



## تأثیر گازهای سوخته باقیمانده چرخه قبل روی عملکرد احتراقی موتور ترکیب سوز بنزین - گاز طبیعی با روش پرش جرقه

مهرداد سرابی<sup>۱</sup>، ابراهیم عبدی اقدم<sup>۲\*</sup>، سید کاظم یکانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، [M\\_Sarabi@uma.ac.ir](mailto:M_Sarabi@uma.ac.ir)

<sup>۲</sup>استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، [Eaaghdam@uma.ac.ir](mailto:Eaaghdam@uma.ac.ir)

<sup>۳</sup>استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران، [S.K.Yekani@uma.ac.ir](mailto:S.K.Yekani@uma.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۰ دی ۱۳۹۹

پذیرش: ۰۶ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

گاز سوخته باقیمانده

پرش جرقه

ترکیب سوز

بنزین

گاز طبیعی

### چکیده

موتورهای اشتعال جرقه‌ای از جمله تجهیزات مرسوم برای تولید توان جهت مصارف گوناگون‌اند. با ترکیب سوز کردن موتورهای اشتعال جرقه‌ای توسط دو سوخت بنزین و گاز طبیعی و بررسی تغییرات مقدار گازهای سوخته از چرخه قبل در چرخه‌های احتراقی، می‌توان شرایط عملکردی موتور را بهبود بخشید. استخراج نتایج تجربی کار حاضر از یک موتور اشتعال جرقه‌ای تک استوانه در پیش‌رسی‌های مختلف جرقه، در نسبت تراکم ۱۰، سرعت موتور ۱۸۰۰ د.د.د. و حالت ترکیب سوز ۷۵٪ جرمی بنزین - ۲۵٪ جرمی گاز طبیعی در شرایط نسبت هم‌ارزی استوکیومتری برای شرایط بدون پرش جرقه و با پرش جرقه انجام شد. داده‌های خام مستخرج توسط برنامه رایانه‌ای پردازش شد تا منحنی فشار درون استوانه-زاویه لنگ و فشار مؤثر متوسط نظری برآورد گردد. با بررسی نمودارهای چرخه معادل فرضی متوجه از چرخه‌های تجربی در پیش‌رسی‌های بهینه جرقه ملاحظه شد که آهنگ تغییرات فشار درون استوانه قبل از قله فشار در شرایط با پرش جرقه بیشتر بوده و اختلاف پیش‌رسی بهینه جرقه در شرایط با پرش جرقه و بدون پرش جرقه، ۹ درجه میل لنگ بدست آمد. انحراف معیار و ضریب تغییرات برای فشار مؤثر متوسط نظری در شرایط با پرش جرقه کمتر بود و به عبارتی تغییرات چرخه‌ای کمتری در شرایط با پرش جرقه ملاحظه شد. همچنین آهنگ تغییرات کسر جرمی سوخته در شرایط با پرش جرقه بیشتر از بدون پرش جرقه مشاهده شده و حاکی از احتراق سریعتر در شرایط با پرش جرقه بود.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

موتورهای اشتعال جرقه‌ای از جمله تجهیزات مرسوم برای تولید توان جهت مصارف گوناگون اند. هزینه‌های بالای تولید و مصرف سوخت بنزین در مقایسه با گاز طبیعی به خصوص در ایران، نیاز به اخذ تصمیم‌هایی در جهت کم کردن هزینه مصرف سوخت را دوچندان نموده است. همچنین موتورهای با سوخت بنزین مقاومت به کوبش کمتر و تولید توان بیشتری را در نسبت تراکم یکسان دارند [۱].

با توجه به موارد بیان شده می‌توان با ترکیب‌سوز کردن موتورهای اشتعال جرقه‌ای توسط دو سوخت بنزین و گاز طبیعی و همچنین بررسی تغییرات مقدار گازهای سوخته از چرخه قبل در چرخه‌های احتراقی، شرایط عملکردی موتور را بهبود بخشید. لذا تحلیل متغیرهای احتراقی و اثرات عملکردی موتورهای اشتعال جرقه‌ای، به خصوص با بررسی تغییر مقدار گازهای سوخته از چرخه قبل در شرایط ترکیب‌سوز را می‌توان جزو پژوهش‌های نوین و کارآمد در این حوزه قلمداد نمود.

وجود گازهای سوخته باقی مانده از چرخه قبل در موتورهای تنفس طبیعی اشتعال جرقه‌ای حتی در شرایط بار کامل غیر قابل انکار بوده و مقادیر این گازها عموماً با افزایش نسبت تراکم، کاهش یافته و با تقلیل بار موتور افزایش پیدا می‌کند [۲ و ۳].

حضور گازهای سوخته از چرخه قبل در مخلوط سوخت-هوا منجر به تغییر در سرعت شعله، طول زمان احتراق، فشار مؤثر متوسط نظری<sup>۱</sup>، کسرگونه‌های گازهای خروجی و پیش‌رسی بهینه جرقه می‌شود. گازهای سوخته از چرخه قبل در نقش رقیق کننده مخلوط سوخت-هوا ظاهر شده و عملاً منجر به کاهش مقدار سوخت ورودی به هر چرخه گشته و در نهایت به کم شدن مقدار انرژی به ازای واحد جرمی مخلوط می‌انجامد. این مسئله می‌تواند بر کیفیت توسعه شعله و آهنگ انرژی آزاد شده آن اثر منفی گذاشته و زمان تناوب احتراق را طولانی کند [۲].

از سوی دیگر با توجه به اینکه دمای گازهای سوخته از چرخه قبل بالا می‌باشد، باعث افزایش دمای مخلوط سوخت-هوا شده و ممکن است اثر مثبت بر سرعت احتراق و پیش‌رسی بهینه جرقه بگذارد. بدین جهت مطالعه تأثیرات گازهای سوخته از چرخه قبل بر روی مولفه‌های عملکردی و احتراقی موتور ضروری به نظر می‌رسد [۴ و ۵].

لذا در تأیید و معتبرسازی برنامه‌های رایانه‌ای شبیه‌سازهای ترمودینامیکی موتورهای اشتعال جرقه‌ای [۶] نیز شایسته است ابتدا فرآیند تأیید برنامه رایانه‌ای به کمک چرخه‌های تجربی عاری از گازهای سوخته چرخه قبلی انجام پذیرد تا تأیید و معتبرسازی برنامه‌های رایانه‌ای شبیه‌ساز ترمودینامیکی از دقت بهتری برخوردار باشند.

استخراج نتایج تجربی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای در شرایطی که مقداری از گازهای سوخته از چرخه قبل در چرخه احتراقی باقی بماند امری مرسوم و متداول بوده [۷ و ۸] ولی استخراج داده‌های تجربی عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل نیازمند ساختارها و تجهیزات پیچیده تری است.

یکی از روش‌های مناسب در بحث استخراج چرخه‌های عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل، به کار بردن روش پرش جرقه است. در روش پرش جرقه با سوخت‌رسانی متداول موتور، به ازای هر  $m$  چرخه فقط در چرخه ابتدایی احتراق رخ داده و مابقی  $m-1$  چرخه بصورت موتور گردانی خواهد بود. در اولین چرخه موتور گردانی بعد از چرخه احتراقی، گازهای سوخته از چرخه قبلی حضور خواهد داشت. اما هنگامی که در چرخه موتورگردانی فرآیند مکش و تخلیه رخ می‌دهد، غلظت گازهای سوخته در گازهای باقی مانده برای چرخه بعدی به مراتب کمتر می‌شود.

سلنا<sup>۲</sup> و همکاران [۹]، مطالعاتی را به کمک ابزارهای کاربردی جهت برآورد گازهای باقیمانده سوخته از چرخه قبل در موتورهای احتراق داخلی انجام دادند. آنها با استفاده از سنسورهای سنجش  $CO_2$  در داخل استوانه و روش پرش جرقه موفق به تخمین کسر گازهای باقیمانده در داخل استوانه شدند.

محمدی [۱۰] به کمک روش پرش جرقه، نتایج تجربی فشار-زاویه میل‌لنگ چرخه‌های بدون گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبلی را استخراج کرد و با تمرکز بر روی imep در نسبت پرش جرقه‌های مختلف به این نتیجه رسید که در نسبت پرش جرقه ۴ به ۱ که شامل دسته چرخه‌های ۴ چرخه‌ای است و فقط چرخه اول احتراقی بوده و ۳ چرخه بعدی چرخه‌های موتورگردانی اند، اطمینان کافی برای عدم حضور گازهای سوخته باقیمانده از چرخه قبل حاصل می‌شود.

روبینت<sup>۳</sup> و هیگلین<sup>۴</sup> [۱۱] در یک پژوهش از روش پرش جرقه استفاده نموده و تخمین زدند که در روش پرش جرقه به ازای هر چهار چرخه، ۱ چرخه اشتعالی و ۳ چرخه پرش وجود داشته باشد، در بدترین شرایط در حدود ۰٫۱ درصد گاز سوخته از قبل در چرخه اشتعالی فعلی وجود خواهد داشت.

عبدی اقدم و عطایی [۱۲] بر روی یک موتور اشتعال جرقه‌ای با سوخت گاز طبیعی شرایط چرخه‌های با پرش جرقه را بررسی کرده و نشان دادند که چرخه‌های با پرش جرقه و بدون پرش جرقه دارای پیش‌رسی بهینه جرقه متفاوتی اند.

در چند سال اخیر با استفاده از روش پرش جرقه پژوهش‌هایی با هدف تشخیص احتراق ناقص [۱۳]، کاهش آلایندگی [۳] و کاهش مصرف سوخت در بارها و دوره‌های کم موتور [۱۴] و همچنین دستیابی به

<sup>3</sup> Robinet

<sup>4</sup> Higelin

<sup>1</sup> imep

<sup>2</sup> Sellnau

نادالتی<sup>۴</sup> و همکاران [۲۴] در یک موتور اشتعال جرقه‌ای به بیوگاز، هیدروژن اضافه نموده و به کمک محاسبه کسر جرمی سوخته به روش راسوایلر-ویدروت نشان دادند که با افزودن هیدروژن به مخلوط طول احتراق کاهش می‌یابد.

هوتا<sup>۵</sup> و همکاران [۲۵] در یک موتور تک استوانه اشتعال جرقه‌ای با سوخت‌های بنزین و بیوگاز، مخلوط سوخت و هوا را همگن در نظر گرفته و کسر جرمی سوخته را محاسبه نمودند.

در مقاله حاضر نتایج تجربی تغییرات فشار داخل استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ در دو حالت چرخه‌های احتراقی با گازهای سوخته از قبل و چرخه‌های احتراقی عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل تحت شرایط ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی با نسبت ۷۵ درصد جرمی بنزین و ۲۵ درصد جرمی گاز طبیعی در سرعت موتور ۱۸۰۰ د.د.د.، نسبت تراکم ۱۰ و نسبت هم‌ارزی استوکیومتری در پیش‌رسی‌های مختلف جرقه استخراج شد. سپس تغییرات imep، کسر جرم سوخته، مقدار قله فشار و زاویه وقوع قله فشار در شرایط با پرش و بدون پرش جرقه بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در کار حاضر از سکوی آزمایش ساخت شرکت گونت<sup>۶</sup> آلمان مدل CT300 با یک موتور پژوهشی تک استوانه اشتعال جرقه‌ای جفت شده به یک لگام ترمز آسنکرون با قابلیت تنظیم سرعت استفاده شده‌است.

سامانه‌های سوخت‌رسانی به صورت دو مجموعه مجزا برای سوخت-های گاز طبیعی و بنزین و همچنین زمانبندی جرقه طی پژوهش‌هایی [۲۶-۲۸] از حالت سوخت آمایی و مکانیکی به افشانه برقی با قابلیت تنظیم زمان آغاز پاشش و طول پاشش سوخت‌ها و زمانبندی جرقه توسط کاربر ارتقا یافته است به طوری که امکان کار موتور با سوخت بنزین و یا گاز طبیعی و حالت ترکیب‌سوز (بنزین-گاز طبیعی) وجود دارد.

همچنین این موتور توانایی کار در شرایط با پرش جرقه با حالت‌های مختلف را دارد که امکان تعیین تعداد چرخه‌های احتراقی پشت‌سرهم و چرخه‌های موتورگردانی پشت‌سرهم را در هر دسته چرخه میسر می‌سازد.

در این پژوهش برای استخراج چرخه‌های با پرش جرقه از دسته چرخه‌های ۷ تایی (۳ احتراق پشت‌سرهم و ۴ موتورگردانی پشت‌سرهم در هر دسته چرخه) با ۲۰۰ تناوب استفاده شده و چرخه‌های اول احتراقی هر دسته چرخه به عنوان چرخه عاری از گازهای سوخته از چرخه قبل با عنوان چرخه با پرش جرقه انتخاب شده‌اند.

چرخه‌های اشتعالی عاری از گازهای باقیمانده از چرخه قبلی انجام شده‌است.

با در نظر گرفتن اینکه رشد شعله در فاز اولیه احتراق از سرعت سوختن آرام مخلوط سوخت-هوا تأثیرپذیری بیشتری دارد و با ترکیب دو سوخت مختلف، این مشخصه از مخلوط دستخوش تغییر می‌شود، اهمیت سرعت سوختن آرام مبرهن و روشن است. بالو و همکاران با استفاده از هیدروکربن‌های پایه خالص متان و ایزو اوکتان سرعت سوختن آرام و ناپایداری شعله را بررسی کرده و نشان دادند که با افزودن متان به ایزو اوکتان سرعت گسترش شعله [۱۵و۱۶] در بازه فقیرسوز افزایش یافت. با استفاده از سوخت‌های رایج بنزین و گاز طبیعی، عبدی‌اقدام و همکاران [۱۷] با افزودن گاز طبیعی به بنزین در بمب حرارتی کروی با فشار اولیه ۵ بار از روی داده‌های تجربی سرعت سوختن آرام مخلوط را با استفاده از روش فشار-مبنا محاسبه کرده و نشان دادند که با افزایش درصد گاز طبیعی در ترکیب، سرعت سوختن لایه‌ای افزایش می‌یابد.

راماسامی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۸] بر روی یک موتور اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی با سوخت غالب گاز طبیعی، متغیرهای عملکردی موتور را در حالت ترکیب سوز با شرایط تک سوخت گاز طبیعی مقایسه کرده و مشاهده نمودند که با افزایش مقدار بنزین در مخلوط نسبت به گاز طبیعی گشتاور افزایش یافته است. در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش راهگاهی با سوخت‌های بنزین و گاز طبیعی بصورت ترکیب‌سوز، موحد و همکاران [۱۹] یک پژوهش تجربی را در موتور بار کامل توربو شارژ انجام داده و نشان دادند که با افزایش درصد گاز طبیعی در حالت ترکیب‌سوز، مقادیر آلاینده‌های CO و HC کاهش یافت.

سربای و عبدی‌اقدام [۲۰و۲۱] عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای ترکیب-سوز بنزین-گاز طبیعی را در نسبت تراکم‌های ۹ و ۱۰ بررسی کرده و نشان دادند که با افزودن گاز طبیعی به ترکیب imep و عموم آلاینده-ها کاهش می‌یابد.

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای پاشش راهگاهی سوخت و هوا قبل از ورود به محفظه احتراق مخلوط شده و می‌توان شرایط درون محفظه احتراق را همگن فرض نموده و متغیرهای احتراقی را بررسی کرد.

موکسی<sup>۲</sup> و همکاران [۲۲] رشد شعله در یک موتور اشتعال جرقه‌ای به کمک تصویربرداری از شعله برای بنزین با افزودن اتانول و بوتانول را انجام دادند. آنها نشان دادند که ضریب تغییرات imep برای مخلوط بوتانول-بنزین کمترین و طول احتراق سریع با روش راسوایلر-ویدروت<sup>۳</sup> [۲۳] برای بنزین کمترین است.

<sup>4</sup> Nadaleti

<sup>5</sup> Hotta

<sup>6</sup> Gunt

<sup>1</sup> Ramasamy

<sup>2</sup> Moxey

<sup>3</sup> Rassweiler-Withrow

در این موتور پاشش سوخت‌های گاز طبیعی و بنزین به صورت افشانه‌ای به راهگاه ورودی موتور مذکور انجام گرفته است و میزان پاشش هر افشانه (طول پاشش)، زاویه آغاز پاشش و زمانبندی جرعه به کمک مجموعه مدیریت موتور تنظیم شد. نظر به امکان تأثیر فشار محل پاشش، افشانه‌های بنزین و گاز طبیعی موتور تحت شرایط مختلف طول پاشش و فشار محل پاشش تنظیم شدند [۲۸].

در کار حاضر فرمول شیمیایی متوسط بنزین  $C_{7.76}H_{13.1}$  [۲۹] با چگالی ۷۴۶ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شد. ترکیب گاز طبیعی به شرح جدول (۲) بر پایه درصد حجمی گونه‌ها [۱۷] با فرمول شیمیایی متوسط بخش هیدروکربن  $C_{1.04}H_{3.97}$  استفاده شد. از ترکیب گاز طبیعی حدود ۹۴٫۹۱ درصد مربوط به هیدروکربن‌ها و مابقی بصورت ناخالصی از  $CO_2$  و  $N_2$  بود.

جدول ۲: اجزاء سازنده گاز طبیعی [۱۷]

ترکیبات سازنده	درصد اجزا
CH4	۸۸٫۳۲۳
C2H6	۴٫۶۷۲
C3H8	۱٫۱۳۷
C4H10	۰٫۴۸۴
C5H12	۰٫۱۸۱
CO2	۰٫۶۹۴
N2	۴٫۵

### ۳- روش انجام آزمایش

در کار پیش‌رو ابتدا موتور در نسبت تراکم ۱۰ سرعت ۱۸۰۰rpm و حالت ترکیب سوز ۷۵٪ جرمی بنزین-۲۵٪ جرمی گاز طبیعی به صورت بارکامل در شرایط نسبت هم‌ارزی استوکیومتری در شرایط کاری و حالت پایا بدون پرش جرعه راه‌اندازی و در پیش‌رسی‌های مختلف جرعه داده برداری شد. داده‌برداری به صورت ۲۰۰ چرخه پشت‌سرهم در پیش‌رسی‌های مختلف انجام گرفت.

سپس در حالت با پرش جرعه از دسته چرخه‌های ۷ تایی که ۳ چرخه احتراق متوالی و ۴ چرخه موتورگردانی با سوخت متوالی را شامل بود، با ۲۰۰ تناوب استفاده شد که برای داده برداری هر پیش‌رسی جرعه با پرش جرعه ۱۴۰۰ چرخه پشت‌سرهم ثبت و ضبط شد.

در شرایط با پرش جرعه نیز داده برداری در پیش‌رسی‌های مختلف جرعه انجام شد. داده‌های خام استخراج شده، به کمک یک برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن به چرخه‌های متوالی پردازش شدند تا بتوان منحنی  $P-\theta$  (فشار درون استوانه-زاویه لنگ) و  $imep$  برای هر چرخه و متوسط چرخه‌ها را استخراج کرد.

داده برداری در شرایط با پرش جرعه و بدون پرش جرعه در پیش‌رسی‌های مختلف جرعه انجام یافته و سپس پیش‌رسی بهینه جرعه برای هر حالت انتخاب شده است. مشخصات موتور پژوهشی مزبور در جدول ۱ به اختصار ذکر شده و شکل ۱ نمایی از این موتور پژوهشی تک استوانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات موتور پژوهشی CT300

قطر استوانه	۹۰ mm
پیمایش سمبه	۷۰ mm
حجم جابجایی	$470 \text{ cm}^3$
نسبت تراکم	۱۰
سامانه جرعه‌زنی	برقی با دقت یک درجه لنگ
سامانه سوخت‌رسانی	پاشش به مسیر ورودی موتور
سامانه روغن‌کاری	فشاری
روش خنک‌کاری	با آب
تعداد و موقعیت دریچه	۲ OHV
زاویه باز و بست دریچه ورودی	$50^\circ \text{ aBDC}$ باز و $0^\circ \text{ TDC}$
زاویه باز و بست دریچه خروجی	$40^\circ \text{ bBDC}$ باز و $8^\circ \text{ aTDC}$
نوع تنفس	طبیعی با صافی و مخزن آرامش
شکل محفظه	صفحه‌ای با سمبه سر تخت



شکل ۱: نمایی از موتور پژوهشی تک استوانه

#### ۴- نتایج و بحث

چنانکه در بخش قبلی شرح داده شد، داده‌های تجربی در دو حالت با پرش جرقه و بدون پرش جرقه در شرایط ترکیب سوز ۷۵٪ جرمی بنزین و ۲۵٪ جرمی گاز طبیعی استخراج شده و سپس توسط برنامه رایانه‌ای پردازش گردید.

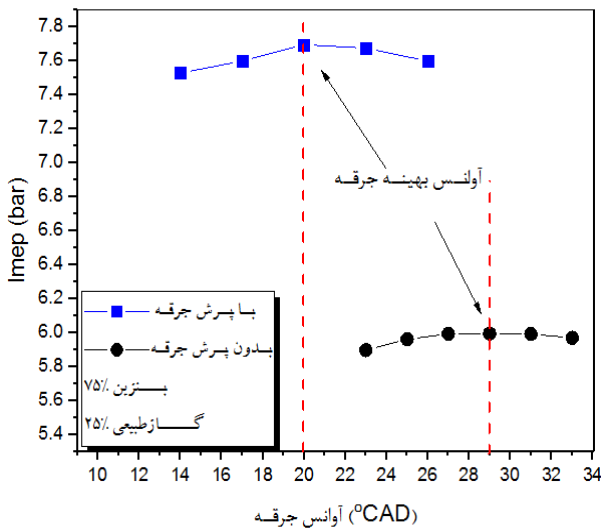
شکل ۲ تغییرات فشار بر حسب زاویه میل‌لنگ را برای چرخه‌های حقیقی با پرش جرقه و بدون پرش جرقه و همچنین چرخه معادل فرضی آنها را نشان می‌دهد و پیش‌رسی جرقه در حالت با پرش جرقه ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از مکث بالا و در حالت بدون پرش جرقه ۲۹ درجه میل‌لنگ قبل از مکث بالا است.

مشاهده می‌شود که در نمودار با پرش جرقه، شدت تغییرات فشار قبل از قلّه فشار بیشتر از حالت بدون پرش جرقه بوده و علت آن می‌تواند از عاری بودن مخلوط سوخت-هوای تازه قبل از جرقه شمع از گازهای سوخته از چرخه قبلی درون استوانه باشد.

شکل ۳ مقدار imep را بر حسب پیش‌رسی جرقه در مخلوط سوخت ۷۵٪ جرمی بنزین و ۲۵٪ جرمی گاز طبیعی در حالت‌های با پرش جرقه و بدون پرش جرقه نشان می‌دهد.

پیش‌رسی بهینه جرقه در حالت با پرش جرقه ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از مکث بالا و در حالت بدون پرش جرقه ۲۹ درجه میل‌لنگ قبل از مکث بالا بوده و پیش‌رسی بهینه جرقه در شرایط با پرش جرقه مقدار کمتری را ثبت کرد و همچنین دو پیش‌رسی بهینه مورد اشاره دارای اختلاف ۹ درجه ای بود.

علت این امر که پیش‌رسی بهینه جرقه در حالت با پرش جرقه کمتر مشاهده شد می‌تواند به پر بودن کامل استوانه با مخلوط سوخت-هوا مرتبط باشد که منجر به سرعت سوختن سریعتر و در نتیجه طول کوتاه‌تر زمان احتراق را سبب می‌شود.

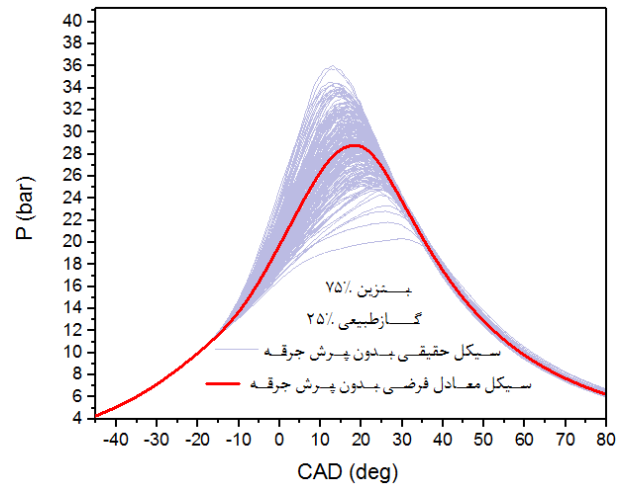


شکل ۳: تغییرات imep با پیش‌رسی جرقه در حالت با پرش جرقه و بدون پرش جرقه

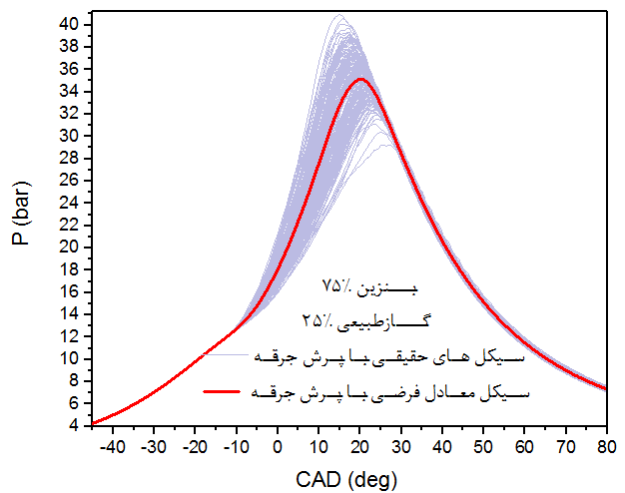
شکل ۴ مقدار imep و درصد تغییرات آن در هر چرخه را نسبت به مقدار میانگین در پیش‌رسی بهینه جرقه برای ۲۰۰ چرخه پشت سرهم بر حسب شماره چرخه در شرایط با پرش جرقه و بدون پرش جرقه نشان می‌دهد. درصد تغییرات داده‌ها از مقدار میانگین با DOV نشان داده شده و به صورت درصدی مطابق معادله (۱) نمایش داده می‌شود.

$$DOV(\%) = \frac{|\bar{x} - x_i|}{\bar{x}} \times 100 \quad (1)$$

که  $\bar{x}$  مقدار میانگین imep و  $x_i$  مقدار imep هر چرخه است. ملاحظه می‌شود که درصد تغییرات imep نسبت به مقدار میانگین در شرایط با پرش جرقه کمتر از حالت بدون پرش جرقه بوده و مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز در شرایط با پرش جرقه کمتر از حالت بدون پرش جرقه است.



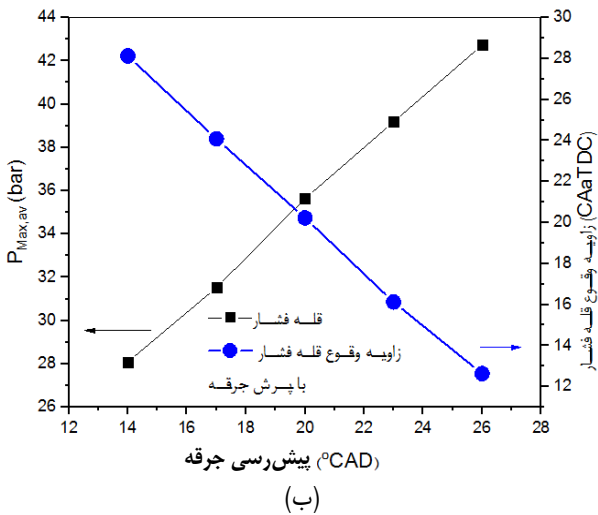
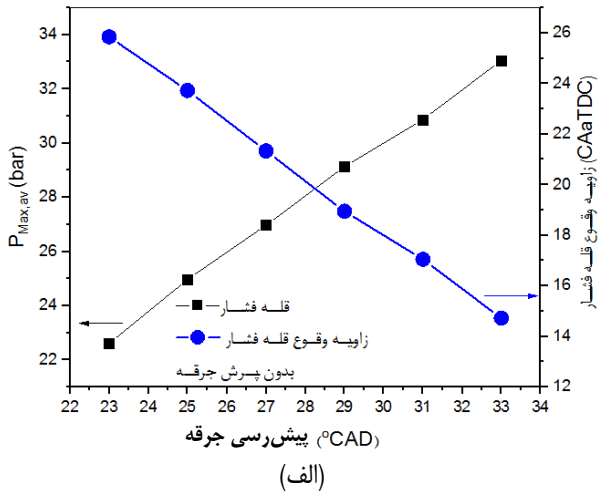
(الف)



(ب)

شکل ۲: تغییرات فشار بر حسب زاویه لنگ چرخه‌های حقیقی و چرخه معادل فرضی در شرایط: (الف) بدون پرش جرقه (ب) با پرش جرقه

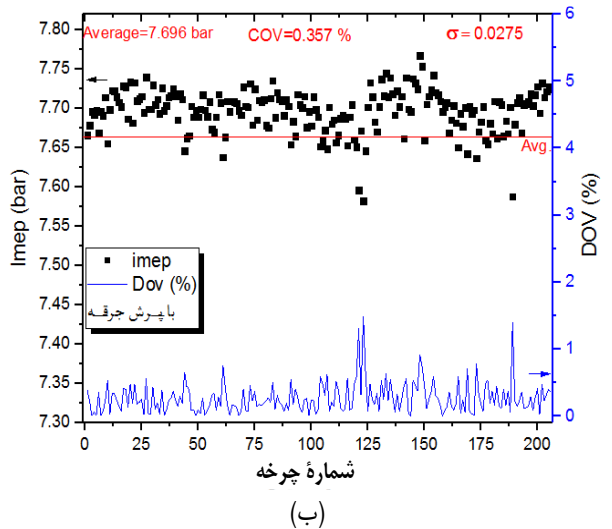
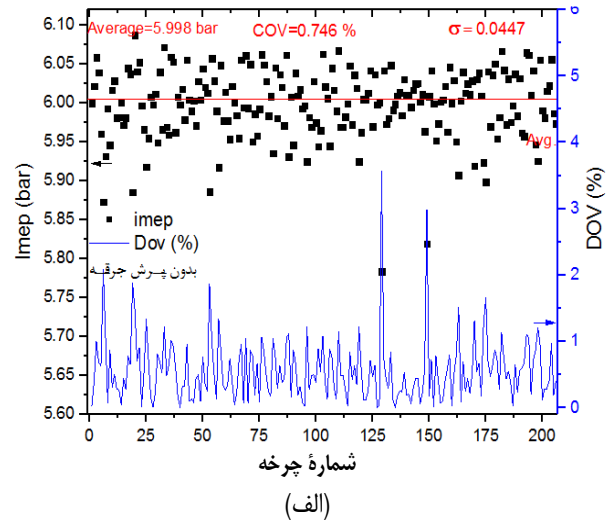
فشار بیشتر و زاویه قلّه فشار دورتر از نقطه مکث بالا نسبت به حالت بدون پرش جرقه می‌شود.



شکل ۵: تغییرات قلّه فشار و زاویه وقوع آن در حالات: (الف) بدون پرش جرقه (ب) با پرش جرقه

از تحلیل تغییرات فشار استوانه بر حسب زاویه لنگ و مشخصات هندسی موتور، در شرایط با پرش جرقه و بدون پرش جرقه به کمک روش راسویلر ویدروت [۲۳] تغییرات کسر جرم سوخته در طول احتراق برآورد شد. شکل ۶ کسر جرمی سوخته بر حسب زاویه میل‌لنگ با مبدا زمان‌بندی جرقه (CA<sub>FT</sub>) را در شرایط با پرش جرقه و بدون پرش جرقه در حالت ترکیب سوز ۷۵٪ بنزین و ۲۵٪ گاز طبیعی و پیش‌رسی بهینه نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود که نمودار کسر جرمی سوخته با پرش جرقه، بالاتر از نمودار بدون پرش جرقه قرار گرفته است. زمان تناوب توسعه اولیه احتراق که از موقعیت جرقه شمع تا ۱۰٪ کسر جرمی سوخته [۱۸] بر حسب گام زاویه‌ای میل‌لنگ بوده و همچنین ۹۰٪ کسر جرمی سوخته (طول احتراق کلی) [۲۹]، در شرایط با پرش جرقه بالاتر است.



شکل ۴: تغییرات imep و DOV بر حسب شماره ترتیب چرخه در پیش‌رسی بهینه جرقه در حالات: (الف) بدون پرش جرقه (ب) با پرش جرقه

شکل ۵ تغییرات قلّه فشار چرخه معادل فرضی و موقعیت وقوع آن بر حسب پیش‌رسی جرقه را در شرایط بدون پرش جرقه و با پرش جرقه در حالت ترکیب سوز ۷۵٪ جرمی بنزین و ۲۵٪ جرمی گاز طبیعی نشان می‌دهد. ملاحظه شد که موقعیت وقوع قلّه فشار در شرایط بدون پرش جرقه در پیش‌رسی بهینه جرقه، حدود ۱۹ درجه بعد از نقطه مکث بالا و وقوع قلّه فشار در شرایط با پرش جرقه در پیش‌رسی بهینه جرقه، حدود ۲۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا ظاهر می‌شود.

با توجه به اینکه در مرحله انبساط، انتقال گرما و حرکت سمبه سبب آهنگ منفی فشار شده و در مقابل، تداوم فرایند احتراق موجب آهنگ مثبت فشار می‌شود و در شرایط با پرش جرقه به دلیل نبود گازهای سوخته از چرخه قبل، انرژی مخلوط نسبت به حالت بدون پرش جرقه بیشتر است، بنابراین در آوانس‌های بهینه، تحت شرایط با پرش جرقه، آهنگ مثبت فشار بیشتری ناشی از احتراق در طول زاویه میل‌لنگ از مکث بالای سمبه اعمال شده و منجر به وقوع قلّه

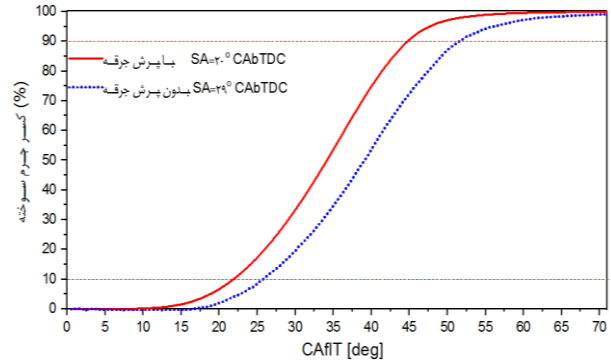
CAaTDC	زاویه لنگ بعد از مکث بالای سمیه
COV	ضریب تغییرات
imep	فشار مؤثر متوسط نظری
$P_{Ma,av}$	قله فشار متوسط
SA	پیش‌رسی جرکه
x	Imep چرخه حقیقی (تجربی)
$\bar{x}$	مقدار میانگین Imep
DOV	درصد تغییرات داده‌ها از مقدار میانگین

### علائم یونانی

$\sigma$	انحراف معیار
----------	--------------

### مراجع و منابع

- [1] Behrad R, Aghdam EA, Ghaebi H. Experimental study of knocking phenomenon in different gasoline-natural gas combinations with gasoline as the predominant fuel in a SI engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019 Jul 25:1-9.
- [2] H. N. Gupta, *Fundamentals of internal combustion engines*, New Dehli: Prentice-Hall of India, 2006
- [3] K. Eisazadeh-Far, and M. Younkins, *Fuel Economy Gains through Dynamic-Skip-Fire in Spark Ignition Engines*, SAE Technical Paper Series, 2016
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] سربای، مهرداد، عبدی اقدم، ابراهیم، بررسی پاسخ کد شبیه‌ساز چند منطقه‌ای مجهز به زیرمدل نشتی در موتور اشتعال جرکه‌ای ترکیب‌سوز. *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*, ۱۳۹۹؛ (۰): -  
doi: 10.22060/mej.2020.17679.6646
- [7] 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
- [8] 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
- [9] M. Sellnau, J. Sinnamon and L. Oberdier, C. Dase, M. Viele, K. Quillen, J. Silvestri, and I. Papadimitriou, *Development of a Practical Tool*



شکل ۶: تغییرات کسر جرم سوخته بر حسب زاویه لنگ در حالت با پرش جرکه و بدون پرش جرکه

### ۵- نتیجه گیری

موتور پژوهشی مورد استفاده در کار حاضر یک موتور تک استوانه اشتعال جرکه‌ای ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی مجهز به سامانه مهار برقی توسط کاربر بود. داده‌های تجربی مورد نیاز از این موتور تحت حالت‌های با پرش جرکه و بدون پرش جرکه به صورت ترکیب‌سوز ۷۵٪ بنزین-۲۵٪ گاز طبیعی در پیش‌رسی‌های مختلف جرکه استخراج شد. برای داده برداری چرخه‌های عاری از گاز سوخته از چرخه قبل، از روش پرش جرکه ۳ به ۴ (۳ احتراق و ۴ موتورگردانی) استفاده شد و از تحلیل نتایج برای دو حالت بدون پرش جرکه و با پرش جرکه نتایج زیر بدست آمد:

- با بررسی نمودارهای فشار داخل استوانه بر حسب زاویه لنگ چرخه معادل فرضی منتجه از چرخه‌های تجربی در پیش‌رسی بهینه جرکه در حالات با پرش جرکه و بدون پرش جرکه ملاحظه شد که آهنگ تغییرات فشار درون استوانه قبل از قله فشار در شرایط با پرش جرکه بیشتر است.
- اختلاف پیش‌رسی بهینه جرکه در شرایط با پرش جرکه و بدون پرش جرکه ۹ درجه میل لنگ بدست آمد و مشاهده شد که پیش‌رسی بهینه جرکه در شرایط با پرش جرکه به نقطه مکث بالای سمیه نزدیک‌تر است.
- انحراف معیار و ضریب تغییرات برای imep در شرایط با پرش جرکه کمتر از شرایط بدون پرش جرکه بود و به عبارتی تغییرات چرخه‌ای کمتری در شرایط با پرش جرکه ملاحظه شد.
- آهنگ تغییرات کسر جرم سوخته در شرایط با پرش جرکه بیشتر از بدون پرش جرکه مشاهده شده و حاکی از احتراق سریعتر در شرایط با پرش جرکه بود.

### فهرست علائم

CAD	زاویه میل لنگ
CAfIT	زاویه میل لنگ با مبدا زمانبندی جرکه

- [۲۰] سرابی مهرداد، عبدی اقدم ابراهیم. عملکرد موتور تک استوانه اشتعال جرقه‌ای در حالت ترکیبی سوز (بنزین- گاز طبیعی) با سوخت غالب بنزین تحت شرایط استوکیومتری. مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۹۸؛ ۲۰ (۲): ۲۸۷-۲۹۵
- [21] Sarabi, M., Abdi Aghdam, E. Experimental analysis of in-cylinder combustion characteristics and exhaust gas emissions of gasoline-natural gas dual-fuel combinations in a SI engine. *J Therm Anal Calorim* 139, 3165-3178 (2020).
- [22] Moxey, B. G., Cairns, A., & Zhao, H. (2016). A comparison of butanol and ethanol flame development in an optical spark ignition engine. *Fuel*, 170, 27-38.
- [23] Rassweiler, G., Withrow, L. 1936. Motion picture of engine flames correlated with pressure cards. Research laboratories division, General Motors corp.
- [24] Nadaleti, W. C., Przybyła, G., Belli Filho, P., & Souza, S. (2017). Methane-hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Efficiency and pollutant emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(49), 29585-29596.
- [25] Hotta, S. K., Sahoo, N., & Mohanty, K. (2018). Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas. *Renewable Energy*.
- [۲۶] عبدی اقدم ابراهیم، باشی محسن. تأثیرپذیری مشخصه‌های عملکردی موتور اشتعال جرقه‌ای تک استوانه با تغییر موقعیت شروع پاشش سوخت‌های بنزین و گاز طبیعی. مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۹۴؛ ۱۵ (۸): ۱۴۲-۱۳۴
- [۲۷] عبدی اقدم ابراهیم، قربانزاده مجتبی. اثر نوع سوخت (بنزین و گاز طبیعی) روی تغییرات چرخه‌ای یک موتور اشتعال جرقه‌ای در حالت مخلوط فقیر. مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۹۲؛ ۱۳ (۱۲): ۱۰۸-۱۰۱
- [۲۸] عبدی اقدم ابراهیم، سرابی مهرداد، قنبری ایوب. مقایسه عملکردی و آلاینده‌ی موتور اشتعال جرقه‌ای ترکیب سوز بنزین- گاز طبیعی با حالت تک سوخت بنزین و گاز طبیعی. یازدهمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز و نفت. ۱۳۹۸
- [29] Heywood, J.B., *Internal combustion engine fundamentals*. Vol. 930. 1988: Mcgraw-hill New York.
- for Residual Gas Estimation in IC Engines, SAE Technical Paper Series, 2009-01-0695
- [10] 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
- [11] Robinet C, P Higelin. 1998. Crossed Study of Residual Gas Rate-Firing Device for a Better Understanding of SI Engines Cycle-to-Cycle Variations. SAE Technical Paper, No. 981434.
- [۱۲] عبدی اقدم ابراهیم، عطایی ترزنق مجید. تأثیر گازهای سوخته مانده از چرخه قبل روی زمانبندی بهینه جرقه به کمک راهبرد پرش جرقه. فصلنامه تحقیقات موتور. ۱۳۹۷؛ ۵۰ (۵۰): ۶۷-۷۵
- [13] 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
- [14] Kutlar OA, H Arslan, AT Calik. 2007. Skip cycle system for spark ignition engines: An experimental investigation of a new type working strategy. *Energy conversion and management*. 48(2):370-9.
- [15] Baloo, M., et al., Effect of iso-octane/methane blend on laminar burning velocity and flame instability. *Fuel*, 2015. 144: p.264-273.
- [16] Baloo, M., et al., Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of iso-octane/methane fuel blend. *Fuel*, 2016. 170: p. 235-244.
- [۱۷] عبدی اقدم ا، م. سرابی، م. مهرید خمیرانی، ۱۳۹۷. مطالعه تجربی سرعت سوزش آرام مخلوط دو سوخت (گاز طبیعی - بنزین) با هوا در محفظه حرارتی کروی با فشار اولیه بالا. سوخت و احتراق. ۱۱۱(۱):۱۳۴-۱۲۱.
- [18] Ramasamy, D., Goh, C. Y., Kadirgama, K., Benedict, F., Noor, M. M., Najafi, G., & Carlucci, A. P. "Engine performance, exhaust emission and combustion analysis of a 4-stroke spark ignited engine using dual fuel injection." *Fuel* Vol. 207 (2017), pp. 719-728
- [19] Movahed, M. Momeni, H. Basirat Tabrizi, and M. Mirsalim. "Experimental investigation of the concomitant injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine." *Energy conversion and management* Vol. 80 (2014), pp. 126-136.





# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## The Effect Of Burned Residual Gases On Gasoline-NG Dual-Fuel Engine Combustion Performance With Skip-Fire Technique

M. Sarabi<sup>1</sup>, E. Abdi Aghdam<sup>2\*</sup>, S. K. Yekani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran, [M\\_Sarabi@uma.ac.ir](mailto:M_Sarabi@uma.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran, [Eaaghdam@uma.ac.ir](mailto:Eaaghdam@uma.ac.ir)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Islamic Azad University of Central Tehran Branch, Tehran, Iran, [S.K.Yekani@uma.ac.ir](mailto:S.K.Yekani@uma.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 19 January 2021

Accepted: 25 January 2021

#### Keywords:

Burned Residual Gas

Skip Fire

Dual-Fuel

Gasoline

Natural Gas

### ABSTRACT

Spark-ignition (SI) engines are commonly used to produce the power needed for various purposes. Using gasoline-NG dual fuel in these engines and investigating the variations of burned residual gas from the previous cycle in combustion cycles can improve engine operating conditions. The experimental data for the current study were obtained from a single-cylinder SI engine in various spark advances at the compression ratio of 10 and engine speed of 1800 rpm in dual-fuel mode (consisting of mass fraction of 75% gasoline and 25% NG) and stoichiometric equivalence ratio in both skip fire and non-skip fire conditions. The obtained raw data were processed using a computer code to arrive at the in-cylinder pressure versus crank angle diagram and the indicated mean effective pressure. The analysis of ensemble average cycle diagrams obtained from the experimental cycles in optimum spark advances indicated that the in-cylinder pressure variations before peak pressure were greater in skip fire conditions and the difference between optimum spark advances in skip fire and non-skip fire conditions was calculated to be 9 crank angle degree. Standard deviation and coefficient of variations for the indicated mean effective pressure were lower in skip fire conditions; in other words, fewer cyclic variations were observed in skip fire conditions. Furthermore, mass fraction burn variations were higher in skip fire conditions as compared to a non-skip fire condition, which was indicative of faster combustion in the former.

