



تأثیر گازهای سوخته مانده از چرخه قبل روی زمانبندی بهینه جرقه به کمک راهبرد پرش جرقه

ابراهیم عبدی اقدم^{۱*}؛ مجید عطایی ترزنق^۲

^۱گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، eaaghdam@uma.ac.ir

^۲گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، majidataie60@gmail.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۱ خرداد ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

گاز سوخته باقیمانده

پرش جرقه

پیشرسی بهینه جرقه

گاز طبیعی متراکم

در این مقاله به کمک نتایج تجربی مستخرج از یک موتور تک استوانه پژوهشی اشتعال جرقه‌ای، تأثیر گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبل روی زمانبندی بهینه جرقه در نسبت هم‌ارزی ۰٫۹ و سرعت ۱۸۰۰ د.د.د. با سوخت CNG بررسی و برای حذف گازهای سوخته مانده از چرخه قبل از راهبرد پرش جرقه استفاده شده است. داده‌های خام شامل سیگنالهای فشار داخل استوانه، فشار ورودی، زاویه میل‌لنگ و نقطه مکث بالا ثبت شد. سپس این داده‌ها به کمک برنامه نوشته شده به زبان فرترن پردازش و تغییرات فشار استوانه برحسب زاویه میل‌لنگ، فشار مؤثر متوسط داخلی و مقدار قله فشار چرخه‌های مشابه محاسبه شد. در نهایت از نتایج به ازای زمانبندی‌های مختلف، پیشرسی‌های بهینه برای دو حالت با و بدون گاز سوخته باقیمانده، تعیین و قله فشار برای دو حالت مذکور مقایسه شد. نتایج نشان دادند وقتی به جای گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی گازهای نسوخته جایگزین شد، پیشرسی بهینه تقریباً ۹ درجه به تأخیر افتاد و موقعیت وقوع قله فشار چرخه معادل آن حدود ۴ درجه دورتر از نقطه مکث بالا ظاهر شد. تغییرات چرخه‌ای چرخه‌های هم‌شرایط در حالت با پرش جرقه نشان داد که شکل توزیع داده‌های Rimep - RP_{max} در حالت پیشرسی بهینه جرقه با سایر پیشرسی‌ها تفاوت قابل توجهی دارد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

حضور گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با تنفس طبیعی حتی در حالت بار کامل اجتناب ناپذیر است. مقدار این گاز با نسبت تراکم، سرعت موتور و بار موتور تغییر می‌کند؛ به طوری که در سرعت معین با افزایش نسبت تراکم، کاهش و با تقلیل بار افزایش می‌یابد [۱ و ۲].

با حضور گازهای سوخته در مخلوط سوخت-هوا سرعت شعله، طول احتراق، مقدار کار بر چرخه، کسر گونه‌های گاز خروجی و پیشرسی بهینه جرقه تغییر می‌کند. گازهای سوخته با رقیق سازی مخلوط سوخت-هوا، مقدار انرژی سوخت به ازای واحد جرم مخلوط را کاهش می‌دهد و بر پیشروی شعله و آهنگ انرژی آزاد شده تأثیر منفی گذاشته و مدت احتراق را طولانی می‌کند [۱]. از طرفی اگر دمای گازهای سوخته باقیمانده داغ باشد، موقع اختلاط با مخلوط نسوخته دما خنک، دمای مخلوط رقیق شده را افزایش می‌دهد که می‌تواند تأثیر مثبت روی سرعت سوختن بگذارد. از روی هم‌گذاری اثرات مثبت و منفی گازهای سوخته، اثر کلی آن روی طول احتراق مشخص می‌شود. اگر پیشرسی جرقه و کیفیت مخلوط ثابت بمانند و طول احتراق تغییر کند، کار چرخه تغییر می‌کند. بنابراین برای هر کیفیت مخلوط موجود در داخل استوانه می‌توان پیشرسی جرقه بهینه‌ای را تعریف کرد که به ازای آن بیشینه کار چرخه حاصل شود. در نتیجه، مقدار گازهای سوخته از چرخه قبلی می‌تواند بر مدت احتراق یا پیشرسی بهینه جرقه اثر بگذارد.

در کارهای پژوهشی گاهی لازم می‌شود برای مشخص کردن تأثیر گازهای سوخته از چرخه قبیل روی مشخصه‌های عملکردی احتراق چرخه مثل سرعت سوختن، چرخه‌های عاری از گازهای سوخته از چرخه قبیل را استخراج کرد [۳-۴].

همچنین در تأیید شبیه‌سازهای ترمودینامیکی و CFD^۱ موتور، ابتدا بهتر است فرآیند تأیید به کمک چرخه‌های تجربی عاری از گازهای سوخته انجام گیرد تا اعتبارسنجی از پیچیدگی‌های ناشی از گازهای سوخته از چرخه قبیل دور باشد. استخراج داده‌های تجربی چرخه‌های همراه با گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی یک امر عادی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای متداول است [۵ و ۶]. اما استخراج نتایج تجربی چرخه‌های عاری از گازهای سوخته از قبل به سادگی میسر نیست. با عمل پرخورانی موتور، در صورت وجود زاویه روی هم افتادگی در پیچه‌ها شاید بتوان گازهای سوخته مانده از چرخه قبیل را تخلیه کرد و به چرخه عاری از گاز سوخته دست یافت. این روش شرایط کاری موتور را از حالت تنفس طبیعی خارج می‌کند و نیل به خواسته مذکور میهم است. راه دیگر استفاده از روش پرش جرقه است. اگر با سوخت‌رسانی معمول به ازاء هر n چرخه فقط در یک چرخه احتراق رخ دهد، در آن صورت در $n-1$ چرخه قبیل یا بعد از آن موتورگردانی با فرآیندهای مکش و تخلیه انجام خواهد گرفت. در اولین چرخه موتور گردانی بعد از چرخه

احتراقی، گازهای سوخته از چرخه قبلی به طور معمول حضور خواهد داشت. اما وقتی در آن چرخه فرآیند مکش و تخلیه رخ می‌دهد، غلظت گازهای سوخته در گازهای باقیمانده برای چرخه بعدی به مراتب کمتر می‌شود. لذا با این روش می‌توان به چرخه‌هایی دست یافت که غلظت گازهای سوخته در گازهای باقیمانده از چرخه قبلی قابل اغماض باشد. مارک سلنا و همکاران^۲، مطالعاتی را روی ابزارهای کاربردی برای برآورد گازهای باقیمانده سوخته از چرخه قبیل در موتورهای احتراق داخلی انجام دادند. آنها با استفاده از حسگرهای حساس به CO₂ در داخل استوانه که در طول مرحله تراکم چرخه مقدار CO₂ را اندازه می‌گرفت و راهبرد پرش جرقه موفق به برآورد کسر گازهای باقیمانده در داخل استوانه شدند [۷].

راهبرد پرش جرقه یا پرش احتراق در موتورهای کاربردی نیز استفاده شده است. در خودروهای جاده‌ای معمولاً گشتاور مورد نیاز راننده که از موتور تأمین می‌شود، غیریکنواخت است. با توجه به عملکرد مطلوب استوانه‌ها در بار کامل، در یک موتور با تعداد استوانه زیاد متناسب با نیاز گشتاوری می‌توان تعدادی از استوانه‌ها را به صورت احتراقی و مابقی را بدون احتراق (بدون سوخت و جرقه) مدیریت کرد. تحت شرایط فوق به جای کنترل بار موتور با دریچه گاز از راهبرد احتراق بار کامل بعضی استوانه‌ها و پرش احتراق مابقی استفاده شده است. در چند سال اخیر از فناوری پرش احتراق یا غیرفعال سازی بعضی استوانه‌ها در موتورهای شش استوانه و با هدف بهینه‌سازی مصرف سوخت [۲، ۸ و ۹]، تشخیص احتراق ناقص [۱۰] و تقلیل آلاینده‌ها [۲] مطالعاتی انجام شده است.

در ادبیات فن نسبت پرش جرقه با دو تعریف متفاوت بیان شده است. در یک تعریف این نسبت به صورت نسبت تعداد چرخه بدون جرقه به تعداد چرخه با جرقه طی یک دوره تکرار بیان و در دیگری به صورت نسبت مجموع تعداد چرخه‌ها در یک دوره از فرآیند تکرار به تعداد چرخه با جرقه در آن تعریف شده است. به عنوان مثال نسبت پرش جرقه ۳ به ۱ از دید تعریف اول این مفهوم را دارد که در ۴ چرخه یکبار جرقه اعمال می‌شود و از دید تعریف دوم در داخل دوره تکرار سه چرخه‌ای یک چرخه با جرقه وجود دارد. در این مقاله از تعریف اول و نسبت پرش جرقه ۴ به ۲ استفاده شده است.

محمدی [۱۱] برای استخراج نتایج تجربی فشار بر حسب زاویه میل لنگ چرخه‌های عاری از گازهای سوخته باقیمانده و تحلیل آنها از راهبرد پرش جرقه استفاده کرد. او با تمرکز روی فشار مؤثر متوسط اندیکه در نسبت پرش جرقه‌های مختلف به این نتیجه رسید که در نسبت پرش جرقه ۴ به ۱ (با تعریف اول) اطمینان کافی برای عدم حضور گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی حاصل می‌شود.

تغییرات در چرخه‌های متوالی یکی از پدیده‌های ذاتی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای است. منشأ آن می‌تواند تغییرات اتفاقی تلاطم داخل استوانه، غیر همگنی مخلوط سوخت و هوای تازه و اختلاط ناهمگن

²Mark Sellnau et al.

¹Computational Fluid Dynamics



شکل ۱: نمایی از موتور پژوهشی تک استوانه

برای تشخیص نقطه مکث بالا از یک حسگر نوری روی میل بادامک استفاده شد. فشار دینامیک داخل استوانه و فشار مطلق ورودی بترتیب از طریق تراگذرهای فشار کیسلر نوع 6052C و کلر^۴ نوع PAA-M5 HB/3bar و تقویت کننده‌های خود، اندازه‌گیری شد.

جدول (۱) مشخصات موتور استفاده شده در آزمایش

ویژگی	توضیحات
قطر استوانه	۹۰ mm
پیمایش سمبه	۷۰ mm
حجم جابجایی	۴۷۰ cm ³
نسبت تراکم	قابل تغییر از ۵ تا ۱۹
سامانه جرقه زنی	برقی با قابلیت تنظیم یک درجه لنگ
سامانه سوخت‌رسانی	پاشش به مسیر ورودی موتور
سامانه روغن کاری	فشاری
نوع خنک کاری	با آب
تعداد و موقعیت دریچه	۲ OHV
زاویه باز و بسته شدن دریچه ورودی	نقطه مکث بالا باز و ۵۰° aBDC بسته
زاویه باز و بسته شدن دریچه خروجی	۴۰° bBDC باز و ۸° aTDC بسته
نوع تنفس	طبیعی با صافی و مخزن آرامش
شکل محفظه	صفحه‌ای با سمبه سر تخت

برای ثبت داده‌های پیوسته فشار داخل استوانه، فشار مطلق ورودی و پله‌های زاویه میل‌لنگ و نقطه مکث بالا^۵ رمزگذار چرخشی از یک ثبت‌کننده چهار ورودی نوع DAQ2005 ساخت شرکت ادلینک با قابلیت بیشینه فرکانس داده برداری ۵۰۰kHz و دامنه ولتاژ ۱۰V استفاده شد.

سوخت، هوا و گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی بویژه در کنار جرقه شمع باشد. برای مطالعه اثرات چرخه‌ای گازهای سوخته باقیمانده از قبل که تغییرات در دما و مقدار گونه‌ها را می‌تواند به دنبال داشته باشد و مخلوط تازه را به طور غیرهمگن رقیق کند، استخراج چرخه‌های تجربی عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل مفید خواهد بود.

بدون تردید بهترین روش برای تأیید اولیه شبیه‌سازی‌های احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مقایسه عملکرد شبیه‌سازی با نتایج تجربی در حالت بدون حضور گازهای سوخته از چرخه قبل است چون در این حالت تعریف شرایط تجربی دقیق در شبیه‌سازی امکانپذیر است. درحالی که در چرخه‌های با گاز سوخته از چرخه قبل برآورد دقیق مقدار گازهای سوخته و خواص ترمودینامیکی آن به طور تجربی کار بسیار سختی است و تعریف شرایط تجربی در شبیه‌سازی و فرآیند تأیید اولیه آن را می‌تواند خدشه‌دار کند. لذا استخراج چرخه‌های تجربی عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل با استفاده از روش پرش جرقه مخصوصاً برای بررسی و تأیید شبیه‌سازی‌های احتراق موتور مناسب است.

در مقاله حاضر نتایج تجربی تغییرات فشار داخل استوانه در دو حالت چرخه‌های با گازهای سوخته از قبل و بدون آن تحت شرایط گازسوز با مقادیر ثابت سرعت موتور، نسبت تراکم و نسبت هم‌ارزی استخراج شد. سپس پیش‌رسی بهینه با استفاده از راهبرد پرش جرقه تعیین و تغییرات چرخه‌ای *imep* و قلّه فشار در پیش‌رسی‌های مختلف بررسی شد.

۲- تجهیزات

موتور استفاده شده در مقاله حاضر موتوری تک استوانه از نوع ۲۹C ساخت کارخانه فریمن دیزل است که توسط شرکت گونت^۱ آلمان به موتوری، نسبت تراکم متغیر اشتعال جرقه‌ای ارتقا یافته است. از این موتور قبلاً برای انجام پژوهش‌هایی در خصوص بررسی آلاینده‌ها و تغییرات چرخه‌ای سوخت‌آما^۲ ارتقا داده شده است [۱۲]. شکل ۱ نمایی از این موتور پژوهشی تک استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

این موتور به یک لگام ترمز برقی با سرعت قابل تنظیم، وصل شده است به طوری که قدرت خروجی از موتور در حالت احتراق را می‌توان با یک واحد باز یاب به شبکه برق شهری بازگرداند. در جدول ۱ مشخصات اصلی این موتور جمع‌بندی شده و در شکل ۲ شمای ساده‌ای از تجهیزات بکار رفته و چیدمان نسبی آنها نشان داده شده است.

طی کارهای قبلی این موتور به حالت افشانه‌ای با نصب رمزگذار چرخشی به انتهای میل بادامک ارتقا داده شد [۱۳-۱۵]. در مقاله حاضر برای بهبود دقت در سنجش زاویه میل‌لنگ یک رمزگذار چرخشی از نوع کیسلر^۳ نوع 2613B با گام یک درجه به انتهای آزاد میل‌لنگ نصب شد تا امکان تنظیم پیش‌رسی جرقه و زمان آغاز پاشش سوخت را با شفافیت یک درجه فراهم کند.

³Kistler

⁴ Keller

⁵ Top Dead Centre

¹ GUNT

² Carburetor

$$W_{C,eq} = \oint P_{eq} dV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \oint P_i dV \quad (۲-الف)$$

$$W_{C,eq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{C,i} \quad (۲-ب)$$

که در آن $W_{C,eq}$ و $W_{C,i}$ بترتیب کارهای چرخه معادل فرضی و چرخه تجربی i ام است و می توان فشار مؤثر متوسط چرخه معادل $imep_{eq}$ را با معادله (۳) بیان کرد،

$$imep_{eq} = \frac{W_{C,eq}}{V_d} \quad (۳)$$

که در آن V_d حجم جابجا شده استوانه است. در مقاله حاضر برای تشخیص پیشرسی بهینه جرقه از $imep_{eq}$ استفاده شده است.

۴- روش آزمایش

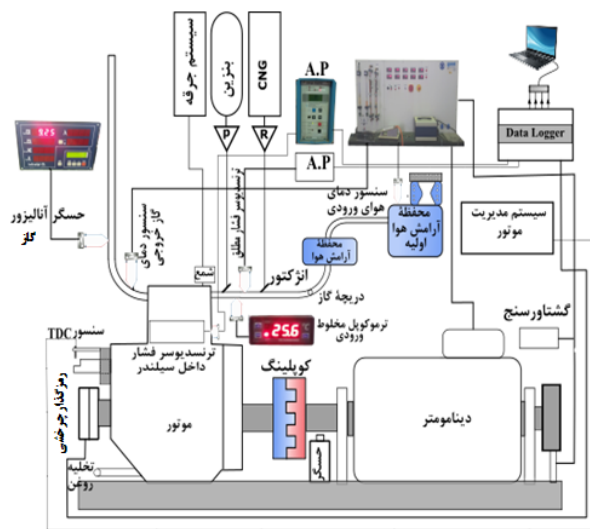
موتور در نسبت تراکم ۱۰،۱۲ و سرعت ۱۸۰۰ د.د.د. در حالت احتراق راه اندازی شد تا به حالت پایای گرم (ثابت ماندن دمای روغن و آب خنک کاری) برسد. پس از تنظیم سرعت موتور به کمک دستگاه تحلیلگر گازهای خروجی کیفیت مخلوط ورودی (λ) اندازه گیری شد. با توجه به مقدار λ مقدار سوخت تزریقی طوری تنظیم شد تا نسبت هم ارزی مورد نظر حاصل شود. پس از تثبیت مقدار سوخت تزریقی و سرعت موتور، مقدار پیشرسی در گستره مناسب تغییر داده شد و نتایج تجربی مربوط به هر پیشرسی ثبت و ذخیره گردید. در آزمایش های حالت با پرش جرقه، نسبت پرش جرقه ۴ به ۲ استفاده شد که دومین چرخه احتراق در هر دوره تکرار برای گرم نگه داشتن موتور در نظر گرفته شد. با توجه به این که در حالت با پرش جرقه در داخل همه چرخه ها احتراق رخ نمی دهد، تعداد چرخه ذخیره شده ۶ برابر تعداد چرخه احتراقی مورد نظر (عاری از گازهای سوخته مانده از قبیل) خواهد شد.

در هر دو حالت مقدار پیشرسی جرقه در یک محدوده مناسب تغییر داده شد و نتایج تجربی هر پیشرسی ثبت و ذخیره شد. پس از استخراج داده های خام توسط نرم افزار AD-Logger، داده های مذکور توسط یک برنامه نوشته شده به زبان فرترن پردازش و تحلیل شد.

۵- نتایج و بحث

داده برداری آزمایش های مقاله حاضر با بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز انجام شده است و در هر آزمایش حالت های با پرش جرقه یا بدون پرش جرقه، داده های خام بترتیب ۷۲۰ و ۳۰۰ چرخه پشت سر هم ذخیره شده است. با توجه به بخش های چرخه معادل فرضی و روش انجام، در حالت با پرش جرقه از نسبت پرش جرقه ۴ به ۲ استفاده شده و چرخه معادل فرضی از روی چرخه های عاری از گازهای سوخته باقیمانده که با گام ۶ چرخه در داده ها تکرار می شود، محاسبه شده است. برای این منظور فرآیند تفکیک چرخه های احتراقی مورد نظر در برنامه پردازش داده ها (اشاره شده در قسمت ۴) لحاظ شده است.

سامانه مدیریت موتور طوری طراحی شده است که با دریافت ضربه های رمزگذار چرخشی و علامت میل بادامک امکان تنظیمات لازم طبق شرایط آزمایش مورد نظر را توسط پژوهشگر فراهم می سازد. از تنظیمات ممکن می توان به زمان بندی پیشرسی جرقه، زاویه شروع پاشش سوخت، طول پاشش افشانه و پرش جرقه اشاره کرد. برای تنظیم کیفیت مخلوط ورودی (هوا- سوخت) به استوانه از تحلیلگر گاز نوع اینفرالیت سی ال^۱ در حالت بدون پرش جرقه استفاده شد. این دستگاه گازهای خروجی موتور را تحلیل می کند و نسبت اضافه هوا ($\lambda = 1/\varphi$) را به همراه کسر چند گونه گاز خروجی نمایش می دهد. در سامانه ورودی هوای محیط پس از گذر از صافی وارد محفظه آرامش اولیه شد و در قسمت ورود به آن شار و دمای هوا اندازه گیری می شود.



شکل ۲: شمای تجهیزات

۳- چرخه معادل فرضی

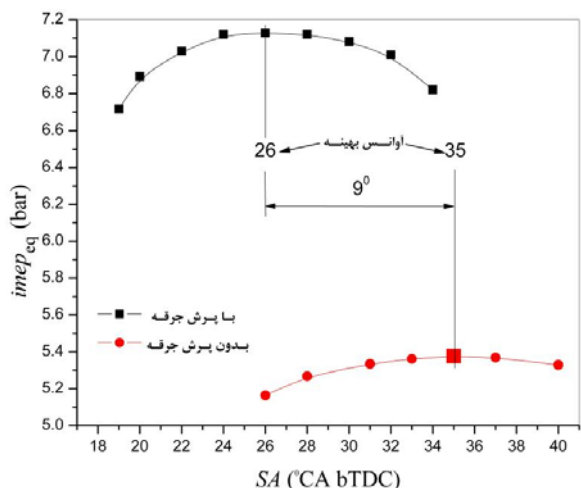
در موتورهای اشتعال جرقه ای وجود تغییرات چرخه ای در نمودارهای فشار استوانه برحسب زاویه میل لنگ فشار چرخه های پشت سرهم با شرایط آزمایش همسان دور از انتظار نیست. معمولاً استفاده از چرخه معادل فرضی حاصله از چرخه های تجربی هم شرایط یک روش معمول در ادبیات فن موتور است. فشار استوانه در هر زاویه θ چرخه معادل فرضی را می توان به کمک معادله (۱) از روی فشار استوانه چرخه های تجربی هم شرایط در همان زاویه محاسبه کرد:

$$P_{eq}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(\theta) \quad (۱)$$

که در آن N تعداد چرخه های تجربی و P_i و P_{eq} بترتیب فشارهای استوانه چرخه معادل و چرخه تجربی i ام در زاویه θ است. معادله (۲) وابستگی کار چرخه معادل فرضی را با کار چرخه های تجربی هم شرایط بیان می کند،

¹ Infralryt CL

می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پیش‌رسی بهینه حالت با پرش جرقه کمتر از مقدار حالت بدون پرش جرقه است. همچنین مقدار پیش‌رسی بهینه حاصل برای حالت با پرش جرقه، پیش‌رسی نامناسبی برای حالت بدون پرش جرقه است و بالعکس. علت این که پیش‌رسی بهینه در حالت با پرش جرقه کمتر ظاهر می‌شود، پر بودن کامل استوانه با مخلوط سوخت-هوا است که سرعت سوختن تند و در نتیجه طول کوتاه زمان احتراق را سبب می‌شود.



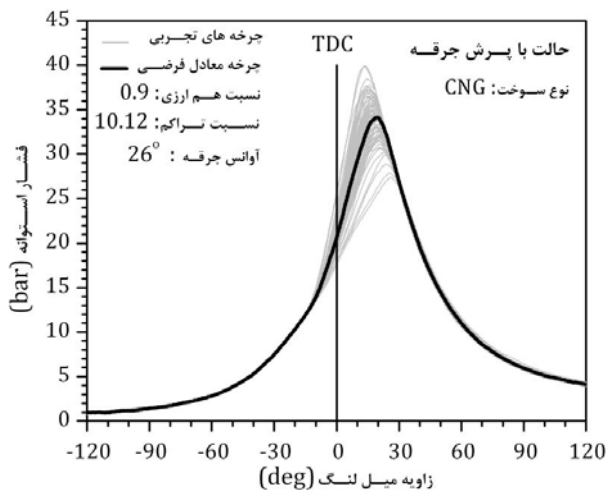
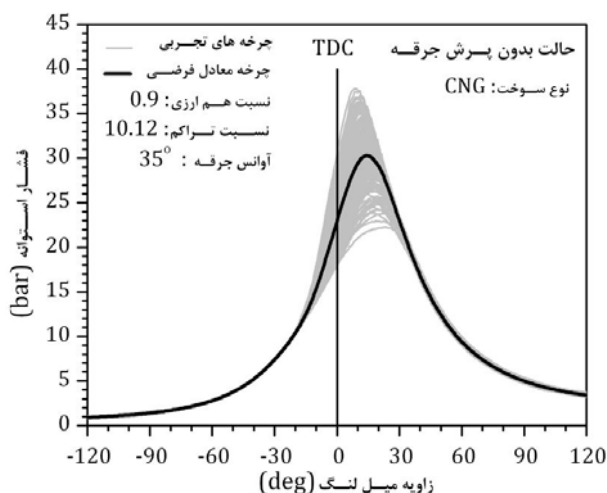
شکل ۴: تغییرات $imep_{eq}$ بر حسب پیش‌رسی جرقه برای دو حالت با و بدون پرش جرقه در هم‌ارزی ۰٫۹ با سوخت گاز طبیعی

شکل ۵ تغییرات قله فشار چرخه معادل فرضی ($P_{max,eq}$) و موقعیت وقوع آن (θ_{Pmax}) بر حسب پیش‌رسی جرقه را برای حالت‌های بدون پرش جرقه (با گاز سوخته از قبل) و با پرش جرقه (بدون گاز سوخته باقیمانده از قبل) با سوخت گاز طبیعی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۵ (الف) مشاهده می‌شود که موقعیت وقوع قله فشار حالت بدون پرش جرقه در پیش‌رسی بهینه، حدود ۱۴٫۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا ظاهر می‌شود که در توافق نزدیک با مرجع [۱۶] است. در شکل ۵-ب که برای گستره‌ای از تغییرات پیش‌رسی در حالت با پرش جرقه است، ملاحظه می‌شود که قله فشار در پیش‌رسی بهینه حدود ۱۸٫۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا اتفاق می‌افتد. نظر به اینکه از آغاز پیمایش انبساط انتقال گرما و حرکت سمبه سبب آهنگ منفی فشار و در مقابل تداوم فرآیند احتراق موجب آهنگ مثبت آن می‌شود، در حالت با پرش جرقه به خاطر انرژی زیاد مخلوط نسبت به حالت بدون پرش جرقه، در طول زاویه میل لنگ بیشتری از نقطه مکث بالا مقدار آهنگ مثبت فشار (ناشی از احتراق) از مجموع مقادیر آهنگ کاهش فشار (ناشی از حرکت پیستون و انتقال گرما) ظاهر می‌شود به طوری که وقتی این دو تمایل در آهنگ فشار باهم معادل می‌شوند قله فشار رخ می‌دهد و پس از آن فشار استوانه کاهش می‌یابد. لذا با حذف گازهای سوخته موقعیت وقوع قله فشار در پیش‌رسی بهینه حدود ۴ درجه دیرتر ظاهر می‌شود.

چنانکه قبلاً بیان شد برای تعیین پیش‌رسی بهینه در دو حالت مورد نظر داده‌برداری در پیش‌رسی‌های مختلف انجام گرفت و پیش‌رسی بهینه برای شرایط بیان شده تعیین شد. شکل ۳ (الف) و (ب) تغییرات فشار داخل استوانه برحسب زاویه میل لنگ چرخه‌های تجربی و چرخه معادل فرضی را برای دو حالت با و بدون پرش جرقه در پیش‌رسی بهینه جرقه مربوطه با استفاده از سوخت گاز طبیعی نشان می‌دهد.

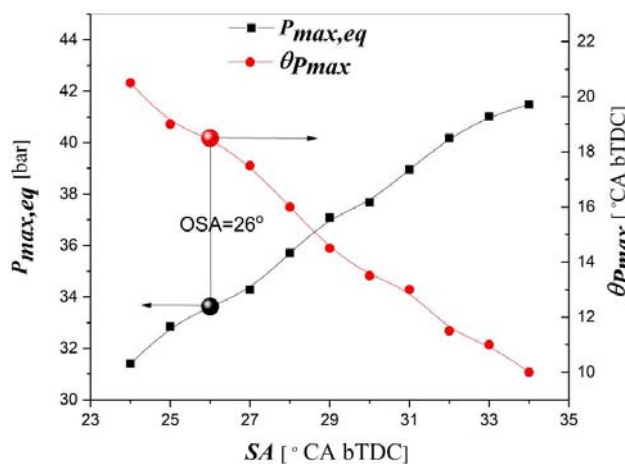
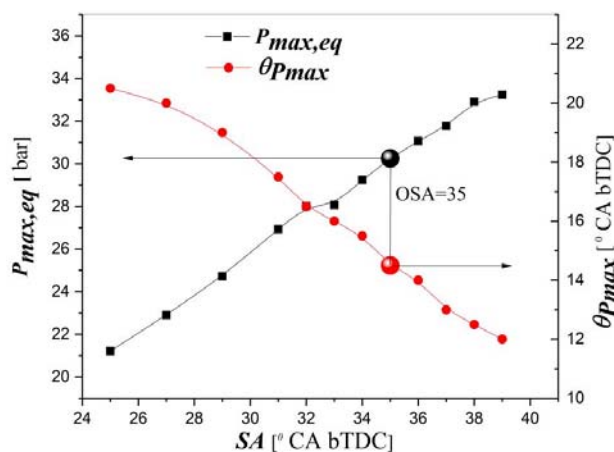
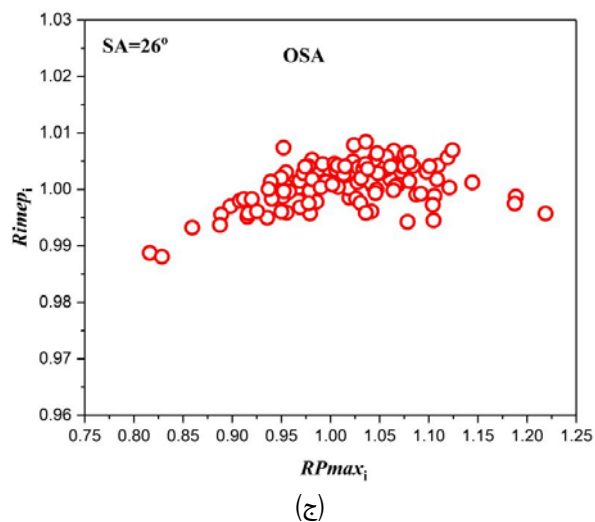
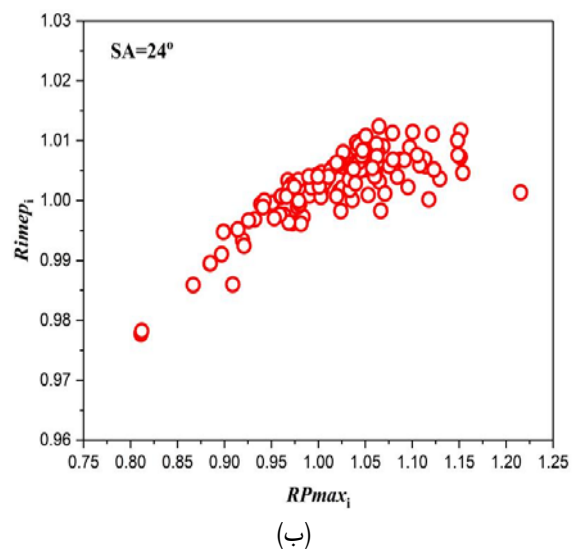
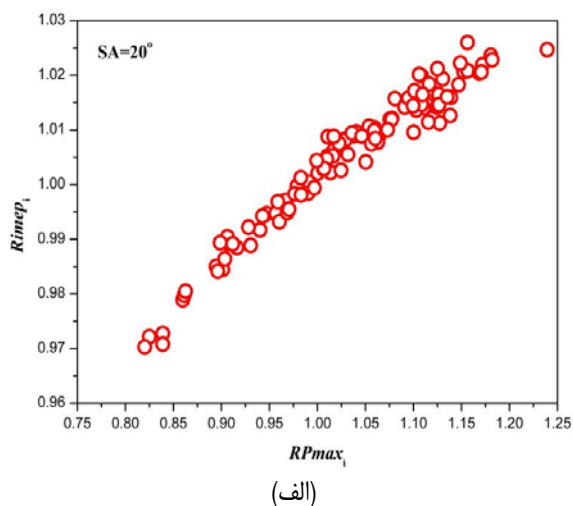
مشاهده می‌شود که در نمودار پرش جرقه، آهنگ تغییر فشار قبل از قله فشار بیشتر از حالت بدون پرش جرقه است و علت آن پر بودن کامل محفظه استوانه با مخلوط سوخت-هوا قبل از جرقه شمع است که می‌تواند آهنگ آزادسازی انرژی و سرعت شعله را افزایش دهد.



شکل ۳: تغییرات چرخه‌ای فشار در پیش‌رسی بهینه جرقه برای حالت‌های (بالا) بدون پرش جرقه و (پایین) با پرش جرقه

شکل ۴ تغییرات $imep$ بر حسب پیش‌رسی جرقه را با سوخت CNG برای چرخه‌های احتراقی در دو حالت بدون پرش جرقه و با پرش جرقه بدون گاز سوخته نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در هر دو حالت جهت تقعر منحنی رو به پایین و پیش‌رسی بهینه جرقه برای دو حالت بدون پرش جرقه و با پرش جرقه بترتیب ۳۵° و ۲۶ درجه میل لنگ است.

نزولی پیدا می‌کند. از ویژگی مهم نمودار پیش‌رسی بهینه جرقه می‌توان به این نکته اشاره کرد که اگر پراکندگی نقاط به شکل یک منحنی با تفرع رو به پایین در نظر گرفته شود، در ابتدای منحنی فاصله نقاط از هم زیاد است، سپس در محدوده اوج آن تجمع نقاط افزایش یافته و در آخر نقاط با فاصله بیشتر سیر نزولی پیدا کرده است.



شکل ۵: تغییرات قلّه فشار چرخه معادل فرضی و موقعیت وقوع آن بر حسب پیش‌رسی جرقه برای حالت‌های (بالا) بدون پرش جرقه و (پایین) با پرش جرقه

مقادیر نسبی $imep_i$ و P_{max} برای هر چرخه تجربی i ام از آزمایش در یک پیش‌رسی مشخص بترتیب از معادلات (۴) و (۵) [۱۷].

$$Rimep_i = \frac{imep_i}{imepeq} \quad (۴)$$

$$RP_{max,i} = \frac{P_{max,i}}{P_{max,eq}} \quad (۵)$$

که در آن $imep_i$ و $P_{max,i}$ بترتیب مقادیر فشار مؤثر متوسط اندیکه و قلّه فشار چرخه i ام، $Rimep_i$ و $RP_{max,i}$ بترتیب مقادیر نسبی و $P_{max,eq}$ قلّه فشار چرخه معادل است.

با استفاده از مقادیر نسبی تعریف شده می‌توان تغییرات چرخه‌ای آنها را در پیش‌رسی‌های مختلف مقایسه کرد. شکل ۶ (الف) تا (ه) تغییرات $Rimep_i$ بر حسب $RP_{max,i}$ چرخه‌های آزمایش را در پیش‌رسی بهینه (۲۶°) و چهار پیش‌رسی دیگر در تقارن با آن (۲۰°، ۲۴°، ۲۸° و ۳۲°) در حالت با پرش جرقه نشان می‌دهد. با توجه به شکل در کمترین پیش‌رسی جرقه (۲۰°) منحنی تغییرات داده‌ها سیر صعودی دارد و با افزایش پیش‌رسی جرقه شکل مجموعه داده‌ها تغییر یافته و در پیش‌رسی بهینه جرقه (۲۶°) تقریباً مسطح شده و در پیش‌رسی بالا (۳۲°) سیر

دو حالت با پرش جرقه و بدون پرش جرقه مشاهده شد که آهنگ تغییر فشار قبل از قلّه فشار حالت با پرش جرقه بیشتر از حالت دیگر است.

- تحت شرایط آزمایش مورد نظر پیشرسی بهینه حالت با پرش جرقه کمتر از مقدار حالت بدون پرش جرقه بود و اختلاف آنها در این مقایسه حدود ۹ درجه برآورد شد. همچنین مشاهده شد که پیشرسی بهینه حاصله برای حالت با پرش جرقه پیشرسی نامناسبی برای حالت بدون پرش جرقه بود و بالعکس.
- با جایگزینی گازهای سوخته باقیمانده با مخلوط سوخت-هوا تحت شرایط مذکور موقعیت وقوع قلّه فشار در پیشرسی بهینه حدود ۴ درجه دیرتر ظاهر شد.
- با تعریف مقادیر نسبی $Rimep_i$ و P_{max} درحالت با پرش جرقه، تغییرات $Rimep_i$ برحسب $RP_{max,i}$ چرخه‌های آزمایش در پیشرسی بهینه و چهار پیشرسی دیگر در تقارن با آن بررسی و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین آنها مشاهده شد. از ویژگی مهم نمودار پیشرسی بهینه جرقه می‌توان به پراکندگی نقاط به شکل یک منحنی با تقعر رو به پایین با فاصله زیاد بین نقاط در ابتدای منحنی، سپس تجمع نقاط در محدوده اوج آن و فاصله بیشتر نقاط در انتهای منحنی با سیر نزولی اشاره کرد.

فهرست علائم

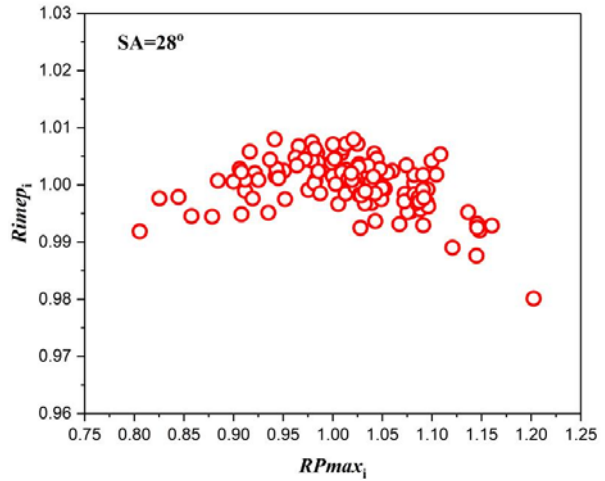
$imep$	فشار مؤثر متوسط اندیکه، bar
P	فشار، bar
$Rimep$	فشار مؤثر متوسط اندیکه نسبی
RP_{max}	قلّه فشار نسبی
V	حجم، cm^3
W	کار، J

علائم یونانی

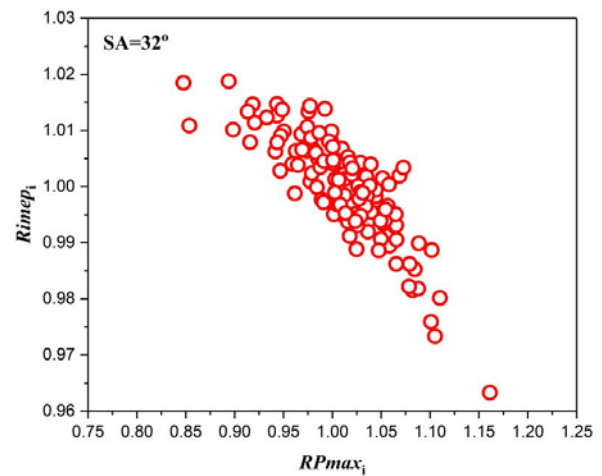
ϕ	نسبت هم‌ارزی
λ	نسبت اضافه هوا
θ	زاویه میل‌لنگ

زیرنویس‌ها

C	چرخه
eq	معادل
i	شماره چرخه
d	جابجا شده



(د)



(ه)

شکل ۶: تغییرات $Rimep_i$ برحسب $RP_{max,i}$ به ازای پیشرسی‌های - جرقه (الف) 20° ، (ب) 24° ، (ج) 26° ، (د) 28° و (ه) 32° در نسبت هم‌ارزی ۰٫۹، با استفاده از سوخت گاز طبیعی

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی تجربی تاثیر گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبل روی پیشرسی بهینه جرقه، قلّه فشار و موقعیت وقوع آن با سوخت CNG پرداخته است. آزمایش‌ها روی یک موتور تک استوانه پژوهشی چهار زمانه انجام گرفت و برای حذف گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبل از راهبرد پرش جرقه ۴ به ۲ استفاده شد.

با توجه به اینکه در حالت با پرش جرقه (بدون گاز سوخته باقیمانده از چرخه قبل) استوانه به طور کامل از مخلوط سوخت-هوا پر می‌شود و سرعت سوختن، انرژی در دسترس و آهنگ آزادسازی آن و آهنگ تغییر فشار متأثر می‌شود، از تحلیل نتایج برای دو حالت بدون پرش جرقه (با گاز سوخته باقیمانده از چرخه قبل) و با پرش جرقه نتایج زیر حاصل شد:

- از مقایسه نمودارهای فشار داخل استوانه برحسب زاویه میل‌لنگ چرخه معادل حاصله از چرخه‌های تجربی در پیشرسی‌های بهینه

مراجع و منابع

- [9] M. Stabinsky, W. Albertson, J. Tuttle, D. Kehr, J. Westbrook, H. Karbstein, and M.Kuhl, Active Fuel Management Technology: Hardware Development on a 2007 GM 3.9L V-6 OHV SI Engine, SAE Technical Paper Series, 2007-01-1292
- [10] S. Kevin Chen, L. Chien, M. Ngashima, J. V. Ess, and S. Hashemi, Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine, SAE International Journal of Engines, Vol.8, No. 2, pp. 389-398, 2015
- [11] B. Mohamadi, Derivation of Experimental Pressure-Crank Angle for Free Burned Residual Gas Cycles and their Analysis, M. Sc. Thesis, University of Mohaghegh Ardabili, 2015
- [12] E. Abdi Aghdam, M. Ghorbanzadeh, The effect of different fuels (gasoline & CNG) on cyclic variations of a spark ignition engine running on lean mixture, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 101-108, 2014.
- [13] E. Abdi Aghdam, B. Farhang, M. Sarabi, Experimental study of a spark ignition single cylinder research engine exhaust emissions in gasoline and natural gas fuel cases, The Journal of Engine Research, Vol. 39, pp. 49-55, 2015
- [14] E. Abdi Aghdam, M. Bashi, Experimental study on effect of cycle-to-cycle variability on HC emission in a SI engine, The Journal of Engine Research, Vol. 33, pp. 23-30, 2014
- [15] E. Abdi Aghdam, M. Bashi, Experimental study of the effect of gasoline injection start position on cyclic variation of a single cylinder research SI engine, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 35-42, 2014
- [16] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill International Editions, 1988
- [1] H. N. Gupta, Fundamentals of internal combustion engines, New Dehli: Prentice-Hall of India, 2006
- [2] K. Eisazadeh-Far, and M. Younkings, Fuel Economy Gains through Dynamic-Skip-Fire in Spark Ignition Engines, SAE Technical Paper Series, 2016
- [3] S. Cong, G. P. Mctaggart-Cowan, and C. P. Garner, Measurement of Residual Gas Fraction in a Single Cylinder HSDI Diesel Engine through Skip-firing, SAE Technical Paper Series, 2009.
- [4] Z. Yan, H. Zhao, M. Peckham, and B. Campbell, Direct In-cylinder CO₂ Measurements of Residual Gas in a GDI Engine for Model Validation and HCCI Combustion Development, SAE Technical Paper Series, 2013
- [5] S. Kota, J. Kako, J. Yang, A. Ohata, and T. Shen, Effect of Transient Residual Gas Fraction for Gasoline Engines, IFAC Proceedings, Vol.46, No. 21, pp. 588-93, 2013
- [6] Y. Jun, T. Shen, and X. Jiao, Model-Based Stochastic Optimal Air-Fuel Ratio Control With Residual Gas Fraction of Spark Ignition Engines, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.22, No. 3, pp. 896-910, 2014
- [7] M. Sellnau, J. Sinnamon and L. Oberdier, C. Dase, M. Viele, K. Quillen, J. Silvestri, and I. Papadimitriou, Development of a Practical Tool for Residual Gas Estimation in IC Engines, SAE Technical Paper Series, 2009-01-0695
- [8] A. Falkowski, M. Mcelwee, and M. Bonne, Design and Development of the DaimlerChrysler 5.7L HEMI® Engine Multi-Displacement Cylinder Deactivation System, SAE Technical Paper Series, 2004-01-2106



The Effect of Burned Residual Gases on Optimum Ignition Timing Using Skip Fire Technique

E. Abdi Aghdam^{1*}, M. Ataee Tarzanagh²

¹University of Mohaghegh Ardabili, eaaghdam@uma.ac.ir

²University of Mohaghegh Ardabili, majidataie60@gmail.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 June 2017

Accepted: 11 September 2018

Keywords:

Burned residual gas

Skip fire

Optimum ignition advance

SI engine

CNG

ABSTRACT

In this paper the effect of burned residual gases on optimum ignition timing has been investigated using experimental data extracted from a single cylinder spark-ignition research engine at 1800 rpm and 0.9 equivalence ratio with CNG as fuel. To omit the residual gases, skip fire technique was utilized. The raw data including signals of in-cylinder pressure, inlet pressure, crank angle and TDC were recorded; then the data were processed by a program written in Fortran field; and variations of cylinder pressure versus crank angle, indicated mean effective pressures and peak pressures of identical cycles were calculated. Finally, from the obtained results at different timings, the optimum ignition timings of two cases, with and without burned residual gases, were determined and the peak pressures of the cases were compared. The obtained results showed that when burned residual gases were replaced by unburned gases, optimum advance was retarded about 9 degrees and peak pressure position of the equivalent cycle was appeared 4 degrees longer far away TDC. Cyclic variation of identical cycles in skip fire case showed that the configuration of the data distribution of $Rimep-RP_{max}$ at optimum ignition timing had a considerable difference than those of the others.

