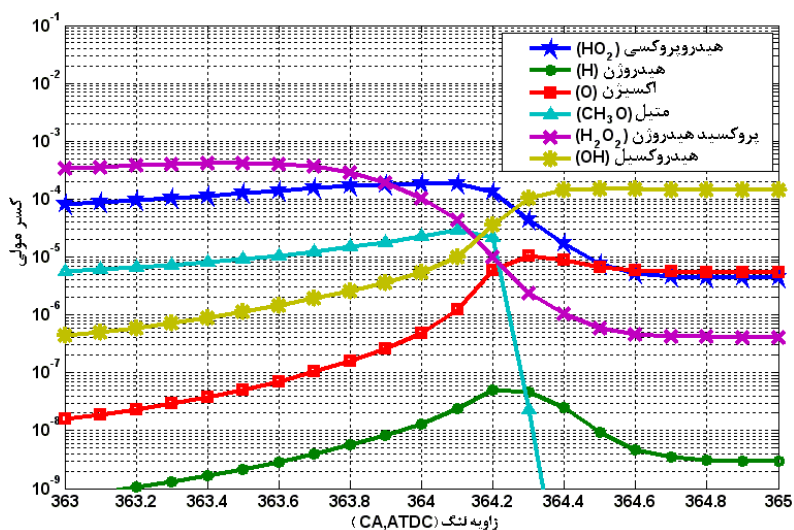
مولکول های پروکسید هیدروژن به نوبه خود به رادیکال هیدروکسیل تجزیه می شوند.



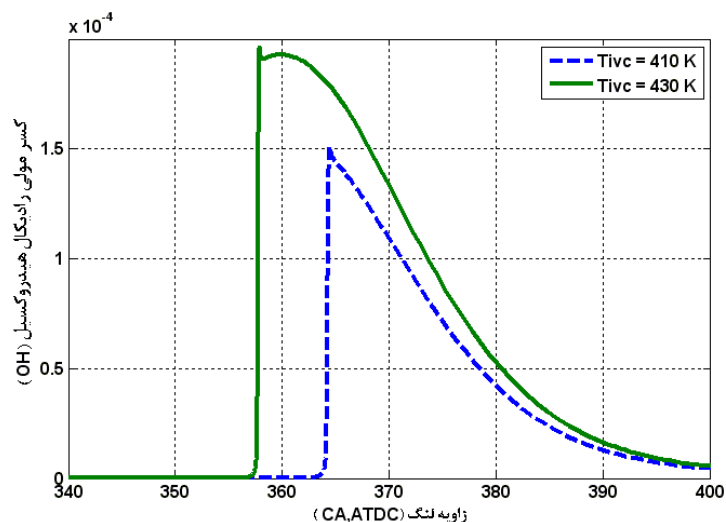
این واکنش مقادیر زیادی از رادیکال هیدروکسیل تولید می کند. واکنش رادیکال های هیدروکسیل با مولکول های سوخت، به شدت گرمازا است. اهمیت این واکنش ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این شکل تغییرات غلظت گونه های میانی احتراق را در نزدیکی نقطه مرگ بالا نشان می دهد.

اهمیت رادیکال هیدروکسیل در انجام واکنش های اصلی گرمازا و شروع احتراق تا حدی است که معمولاً شروع احتراق در مخلوط هوا و گاز طبیعی را در لحظه افزایش ناگهانی غلظت این رادیکال (بیشینه شیب نمودار تغییرات غلظت) تعریف می کنند [۳۳]. در این مقاله نیز از همین شیوه برای تعیین زمان شروع احتراق استفاده شده است. برای انجام این کار باید از نمودار تغییرات غلظت این گونه شیمیایی نسبت به زاویه لنگ مشتق گرفت و محل بیشینه مشتق را تعیین کرد. این زاویه لنگ، لحظه شروع احتراق است. نمودار تغییر غلظت این رادیکال برای دو حالت  $T_{IVC} = 410K$  و  $T_{IVC} = 430K$  که در آن ها

احتراق روی می‌دهد در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بنابراین در حالت  $T_{IVC} = 410K$  احتراق در  $CA \ 4/2$  پس از نقطه مرگ بالا و در حالت  $T_{IVC} = 430K$  احتراق در  $CA \ 2/3$  قبل از نقطه مرگ بالا روی داده است.



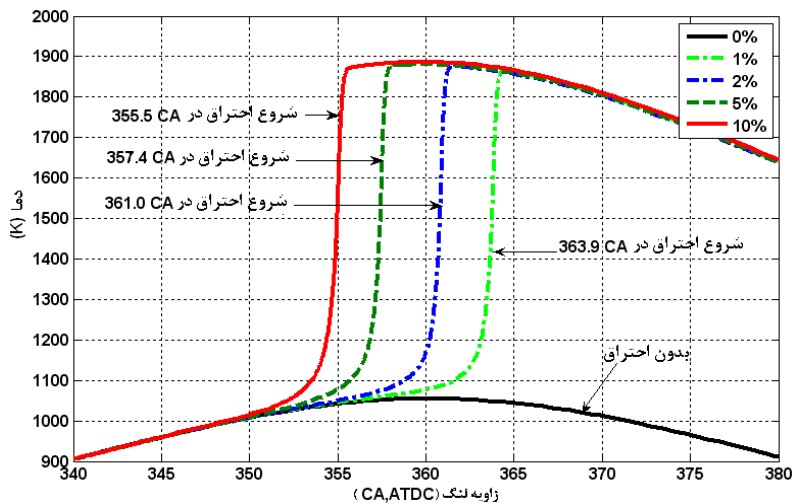
شکل ۱۰- تغییرات غلظت رادیکال‌های مختلف در محدوده احتراق



شکل ۱۱ - تغییرات غلظت رادیکال هیدروکسیل در محدوده احتراق

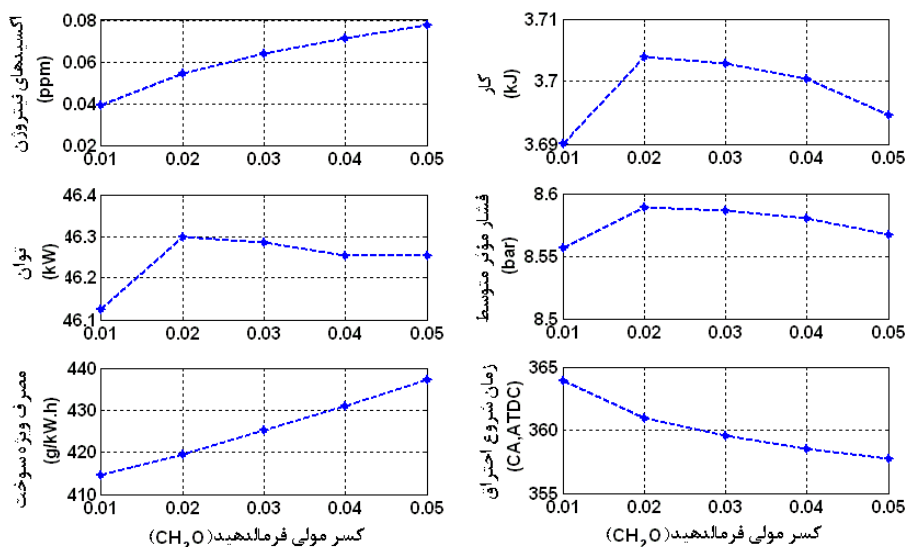
برای مقایسه این روش تعیین زمان شروع احتراق با روش مشتق سوم، اگر با توجه به نمودارهای تغییرات فشار، زمان شروع احتراق محاسبه شود، دیده می‌شود که برای حالت  $T_{IVC} = 410K$  زمان شروع احتراق  $CA \ 4/1$  به دست می‌آید که با پیش‌بینی قبلی  $CA \ 0/1$  تفاوت دارد. همچنین برای حالت  $T_{IVC} = 430K$  زمان شروع احتراق  $CA \ 2/5$  قبل از نقطه مرگ بالا پیش‌بینی می‌شود که با روش قبل تنها  $CA \ 0/2$  اختلاف دارد. بنابراین می‌توان دقت مناسب استفاده از روش پیشینه شیب نمودار تغییرات غلظت رادیکال هیدروکسیل را نشان داد.

پس از تعیین شیوه دقیق محاسبه زمان شروع احتراق، می‌توان به بررسی اضافه نمودن فرمالدهید پرداخت. انتظار می‌رود با توجه به پایین‌تر بودن دمای اشتعال فرمالدهید، اضافه نمودن آن سبب پیش‌روی احتراق شود. به همین دلیل ابتدا مقادیر ۱ درصد، ۲ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد فرمالدهید به شرایط بدون احتراق ( $T_{IVC} = 390K$ ) اضافه شد. نتایج در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ - تغییرات دمای درون سیلندر برای مقادیر مختلف افزودنی در  $T_{IVC} = 390K$

همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، حتی افزودن ۱ درصد فرمالدهید به سوخت در حالت  $T_{IVC} = 390K$  (که بدون افزودنی احتراق روی نمی‌دهد) سبب می‌شود که فرایند احتراق اتفاق بیفتد. هرچند زمان شروع احتراق در  $CA 3/9$  پس از نقطه مرگ بالا روی می‌دهد و این از نظر عملکرد موتور در نقطه مطلوبی قرار ندارد اما می‌توان با اضافه نمودن مقدار بیشتر افزودنی، زمان شروع احتراق را نیز تغییر داد به گونه‌ای که با افزودن ۱۰ درصد فرمالدهید، زمان شروع احتراق به  $CA 4/5$  قبل از نقطه مرگ بالا می‌رسد که نسبت به حالت ۱ درصد افزودنی،  $CA 8/4$  زودتر است. اما برای بررسی دقیق‌تر عملکرد موتور باید متغیرهای دیگری را نیز مورد مطالعه قرار داد، زیرا پیش‌رسی زمان احتراق تا حد مشخصی مطلوب است و پس از آن باعث کاهش کارایی موتور می‌شود. به این منظور در شکل (۱۳) تأثیر افزودنی بر متغیرهایی نظیر کار ناخالص (Gross Indicated Work per Cycle)، توان ناخالص (Gross Indicated Power per Cylinder)، فشار موثر متوسط ناخالص (mep)، مصرف ویژه سوخت ناخالص (sfc)، زمان شروع احتراق (SOC) و میزان تولید آلاینده‌گی  $NO_x$  نشان داده شده است. میزان افزودن فرمالدهید در این بررسی در محدوده ۱ تا ۵ درصد قرار دارد. این محدوده با توجه به سایر فعالیت‌های انجام شده در این زمینه، انتخاب شده است [۱۲ و ۱۱].

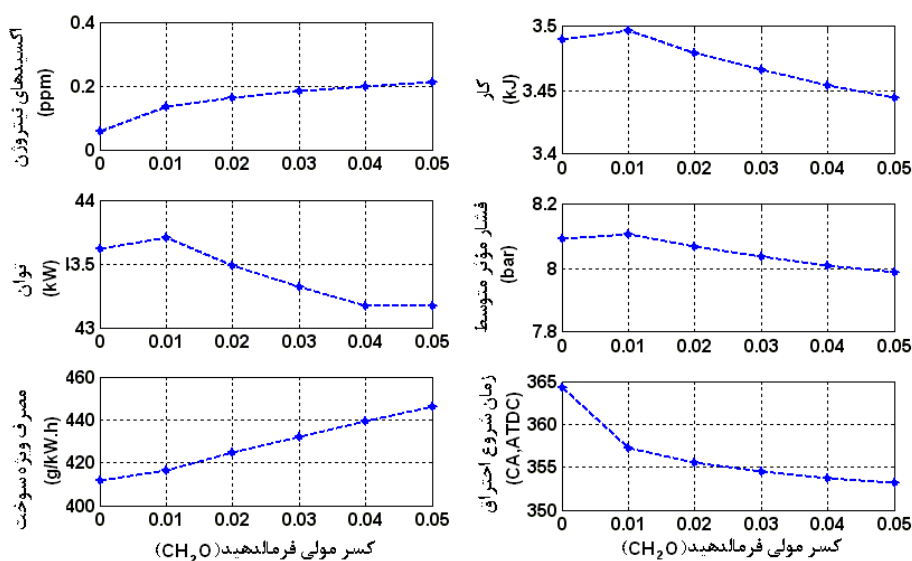


شکل ۱۳ - تأثیر افزودن فرمالدهید بر متغیرهای مختلف عملکردی موتور در  $T_{IVC} = 390K$

همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، با افزایش میزان فرمالدهید، احتراق زودتر روی می‌دهد و از CA,ATDC ۳۶۳/۹ به CA,ATDC ۳۵۷/۴ می‌رسد. از طرف دیگر میزان تولید آلاینده‌ی NOx نیز تا حد ۲ برابر افزایش پیدا می‌کند. این امر به دلیل بالاتر رفتن دمای محفظه احتراق با استفاده از مقدار فرمالدهید بیشتر و همچنین بیشتر شدن طول دوره دما بالا در سیلندر است. دمای بالای محفظه احتراق منشأ افزایش سرعت واکنش‌های مولکول نیتروژن است که به تولید NOx بیشتر منجر می‌شود که معمولاً از آن تحت عنوان گرمايي یاد می‌شود.

مهم‌ترین متغیرهای مورد استناد در مطالعه عملکرد یک موتور، مقدار کار، توان و فشار موثر متوسط آن است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، هر سه متغیر ابتدا با افزایش میزان فرمالدهید روند صعودی دارند اما پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، شروع به کاهش می‌کنند. هر چند تغییرات این متغیرها ممکن است کوچک به نظر برسد اما تأثیر بسیار مهمی در انتخاب شرایط بهینه دارد. با دقت بر روی نمودارها به راحتی می‌توان دریافت که برای شرایط کاری اعلام شده، سوخت با ۲ درصد افزودنی فرمالدهید، بهترین عملکرد را در موتور به دنبال دارد، زیرا در این حالت مقادیر توان و فشار موثر متوسط به بیشینه خود می‌رسند. با این حال افزایش فرمالدهید به صورت تقریباً خطی میزان مصرف ویژه سوخت را افزایش می‌دهد. البته این نکته را نیز نباید فراموش کرد که در این شرایط عملکردی موتور، سوخت گاز طبیعی بدون افزودنی، به شرایط احتراق نمی‌رسد و عملاً موتور کار نمی‌کند و افزودنی سبب شده است که موتور در دمای ورودی پایین‌تری کار کند. پایین‌تر بودن دمای ورودی سبب کاهش چشمگیر آلاینده‌ی NOx شده و از سوی دیگر با افزایش بازده حجمی، کارایی موتور را نیز افزایش می‌دهد.

برای مطالعات بیشتر و مقایسه‌ای، حالت  $T_{IVC} = 410K$  نیز با در نظر گرفتن مقادیر مختلف افزودنی بررسی شد. نتایج این بررسی در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - تأثیر افزودن فرمالدهید بر متغیرهای مختلف عملکردی موتور در  $T_{IVC} = 410K$

در اینجا نیز تقریباً روندی مشابه حالت قبل دیده می‌شود و تمام تفاسیر ارائه شده برای شکل قبل، در اینجا نیز صادق است و می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در این شرایط عملکردی موتور، استفاده از سوخت با ۱ درصد افزودنی، منجر به مناسب‌ترین عملکرد موتور می‌شود.

برای نشان دادن بهتر تأثیر افزودن فرمالدهید، دو حالت بهینه مربوط به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) در جدول (۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول، حالت ۱ مربوط به شرایط  $T_{IVC} = 390K$  و استفاده از سوخت با ۲ درصد فرمالدهید است و

حالت ۲ نیز شرایط  $T_{IVC} = 410K$  و استفاده از سوخت با ۱ درصد افزودنی را نشان می‌دهد. ستون آخر این جدول مقدار مقایسه‌ای حالت ۱ نسبت به حالت ۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۳- متغیرهای مختلف عملکردی موتور در دو حالت بهینه مربوط به دماهای مختلف ورودی

نسبت	حالت ۲	حالت ۱	واحد	نماد	ویژگی‌ها
	۳۵۷/۳	۳۶۱/۰	CA, ATDC	SOC	زمان شروع احتراق
+۳/۷ CA	۳/۵۰	۳/۷۰	kJ	Work	کار ناخالص در هر چرخه
٪+۵/۷۱	۴۳/۷۱	۴۶/۳۰	kW	Power	توان ناخالص در هر سیلندر
٪+۵/۹۳	۸/۱۱	۸/۵۹	bar	mep	فشار موثر متوسط
٪+۰/۸۲	۴۱۶/۲۰	۴۱۹/۶۲	J/kW.h	sfc	مصرف ویژه سوخت
٪-۶۰/۵۸	۰/۱۳۷	۰/۰۵۴	ppm	NOx	اکسیدهای نیتروژن

دیده می‌شود که با وجود احتراق دیرتر در حالت ۱، میزان کار، توان و فشار موثر متوسط حدود ۶ درصد بیشتر از حالت ۲ است در حالی که مصرف ویژه سوخت آن کمتر از ۱ درصد بیشتر است. همان‌گونه که در توضیحات مربوط به حالت  $T_{IVC} = 390K$  بیان شد، کمتر بودن دمای ورودی مخلوط هوا و سوخت، موجب افزایش بازده حجمی موتور می‌شود که تأثیر بسیار مثبتی بر عملکرد موتور دارد. همان‌طور که دیده می‌شود این تأثیر در حدی است که میزان کار و توان موتور افزایش داشته است. افزودن مقدار ۲ درصد فرمالدهید باعث شده است که محدوده عملکردی موتور تغییر کند و موتور بتواند در حالت  $T_{IVC} = 390K$  نیز عمل کند. از سوی دیگر، کاهش دمای سیلندر به شدت باعث کاهش آلاینده‌گی NOx می‌شود. در جدول نیز می‌توان دید که میزان NOx در حالت ۱ حدود ۶۰ درصد کمتر از حالت ۲ است.

در انتها باید به این نکته هم اشاره کرد، که با توجه به شرایط احتراقی موتور، تقریباً تمام فرمالدهید اضافه شده به سوخت می‌سوزد. در حالت  $T_{IVC} = 390K$  میزان کسر جرمی فرمالدهید در لحظه باز شدن سوپاپ دود در مرتبه  $10^{-4}$  و در حالت  $T_{IVC} = 410K$  این مقدار در مرتبه  $10^{-17}$  قرار دارد و این مقادیر بسیار کمتر از مقادیر مجاز اعلام شده ( $10^{-8} \times 1/6$ ) است. این نتیجه قبلاً نیز در تحقیقات مختلف به دست آمده است [۱۲-۱۴]. البته باید به فناوری‌های مورد استفاده در زمینه شیوه اضافه نمودن این ماده و همچنین کنترل نشتی سوخت توجه ویژه‌ای داشت.

## خلاصه و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، تأثیر افزودن فرمالدهید بر روی زمان شروع احتراق یک موتور HCCI با سوخت گاز طبیعی با استفاده از یک مدل ترمودینامیکی بررسی شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- مدل ترمودینامیکی صفر بعدی تک ناحیه‌ای می‌تواند با دقت مناسبی زمان شروع احتراق در یک موتور HCCI را تعیین کند. همچنین می‌توان از این مدل برای مطالعات مقایسه‌ای استفاده کرد.
- دمای مخلوط هوا و سوخت ورودی به سیلندر، تأثیر بسیار زیادی بر روند احتراق موتور HCCI دارد. کاهش دما می‌تواند باعث خروج از محدوده عملکردی موتور و عدم احتراق شود. از سوی دیگر افزایش دما سبب پیش‌رسی احتراق در موتور خواهد شد.
- رادیکال هیدروکسیل (OH) نقش کلیدی در پیش‌برد روند احتراق گاز طبیعی دارد به گونه‌ای که می‌توان زمان شروع احتراق را بر مبنای نرخ تغییرات غلظت آن در مخلوط، به صورت کمی بیان کرد.
- دمای احتراق پایین‌تر فرمالدهید سبب می‌شود که با افزودن آن به گاز طبیعی، احتراق زودتر روی دهد. در حالت  $T_{IVC} = 410K$ ، با افزودن ۵ درصد فرمالدهید به سوخت، احتراق بیش از ۱۰ CA زودتر رخ می‌دهد.

- افزودن فرمالدهید به سوخت گاز طبیعی سبب تغییر محدوده عملکردی آن می‌شود به گونه‌ای که می‌توان در دماهای ورودی پایین‌تر مانند  $T_{IVC} = 390K$  نیز به عملکرد مطلوبی رسید.
- افزایش بیش از حد افزودنی فرمالدهید سبب کاهش کارایی موتور می‌شود. می‌توان در هر شرایط کاری موتور به یک حد بهینه مقدار افزودنی دست یافت. برای حالت  $T_{IVC} = 390K$  این مقدار بهینه به میزان ۲ درصد و برای حالت  $T_{IVC} = 410K$  به میزان ۱ درصد بوده است.
- با توجه به این که قسمت اعظم آلاینده NOx موتورهای HCCI مربوط به NOx گرمایی است، با افزایش مقدار افزودنی فرمالدهید در سوخت، میزان آلاینده NOx خروجی افزایش می‌یابد، زیرا علاوه بر افزایش بیشینه دمای سیلندر، طول دوره دما بالا نیز بیشتر می‌شود.
- استفاده از حالت بهینه با  $T_{IVC} = 390K$  سبب افزایش حدود ۵ درصد کار و توان و کاهش ۶۰ درصد آلاینده‌گی NOx نسبت به حالت بهینه  $T_{IVC} = 410K$  می‌شود، در حالی که مصرف ویژه سوخت کمتر از ۱ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد بتوان برای هر شرایط کاری موتور به یک مقدار بهینه افزودنی فرمالدهید دست یافت.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند که تشکر خود را از شرکت ملی بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور برای حمایت مالی از این طرح و همچنین جناب آقای دکتر شاه‌بختی برای ارائه راهنمایی‌های ارزنده، اعلام کنند.

### مراجع

1. Onishi, S., Hong Jo, S., Shoda, K., and Kato, S., "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC)-A New Combustion Process for Internal Combustion Engines," SAE Paper 790501, 1979.
2. Noguchi, M., Tanaka, T., and Takeuchi, Y., "A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products during Combustion," SAE Paper 790840, 1979.
3. Najt, P. M., and Foster, D. E., "Compression-Ignited Homogenous Charge Combustion," SAE Paper 830264, 1983.
4. Thring, R. H., "Homogenous Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines," SAE Paper 892068, 1989.
5. Shahbakhti, M., Lupul, R., and Koch, C. R., "Predicting HCCI Auto-Ignition Timing by Extending a Modified Knock-Integral Method," SAE Paper 2007-01-0222, 2007.
6. Stanglmaier, R. H., and Roberts, C. E., "Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE Paper 1999-01-3682, 1999.
7. Fiveland, S. B., Christensen, M., Johansson, B., Hiltner, F., and Assanis, D. N., "Experimental and Simulated Results Detailing the Sensitivity of natural Gas HCCI Engines to Fuel Composition," SAE Paper 2001-01-3609, 2001.
8. Shahangian, N., Keshavarz, M., and Jazayeri, S. A., "Analysis of HCCI Engine Operation with Diesel Like Fuels," Oil & Gas Science and Technology, 64, NO. 4, pp. 521-532, 2009.
9. Wang, Z., Shuai, S. J., Wang, J. X., Tian, G. H., and An, X. L., "Modeling of HCCI Combustion: From 0D to 3D," SAE Paper 2006-01-1364, 2006.
10. Kentaro, M., Yoshiyuki, Y., Mitsuru, K., "Control of HCCI Combustion by Adding Formaldehyde," Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu, 7, pp. 203-204, 2004.
11. Morsy, M. H., and Chung, S. H., "Fundamental Study on the Influence of Additives on Ignition Control of Natural Gas HCCI Engine," The 18<sup>th</sup> Internal Combustion Engine Symposium, JSAE Paper Number: 20056029, December, 2005.
12. Morsy, M. H., "Ignition Control of methane Fueled Homogenous Charge Compression Ignition Engines Using Additives," Fuel, 86, pp. 533-540, 2007.
13. Chen, Z., Konno, M. and Miki, K., "Computational and Experimental Study on the Influence of Formaldehyde on HCCI Combustion Fueled with Dimethyl Ether," SAE Paper 2003-01-1826, 2003.
14. Yamada, H., Suzuki, K., Sakanashi, H., Choi, N., and Tezaki, A., "Kinetic Measurements in Homogeneous Charge compression of dimethyl ether: role of intermediate formaldehyde controlling chain branching in the low-temperature Oxidation Mechanism," Combustion and Flame, 140, pp. 24-33, 2005.
15. Yamaya, Y., Furutani, M., and Ohta, Y., "Advanced/Retarded Criterion on Ignition of Fuel/Air Mixtures with Formaldehyde Doping," The 6<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines COMODIA, 2004.
16. Weast, R. C., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 62<sup>nd</sup> ed., Boca Raton, FL: CRC Press, pp. C-301, E-61, 1981.
17. <http://www.epa.gov/iris/subst/0419.htm>
18. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech)
19. Kuo, K. K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, Inc., 1<sup>st</sup> Edition, 1986.



20. [http://homepages.vub.ac.be/~akonnov/science/mechanism/texts/mech0\\_4.txt](http://homepages.vub.ac.be/~akonnov/science/mechanism/texts/mech0_4.txt)
21. Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, 1<sup>st</sup> Edition, 1988.
22. Chang, J., Guralp, O., Filipi, Z., Assanis, D., Kuo, T. W., Najt, P., and Rask, R., "New Heat Transfer Correlation for an HCCI Engine Derived from Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux," SAE Paper 2004-01-2996, 2004.
23. Shahbakhti, M., and Koch, R., "Thermo-Kinetic Combustion Modeling of an HCCI Engine to Analyze Ignition Timing for Control Applications," Spring Technical Meeting Combustion Institute/Canadian Section, 2007.
۲۴. جهانیان، الف؛ و جزایری، س.ع؛ "پیش‌بینی شروع احتراق در یک موتور HCCI با سوخت متان به روش انتگرال کوبش،" هفدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک (ISME 2009)، دانشگاه تهران، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۳۸۸.
۲۵. ابراهیمی، ر؛ "پیش‌بینی تأخیر خوداشتعالی در موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن،" نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال اول، شمار ۱، صفحات ۴۱-۵۱، ۱۳۸۷.
26. Fiveland, S. B. and Assanis D. N., "Development and Validation of a Quasi-Dimensional Model for HCCI Engine Performance and Emissions Studies under Turbocharged Conditions," SAE 2002-01-1757, 2002.
27. Xu, H., Fu, H., Williams, H., and Shiling, I., "Modeling Study of Combustion and Gas Exchange in a HCCI (CAI) Engine," SAE 2002-01-0114, 2002.
۲۸. نوری کزج، ر؛ و محسنیان‌راد، الف. ف؛ "بررسی اثر استفاده از گاز طبیعی فشرده بر راندمان موتورهای احتراق داخلی،" دومین همایش ملی CNG ایران، هتل المپیک، تهران، ایران، مرداد ۱۳۸۸.
29. Gordon, S., and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications I. Analysis," NASA Reference Publication 1311, October, 1994.
30. Jahanian, O., and Jazayeri, S. A., "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 (ICEF2009), Lucerne, Switzerland, September, 2009.
31. Jahanian, O., and Jazayeri, S. A., "A Thermo-Kinetic Model Base Study on Natural Gas HCCI Engine Response to Different Initial Conditions," Int'l Congress on Combustion Engines, Opole, Poland, June, 2009.
۳۲. جهانیان، الف؛ و جزایری، س.ع؛ "بررسی عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی سوخت همگن (HCCI) با سوخت متان به روش مدل‌سازی ترمودینامیکی تک‌ناحیه‌ای،" دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، اردیبهشت ۱۳۸۸.
33. Aceves, A. M., Flowers, D. L., Westbrook, C. K., Smith, J. R., and Dibbe, R., "A Multi-Zone Model for Prediction of HCCI Combustion and Emissions," SAE Paper 2000-01-0327, 2000.

## English Abstract

### The Effect of Using Formaldehyde on the Performance of an HCCI Engine Fueled with Natural Gas

O. Jahanian and S. A. Jazayeri

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

*In this paper, the performance of a natural gas HCCI engine is studied through a thermodynamic model along with its detailed chemical kinetics. The influence of using formaldehyde as an additive on the engine characteristics is also investigated. The results show that it is possible to change the engine working limit using this additive. Furthermore, there is an optimum additive content for each operating condition, which leads to higher output work and power. It is also shown that the air/fuel mixture will ignite earlier using this additive, so it conceivable to reduce inlet mixture temperature resulting in better performance due to higher volumetric efficiency.*

**Keywords:** HCCI Engine, Start of Combustion, Natural Gas, Formaldehyde