



بررسی تجربی و تحلیل آماری نوسانات چرخه‌ای در موتور احتراق تراکمی همگن

وحید حسینی*

^۱دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، vhosseini@sharif.edu

*نویسنده مسؤل، شماره تماس: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۵۸۵

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۳ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۷ خرداد ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

احتراق تراکمی همگن (HCCI)

تغییرات چرخه‌ای

احتراق HCCI

سینتیک شیمیایی

موتورهای احتراق تراکمی همگن (HCCI)، نسل جدیدی از موتورهای احتراق داخلی هستند که همانند موتورهای دیزلی دارای احتراق خودبخودی‌اند و مشابه موتورهای بنزینی با مخلوط همگن سوخت و هوا کار می‌کنند. اساس احتراق در این موتورها خوداشتعالی مخلوط همگن سوخت و هوا بر اثر تراکم است. این نوع احتراق معمولاً با مخلوط هوا و سوخت به شدت رقیق شده، با هوای اضافی یا گازهای بازخوران EGR انجام می‌شود و مقادیر تولید آلاینده‌های NOx (به خصوص در بارهای ضعیف) و دوده بسیار، ناچیز است. موتور HCCI بر خلاف موتورهای جرقه‌ای، نوسانات چرخه‌ای بسیار اندکی دارد. با اینحال، به دلیل حساسیت زیاد احتراق به متغیر دما، در صورت بروز نوسانات چرخه‌ای، احتراق به شدت ناپایدار می‌گردد. این امر در پایش بهینه موتور، اهمیت بسزایی دارد. در این تحقیق، موتوری HCCI در دامنه کارکرد متنوع آزمایش و نوسانات چرخه‌ای احتراق از منحنی فشار داخل استوانه استخراج شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند، پایداری احتراق HCCI با افزایش آزادسازی انرژی در مرحله احتراق دما خنک، افزایش می‌یابد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱) مقدمه

احتراق سوخت‌های مختلف در موتور ایجاد انواع آلاینده‌گی می‌کنند که شامل PM , NO_x , CO , HC و ... اند. موتورهای استفاده شده در خودروها تولید کننده مقادیر زیادی PM و NO_x اند که این مواد خطرات بسیاری را برای سلامتی انسان به همراه دارد. استانداردهای ملی کشورهای مختلف به منظور جلوگیری از افزایش آلودگی هوا، شرکت‌های خودروسازی را تحت فشار قرار داده‌اند و محدودیت‌های شدیدی را برای مقدار PM و NO_x تولیدی اعمال کرده‌اند. برای مثال در قاره اروپا برای خودروهای تجاری سبک دیزلی در سال ۲۰۱۱ میلادی، مقادیر PM و NO_x به ترتیب نباید از ۰٫۰۵ و ۰٫۱۸ گرم بر واحد کیلومتر تجاوز کند [۱]. اما کاهش همزمان PM و NO_x در موتورهای احتراق داخلی به ویژه در موتورهای CI بسیار دشوار است. این امر محققین را بر این واداشت که راه حل‌های جدیدی را برای این مشکل بیابند که موتور $HCCI$ از جمله مهم‌ترین و کارآمدترین روش‌ها است.

عملکرد موتور $HCCI$ ترکیبی از عملکرد موتورهای SI و CI است. در این موتور همانند موتورهای SI سوخت و هوا قبل از ورود به استوانه با هم ترکیب می‌شوند ولی بر خلاف موتورهای SI ، در موتور $HCCI$ شمع جرقه نمی‌زند و همانند موتورهای CI احتراق بر اثر تراکم و خود اشتعالی رخ می‌دهد.

در موتورهای $HCCI$ به دلیل خود اشتعالی، ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سوخت مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این نوع موتورها به دلیل اینکه سوخت می‌بایست به خود اشتعالی برسد، باید شرایط لازم برای این امر را فراهم کرد. این شرایط می‌تواند شامل افزایش دمای ورودی، افزایش نسبت تراکم، افزایش خاصیت خود اشتعالی سوخت (کاهش عدد اکتان، افزایش عدد ستان) و ... باشد. مورد دیگری که باید به آن توجه داشت رقیق بودن مخلوط سوخت و هوا است که می‌تواند مانع آزاد شدن انرژی بیش از حد بر اثر خود اشتعالی و آسیب رساندن به موتور شود. یکی از روش‌های رقیق کردن مخلوط سوخت و هوا استفاده از EGR و گازهای پس‌ماند است. در این روش گازهای خروجی از مسیر خروجی و گازهای درون استوانه باقی‌مانده از احتراق، در احتراق بعدی شرکت داده می‌شوند تا مخلوط سوخت و هوا را رقیق کنند. احتراق $HCCI$ بر اساس رقت مخلوط سوخت و هوا (با استفاده از EGR یا هوای اضافی) دارای دو مرز کوبش و عدم اشتعال است. اگر λ درصد EGR از مقدار مشخصی بیشتر شوند احتراق ناقص و اگر این دو مقدار کمتر از حد مطلوب باشند پدیده کوبش رخ خواهد داد.

مهمترین مزایای موتورهای $HCCI$ کاهش همزمان PM و NO_x و همچنین افزایش قابل ملاحظه بازده حرارتی نسبت به موتورهای SI است [۲]. اگر چه با توجه به ویژگی‌های ذکر شده برای موتورهای $HCCI$ می‌توان مشکلات آلودگی و مصرف انرژی را حل شده فرض

کرد ولی چالش‌هایی که این موتور با آن‌ها روبه‌رو است به اندازه‌ای جدی‌اند که تاکنون مانع تولید تجاری این موتور شده است. دو مورد از اصلی‌ترین موانع موتورهای $HCCI$ محدودیت توان خروجی و عدم پایش بر زمان شروع احتراق است [۳]. تولید هیدروکربن نسوخته (HC) و مونواکسیدکربن (CO) زیاد، بیشینه فشار زیاد و مشکلات راه‌اندازی سرد نیز از جمله دیگر مشکلات موتورهای $HCCI$ است که در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرند.

نوسانات چرخه‌ای در موتورهای جرقه‌ای برای دهه‌ها به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است اما تعداد کمی مطالعه تجربی بر روی نوسانات چرخه‌ای در موتورهای $HCCI$ انجام گرفته است. در [۴] یک موتور تک استوانه با استفاده از ترکیب‌های مختلف مخلوط ایزو اکتان و نرمال هپتان در حالت $HCCI$ برای بررسی نوسانات چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که وقتی عدد اکتان کاهش می‌یابد نوسانات چرخه‌ای متغیرهای عملکردی موتور به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در [۵] مشاهده کردند که نوسانات چرخه‌ای قابل قبول برای موتور $HCCI$ تنها در بازه باریکی از زمان احتراق در اطراف نقطه مکث بالا اتفاق می‌افتد. در [۶] به این نتیجه رسیدند که نوسانات چرخه‌ای موتور $HCCI$ بسیار به نقطه شروع احتراق وابسته است، همچنین برای سوخت‌های دارای آزادسازی انرژی در دو مرحله نوسانات چرخه‌ای در مرحله اول نسبت به مرحله دوم کم‌تر است.

۲) پایداری احتراق و نوسانات چرخه‌ای

پایداری احتراق را می‌توان از نظر کیفی تمایل احتراق به بازگشت به حالت مطلوب پس از هر نامنظمی در احتراق نامید [۷]. این نامنظمی در احتراق که نوسانات چرخه‌ای نامیده می‌شود، یکی از پدیده‌های غیر قابل اغماض در هر احتراقی است. این نوسانات نقش بسیار مهمی در پایداری احتراق ایفا می‌کنند به این صورت که اگر این نوسانات تشدید شود احتراق ناپایدار و اگر تضعیف شوند احتراق پایدار می‌شود.

اگرچه در مقایسه با موتورهای SI و CI ، موتورهای $HCCI$ نوسانات چرخه‌ای کمتری دارند، ولی به دلیل عدم پایش بر زمان آغاز واکنش در این نوع موتورها، تغییرات چرخه‌ای کوچک می‌توانند موجب ناپایداری کارکرد موتور شده و احتراق را به طرف کوبش یا احتراق ناقص هدایت کنند [۸]. از این رو نوسانات چرخه‌ای در احتراق $HCCI$ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. با دانستن الگوی این تغییرات چرخه‌ای و منابع ایجاد کننده آن می‌توان مانع تشدید شدن این پدیده شد.

به صورت کلی الگوهای تغییرات چرخه‌ای در احتراق $HCCI$ را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود: تغییرات چرخه‌ای طبیعی، تغییرات چرخه‌ای نوسانی و تغییرات چرخه‌ای نامنظم شدید [۹]. تغییرات چرخه‌ای طبیعی به علت‌هایی نظیر ناهمگنی دمای، ناهمگنی

کلیه آزمایش‌ها در شرایط پایدار و دور ثابت موتور صورت گرفته است. متغیرهای EGR و نسبت هوا به سوخت λ در جریان آزمایش تغییر یافته و برای تغییر زمان‌بندی احتراق از تغییر نسبت تراکم موتور استفاده گردیده است. در مجموع ۹۴ نقطه کاری و برای هر نقطه کاری ۳۰۰ چرخه کاری موتور داده برداری شده است. مقدار فشار داخلی با دقت ۰٫۲ درجه دوران میل لنگ قرائت گردیده است. جدول ۴ خلاصه ای از شرایط عملکردی آزمایش را نشان می‌دهد.

محفظه احتراق	صاف با سمبه بالا تخت
نسبت تراکم	قابل تغییر از ۱:۶ تا ۱:۱۶
قطر سمبه × طول جابه‌جایی	114.3 mm × 82.5 mm
حجم جابه‌جایی سمبه (cm ³)	۶۱۱٫۷
باز شدن دریچه هوا	10° CA ATDC
بسته شدن دریچه هوا	34° CA ABDC
باز شدن دریچه دود	40° CA BBDC
بسته شدن دریچه دود	15° CA ATDC
گشودگی دریچه	٪۱۰۰

محدوده جریان (lit/min)	۲۰-۱۰۰۰
دمای گاز (°C)	۴۰- تا ۶۰
محدوده فشار (psig)	بزرگتر از ۱۵۰
زمان پاسخ	کمتر از ۲۵ میلی ثانیه

محدوده دمایی سیال (°C)	۴۸- تا ۱۵۰
محدوده دمایی ترنسمیتر (°C)	۲۰- تا ۶۵
فشار بیشینه (psi)	۱۰۰۰
جابه‌جایی (cm ³ /rev)	کمتر از ۲۵ میلی ثانیه

شرایط کاری	۱	۲
دور موتور (rpm)	۹۰۰	۹۰۰
نرخ EGR	٪۶۰	صفر
نسبت هوا به سوخت نسبی (λ)	۳٫۵	۱٫۲
نسبت تراکم	۱۰٫۲۵ تا ۷٫۲۵	۱۰٫۲۵ تا ۷٫۲۵
درصد هیدروژن سوخت	صفر تا ٪۱۵	صفر تا ٪۱۵

ترکیب مخلوط، نوسانات نسبت هوا به سوخت و نوسانات مقدار EGR تشکیل می‌گردد. تغییرات چرخه‌ای نوسانی وقتی رخ می‌دهد که شرایط مخلوط درون استوانه نوسانات تناوبی بین دو محدوده داشته باشد. تغییرات چرخه‌ای نامنظم شدید هنگامی است که در تعدادی از چرخه‌ها بدسوزی و احتراق ضعیف اتفاق می‌افتد. این سه الگو تغییرات چرخه‌ای نشانگر این امر هستند که تغییرات چرخه‌ای لزوماً یک پدیده تصادفی نیست و با توجه به شرایط اولیه احتراق، تغییرات چرخه‌ای می‌تواند در هر یک از این سه گروه قرار بگیرد.

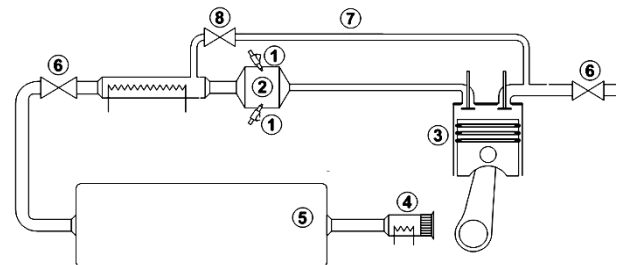
اساساً تغییرات چرخه‌ای را می‌توان از طریق نمایش رفتار متغیرهای احتراقی در چرخه‌های متوالی به تصویر کشید تغییرات چرخه به چرخه متغیرهایی مانند SOC، P_{max} و IMEP می‌تواند به عنوان نمایش‌دهنده نوسانات چرخه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

۳) آزمایشگاه مورد استفاده برای تولید داده‌های تجربی

آزمایشگاه موتورهای احتراق داخلی دانشگاه آلبرتای کانادا برای تولید داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. نمای وسایل و تجهیزات استفاده شده در آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

موتور CFR استفاده شده در این تحقیق یک موتور تک استوانه چهارزمانه با قابلیت نسبت تراکم متغیر است. دلیل اصلی انتخاب این موتور تغییرپذیر بودن نسبت تراکم و پرکاربرد بودن این موتور در ارزیابی و رتبه‌بندی سوخت‌های گازویلی و دیزلی است. جدول ۱) مشخصات اساسی این موتور را نشان می‌دهد. از یک حسگر سیم داغ برای اندازه‌گیری شار هوا استفاده شده است. مشخصات این شارنچ در جدول ۲) نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری شار سوخت از دو شارنچ حجمی نوع سمبه‌ای جابه‌جایی مثبت برای شارهای بزرگ و کوچک شده است. برای هر شارنچ از انتقال‌دهنده جداگانه استفاده گردیده است. برخی از مشخصات این شارنچ‌ها در جدول ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای وسایل و تجهیزات استفاده شده در آزمایش: ۱- افشانه‌های پاشش سوخت، ۲- چندراهه ورودی، ۳- موتور CFR، ۴- شارنچ مصرف هوا، ۵- مخزن آرامش، ۶- شیر تنظیم فشار خروجی و فشار چندراهه ورودی، ۷- لوله گازهای بازخوران، ۸- شیر تنظیم بازخوران

۴) مدل عددی تحلیل نتایج آزمایش

برای مدل سازی ترمودینامیکی احتراق HCCI بر اساس داده‌های تجربی یک مدل صفر بعدی ترمودینامیکی توسعه داده شد. این مدل ریاضی با در اختیار داشتن داده‌های اولیه یک چرخه بسته شامل جرم، دما، فشار و حجم اولیه و با استفاده از فشار اندیکاتوری اندازه‌گیری شده در داخل استوانه، گرمای آزاد شده از احتراق و متغیرهای احتراقی مرتبط را برای هر نقطه کاری محاسبه می‌کند. در این مدل سیال کاری، هوا با خواص متغیر نسبت به دما منظور گردید. فشار داخل استوانه از داده‌های تجربی استخراج شده و با استفاده از هندسه موتور، روابط تغییر حجم داخل محفظه احتراق مورد استفاده قرار گرفت. چرخه کاری به صورت یک چرخه بسته از زمان IVC تا EVO مورد بررسی قرار گرفت. مدل به صورت آدیاباتیک و با صرف نظر کردن از انتقال حرارت توسعه داده شد. رابطه زیر، رابطه نهایی مورد استفاده برای محاسبه نرخ انرژی آزاد شده را نشان می‌دهد [۷].

$$\frac{\partial Q_{ch}}{\partial \theta} = \left(\frac{1}{\gamma-1}\right)V \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} + \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)P \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (1)$$

که در این رابطه، Q_{ch} ، انرژی آزاد شده حاصل از احتراق و γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه هوا و به صورت تابعی از دماست.

برای محاسبه مقدار تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه هوا نسبت به دما نیز از رابطه زیر استفاده گردید:

$$C_p = C_0 + C_1 \cdot \theta^1 + C_2 \cdot \theta^2 + C_3 \cdot \theta^3 \quad (2)$$

که در آن [۲]

$$\theta = \frac{T(\text{Kelvin})}{1000}$$

$$C_0 = 1.05$$

$$C_1 = -0.365$$

$$C_2 = 0.85$$

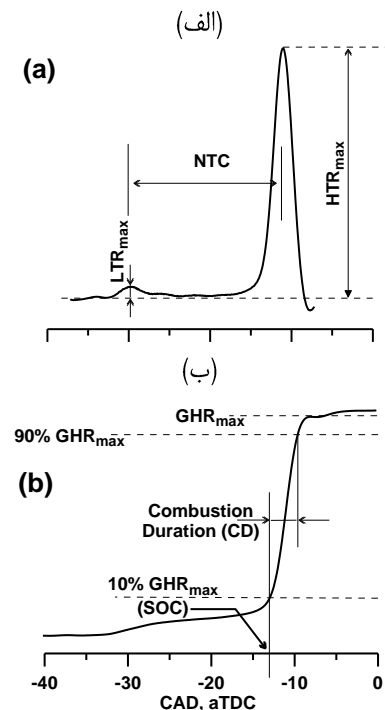
$$C_3 = -0.39$$

۵) بررسی و تحلیل نتایج

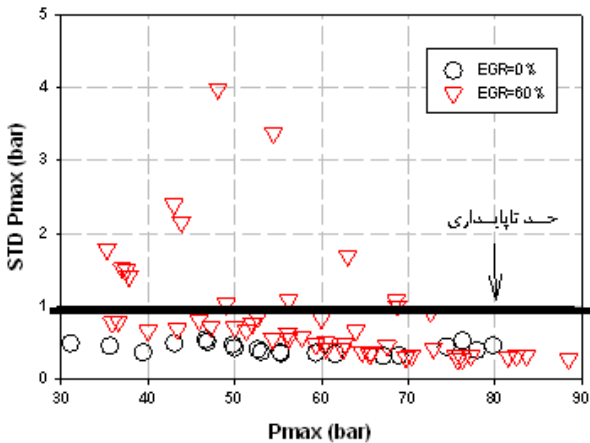
علیرغم اینکه احتراق HCCI به دلیل وابستگی بسیار به سینتیک شیمیایی و در مقایسه با احتراق جرقه‌ای بسیار پایدار است، تغییرات چرخه‌ای در چرخه‌های پیاپی و به صورت تصادفی دیده می‌شوند. چنین تغییراتی به دلیل عدم وجود سازوکار جرقه زنی می‌توانند با اندکی انحراف به ناپایداری احتراق به سمت احتراق ناقص، عدم احتراق و یا احتراق همراه با ضربه منجر شوند. یکی از خواص احتراق HCCI همراه با EGR در نقاط ناپایدار، تناوب احتراق بین دو منطقه بدسوزی و ضربه است.

نسبت تراکم بر اساس مقدار شار جرمی هوا و سوخت تعیین می‌شود. AFR درست نیز بر اساس نرخ H/C هر سوخت محاسبه می‌شود. نرخ EGR بر اساس نسبت درصد حجمی CO_2 در ورودی و خروجی محاسبه می‌شود. در این آزمایش از سوخت هپتان نرمال استفاده شده است. این سوخت از خانواده آلکان‌هاست و رابطه مولکولی آن C_7H_{16} است. در آزمایشگاه، به این سوخت به دلیل مقاومت بسیار پایین در برابر تراکم و خود اشتعالی، عدد اکتان صفر نسبت داده شده است. از این رو از هپتان نرمال به عنوان سوخت مرجع در تعیین عدد اکتان سوخت‌های مختلف استفاده می‌شود.

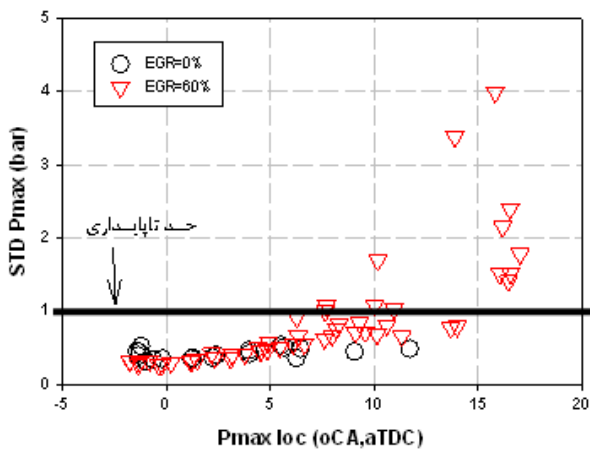
یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌های احتراقی این سوخت، احتراق دو مرحله‌ای است. اولین مرحله از احتراق آن که به احتراق دمای خنک معروف است در دمای نسبتاً پایینی رخ می‌دهد و انرژی نسبتاً کمی نیز تولید می‌کند ولی در احتراق اصلی که احتراق دمای گرم نام دارد، دما به شدت افزایش می‌یابد و انرژی عمده احتراق در این مرحله آزاد می‌شود. (شکل ۲) احتراق دو مرحله‌ای هپتان نرمال را در شرایط آزمایش موتور HCCI نشان می‌دهد. همچنین برخی مشخصه‌های احتراق هپتان نرمال مانند آزادسازی انرژی دما خنک (LTR_{max}) و آزادسازی انرژی دما گرم (HTR_{max}) در این شکل نشان داده شده است. و ضریب دمایی منفی (NTC: Negative Temperature Coefficient) نیز مطابق شکل ۲ تعریف می‌شود.



شکل ۲: (الف) نرخ تولید گرما و (ب) تولید گرما بر حسب زاویه میل لنگ همراه به معرفی متغیرهای احتراقی مورد محاسبه



شکل ۳: تغییرات انحراف استاندارد فشار بیشینه بر حسب میانگین فشار بیشینه در دور ۹۰۰ rpm با تغییر نسبت تراکم از ۷،۲۵ تا ۱۰،۲۵ و مقدار هیدروژن سوخت از ۰ تا ۱۵ درصد



شکل ۴: تغییرات انحراف استاندارد فشار بیشینه بر حسب میانگین مکان آن در دور ۹۰۰ rpm با تغییر نسبت تراکم از ۷،۲۵ تا ۱۰،۲۵ و مقدار هیدروژن سوخت از ۰ تا ۱۵ درصد

شکل ۵) اثر مقدار حداکثر نرخ انرژی آزاد شده در مرحله دما خنک را بر پایداری احتراق نشان می‌دهد. برای هپتان نرمال احتراق دو مرحله‌ای ملاحظه گردید. مقدار، زمان و شدت آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک با تنظیم مقدار گاز بازشکل‌دهنده^۱ صورت گرفته است. گاز بازشکل‌دهنده مخلوطی از گازهای سبک است که اکثر آن را CO و H₂ تشکیل می‌دهد و مقداری نیز گازهای بی‌اثر در آن وجود دارد. شکل ۵) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار انرژی آزاد شده در مرحله دما خنک، پایداری احتراق افزایش می‌یابد. در مرحله احتراق دما خنک علیرغم آزادسازی مقدار اندک انرژی نسبت به کل انرژی، آنتالپی و رادیکال‌های آزاد مورد نیاز مرحله اصلی احتراق نظیر رادیکال هیدروژن پروکساید (H₂O₂) تولید می‌شوند. از این رو، شدت و مقدار آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک می‌تواند تأثیر بسزایی در احتراق

به منظور تعریف ناپایداری احتراق از متغیرهای آماری گوناگونی که برای متغیرهای احتراقی در ۳۰۰ چرخه پشت سرهم محاسبه می‌شوند، می‌توان استفاده نمود. انحراف استاندارد هر متغیر و ضریب تغییرات هر متغیر $COV = 100 \times STD(x)/mean(x)$ از جمله چنین متغیرهایی هستند که می‌توان آن‌ها را برای فشار بیشینه، مکان فشار بیشینه، زمان احتراق (زمانی که ۵۰٪ انرژی کل گرمایی آزاد شده است)، طول زمان احتراق، زمان یا مقدار آزادسازی گرما در مرحله احتراق دما خنک، زمان یا مقدار آزادسازی گرما در مرحله احتراق دما گرم و فشار متوسط مؤثر تعریف و محاسبه نمود.

شکل ۳) به عنوان نمونه مقدار تغییرات انحراف استاندارد فشار بیشینه را نسبت به مقدار متوسط فشار بیشینه برای نقاط کاری با دو مقدار متفاوت درصد گازهای بازخوران نشان می‌دهد. فشار بیشینه با تغییر نسبت تراکم و درصد هیدروژن سوخت تغییر یافته است. انحراف استاندارد فشار بیشینه به مقدار ۱ بار به عنوان حد پایداری در نظر گرفته شده است. با افزایش فشار بیشینه، پایداری احتراق به صورت کلی افزایش یافته است. فشار بیشینه قوی در بار زیاد موتور تولید می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که به صورت عمومی احتراق HCCI در محدوده عملکردی نزدیک به بارهای زیاد پایدارتر است و در عوض برای تولید بارهای کم ناپایداری احتراق افزایش می‌یابد. مقدار افزایش ناپایداری احتراق علاوه بر بار، به سایر متغیرهای عملکردی موتور نیز ارتباط دارد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که وجود EGR موجب ناپایداری احتراق می‌گردد. کلیه نقاط بدون EGR به لحاظ پایداری در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند. استفاده از EGR یکی از مهمترین مشخصه‌های موتور HCCI به منظور کاهش نرخ آزادسازی انرژی است. EGR دارای اثرات متعدد و متفاوتی بر متغیرهای احتراقی است که از آن جمله می‌توان به اثر دمایی، اثر شیمیایی، اثر چینه‌بندی مخلوط و اثر ظرفیت گرمایی اشاره نمود. وجود EGR باعث کاهش نرخ آزادسازی انرژی و کاهش دمای احتراق شده و با افزایش درصد EGR در بارهای متوسط و کم، احتراق به سمت ناپایداری پیش می‌رود.

آزمایش‌های تجربی انجام شده برای نقاط کاری متعدد با تغییر نسبت تراکم و درصد هیدروژن سوخت انجام گردیده است. زمان‌بندی احتراق و زمان وقوع فشار بیشینه بر این اساس تغییر نموده است. شکل ۴) مقدار تغییرات فشار بیشینه بر حسب موقعیت مکانی فشار بیشینه را نشان می‌دهد. بهترین احتراق زمانی رخ می‌دهد که فشار بیشینه در محدوده نقطه مکث بالا قرار می‌گیرد. با دور شدن زمان فشار بیشینه از نقطه مکث بالا و به سمت مرحله انبساط پایداری احتراق مستقل از سایر متغیرهای عملکردی موتور کاهش می‌یابد و با رسیدن نقطه وقوع فشار بیشینه به حدود ۱۰ درجه دوران میل لنگ بعد از نقطه مکث بالا، احتراق کاملاً ناپایدار می‌گردد.

¹ Reformer gas

نقاط ناپایداری با نرخ آزادسازی انرژی در همه محدوده عملکردی موتور دیده می‌شوند و با افزایش نرخ آزادسازی انرژی، تعداد این نقاط کاهش می‌یابد.

۶ نتیجه‌گیری

آزمایش‌های تجربی با موتوری تک استوانه ای CFR برای احتراق HCCI با سوخت هپتان نرمال در شرایط کاری متفاوت با تغییر نسبت تراکم، درصد EGR و درصد هیدروژن سوخت صورت پذیرفت. یک الگوی صفر بعدی ترمودینامیکی برای تحلیل داده‌های فشار داخل استوانه و استخراج متغیرهای احتراقی توسعه داده شد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین پایداری احتراق زمانی رخ می‌دهد که بیشینه فشار داخل استوانه افزایش یابد و زمان بیشینه فشار داخل استوانه به حدود نقطه مکث بالا منتقل شود. همچنین، مستقل از نقاط عملکردی، آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک تأثیر بسزایی در پایداری احتراق داشت و با افزایش آن، نوسانات چرخه‌ای به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافت و احتراق پایدارتر شد. بنابر این، در شرایط کارکرد آزمایشی، سوخت‌های با خاصیت آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک، احتراق پایدارتری خواهند داشت.

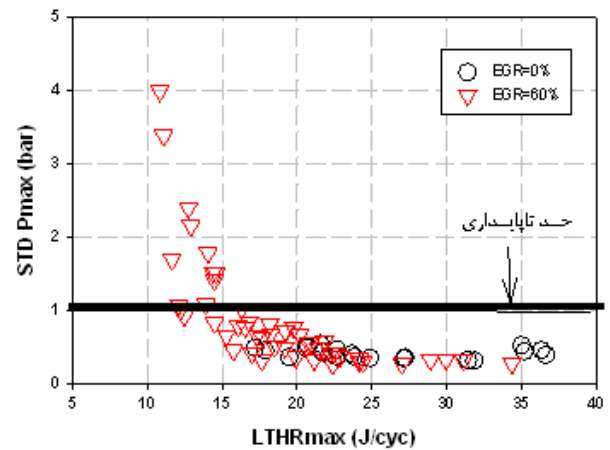
فهرست علائم

γ	نسبت گرمای ویژه
AFR	نسبت هوا به سوخت
COV	ضریب تغییرات متغیر مورد نظر
EGR	بازخوران (%)
$HTHR_{max}$	بیشینه نرخ تولید انرژی بر درجه میل لنگ (دما گرم)
x	
IMEP	فشار متوسط مؤثر داخلی
$LTHR_{max}$	بیشینه نرخ تولید انرژی بر درجه میل لنگ (دما خنک)
mean	میانگین متغیر مورد نظر
P_{max}	فشار بیشینه درون استوانه
$P_{max Loc}$	زاویه‌ای از میل لنگ که در آن فشار چرخه بیشینه است.

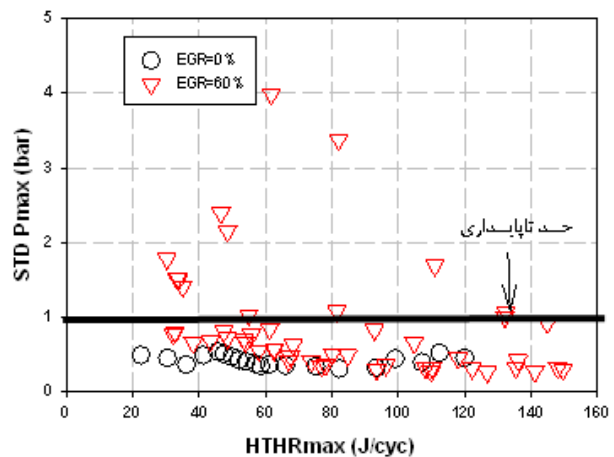
References

- [1] Available from: www.dieselnet.com
- [2] B. Mansouri, Analysis of cyclic variation in HCCI combustion, MSc Thesis, Sharif University of Technology, Iran, 2012
- [3] D. Flowers, HCCI in a CFR engine: Experiments and detailed kinetic modeling, SAE International, Paper No. 2000-01-0328, 2000
- [4] L. Xingcai, J. Libin, M. Junjun, H. Zhen. Experimental study on the cycle-by-cycle variations of homogeneous charge compression ignition combustion using primary reference fuels and their mixtures, Proceeding of IMechE - Part D, Vol. 221, pp. 859-866, 2007

اصلی بگذارد. احتراق به صورت کلی و مستقل از درصد EGR زمانی به پایداری کافی رسیده است که حداکثر نرخ آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک به بزرگتر از 15 J/cyc رسیده باشد. سوخت‌های مختلف حداکثر نرخ آزادسازی انرژی در مرحله دما خنک متفاوتی دارند و شکل (۵) نشان می‌دهد که پایداری احتراق با انتخاب مناسب نوع سوخت می‌تواند افزایش یابد. سوخت‌های با خاصیت دیزلی، سوخت‌هایی هستند که دارای احتراق قوی در مرحله دما خنک اند و از این رو سوخت‌های مناسب‌تری برای احتراق HCCI از منظر پایداری احتراق محسوب می‌شوند. شکل (۶) اثر مقدار نرخ حداکثر آزادسازی انرژی در مرحله اصلی احتراق را بر پایداری احتراق نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد، علیرغم آنکه نرخ آزادسازی انرژی در مرحله اصلی احتراق با افزایش بار، افزایش می‌یابد، اما نمی‌توان بر اساس این متغیر پایداری احتراق را تعیین کرد.



شکل ۵: تغییرات انحراف استاندارد فشار بیشینه بر حسب بیشینه مقدار انرژی آزاد شده در مرحله احتراق دما خنک در دور 900 rpm با درصد RG های متفاوت



شکل ۶: تغییرات انحراف استاندارد فشار بیشینه بر حسب بیشینه مقدار انرژی آزاد شده در مرحله احتراق دما گرم در دور 900 rpm و با درصد RG های متفاوت

- [8] M. Shahbakhti, Modeling and experimental study of an HCCI engine for combustion timing control, PhD Thesis, University of Alberta, Canada, 2009
- [9] M. Shahbakhti, C.R. Koch, Characterizing the cyclic variability of ignition timing in a homogeneous charge compression ignition engine fuelled with n-heptane/isooctane blend fuels, International Journal of Engine Research, Vol. 9, No. 5, pp. 361-397, 2008
- [5] G.T. Kalghatgi, R.A. Head, Combustion limits and efficiency in a homogeneous charge compression ignition engine, International Journal of Engine Research, Vol. 7, pp. 215-236, 2006
- [6] M. Shahbakhti, R. Lupul, A. Audet, C.R. Koch, Experimental study of HCCI cyclic variations for low-octane PRF fuel blends, Technical Meeting Combustion Institute, Canada, 2007
- [7] J.B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Book Company, 1988



Experimental investigation and statistical analysis of cyclic variations in homogeneous charge compression ignition combustion engine

V. Hosseini^{1*}

¹Sharif University of Technology, Tehran, Iran, vhosseini@sharif.edu

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 August 2013

Accepted: 07 June 2014

Keywords:

Homogeneous charge
compression ignition (HCCI)
Cyclic Variation
HCCI Combustion Phasing
Chemical kinetics

ABSTRACT

Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engines are the new generation of internal combustion engines that are like compression ignition engines utilize the auto-ignition and similar to spark ignited engines use the homogenous air-fuel mixture. The HCCI combustion is highly diluted with the air or exhaust gas recirculation (EGR) and produces near-zero NO_x and soot emissions. Unlike SI engines, the HCCI combustion engines exhibit low combustion cyclic variations. However, due to extreme sensitivity of the combustion to the temperature history, small cyclic variation can potentially lead to the combustion instability. This is important for a robust design of the engine control system. In this study, the operation of the HCCI combustion engine has been examined in a wide range of operating conditions. Cyclic variations were characterized by cylinder pressure data. Results showed that the stability of the HCCI combustion increased with the increase of low temperature heat release rate.