

پیش‌بینی تاخیر خوداشتعالی در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن

رحیم ابراهیمی*

گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۱۹، پذیرش: ۱۳۸۷/۸/۱۶)

راندمان بالای گرمایی همراه با تولید پایین اکسیدهای نیتروژن، موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن را در زمره‌ی ایده‌های اصلی موتورهای آینده قرار داده است. کنترل زمان خوداشتعالی در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن مشکل اصلی تجاری شدن آن است. بر این اساس، الگوی هو و کک، الگوی شل و الگوی انتگرال کوبش برای پیش‌بینی شروع خود اشتعالی برای استفاده در سیستم کنترل موتور پیشنهاد و با هم مقایسه شدند. در الگوی انتگرال کوبش دو رابطه‌ی جدید برای پیش‌بینی شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق پیشنهاد شد. مقایسه‌ی اختلاف میانگین مقادیر به دست آمده از الگوهای نظری با مقادیر آزمایشگاهی و زمان محاسبه آنها نشان می‌دهد که الگوی انتگرال کوبش بهترین تطبیق و کم‌ترین زمان محاسبه را در پیش‌بینی شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق دارد.

واژگان کلیدی: موتور، شروع احتراق، الگوی انتگرال کوبش، الگوی هو و کک، الگوی شل

مقدمه

موتور دیزل و اشتعال جرقه‌ای دو موتور سنتی احتراق داخلی‌اند که بیش از یک قرن بدون هیچ تغییر اساسی با سوخت‌های فسیلی در زندگی روزمره ما نفوذ کرده‌اند. اما به دلیل کاهش مقدار و افزایش قیمت این نوع از سوخت‌ها و همچنین مسئله آلودگی باید راه چاره اساسی برای موتورهای احتراق داخلی اندیشید. در این مورد می‌توان به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن (Homogeneous charge compression ignition) که برای اولین بار توسط اونیشی و همکاران [۱] مطرح شده است، به عنوان یک ایده مناسب اشاره کرد. به عنوان مزیت اصلی این نوع موتور می‌توان به مقدار پایین اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق، راندمان بالا و همچنین قابلیت استفاده از انواع مختلف سوخت‌ها (بنزین، گازوئیل، گاز طبیعی و هیدروژن...) به شرط تنظیم دقیق پارامترهای موتور همچون نسبت تراکم اشاره کرد. روش احتراق در این موتورها به این طریق است که مخلوط هوا و سوخت مانند مخلوط هوا و سوخت در موتورهای اشتعال جرقه‌ای همگن تشکیل شده، اما شروع احتراق مانند موتورهای اشتعال تراکمی است. بنابراین احتراق مخلوط همگن توسط فرایند سینتیک شیمیایی انجام شده و هیچ نوع وسیله‌ای برای کنترل زمان احتراق چنانچه در موتورهای اشتعال جرقه‌ای و دیزل وجود دارد دیده نمی‌شود. بنابراین کنترل زمان احتراق در این نوع موتورها مشکل اساسی آنها در روند تجاری شدن است. در این صورت تخمین زمان احتراق برای کنترل آن از اصلی‌ترین دغدغه‌های محققان در این راه است.

در حالت کلی، الگوهای جهت اکسید شدن سوخت برای تعیین زمان شروع احتراق وجود دارد. این الگوها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد. اولین دسته که شامل الگوی تجربی است بدون اینکه به واکنش‌های اولیه سوخت و اکسید کننده احتیاج باشد زمان خود اشتعالی را تعیین می‌کند. معروف‌ترین این الگوها توسط لیونگود و همکاران [۲] که به الگوی انتگرال کوبش (knock integral method) معروف است ارائه شده است. الگوی دوم به الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته معروف است که فقط واکنش‌های غالب و اساسی در اکسایش را در بر می‌گیرد. الگوی سوم شامل الگوی سینتیک شیمیایی تفصیلی است. الگوهای دسته دوم به دلیل دقت مناسب و زمان کوتاه مورد توجه قرار گرفته شده است. از الگوهای این دسته،

* استادیار (ایمیل: rahim.ebrahimi@gmail.com)

الگوی شل و الگوی هو و کک بیشتر از دیگر الگوها مورد استفاده محققان است. الگوی دسته آخر که الگوی سینتیک شیمیایی تفضیلی نامیده می‌شود، بازده کاربردی آن بستگی به توانایی و کامل بودن واکنش‌ها دارد. در هر حال به دلیل طولانی بودن زمان اجرای محاسبات فقط زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بررسی مواد آلوده‌کننده ارجحیت داشته باشد که در این تحقیق در اولویت قرار ندارد.

در ادامه‌ی مقدمه به بررسی چندین کار انجام شده توسط دیگر محققان پرداخته می‌شود. بنگتسون [۳] کارکرد دینامیکی موتور شش سیلندر را به کمک الگوی شل همراه با اندازه‌گیری پارامترهای همچون فشار سیلندر، دمای مخلوط ورودی و ... کنترل کرد. اما به دلیل انتخاب الگوی شل اشاره‌ای نشده است. هی و همکاران [۴] از روشی که پایه آن بر مبنای رابطه‌ی آرنیوس است برای پیش‌بینی زمان خود اشتعالی استفاده کردند. در آخر یک رابطه‌ی ساده همچون رابطه‌ی الگوی انتگرال کوبش برای پیش‌بینی زمان خود اشتعالی همراه با جزییات معرفی شد. سویلو [۵] یک روش جدید را برای مدل کردن احتراق در یک موتور اشتعال جرقه‌ای با سوخت گاز طبیعی ارائه کرد. اساس این روش بر مبنای الگوی انتگرال کوبش بوده و بر حسب نسبت توازن و پروپان موجود در گاز طبیعی معرفی شده است. ابراهیمی [۶] دو الگوی معروف شل و هو و کک را از بین الگوهای سینتیک شیمیایی انتخاب و با هم مقایسه کرد. او در این کار سعی در فرمول بندی مناسب بین این دو الگو با مقادیر آزمایشگاهی کرد. در آخر الگوی شل را با دو رابطه که بتوان مقادیر آزمایشگاهی را به طور دقیق تخمین زد، ارائه کرد.

سوخت ایزوبوتان برای استفاده در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن در این تحقیق انتخاب شد. در این موتور هوا و سوخت در درگاه ورودی مخلوط شده و بعد به داخل سیلندر رانده می‌شود. در اثر تراکم، دما و فشار مخلوط داخل سیلندر افزایش می‌یابد. این افزایش دما و فشار مخلوط سوخت و هوا باعث شروع اولین مرحله‌ی واکنش‌های شیمیایی می‌شود. شدت واکنش‌های شیمیایی با افزایش دما و فشار داخل سیلندر ابتدا افزایش و بعد کاهش می‌یابد. این کاهش تا حدی است که انجام واکنش‌های شیمیایی متوقف می‌شود. اما افزایش دما و فشار داخل سیلندر بر اثر تراکم، باعث شروع دوباره‌ی واکنش‌های شیمیایی می‌شود. در این مرحله، سوخت و هوا با شدت با هم واکنش می‌دهند. بر این اساس، احتراق سوخت ایزوبوتان در موتور اشتعال تراکمی در دو مرحله انجام می‌شود. فاصله‌ی زمانی بسته شدن سوپاپ ورودی تا شروع اولین مرحله‌ی واکنش شیمیایی و فاصله‌ی زمانی بسته شدن سوپاپ ورودی تا شروع دومین مرحله‌ی واکنش شیمیایی را به ترتیب تاخیر شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق می‌نامند.

در این تحقیق، ابتدا پیش‌بینی زمان شروع احتراق در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن به کمک الگوهای نظری که دارای قابلیت شبیه سازی در سیستم کنترل موتور هستند انجام می‌شود. در مرحله‌ی بعد، هر یک از این الگوها بررسی و پس از مقایسه بهترین الگو پیشنهاد خواهد شد.

الگوهای سینتیک شیمیایی سوخت

نظر به اینکه هدف تحقیق انتخاب الگوهای ساده برای استفاده در سیستم کنترل موتور است، الگوی شل و الگوی هو و کک به دلیل پایین بودن واکنش‌های موجود در آن‌ها، سادگی و سریع بودن کاربردشان، قابل استفاده بودن آن‌ها در انواع مختلف هیدروکربن‌های موجود، استفاده زیاد آن‌ها توسط دیگر محققان از بین الگوهای سینتیک شیمیایی سوخت انتخاب شدند [۳ و ۷].

الگوی شل

در این الگو، واکنش‌های شیمیایی به هشت زنجیره واکنشی کاهش یافته است. این زنجیره‌های واکنشی در چهار مرحله که به ترتیب عبارتند از مرحله‌ی آغازین، انتشار، انشعاب و پایانی دسته بندی شده‌اند [۸].
مرحله‌ی آغازین :



مرحله‌ی انتشار :



مرحله‌ی انشعاب :



مرحله‌ی پایانی :



که در آن RH هیدروکربن سوخت، R^* معرف رادیکال‌های ایجاد شده در روند احتراق، B معرف عامل انشعاب، Q معرف عامل واسطه و P معرف تولیدات احتراق‌اند که شامل محصولات CO ، CO_2 و H_2O است. مرحله‌ی انشعاب به واسطه‌ی هیدروپروکسید در دمای پایین و به واسطه پیروکسید هیدروژن در دمای بالا ظاهر می‌شود. محصولات گونه‌های واسطه در این مرحله به طور عموم به آلدئیدهای تولیدی در فرایند اکسیداسیون سوخت مرتبط است [۹]. در حالت کلی فرض اصلی الگوی شل، بر ثابت بودن مقدار رادیکال تولیدی R^* در سامانه‌ی پیشنهادی است. در واقع، به طور کلی R^* به رادیکال‌های مختلف تولیدی در واکنش اشاره می‌کند.

در رابطه‌هایی که برای تعیین سرعت واکنش در جهت محصولات تولیدی و واکنش دهنده‌ها استفاده می‌شود، درجه حرارت نیز لحاظ شده است. بر این اساس، بایستی درجه حرارت نیز در فرایند سیکل محاسبه شود. بنابراین، دما در فرایند سیکل تراکم با استفاده از قانون انرژی شل پیشنهاد شده است طبق رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$C_v n_{tot} \frac{dT}{dt} = k_p q n_{R^*} - hA(T - T_w) - \frac{n_{tot} \tilde{R}T}{V} \frac{dV}{dt} \quad (۹)$$

که در آن C_v گرمای ویژه در حجم ثابت، V حجم داخل سیلندر، n_{tot} تعداد کل مول، \tilde{R} ثابت جهانی گاز، A سطح مقطع محفظه‌ی احتراق، k_p پارامتر ثابت، n_{R^*} تعداد مول R^* ، T دمای مخلوط داخل سیلندر و T_w دمای دیواره سیلندر است که برابر $355K$ فرض می‌شود [۷]. h ضریب انتقال گرماست که از رابطه‌ی تجربی ارائه شده توسط وشنی محاسبه می‌شود [۱۰]. q انرژی آزاد شده در سیکل است که برابر $383 kJ/mol$ در نظر گرفته می‌شود [۷].

مقادیر ثابت واکنش‌های الگوی شل با حل معادله غیر خطی استخراج شده از آن را می‌توان در مرجع [۹] مشاهده کرد.

الگوی هو و کک

این الگو دارای ۱۳ گونه‌ی فعال شیمیایی و ۱۸ واکنش است [۱۱] که به طور خلاصه توضیحی درباره‌ی این الگو داده خواهد شد.

فرایند اکسیداسیون در دمای پایین با جذب هیدروژن از سوخت هیدروکربن اشباع شده، در جهت تشکیل رادیکال آلکیل و رادیکال هیدروپروکسی شروع می‌شود.



مرحله‌ی اصلی انتشار و انشعاب برای اکسیداسیون آلکان برای تعداد کربن بزرگ‌تر و برابر ۴ به ترتیب واکنش در زیر ارائه خواهد شد. اتصال بازگشت‌پذیر اکسیژن با رادیکال آلکیل به تولید رادیکال پروکسید آلکیل می‌انجامد. واکنش بعدی ایزومر شدن RO_2^* را نشان می‌دهد، که در آن واکنش جذب یک اکسیژن داخلی منجر به تولید رادیکال آلکیل هیدروپروکسید می‌شود. در واکنش چهارم اکسیژن توسط رادیکال آلکیل هیدروپروکسید جذب می‌شود. محصول تولیدی در یک واکنش بازگشت‌پذیر

به رادیکال OH^* و همچنین رادیکال کتوهیدروپروکسید می‌انجامد. رادیکال OH^* با حذف هیدروژن سوخت موجب تشکیل رادیکال آلکیل و آب می‌شود. بنابراین در این مرحله OH^* شروع به مصرف هیدروکربن سوخت می‌کند. به طور خلاصه، واکنش‌ها به صورت زیر می‌توانند بیان شوند.



مرحله‌ی انشعابی که در ادامه‌ی زنجیره‌ی واکنش (۱۵) ظاهر می‌شود، تجزیه‌ی هیدروپروکسید ($OORO OH$) است:



در مدت طی شدن مرحله‌ی اول احتراق (واکنش‌ها)، دما تا حدی که واکنش (۱۷) از اهمیت خاصی در واکنش‌ها برقرار شود افزایش می‌یابد. در این نقطه‌ی زمانی، مرحله‌ی اول احتراق به اتمام می‌رسد.



واکنش زیر به دنبال واکنش (۱۶) در جهت تولید O_2 و $HOOH$ اتفاق می‌افتد.



در دمای بالاتر از ۸۰۰ کلوین، گونه‌ی $HOOH$ تولیدی از واکنش قبلی به صورت زیر تجزیه می‌شود. با اهمیت یافتن واکنش (۱۹) مرحله‌ی دوم احتراق آغاز می‌شود.



در رابطه‌ی بالا M هر نوع جزء سومی می‌تواند باشد.

در رابطه‌هایی که برای تعیین سرعت واکنش در جهت محصولات تولیدی و واکنش دهنده‌ها استفاده می‌شود، دما نیز لحاظ شده است. بر این اساس، بایستی دما نیز در فرایند سیکل محاسبه شود. بنابراین، با استفاده از قانون انرژی می‌توان دما را در فرایند سیکل طبق رابطه‌ی زیر محاسبه کرد.

$$C_v n_{tot} \frac{dT}{dt} = -\frac{n_{tot} \bar{R} T}{V} \frac{dV}{dt} - hA(T - T_w) + \sum_{i=1}^{18} (-\Delta H_i) \left(k_i^+ \sum_{k=1}^K [X_k]^{v_{ki}^+} - k_i^- \sum_{k=1}^K [X_k]^{v_{ki}^-} \right) \quad (20)$$

که در آن، v_{ki}^+ ضریب استوکیومتری گونه k در واکنش i در جهت محصولات، v_{ki}^- ضریب استوکیومتری گونه k در واکنش i در جهت واکنش، k_i^+ ثابت سرعت واکنش i در جهت محصولات، k_i^- ثابت سرعت واکنش i در جهت واکنش، $[X_k]$ تمرکز مول گونه k و ΔH_i تغییرات آنتالپی برای واکنش i است.

پارامترهای ذکر نشده در اینجا را می‌توان در مرجع [۱۱ و ۱۲] و روش حل معادله‌ی غیر خطی استخراج شده از این الگو را در مرجع [۱۳] مشاهده کرد.

الگوی انتگرال کوبش

یکی از راه‌های تعیین زمان احتراق تطبیق دادن رابطه‌ی آرنیوس با داده‌های آزمایشگاهی است [۱۴ و ۱۵]. نظر به سادگی این رابطه، تطبیق قابل توجهی با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد [۱۵]. در هر صورت برای افزایش دقت پیش‌بینی خوداشتعالی، دو رابطه‌ی جدید با تغییراتی نسبت به رابطه‌ی آرنیوس پیشنهاد شد. یکی از روابط پیشنهادی برای پیش‌بینی تاخیر زمان شروع مرحله‌ی اول احتراق (τ_1) و رابطه‌ی دیگر برای پیش‌بینی تاخیر زمان شروع مرحله‌ی دوم احتراق (τ_2) است.

از نتایج به دست آمده توسط ماشین تراکم سریع^۱ می‌دانیم که فشار و نسبت هم‌ارزی تأثیری در شروع مرحله‌ی اول احتراق ندارد [۱۶]. بنابراین رابطه‌ی آرنیوس به صورت رابطه‌ی (۲۱) جهت پیش‌بینی مرحله‌ی اول احتراق پیشنهاد شد. همچنین بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از موتور تراکم سریع، فشار داخل سیلندر و نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی نیز علاوه بر دمای محفظه‌ی احتراق بر شروع مرحله‌ی دوم احتراق تأثیر می‌گذارد [۱۶]. برایین اساس رابطه‌ی (۲۲) با لحاظ نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و فشار سیلندر علاوه بر دمای سیلندر پیشنهاد می‌شود.

$$\tau_1 = Y_1 \exp(Y_2/T) \quad (21)$$

$$\tau_2 = X_1 P^{X_2} \phi^{X_3} \exp(X_4/T) \quad (22)$$

در آنجا P فشار داخل سیلندر، T دمای داخل سیلندر، ϕ نسبت هم‌ارزی و X_1, X_2, X_3, X_4 و Y_1 و Y_2 ثابت‌های مجهول معادله‌اند. دما و فشار داخل سیلندر در طی چرخه موتور متغیر است. بر این اساس، از الگوی انتگرال کوبش پیشنهاد شده توسط لیونگود استفاده می‌شود [۲]. در این الگو از معادله‌ی آرنیوس در دامنه بین زمان بسته شدن سوپاپ ورودی تا شروع احتراق انتگرال گرفته شده و برابر مقدار یک قرار داده می‌شود.

$$\int_{t=0}^{t=t_c} \frac{dt}{\tau} = 1 \quad (23)$$

که در آن τ تاخیر زمان شروع احتراق، t_c زمان احتراق و زمان صفر معرف زمان بسته شدن سوپاپ ورودی است. به طور خلاصه می‌توان اشاره کرد که در این الگو، مقدار تمرکز یک رادیکال اصلی برای پیش‌بینی زمان شروع احتراق در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمان احتراق برابر زمانی است که رادیکال اصلی به حد بحرانی تمرکز خود در محفظه‌ی احتراق می‌رسد. با توجه به اینکه احتراق در سوخت ایزوبوتان در دو مرحله انجام می‌شود، τ که برابر تاخیر زمانی شروع احتراق است را می‌توان تاخیر زمان شروع مرحله‌ی اول احتراق (τ_1) یا تاخیر زمان شروع مرحله‌ی دوم احتراق (τ_2) در نظر گرفت.

بر این اساس، رابطه‌ی (۲۳) حاصل می‌شود:

$$\int_{t=0}^{t=t_1} \frac{dt}{Y_1 \exp(Y_2/T)} = 1 \quad (24)$$

که در آن t_1 زمان شروع مرحله‌ی اول احتراق است.

با جایگزینی رابطه‌ی (۲۱) در (۲۳)، رابطه‌ی پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق به دست می‌آید:

$$\int_{t=0}^{t=t_2} \frac{dt}{X_1 P^{X_2} \phi^{X_3} \exp(X_4/T)} = 1 \quad (25)$$

که در آن t_2 زمان شروع احتراق مرحله‌ی دوم است.

ثابت‌های دو رابطه‌ی (۲۴) و (۲۵) علاوه بر اینکه در بین زمان شروع تراکم تا شروع احتراق صدق می‌کنند، بایستی در ۱۲ نسبت هم‌ارزی مختلف نیز صادق باشند. برایین اساس، دو رابطه‌ی زیر نتیجه شده است.

$$SS = \sum_{i=1}^{12} \left[\int_{t=0}^{t=t_1} \frac{dt}{Y_1 \exp(Y_2/T)} - 1 \right]^2 \quad (26)$$

$$SS = \sum_{i=1}^{12} \left[\int_{t=0}^{t=t_2} \frac{dt}{X_1 P^{X_2} \phi^{X_3} \exp(X_4/T)} - 1 \right]^2 \quad (27)$$

در این دو رابطه، SS بایستی برابر مقدار صفر به دست آید. بر این اساس، پارامترهای مجهول در این دو رابطه، از روش محاسباتی فراز و نشیب^۲ با به حداقل رساندن مقدار SS محاسبه شدند [۱۷]. برای حل معادلات، نیاز به تعیین دما و فشار

^۱ Rapid compression machine

^۲ Steepest-Ascent

مخلوط داخل سیلندر در طی کورس تراکم تا قبل از شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق هستیم. طبق دو رابطه‌ی زیر می‌توان دما و فشار مخلوط داخل سیلندر را محاسبه کرد.

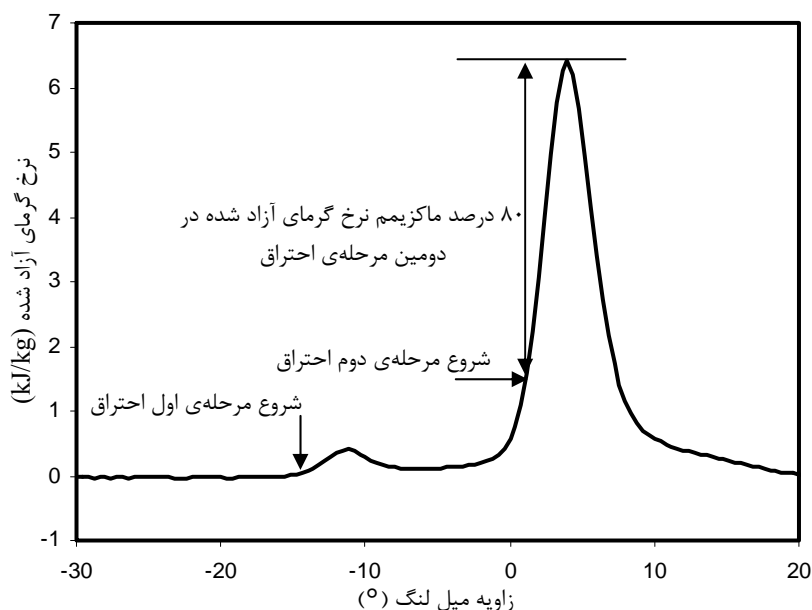
$$mC_v \frac{dT}{dt} = -p \frac{dV}{dt} - hA(T - T_w) \quad (28)$$

$$pV = mRT \quad (29)$$

که در آن، m جرم سوخت داخل سیلندر، p فشار داخل سیلندر و R ثابت گاز است. پارامترهای مجهول به دست آمده در دو رابطه‌ی (۲۴) و (۲۵) قرار داده می‌شود. این دو رابطه به کمک روش سیمسون برای تخمین شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق حل می‌شوند.

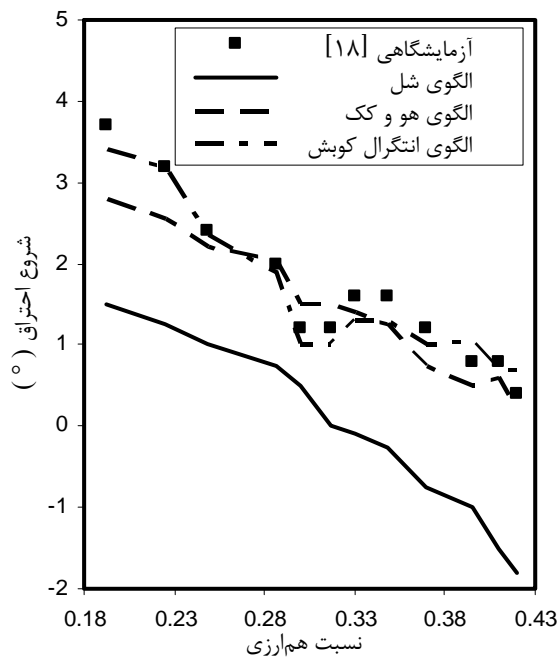
بررسی نتایج حاصل از الگوهای نظری

در این کار سه مدل نظری که به سهولت در سیستم کنترل موتور قابل شبیه‌سازی‌اند برای تعیین زمان خود اشتعالی بررسی و با مقادیر آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [۱۸] برای سوخت ایزوئوتان مقایسه شدند. تعیین مقادیر آزمایشگاهی بر اساس اندازه‌گیری فشار داخل سیلندر در هر ۰/۱ درجه میل لنگ است. با توجه به فشار اندازه‌گیری شده از داخل سیلندر، نرخ تغییرات گرمای آزاد شده در هر سیکل بر اساس قانون اول ترمودینامیک تک منطقه‌ای استخراج می‌شود. شکل (۱) نرخ تغییرات گرمای آزاد شده را در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن نشان می‌دهد. به طور وضوح در شکل مشاهده می‌شود که سوخت ایزوئوتان در دو مرحله مشتعل می‌شود که آن را مرحله‌ی اول و دوم احتراق می‌نامیم. بر طبق شکل، شروع مرحله‌ی اول احتراق را برابر نقطه‌ی جدایی بین منحنی نرخ گرمای آزاد شده با محور افقی که در آن مقدار نرخ تغییرات گرمای آزاد شده برابر صفر است در نظر گرفته می‌شود. شروع مرحله‌ی دوم احتراق را نیز برابر ۲۰ درصد ماکزیمم نرخ گرمای آزاد شده در دومین مرحله‌ی احتراق در نظر گرفته می‌شود [۱۸ و ۱۹]. دقت تعیین زمان خوداشتعالی با این روش کمتر از ۰/۰۵ درجه میل لنگ است [۱۸]. کورس پیستون، قطر سیلندر، طول دسته سمبه، نسبت تراکم، سرعت میل لنگ، دمای مخلوط ورودی و دمای آب خنک کننده در موتور مورد استفاده به ترتیب برابر ۸۲ mm، ۹۵ mm، ۱۵۸ mm، ۱۵/۳، ۹۰۰ rpm، ۴۵ °C و ۹۰ °C است.

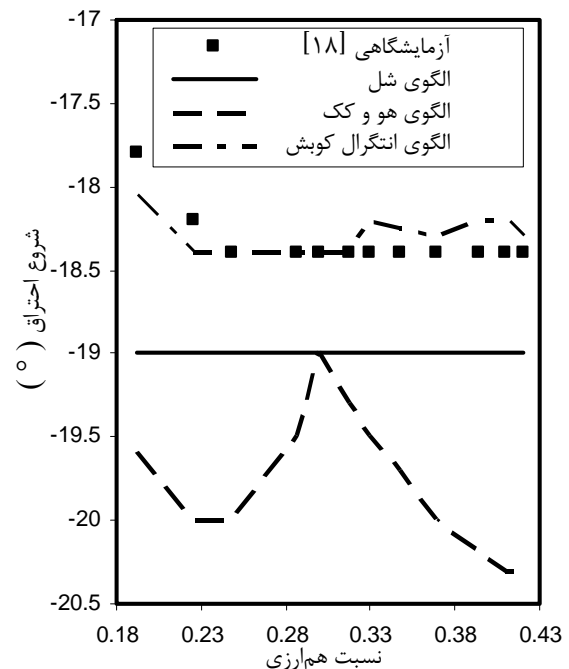


شکل ۱- تعیین شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق

شکل‌های (۲) و (۳) زمان شروع احتراق را به ترتیب در مرحله‌ی اول و دوم برای مقادیر سه الگوی نظری همراه با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. از شکل (۳) نتیجه می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شروع مرحله‌ی دوم احتراق با افزایش نسبت هم‌ارزی در هر سه الگوی نظری گرایشی همچون مقادیر آزمایشگاهی دارند. به عبارت دیگر با افزایش نسبت هم‌ارزی، هم‌زمان مقادیر شروع مرحله‌ی دوم در هر سه الگوی نظری همچون مقادیر آزمایشگاهی زودرس می‌شود. اما چنین گرایشی که در پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق مشاهده شد در مرحله‌ی اول احتراق به ویژه در الگوی هو و کک و کک چنانچه در شکل (۲) مشاهده می‌شود ظاهر نمی‌شود.



شکل ۳- شروع مرحله‌ی دوم احتراق

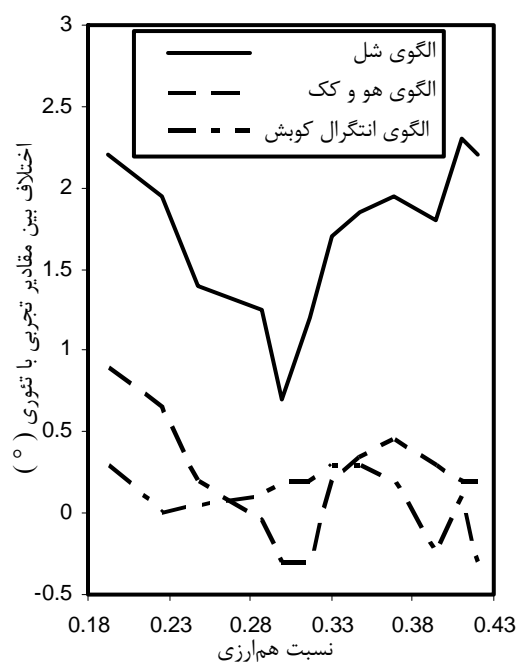


شکل ۲- شروع مرحله‌ی اول احتراق

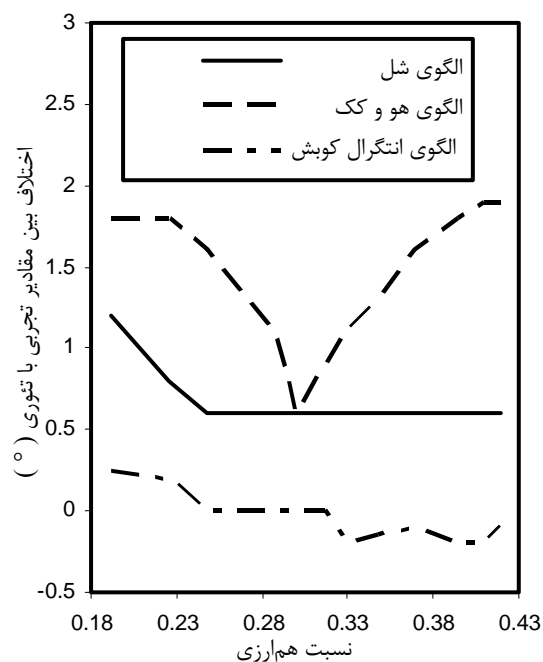
این مسئله را به این صورت می‌توان بیان کرد که تعیین دما در ابتدای تراکم به علت وجود گازهای باقی‌مانده از سیکل قبلی بسیار مشکل است که این امر موجب خطا در محاسبه‌ی دمای گاز سیلندر در ابتدای تراکم می‌شود. چنانچه قبلاً نیز اشاره شد شروع مرحله‌ی اول احتراق متأثر از دمای گازهای داخل سیلندر بوده و فشار داخل سیلندر و نسبت هم‌ارزی تأثیری بر آن ندارد. بر این اساس خطای دما به سهولت در پیش‌بینی مرحله‌ی اول احتراق تأثیر می‌گذارد؛ چرا که تنها پارامتر تأثیر گذار است. اما چنانچه قبلاً به آن اشاره شد، شروع مرحله‌ی دوم احتراق علاوه بر دمای گازهای داخل سیلندر به نسبت هم‌ارزی و فشار بستگی دارد. به علاوه در این مرحله، دمای گازهای داخل سیلندر به خاطر واکنش‌های مرحله‌ی اول احتراق و افزایش تراکم تا حدودی افزایش یافته است. بنابراین تأثیر خطای اندازه‌گیری دما در ابتدای تراکم بر روی پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق ناچیز خواهد بود. بر این اساس الگوهای استفاده شده در مرحله‌ی دوم احتراق گرایشی مشابه با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

ماکزیمم خطای بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوی شل، الگوی هو و کک و الگوی انتگرال کوبش در مرحله‌ی اول احتراق به ترتیب برابر ۱/۲، ۱/۹ و ۰/۲۵ درجه میل لنگ و در مرحله‌ی دوم احتراق برابر ۲/۳، ۰/۹ و ۰/۳ درجه میل لنگ است. قبل از محاسبه‌ی دقت تخمین سه الگوی نظری با مقادیر آزمایشگاهی، سرعت انجام محاسبات بررسی می‌شود. محاسبات هر سه الگو در رایانه پنتیوم چهار با سرعت ۳ گیگاهرتز توسط نرم افزار مطلب انجام شده است. الگوی شل، الگوی هو و کک و الگوی انتگرال کوبش برای تمام شرایط کاری سرعت محاسباتشان به ترتیب برابر ۸۰-۹۵ms، ۱۸۰-۲۲۰ms و ۴۰-۶۰ms به دست آمد. بر این اساس الگوی انتگرال کوبش دارای سرعت محاسبات بالاست.

برای مقایسه‌ی الگوهای پیشنهادی، از اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوهای نظری استفاده شد. به وضوح در شکل (۴) مشاهده می‌شود که اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با الگوی انتگرال کوبش در مرحله‌ی اول احتراق کم‌تر از اختلاف آن با دو الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته است. اختلاف میانگین مقادیر به دست آمده از الگوی شل، الگوی هو و کک و الگوی انتگرال کوبش در مرحله‌ی اول احتراق به ترتیب برابر ۰/۶، ۱/۴۵ و ۰/۴- درجه میل لنگ است. علت دقت بالای الگوی انتگرال کوبش در پیش‌بینی شروع مرحله‌ی اول احتراق را می‌توان به تعیین مناسب پارامترهای ثابت تاثیرگذار در الگوی انتگرال کوبش و همچنین محاسبه‌ی این پارامترها در شرایط کاری موتور مورد تحقیق مرتبط دانست. یادآوری می‌شود که دو الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته در موتور تراکم سریع تصحیح شده‌اند که کنترل دقیقی بر روی شرایط کاری آن وجود دارد. به عنوان مثال به عدم وجود گازهای باقی‌مانده در این نوع موتور می‌توان اشاره کرد. با رجوع به دو الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته به وضوح مشاهده می‌شود که اثر هیچ نوع گاز دیگری جز هیدروکربن اصلی در این دو الگو در نظر گرفته نشده است. براین اساس، وجود گازهای باقی‌مانده در سیلندر موتور واقعی موجب افزایش ترکیب گازهای داخل سیلندر شده که در زمان تعیین واکنش‌های دو الگوی سینتیک شیمیایی در نظر گرفته نشده است. بر این اساس، دقت دو الگوی سینتیک شیمیایی در پیش‌بینی احتراق در موتور واقعی کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه می‌شود که اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوی شل کم‌تر از اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوی هو و کک است. بنابراین الگوی شل پیش‌بینی بهتری در زمان شروع مرحله‌ی اول احتراق نسبت به الگوی هو و کک دارد. این می‌تواند به خاطر حساسیت کم الگوی شل به خطای دمایی بدست آمده در ابتدای شروع مرحله‌ی تراکم چرخه‌ی موتور باشد. می‌توان اشاره کرد که خطای پیش‌بینی دما در ابتدای تراکم بر دمایی به دست آمده در طول چرخه‌ی موتور تاثیر دارد.



شکل ۵- اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوهای نظری در زمان شروع مرحله‌ی دوم احتراق



شکل ۴- اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوهای نظری در زمان شروع مرحله‌ی اول احتراق

اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر الگوهای نظری در مرحله‌ی دوم احتراق در شکل (۵) نمایش داده شده است. اختلاف میانگین مقادیر به دست آمده از الگوی شل، الگوی هو و کک و الگوی انتگرال کوبش با مقادیر آزمایشگاهی در مرحله‌ی دوم احتراق به ترتیب برابر ۱/۶، ۰/۲ و ۰/۱- درجه میل لنگ است. بر این اساس، الگوی شل نسبت به دو الگوی دیگر

دارای دقت پایین تری در پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق است. پیش‌بینی دقیق الگوی هو و کک را نسبت به الگوی شل می‌توان به تعداد بیشتر گونه و واکنش آن نسبت داد. در مقایسه‌ی بین الگوی هو و کک با الگوی انتگرال کوبش، الگوی انتگرال کوبش دارای پیش‌بینی بهتری در مرحله‌ی دوم احتراق است. علت آن، در تعیین مناسب پارامترهای ثابت تاثیرگذار الگوی انتگرال کوبش (فشار، دما و نسبت هم‌ارزی) و همچنین محاسبه‌ی این پارامترها در شرایط کاری موتور واقعی است.

مقایسه‌ی اختلاف میانگین الگوی انتگرال کوبش در مرحله‌ی اول احتراق با مرحله‌ی دوم احتراق نتیجه می‌دهد که شروع مرحله‌ی اول احتراق بهتر از شروع مرحله‌ی دوم احتراق توسط این الگو قابل پیش‌بینی است. علت آن افزایش پارامترهای ثابت تاثیرگذار یا به عبارتی پارامترهای مجهول در پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق است که موجب تنزل دقت همگرایی مدل ریاضی استفاده شده در پیش‌بینی مرحله‌ی دوم احتراق می‌شود.

سه الگوی پیشنهادی در جهت پیش‌بینی خود اشتعالی در سرعت‌ها و شرایط کاری مختلف دیگر با هم مقایسه شدند. بعد از مقایسه‌ی اختلاف میانگین مقادیر الگوها با مقادیر آزمایشگاهی نتیجه شد که الگوی انتگرال کوبش بهترین تطبیق و کم‌ترین زمان محاسبه را برای پیش‌بینی خود اشتعالی نسبت به الگوهای سینتیک شیمیایی داراست.

در آخر به این موضوع اشاره می‌شود که برای بالا بردن دقت پیش‌بینی در الگوهای سینتیک شیمیایی، باید تعداد واکنش‌های موجود در آنها افزایش داده شود و همچنین ترکیب گازهای باقی‌مانده را نیز در نظر گرفت. ولی این امر موجب افزایش زمان محاسبه می‌شود که هدف این تحقیق نیست؛ به دلیل اینکه هدف اصلی تحقیق یافتن یک الگوی ساده همراه با زمان پایین محاسبات برای استفاده در سیستم کنترل موتور است. یادآوری می‌شود که گازهای باقی‌مانده از ترکیب قابل توجهی گاز که در واکنش نهایی سوخت شرکت نکرده‌اند تشکیل شده است. بر این اساس، بایستی اثر ترکیبات موجود در گازهای باقی‌مانده در الگوهای سینتیک شیمیایی در نظر گرفته شود. این امر مستلزم افزایش تعداد گونه و واکنش در دو الگوی سینتیک شیمیایی است. بنابراین، تعداد واکنش‌ها و مدت محاسبه‌ی الگوها افزایش می‌یابد. اشاره می‌شود که زمان محاسبه‌ی دو الگوی سینتیک شیمیایی انتخاب شده بدون افزایش تعداد گونه و معادله بیش از زمان محاسبه‌ی الگوی انتگرال کوبش در مرحله‌ی اول و دوم احتراق است. بر این اساس نتیجه می‌شود که الگوی انتگرال کوبش بهترین انتخاب برای پیش‌بینی شروع احتراق با سرعت و دقت بالاست.

کاربرد الگوی انتگرال کوبش در جهت کنترل شروع احتراق در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن را می‌توان در مثال زیر مشاهده کرد.

یکی از راه‌های کنترل شروع احتراق در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن، استفاده از دو سوخت با عدد ستان مختلف همراه با یک الگوی پیش‌بینی کننده خود اشتعالی است. می‌توان برای مثال به سوخت بوتان با عدد اکتان بالا (۸۹) و سوخت دی‌متراپیل با عدد اکتان پایین (۵۵) و الگوی انتگرال کوبش اشاره کرد. در این روش، سوخت بوتان در درگاه ورودی با هوا مخلوط شده و مورد تراکم قرار می‌گیرد در حالی که سوخت دی‌متراپیل توسط انژکتور در زمان‌های مختلف با مقادیر متغیر به داخل سیلندر برای زودرس کردن زمان خوداشتعالی پاشیده می‌شود. می‌دانیم که سوخت بوتان، هوای تازه و گازهای باقی‌مانده در ابتدای تراکم با هم مخلوط شده‌اند و کنترل دقیق بر روی مقدار و دمای سوخت بوتان و هوای تازه وجود دارد، در حالی که مقدار و دمای گازهای باقی‌مانده به راحتی قابل کنترل نیستند. بر این اساس، شروع احتراق با انتخاب درست مقدار سوخت بوتان برای بعد از نقطه مرگ بالا کنترل می‌شود. با توجه به اندازه‌گیری فشار و دما در درگاه ورودی و خروجی و همچنین مقدار جرم سوخت و هوای ورودی می‌توان فشار و درجه حرارت داخل سیلندر را به دست آورد. با داشتن این پارامترها و الگوی انتگرال کوبش، می‌توان زمان خوداشتعالی را که برای بعد از نقطه مرگ بالا تنظیم شده است پیش‌بینی کرد. با شناخت زمان خود اشتعالی سوخت بوتان در ابتدای تراکم، می‌توان پاشش سوخت دی‌متراپیل را به طریقی تنظیم کرد که خود اشتعالی در زمان دلخواه ظاهر شود. یادآوری می‌شود که تاثیر سوخت دی‌متراپیل به شروع مرحله‌ی اول احتراق سوخت بوتان بستگی دارد. بنابراین شناخت مرحله‌ی اول سوخت بوتان نیز لازم است. بر این اساس، انجام یک کار آزمایشگاهی بر روی مثال ذکر شده از فعالیت‌هایی است که می‌توان در راستای این کار به انجام رساند.

نتیجه گیری

از بین الگوهای سینتیک شیمیایی، الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته به دلیل پایین بودن تعداد گونه و واکنش شرکت کننده در آن مورد استفاده قرار گرفت. در میان این دسته از الگوها، دو الگوی معروف شل و الگوی هو و کک انتخاب شدند. همچنین الگوی انتگرال کوبش که در بین الگوهای تجربی مورد توجه محققان است با تغییراتی برای پیش‌بینی مرحله‌ی اول و دوم احتراق استفاده شد. مقایسه‌ی سه الگوی پیشنهادی نشان داد که زمان محاسبه‌ی الگوی شل به طور متوسط ۱/۷۵ برابر و الگوی هو و کک ۴ برابر بیشتر از الگوی انتگرال کوبش است. بر این اساس زمان محاسبه‌ی الگوی انتگرال کوبش پایین‌تر از دو الگوی دیگر است. همچنین مقایسه‌ی اختلاف میانگین الگوها با مقادیر آزمایشگاهی نشان داد که الگوی انتگرال کوبش بهترین پیش‌بینی را در شروع مرحله‌ی اول و دوم احتراق دارد. در مورد دو الگوی سینتیک شیمیایی پیشنهاد شده می‌توان گفت که الگوی هو و کک پیش‌بینی بهتری در شروع مرحله‌ی اول احتراق نسبت به الگوی شل، به علت در بر داشتن تعداد بیشتر گونه و واکنش نشان می‌دهد. ولی الگوی شل تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی در شروع مرحله‌ی اول احتراق دارد.

مراجع

1. Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., JO, P. D., and Kato, S., "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC)-A New Combustion Process for Internal Combustion Engine," SAE paper 790501, 1979.
2. Livengood, J. C., and Wu, P. C., "Correlation of Autoignition Phenomenon in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines," 15th Symposium (International) on Combustion, pp. 347-56, 1955.
3. Bengtsson, J., "Closed-Loop Control of HCCI Engine Dynamics," Ph.D. Thesis, Lund Institute of Technology, Sweden, 2004.
4. He, X., Donovan, M. T., Zigler, B. T., Palmer, T. R., Walton, S. M., Wooldridge, M. S., and Atreya, A., "An Experimental and Modeling Study of Iso-octane Ignition Delay Times Under Homogeneous Charge Compression Ignition Conditions," Combustion and Flame, Vol. 143, pp. 266-275, 2005.
5. Soylu, S., and Gerpen, J. V., "Development of an Autoignition Submodel for Natural Gas Engines," Fuel, Vol. 82, pp. 1699-1707, 2003.
6. ابراهیمی، ر. "پیش‌بینی شروع مرحله‌ی دوم احتراق در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن توسط الگوی سینتیک شیمیایی کاهش یافته،" دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، بهمن ۱۳۸۶.
7. Ribaucour, M., Minetti, R., Sazhina, E. M., and Sazhin, S. S., "Autoignition of n-Pentane in a Rapid Compression Machine: Experiment Versus Modelling," Third European Combustion Meeting ECM, 2007.
8. Nabil, S., Ayoub, R., and Reitz, D., "Multidimensional Modeling of Fuel Composition Effects on Combustion and Cold-starting in Diesel Engines," SAE Paper 952425, 1998.
9. Sazhin, S. S., Sazhina, E. M., Heikal, M. R., Marooney, C., and Mikhalovsky, S. V., "The Shell Autoignition Model: A New Mathematical Formulation," Combustion and Flame, Vol. 117, pp. 529-540, 1999.
10. Woschni, G., "A universally applicable equation for instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine," SAE Paper 670931, 1967.
11. Hu, H., and Keck, J., "Autoignition of Adiabatically Compressed Combustible Gas Mixtures," SAE paper 872110, 1987.
12. Houliag, L., David, L. M., and Nicholas, P. C., "A Study on the Application of a Reduced Chemical Reaction Model to Motored Engines for Heat Release Prediction," SAE Paper 922328, 1992.
13. Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R. W., Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th ed., p. 378, Springer, Germany, 2006.
14. Choi, Y., and Chen, J.-Y., "Fast Prediction of Start-of-Combustion in HCCI with Combined Artificial Neural Networks and Ignition Delay Model," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2711-2718, 2005.
15. Choi, Y., and Chen, J.-Y., "Numerical Modeling of Start-of-Combustion (SOC) in HCCI Engine With Artificial Neural Network (ANN)," Proceedings of the 2003 Western States Meeting of the Combustion, 2003.
16. Vanhove, G., "Oxydation, Co-oxydation et Auto-inflammation à Basses Températures d'Alcènes et Aromatiques Type. Etude Expérimentale des Interactions an Sein d'un Carburant-Modèle," Thèse Ph.D., L'Université des Sciences et technologies de Lille, 2004 (In French).
17. Stoecker, W. F., Design of Thermal Systems, 2nd Edition, McGraw-Hill, Kogakusha, 1980.
18. Dagaut, P., Dayma, G., Desmet, B., Djedaili-Chaumeix, N., Ebrahimi, R., Hadj Ali, K., Mercier, M., and Minetti, R., "Utilisation de Combustibles Issus de la Gazéification de la Biomasse dans les Moteurs HCCI," Rapport Final, PR5.5 SYNGAZ-GTL-HCCI, 2005 (In French).
19. Lu, X. C., Chen, W., Huang, Z., "A Fundamental Study on the Control of the HCCI Combustion and Emissions by Fuel Design Concept Combined with Controllable EGR. Part 1. The Basic Characteristics of HCCI Combustion," Fuel, Vol. 84, pp. 1074-1083, 2005.

English Abstract

Prediction of auto-ignition delay in HCCI engine

R. Ebrahimi

Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

Homogenous charge compression ignition (HCCI) engines are being actively developed worldwide as they can have efficiencies close to that of diesel engines, with low levels of oxides of nitrogen as well as particulate matter emissions. There are challenges associated with the successful operation of HCCI engines particularly with combustion phasing controls. Thus, auto-ignition models are proposed to be used in engine control systems. Hu and Keck model, Shell model, and Knock integral method are selected. Two equations in Knock integral method are proposed for the prediction of start of ignition of the first- and second-stage combustion. The comparison of average differences in auto-ignition delay between the models, experimental data and time calculation indicates that Knock integral model has the highest accuracy as well as shorter time.

Key Words: HCCI, Auto-ignition, Shell model, Hu and Keck model, Knock integral method