

Performance Response of a Spark Ignition Engine to Adding Natural Gas to Gasoline on Lean-Burn Condition in 10 Compression Ratio

Yekani S.K.¹ *MSc*, Abdi Aghdam E.*¹ *PhD*, Sadeqh Moghanlou F.¹ *PhD*

¹ Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

Considering the disadvantages of gasoline and natural gas as mono-fuel in SI engines has made the researchers improve the performance and reduce the pollutant as the advantages of the application of dual-fuel engines. On the other hand, lean-burn in the engine may lead to reduced pollutants. In the present study various mixtures of gasoline and natural gas with the gasoline as the dominant fuel, including 100, 87.5, 75 and 62.5% in weight-base gasoline and the rest natural gas (respectively named as G100, G87.5, G75, G62.5) in lean-burn condition with 0.9 as the equivalence ratio are investigated. At 1800rpm and 10 compression ratio, cylinder pressure variations of 350 successive cycles of each mixture were recorded using a single-cylinder research engine. First of all, the raw data were processed and the optimized knock-free advance for each individual mixture was determined. Later on, the performance of all four mixtures in the corresponding optimized advance was explored. The results revealed that by increasing the amount of natural gas in the mixture, the CO pollutant reduced however the amount of HC initially increased which was followed by a decreasing trend. The amount of NO_x had a direct relation with the appearance of the natural gas. In the lean-burn condition, a better performance was observed for G75 in comparison with G100 and the other mixtures.

Keywords:

SI Engine,
Lean-Burn,
Pollutant,
Dual Fuel

*Corresponding Author

Tel: +98 (45) 33512910

Fax: +98 (45) 33512910

Post Address: Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Postal code: 561991167
eaaghdam@uma.ac.ir

Received: January 11, 2020

Accepted: January 28, 2020

ePublished: June 20, 2020

پاسخ عملکردی موتور اشتعال جرقه‌ای به افزودن گاز طبیعی به بنزین در شرایط فقیرسوز با نسبت تراکم ۱۰

سیدکاظم یکانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

ابراهیم عبدی اقدم* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

فرهاد صادق‌مغانلو PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

معایب استفاده از دو سوخت بنزین و گاز طبیعی به صورت تک‌سوز در موتورهای اشتعال جرقه‌ای، محققان را بر آن داشته است که با استفاده از ترکیب آن دو در موتور، بر مزیت‌های احتراق از جمله بهبود در عملکرد و کاهش در آلاینده‌گی بیافزایند. از طرف دیگر استفاده از حالت فقیرسوز در موتور می‌تواند موجب کاهش آلاینده‌های خروجی شود. در کار حاضر، ترکیب‌های مختلف بنزین-گاز طبیعی با سوخت غالب بنزین شامل ۷۵، ۸۷/۵، ۱۰۰ و ۶۲/۵ درصد وزنی بنزین و مابقی گاز طبیعی (نام‌گذاری شده به ترتیب G100، G87/5، G75 و G62/5) در حالت فقیرسوز با نسبت هم‌ارزی ۹/۰ بررسی شد. در سرعت ۱۸۰۰rpm و نسبت تراکم ۱۰ به‌ازای هر ترکیب در آوانس‌های مختلف، تغییرات فشار داخل سیلندر، ۳۵۰ سیکل پشت سر هم از یک موتور پژوهشی تک‌سیلندر ذخیره شد. این داده‌های خام ابتدا پردازش و از نتایج آنها، آوانس بهینه‌سازی از کوبش هر ترکیب استخراج شد. سپس عملکرد چهار ترکیب در آوانس بهینه‌سازی مربوط مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش حضور گاز طبیعی در ترکیب میزان آلاینده CO تقلیل و مقدار HC ابتدا افزایش و سپس سیر کاهش داشت. میزان NOx با افزایش حضور گاز طبیعی روند افزایشی داشت و در مجموع عملکرد G75 در حالت فقیر سوز نسبت به G100 و سایر ترکیب‌ها بهتر بود.

کلیدواژه‌ها: موتور اشتعال جرقه‌ای، فقیرسوز، آلاینده، سوخت ترکیبی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۸

*نویسنده مسئول: eaaghdam@uma.ac.ir

مقدمه

تحقیق در موضوع موتورهای احتراق داخلی از جمله ضروری‌ترین شاخه‌های تحقیقی خودروسازی در جهان است. این موتورها نقش به‌سزایی در صنایع مختلف از جمله حمل‌ونقل ایفا می‌کنند. علاوه بر موضوعات عملکردی در حوزه حمل‌ونقل موضوع سلامت افراد جامعه و برخورداری از هوای پاک یکی از مهم‌ترین ارکان تحقیقات فعلی محققان است که تصمیمات حمل‌ونقل کلان‌شهرها را به خود معطوف نموده است. یکی از روش‌های کارآمد و نوین در جهت کاهش آلاینده‌های موتورهای اشتعال جرقه‌ای، تغییر سوخت مصرفی به سوخت‌های جایگزین با آلاینده‌گی کمتر و یا استفاده از

سوخت‌های ترکیبی است. در سال‌های اخیر، اغلب پژوهش‌های تئوری و تجربی که در مورد موتورهای اشتعال جرقه‌ای انجام می‌گیرد در زمینه سوخت جایگزین، افزایش کارایی و کاهش آلاینده‌گی موتور بوده است. تعداد وسایل نقلیه گازسوز در جهان تقریباً به ۲۳ میلیون رسیده است که بزرگ‌ترین ناوگان گازسوز دنیا مربوط به ایران است [1]. موتورهای گازسوز دارای مزایای زیادی است که از آن جمله می‌توان به کوبش کمتر نسبت به سوخت‌های فسیلی، امکان افزایش نسبت تراکم، اختلاط آسان با هوا، کاهش آلاینده‌گی و صرفه اقتصادی اشاره نمود [2]. از این‌رو، بدون شناخت و بهینه‌سازی وضعیت موتور، گاز طبیعی به‌عنوان سوخت جایگزین در موتور بنزینی به‌کار می‌رود. این در حالی است که سرعت سوختن پایین آن روی قدرت موتور اثر منفی می‌گذارد. از سوی دیگر باید توجه داشت که گاز طبیعی، سوختی کندسوز است و افزودن سوختی تندسوز به آن می‌تواند روشی موثر در حل مشکلات احتراقی و کاهش آلاینده‌گی باشد [3]. همچنین به دلیل مزیت‌های گاز طبیعی، موتورهای دوگانه‌سوز با بنزین و گاز طبیعی نیز در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. امکان استفاده گزینشی یکی از دو سوخت گاز یا بنزین از ویژگی‌های مهم موتورهای دوگانه‌سوز به‌شمار می‌رود. اما طراحی و کنترل چنین موتورهایی با پیچیدگی‌ها و مشکلاتی همراه است، زیرا اغلب موتورها برای سوخت بنزین طراحی شده‌اند [4, 5].

لذا استفاده همزمان بنزین و گاز می‌تواند راه‌حل خوبی برای کاهش مشکلات سوخت باشد. سوخت ترکیبی می‌تواند موجب کاهش کوبش نسبت به سوخت بنزین شود. توجه به معایب استفاده از دو سوخت بنزین و گاز طبیعی به‌صورت تک‌سوز در موتورهای اشتعال جرقه‌ای، محققان را بر آن داشته که با استفاده از ترکیب آن دو در موتور، بر مزیت‌های احتراق از جمله بهبود در عملکرد و کاهش در آلاینده‌گی بیافزایند. لذا به نظر می‌رسد استفاده از موتورهای اشتعال جرقه‌ای با سوخت ترکیبی (بنزین-گاز طبیعی) با نوآوری فقیرسوزی بتواند مزایای هر دو سوخت را تامین و از نظر اقتصادی به‌صرفه باشد.

رحیم و رسلی عبدالله [6]، موتور اشتعال جرقه‌ای را با ترکیب بنزین و اتانول بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد اتانول بازده حرارتی ترمزی را افزایش می‌دهد. یو و همکاران [7]، اثر افزودن بوتانول نرمال به بنزین را مطالعه نمودند و تغییرات جزئی در فشار موثر متوسطه اندیکه (IMEP) را گزارش نمودند. آنها میزان گازهای خروجی در این حالت را نیز مورد بررسی قرار دادند. پیپیتین و همکاران [8]، اثر تزریق همزمان بنزین و گاز طبیعی را روی یک موتور چهارسیلندر اشتعال جرقه تجاری نسبت به تک‌بنزین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تمایل به کوبش در سوخت ترکیبی نسبت به بنزین خالص کمتر بود و زمان جرقه کمتر به عقب انداخته می‌شود. در کار آنها نوع موتور و شرایط حاکم چنان بوده که مقایسه بدون همسان‌گیری نسبت هم‌ارزی انجام گرفته است به‌طوری که آزمایش‌های بنزین با مخلوط غنی $\lambda = 0.84$ و ترکیب سوز با

اطلاعاتی ارایه ندادند. یکانی و همکاران^[16]، پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور اشتعال جرقه‌ای را با سوخت ترکیب‌سوز (بنزین- گاز طبیعی) در حالت فقیرسوز در نسبت تراکم‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند که می‌توان نتایج این دو تحقیق با نسبت تراکم متفاوت را با یکدیگر مقایسه نمود.

بررسی به‌عمل‌آمده از پیشینه پژوهش، مشخص است که حالت ترکیب‌سوز فقیر بنزین- گاز طبیعی مورد توجه قرار نگرفته است. در کار حاضر برای استفاده از سوخت جایگزین و قابلیت بنزین در تولید توان و همچنین استفاده از ایده فقیرسوزی، این پژوهش در شرایط فقیر با نسبت هم‌ارزی ۹/۰ و وضعیت عملکردی و آلاینده‌گی یک موتور پژوهشی تک‌سیلندر در نسبت تراکم ۱۱ و سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه را با ترکیب‌های متفاوت بنزین و گاز طبیعی (با سوخت غالب بنزین) مورد بررسی قرار می‌دهد. ترکیب‌های مورد مطالعه بر پایه جرمی شامل ۱۰۰٪، ۸۷/۵٪، ۷۵٪ و ۶۲/۵٪ بنزین و مابقی گاز طبیعی می‌شود.

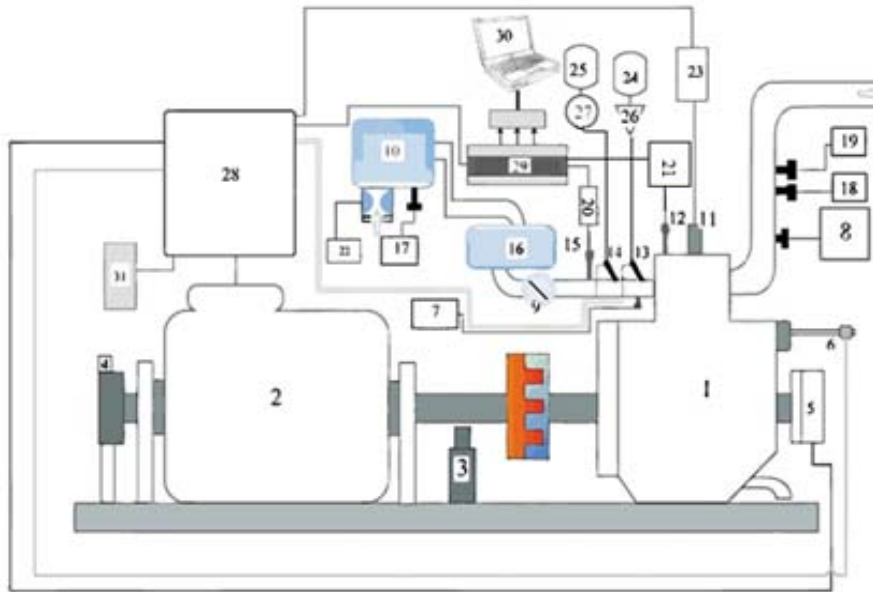
راه‌اندازی آزمایش

در این مطالعه از یک موتور پژوهشی تک‌سیلندر اشتعال- جرقه‌ای استفاده شده است که قابلیت کارکرد با سوخت بنزین و گاز طبیعی و یا ترکیب‌سوز (بنزین- گاز طبیعی) را دارا است. شماتیک این موتور به همراه تعلیقات مربوطه در شکل ۱ و مشخصات فنی آن در جدول ۱ آمده است. این موتور به یک دینامومتر الکتریکی زوج‌نیرو شده و سرعت آن قابل کنترل است. برای اندازه‌گیری تغییرات فشار داخل محفظه سیلندر از یک مبدل فشار دینامیک کیسلر مدل ۶۰۵۲C و برای تقویت سیگنال آن از یک تقویت‌کننده مدل ۵۰۱۱ بهره‌گیری شده است. داده‌های آنالوگ شامل فشار درون سیلندر، فشار مطلق مانیفولد ورودی، پالس‌های زاویه میل‌لنگ و TDC شفت‌انکودر، از چهار کانال ورودی یک دیتالوگر مدل DAQ۲۵۰۰ ادلینک دریافت و با بسامد داده‌برداری ۱۲۰ کیلوهرتز به داده‌های دیجیتال تبدیل شده است. در آزمایشات انجام‌شده، فشار پشت انژکتور بنزین حدود ۳/۵ بار بود که توسط یک پمپ سوخت تامین می‌شد. همچنین گاز طبیعی فشرده تحت فشار ۲۰۰ تا ۲۵۰ بار در یک مخزن فشار بالا، با فعال‌سازی رگلاتور گاز طبیعی تحت فشار ۲/۵ بار به پشت انژکتور گاز ارسال می‌شد. فلودیاگرام سیستم کنترل پاشش سوخت‌ها در شکل ۲ ارایه شده است. سیستم مدیریت موتور توسعه‌یافته توسط نویسندگان طوری است که میزان پاشش، زاویه آغاز پاشش انژکتورهای گاز طبیعی و بنزین به راهگاه ورودی موتور و زمانبندی جرقه توسط کاربر قابل تنظیم است. در کار حاضر از دو دستگاه آنالیزور گاز Infracit-CL ساکسون و Testo۳۵۰XL برای شناسایی مشخصه‌های گازهای خروجی شامل هوا به سوخت نسبی (λ)، کربن مونواکسید (CO)، HC، کربن‌دی‌اکسید (CO₂)، اکسیژن (O₂)، نیتریک‌اکسید (NO) و نیترژن‌دی‌اکسید (NO₂) استفاده شده است. با استفاده از کمیت λ می‌توان نسبت هم‌ارزی را با تغییر مقدار سوخت پاششی تنظیم کرد.

مخلوط استوکیومتری انجام شده است. همچنین در این موتور، امکان مدیریت آوانس جرقه توسط کاربر نبوده است. چهارسیلندربودن موتور نیز دقت در پژوهش را به دلیل احتمال غیرهمسانی در کیفیت مخلوط‌ها، محصولات احتراق و تبادل گرماها در سیلندرها و همچنین لغزش محتمل آوانس جرقه سیلندرها به‌خاطر تغییرشکل‌های زاویه‌ای الاستیک میل‌لنگ تحت بار مکانیکی زیر سوال می‌برد. بنابر این نویسندگان بر این باورند که پژوهش‌های دقیق در موتورهای تک‌سیلندر مخصوص باقابلیت‌های تغییر پارامترها توسط کاربر امکان‌پذیر است.

همچنین برخی مطالعات روی تزریق همزمان گاز و بنزین با استفاده از موتور چهارسیلندر توریوشارژ انجام شده است^[8, 9]. آنها بدون همسان‌گیری نسبت هم‌ارزی در مقایسه‌ها در حالت دریچه کاملاً باز، بهبودی را در راندمان حرارتی و قدرت موتور گزارش دادند. مطالعات تئوریک مخلوط بنزین- گاز طبیعی مایع نیز مورد توجه قرار گرفته است^[10]. تاثیر نوع سوخت (گاز طبیعی و بنزین) در حالت بار غیرکامل به‌صورت تک‌سوز^[4] و همچنین فقط گاز طبیعی^[11] روی عملکرد موتور چهارسیلندر و تک‌سیلندر^[12] مورد مطالعه قرار گرفته است.

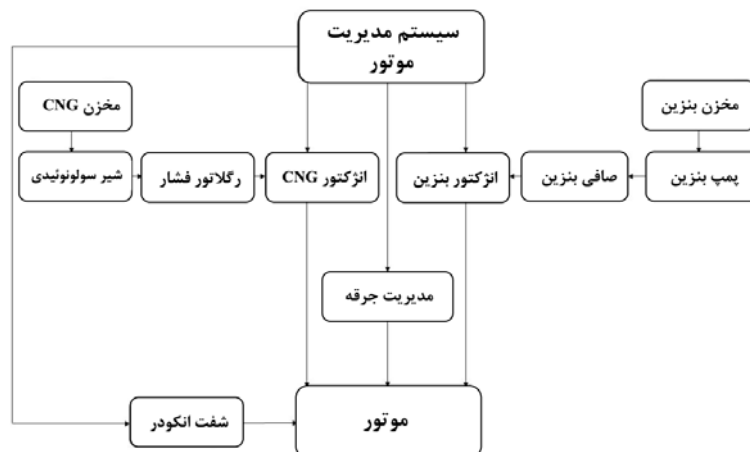
یکی دیگر از روش‌های کنترل آلاینده‌های خروجی، بازده، اقتصاد سوخت و توسعه آتی در حوزه موتورهای اشتعال جرقه‌ای می‌تواند استفاده از مخلوط فقیر یا احتراق فقیرسوز باشد. البته باید دقت نمود که برای مخلوط‌های فقیرتر، به دلیل کندسوزی تغییرات سیکنی در فرآیند احتراق جدی می‌شود و ممکن است منجر به ناپایداری آن شود. این موضوع به‌طور قابل توجه راندمان موتور و انتشار گازهای خروجی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد و پتانسیل موتورهای فقیرسوز را محدود می‌کند. محدودیت احتراق نامناسب مخلوط‌های فقیر علاوه بر طرح موتور به نوع سوخت نیز وابسته است. ران و همکاران^[13]، حد احتراق ناقص را در یک موتور با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه برای سه سوخت جایگزین گاز طبیعی، الکل و سینگاز (Syngas) که دارای آلاینده‌گی کمتری هستند بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که در بین سوخت‌های رایج، گاز طبیعی حد احتراق ناقص پایین‌تری نسبت به بنزین و الکل دارد. تحت شرایط آزمایش مورد نظر، آنها دریافتند که بنزین از لحاظ تولید بار و بازده تبدیل سوخت وضعیت بهتری نسبت به سوخت‌های جایگزین دارد. بهر/اد و/ابدی/قدم^[14]، به تازگی در یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای ترکیبی‌سوز بنزین- گاز طبیعی با سوخت غالب بنزین توانستند مقادیر کوبش موتور را اندازه‌گیری نمایند که نشان داده شد با افزایش مقدار گاز طبیعی مقدار کوبش کمتر می‌شود. متأسفانه این تحقیق فقط در حالت کوبش بوده و در حالت احتراق طبیعی آزمایشی صورت نگرفته است در تحقیق پیش رو آزمایشات در حالت احتراق طبیعی تا مرز کوبش داده‌برداری شده است. سرابی و/ابدی/قدم^[15]، پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور اشتعال جرقه‌ای را با سوخت ترکیب‌سوز (بنزین- گاز طبیعی) در حالت استوکیومتری بررسی نمودند ولی متأسفانه در موضوع فقیر سوزی این سوخت



شکل ۱) نمایی از بستر آزمایش؛ ۱) موتور، ۲) دینامومتر، ۳) سنسور سرعت موتور، ۴) سنسور گشتاور، ۵) شفت انکودر، ۶) تشخیص TDC مکشی، ۷) سنسور دمای مخلوط ورودی، ۸) سنسور دمای گاز خروجی، ۹) پروانه گاز، ۱۰) محفظه آرامش هوای اولیه، ۱۱) شمع موتور، ۱۲) مبدل فشار دینامیکی، ۱۳) انژکتور NG، ۱۴) انژکتور بنزین، ۱۵) مبدل فشار مطلق، ۱۶) محفظه آرامش هوای ثانویه، ۱۷) سنسور دمای مخزن آرامش اولیه، ۱۸) آنالیزور گاز a، ۱۹) آنالیزور گاز b، ۲۰) آمپلی فایر مبدل فشار مطلق، ۲۱) آمپلی فایر مبدل فشار دینامیکی، ۲۲) سنسور دبی هوای ورودی، ۲۳) سیستم جرعه زنی، ۲۴) مخزن سوخت NG، ۲۵) مخزن سوخت بنزین، ۲۶) رگلاتور فشار NG، ۲۷) پمپ بنزین، ۲۸) سیستم مدیریت پاشش و جرعه موتور، ۲۹) AD-Logger، ۳۰) PC، ۳۱) ورودی برق به سیستم

جدول ۱) مشخصات موتور CT300

مشخصه	توضیحات
قطر سیلندر	۹۰mm
کورس پیستون	۷۴mm
حجم جایجایی	۴۷۰cm ³
نسبت تراکم	۱۰
سیستم جرعه زنی	الکترونیکی با قابلیت تنظیم زمان بندی جرعه
سیستم سوخت رسانی	انژکتوری گازسوز و بنزین سوز با قابلیت تنظیم
سیستم روغن کاری	فشاری- پاششی
نوع خنک کاری	تک جریانی با آب
تعداد و موقعیت سوپاپ ها	۲ OHV
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ ورودی	TDC ^o باز و ۵۰aBDC ^o بسته
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ خروجی	bBDC ^o ۴۰ باز و ۸aTDC ^o بسته
نوع تنفس	طبیعی
شکل محفظه	دیسکی



شکل ۲) فلودیاگرام سیستم کنترل پاشش سوخت ها و مدیریت جرعه

آنالوگ به دیجیتال ثبت شد و مجموعه داده هر آزمایش به کمک یک کد کامپیوتری نوشته شده در فضای فرتن به سیکل‌های متوالی تجزیه شد تا بتوان تغییرات فشار-زاویه لنگ درون سیلندر و IMEP برای هر سیکل و متوسط سیکل‌ها را استخراج کرد. همچنین برای تشخیص کوبشی بودن سیکل یا شرایط کاری، داده‌های فشار هر سیکل طی فرآیند تبدیل فوریه سریع (FFT) به حوزه فرکانس برده شد و پس از فیلترکردن گستره فرکانس ناشی از کوبش (۳-۲۵ کیلوهرتز)^[19] از آن، هر دو بخش با اعمال فرآیند معکوس تبدیل فوریه (IFFT) به حوزه زمان بازگردانده شد. جزئیات این فرآیندها در مطالعه /حمدی^[20] تشریح شده است. برای تعیین معیار کوبش MAPO از سیگنال نوسان فشار کوبشی حاصله استفاده شد و از سیگنال صاف شده فشار سیلندر مقدار IMEP سیکل برآورد شد. سپس با استفاده از تغییرات IMEP و گشتاور خروجی برحسب آوانس جرقه هر ترکیب و درصد سیکل کوبشی آن، آوانس بهینه غیرکوبشی تعیین شد. همچنین برای به دست آوردن مقدار آلاینده‌ها در هر آزمایش میزان گونه‌های CO، HC و NO_x از طریق آنالیزور گازها تشخیص و ثبت شد.

یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایش‌های تجربی روی موتور تک‌سیلندر CT^{۳۰۰} در ترکیب‌های مختلف ۱۰۰، ۸۷/۵، ۷۵ و ۶۲/۵٪ بنزین و مابقی گاز طبیعی در نسبت هم‌ارزی ۹/۰٪ در آوانس‌های مختلف جرقه با گام زاویه‌ای ۲ درجه میل‌لنگ استخراج شد. در ادبیات فن برای تحلیل و تفسیر کوبش سیکل‌ها و شرایط کاری موتور معمولاً از حداکثر دامنه نوسان فشار (Maximum Amplitude of Pressure Oscillation; MAPO) ناشی از کوبش به‌عنوان معیار سنجش کوبش استفاده می‌شود^[21, 22]. سیکلی که MAPO آن بزرگتر از ابار باشد به‌عنوان سیکل کوبشی شناخته می‌شود و اگر درصد سیکل کوبشی در یک شرایط کاری موتور بیش از ۱۰٪ باشد آن شرایط کوبشی تلقی می‌شود^[22]. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای برای پرهیز از وقوع چنین شرایطی آوانس جرقه به تاخیر انداخته می‌شود. در کار حاضر برای تشخیص شرایط غیر کوبشی از معیار MAPO استفاده شده است به طوری که وقتی درصد سیکل کوبشی کمتر از ۵٪ باشد آن شرایط کاری غیرکوبشی شناخته می‌شود. بدین ترتیب برای تغییر شرایط از غیرکوبشی به کوبشی گستره ۵ تا ۱۰٪ سیکل کوبشی به‌عنوان شرایط گذر در نظر گرفته شده است. بنابر این اگر در آوانس بهینه برپایه گشتاور ترمزی حداکثر (Maximum Brake Torque; MBT) درصد سیکل کوبشی مربوطه کمتر از ۵٪ باشد از آن با عنوان آوانس بهینه غیرکوبشی یاد می‌شود. اما اگر در آوانس بهینه MBT درصد سیکل کوبشی بیش از ۵٪ باشد در آن صورت نزدیک‌ترین آوانس به آن که درصد سیکل کوبشی کمتر از ۵٪ باشد به‌عنوان آوانس بهینه غیرکوبشی شناخته شده است. به‌ازای هر آوانس جرقه ۳۵۰ سیکل متوالی بررسی شد و از روی IMEP آنها و گشتاور خروجی مربوطه آوانس بهینه جرقه غیرکوبشی

در برآوردهای لازم سوخت ترکیبی، فرمول شیمیایی متوسط بنزین C_{7.76}H_{13.1}، ارزش حرارتی پایین آن ۴۵ مگاژول بر کیلوگرم^[17] و چگالی مربوطه ۷۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. از گونه‌های تشکیل‌دهنده گاز طبیعی به شرح جدول ۲ بر پایه درصد حجمی گونه‌ها مشخص شد که فرمول شیمیایی متوسط بخش هیدروکربن C_{1.04}H_{3.97} و ارزش حرارتی پایین ۴۵/۵ مگاژول بر کیلوگرم برای گاز طبیعی حاصل می‌شود^[18]. از ترکیب گاز طبیعی حدود ۹۴/۷۹۷٪ مربوط به هیدروکربن‌ها است و مابقی به‌صورت ناخالصی به دی‌اکسید کربن و نیتروژن مربوط می‌شود. با این فرض که برای گاز طبیعی کسر حجمی را می‌توان به‌صورت کسر مولی نیز به‌کار گرفت.

جدول ۲) گونه‌های تشکیل‌دهنده گاز طبیعی^[15]

محتویات	مقدار
CH ₄	۸۸/۳۲۳٪
C ₂ H ₆	۴/۶۷۲٪
C ₃ H ₈	۱/۱۳۷٪
C ₄ H ₁₀	۰/۴۸۴٪
C ₅ H ₁₂	۰/۱۸۱٪
CO ₂	۰/۶۹۴٪
N ₂	۴/۵٪
H ₂ S	۰/۸۴۹ (ppm)

رابطه استوکیومتری مخلوط هوا با سوخت ترکیبی بنزین و گاز طبیعی را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ بیان کرد.

(۱)

$$\%C_{7.76}H_{13.1} + (1-\%)(0.94797C_{1.04}H_{3.97} + 0.00694CO_2 + 0.04509N_2) + \alpha(O_2 + 3.76N_2)$$

که در آن $\%$ کسر مولی بنزین در سوخت ترکیبی و α تعداد مول‌های اکسیژن لازم در مخلوط استوکیومتری برای هر مول سوخت ترکیبی است. با استفاده از جرم‌های مولکولی بنزین (M_G) و گاز طبیعی (M_{NG}) رابطه بین کسرهای مولی ($\%$) و جرمی (X) بنزین در سوخت ترکیبی را می‌توان به‌صورت رابطه ۲ به‌دست آورد:

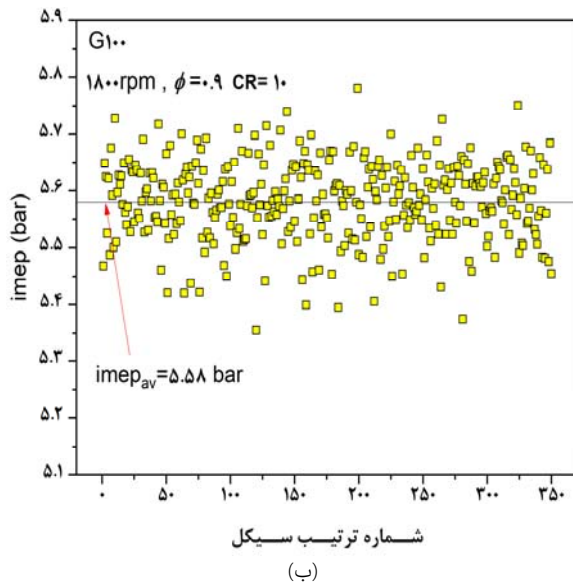
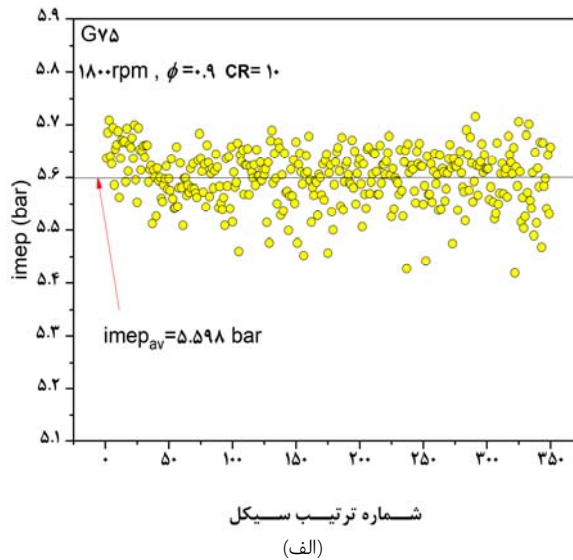
(۲)

$$\% = \frac{x}{\frac{M_G}{M_{NG}} + \left(1 - \frac{M_G}{M_{NG}}\right)x}$$

روش انجام آزمایش

در این آزمایش‌ها، نسبت تراکم موتور و سرعت موتور به‌ترتیب به ۱۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. ابتدا موتور در حالت بنزین‌سوز راه‌اندازی و پس از گرم‌شدن، در نسبت هم‌ارزی ۹/۰٪ در آوانس‌های مختلف با گام زاویه‌ای ۲ درجه میل‌لنگ برای ۳۵۰ سیکل پشت سر هم داده‌برداری شد. همین فرآیند داده‌برداری برای حالت پاشش هم زمان دو سوخت، تحت ترکیب‌های مختلف ۱۰۰، ۸۷/۵، ۷۵ و ۶۲/۵٪ بنزین و مابقی گاز طبیعی نیز دنبال شد. در حین انجام این آزمایش‌ها داده‌های فشار مطلق مانیفولد ورودی، فشار درون سیلندر، زاویه میل‌لنگ و نقطه مرگ بالا توسط دیتالاگر و نرم‌افزار مبدل

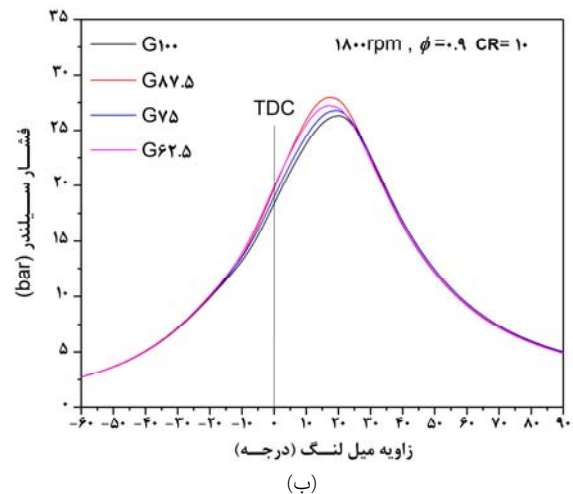
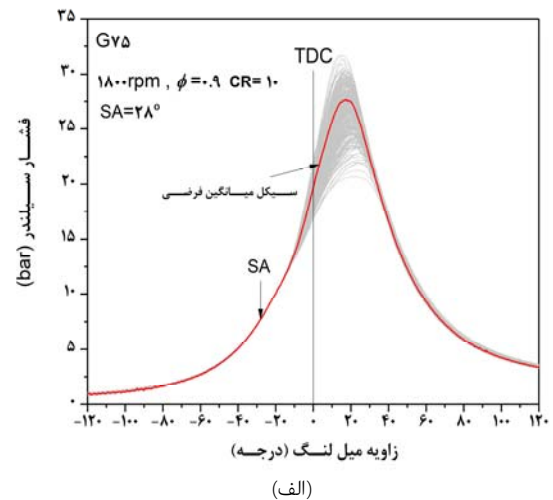
تغییرات سیکیلی در نمودار $p-\theta$ و IMEP دور از انتظار نیست. برای استخراج نتایج و بررسی مناسب‌تر این تغییرات، اخذ فشار داخل سیلندر ۳۵۰ سیکل پشت سر هم برای هر آزمایش در نظر گرفته شد. IMEP ۳۵۰ سیکل متوالی در شرایط فقیروسوز را به همراه میانگین آنها برحسب شماره وقوع سیکل برای ترکیب‌های ۱۰۰ و G۷۵ در نمودار ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۲ تغییرات IMEP برای ۳۵۰ سیکل متوالی در نسبت تراکم ۱۱، سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه و نسبت هم‌ارزی ۹/۰ برای ترکیب‌های؛ (الف) G۷۵، (ب) G۱۰۰ در آوانس بهینه جرقه

ملاحظه می‌شود که پراکندگی IMEP سیکل‌ها از $IMEP_{av}$ در ترکیب G۱۰۰ بیشتر از G۷۵ است. برای روشن‌شدن بهتر پراکندگی در داده‌ها مقادیر σ (انحراف‌معیاری) و COV (ضریب تغییرات) در آوانس‌های بهینه ترکیب‌های مختلف برآورد شد. نمودار ۳ تغییرات σ و COV برحسب نوع ترکیب را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که تغییرات سیکیلی ترکیب G۷۵ کمتر از سایر ترکیب‌ها است و σ و COV آن

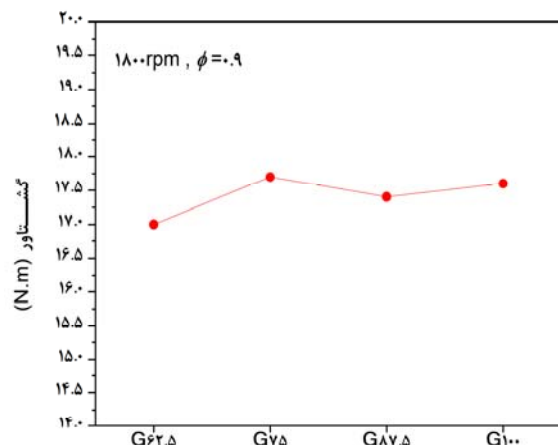
برای هر ترکیب مشخص شد. نمودار ۱-الف تغییرات فشار داخل سیلندر برحسب زاویه میل‌لنگ اخذ شده در آوانس بهینه ترکیب G۷۵ را برای ۳۵۰ سیکل متوالی به همراه سیکل میانگین فرضی آن نشان می‌دهد. سیکل میانگین فرضی از متوسط‌گیری فشار سیکل‌ها در هر زاویه میل‌لنگ حاصل می‌شود [17]. به‌طور مشابه برای ترکیب‌های دیگر در آوانس بهینه نیز سیکل میانگین فرضی محاسبه شد. نمودار ۱-ب تغییرات فشار محفظه سیلندر برحسب زاویه میل‌لنگ سیکل میانگین فرضی در آوانس بهینه را برای چهار ترکیب ۱۰۰، ۸۷/۵، ۷۲ و G۶۲/۵ در سرعت موتور ۱۸۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد و بیان می‌کند که با افزایش درصد جرمی گاز طبیعی در مخلوط، قله فشار تقریباً با مقدار فزاینده به سمت نقطه مرگ بالا متمایل می‌شود.



نمودار ۱ فشار محفظه احتراق برحسب زاویه میل‌لنگ برای؛ (الف) ۳۵۰ سیکل متوالی در حالت G۷۵ و میانگین آنها، (ب) سیکل‌های میانگین چهار ترکیب مختلف G۱۰۰، G۸۷/۵، G۷۵ و G۶۲/۵ در آوانس بهینه غیرکوبشی

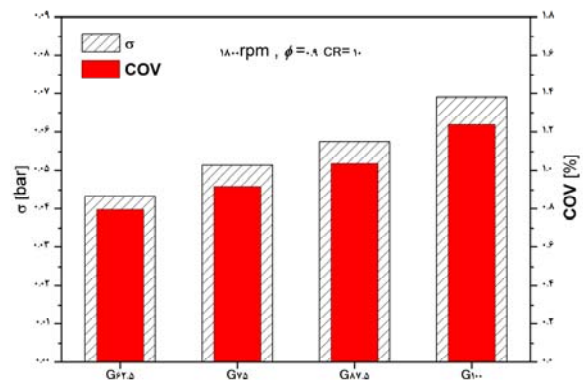
نظر به اینکه با اعمال شرایط کاری ثابت به موتور از طریق سامانه مدیریت، میدان جریان حاکم در درون سیلندر، مقادیر سوخت، هوا و گازهای باقی‌مانده، تبادل گرما با دیواره‌های سیلندر، تلاطم و کیفیت مخلوط در جوار شمع به هنگام جرقه و تشکیل شعله اولیه در سیکل‌های کاری پشت سر هم موتور، کاملاً یکسان نمی‌شود،

حالت‌های ترکیبی نسبت به G_{100} می‌توان به آوانس بیشتر آنها اشاره کرد که فاصله خاتمه احتراق از انتهای مرحله انبساط را بیشتر می‌کند و احتمال سوختن HC بازگشتی از شکاف‌ها به سیلندر را پایین می‌آورد. در حالی که طولانی‌شدن پریود احتراق G_{100} بعد از TDC که از نمودار $p-\theta$ آن در نمودار ۱-ب (قله فشار پایین‌تر در موقعیتی دورتر از TDC) احتمال سوختن HC بازگشتی از شکاف‌ها را بیشتر می‌کند. این تمایل G_{100} به علت ریتارد زمان‌بندی جرقه برای گریز از شرایط کوبش اتفاق می‌افتد.

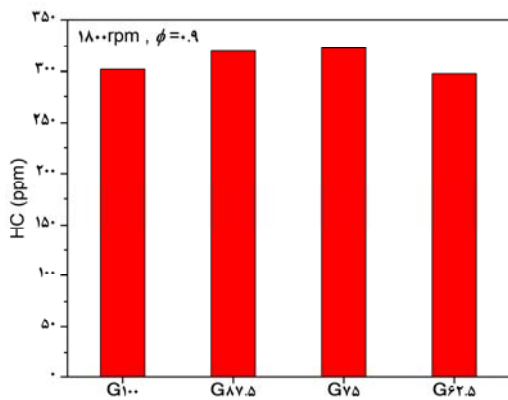


نمودار ۵) مقادیر گشتاور خروجی برای ترکیب‌های مختلف G_{100} ، $G_{87.5}$ ، G_{75} و $G_{62.5}$ در آوانس بهینه غیرکوبشی

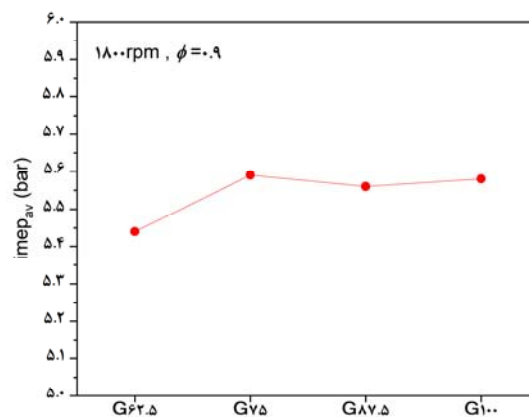
به ترتیب حدود ۶۲ و ۶۱٪ کمتر از G_{100} است. چنین تفاوتی می‌تواند از حساسیت نوع سوخت به تغییرات جزئی موضعی سرعت سوختن با نسبت هم‌ارزی و همگن‌پذیری مخلوط سوخت- هوا باشد. تغییرات $IMEP_{av}$ برحسب درصد حضور بنزین در ترکیب‌های مورد نظر را در آوانس‌های بهینه مربوطه، نمودار ۴ نشان می‌دهد. نظر به اینکه در تعیین $IMEP_{av}$ هر ترکیب، میانگین ۳۵۰ سیکل لحاظ شده است مقادیر حاصله از دقت خوبی برخوردار است. ملاحظه می‌شود که $IMEP_{av}$ با کاهش حضور بنزین در ترکیب تا G_{75} تغییر چندانی نمی‌یابد اما در حالت $G_{62.5}$ کاهش حدود ۵٪ پیدا می‌کند.



نمودار ۳) تغییرات σ و COV برای ترکیب‌های G_{100} ، $G_{87.5}$ ، G_{75} و $G_{62.5}$ در آوانس بهینه غیرکوبشی



نمودار ۶) مقادیر آلایندة HC ترکیب‌های G_{100} ، $G_{87.5}$ ، G_{75} و $G_{62.5}$ در آوانس بهینه غیرکوبشی



نمودار ۴) مقادیر $IMEP_{av}$ برای ترکیب‌های G_{100} ، $G_{87.5}$ ، G_{75} و $G_{62.5}$ در آوانس بهینه غیرکوبشی

میزان CO خروجی را برای ترکیب‌های مختلف در آوانس بهینه غیرکوبشی در نمودار ۷ نشان داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که مقدار آن در G_{100} بیشترین است و با کاهش درصد بنزین در ترکیب، روند نزولی دارد و کمترین مقدار به $G_{62.5}$ مربوط می‌شود. دلیل زیاد شدن CO با افزایش حضور بنزین در مخلوط می‌تواند ناشی از تداوم بیشتر احتراق در ابتدای مرحله انبساط باشد که حضور CO در بخش سوخته را در قسمت میانی این مرحله (که آهنگ انبساط بالا است) بیشتر کند. همچنین افزایش نسبت C/H نیز می‌تواند موثر باشد.

تغییرات گشتاور خروجی اندازه‌گیری شده به همراه میله خطای مربوط برحسب افزایش حضور بنزین در آوانس بهینه غیرکوبشی هر ترکیب در نمودار ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است دقت نمایش دیجیتالی این کمیت ± 0.1 نیوتن متر بود. روند تغییرات گشتاور مشابه تغییرات $IMEP_{av}$ است و با کاهش بنزین تا G_{75} تغییرات اندکی دارد و در $G_{62.5}$ به میزان ۷٪ کاهش می‌یابد. مقادیر آلایندة HC در گازهای حاصل از احتراق در نمودار ۶ نشان داده شده است. مقادیر HC با کاهش درصد بنزین در مخلوط سوخت، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. از علل ازدیاد HC

۱- پراکندگی IMEP مجموعه داده‌های سیکل هر آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر σ (انحراف معیار) و COV (ضریب تغییرات) در آوانس‌های بهینه ترکیب‌های مختلف برآورد شد. نتایج حاصله نشان داد که تغییرات سیکلی ترکیب G۷۵ کمتر از سایر ترکیب‌ها است و σ و COV آن به ترتیب حدود ۲۷٪ و ۲۶٪ کمتر از G۱۰۰ است.

۲- بررسی IMEP و گشتاور خروجی ترکیب‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان داد که ترکیب G۷۵ از بهبود عملکرد نسبت به G۱۰۰ (بنزین‌سوز) برخوردار است. افزودن گاز طبیعی به بنزین در حالت فقیرسوز و نسبت تراکم مد نظر نشان دهنده بهبود عملکرد موتور در ترکیب G۷۵ را تایید می‌کند و با افزایش بیشتر گاز در ترکیب پارامترهای عملکردی موتور به شدت کاهش می‌یابد.

۳- در بررسی آلاینده‌های خروجی ترکیب‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ با افزایش مقدار گاز طبیعی در ترکیب میزان CO تقلیل یافت.

۴- با افزایش حضور گاز طبیعی در ترکیب میزان آلاینده HC ابتدا افزایش یافت و سپس با افزایش مقدار گاز طبیعی در ترکیب روند کاهش به خود گرفت.

۵- از نتایج حاصله در خصوص NO_x خروجی در شرایط فقیر مد نظر، با افزایش کسر جرمی گاز طبیعی در ترکیب مقدار NO_x افزایش یافت.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از کارکنان آزمایشگاه موتور دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اصالت و نوآوری محتوای مقاله را تایید می‌کنند.

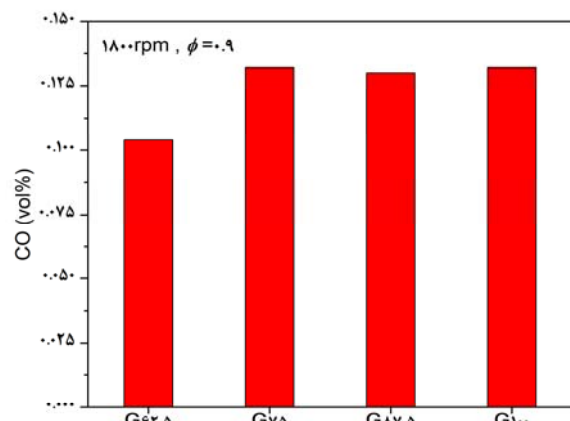
تعارض منافع: این مقاله مستخرج از رساله دکتری آقای سیدکاظم یکانی با عنوان "مطالعه تجربی عملکرد موتور پژوهشی تک‌سیلندر اشتعال جرقه‌ای نوعی در حالت ترکیب‌سوز (بنزین- گاز طبیعی) و احتراق نرمال با استفاده از نتایج تجربی" مستخرج از موتور پژوهشی CT 300 با راهنمایی آقای دکتر/ابراهیم عبدی اقدام است.

سهم نویسندگان: سیدکاظم یکانی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ ابراهیم عبدی اقدام (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ فرهاد صادق مغاللو (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪).
منابع مالی: هزینه‌های پژوهش حاضر توسط دانشگاه محقق اردبیلی تامین شده است.

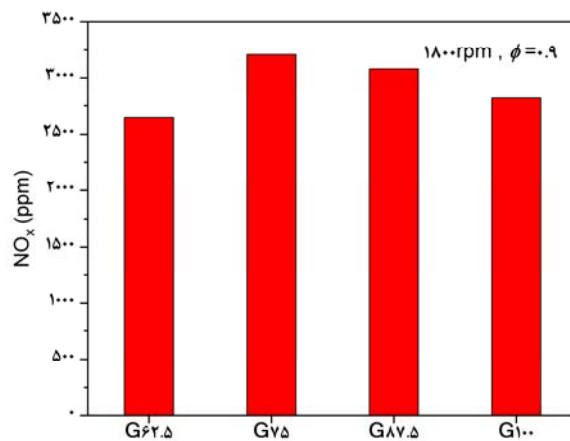
منابع

- 1- Kakaee AH, Paykani A. Research and development of natural-gas fueled engines in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:805-821.
- 2- Cho HM, Bang-Quan H. Spark ignition natural gas engines – a review. *Energy Conversion and Management*. 2007;48(2):608-618.

میزان NO_x خروجی ترکیب‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و سرعت موتور ۱۸۰۰ دور بر دقیقه در نمودار ۸ نشان داده شده است. مقادیر NO_x با افزایش درصد بنزین در ترکیب، روند کاهشی از خود نمایش می‌دهد به طوری که در حالت G۱۰۰ کمترین مقدار و در حالت G۶۲/۵ بیشترین مقدار مشاهده شده است. از آنجا که با افزایش کسر بنزین در ترکیب برای ممانعت از وقوع کوبش بالاخص برای G۱۰۰ آوانس بهینه غیرکوبشی نسبت به آوانس بهینه MBT به تاخیر انداخته می‌شود، حداکثر دمای گازهای سوخته پایین‌تر ظاهر می‌شود و به دلیل وابستگی جدی NO_x به دما، میزان تشکیل آن تضعیف می‌شود.



نمودار ۷) میزان CO منتشره ترکیب‌های G۱۰۰، G۸۷/۵، G۷۵ و G۶۲/۵ در آوانس بهینه غیرکوبشی



نمودار ۸) میزان NO_x خروجی برای ترکیب‌های مختلف G۱۰۰، G۸۷/۵، G۷۵ و G۶۲/۵ در آوانس بهینه غیرکوبشی

نتیجه‌گیری

در کار حاضر چهار ترکیب مختلف از بنزین و گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی ۰/۹، نسبت تراکم ۱۰ و سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه در یک موتور اشتعال جرقه‌ای تک‌سیلندر پژوهشی به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت و پس از تحلیل داده‌های ۳۵۰ سیکل پشت سر هم در هر آزمایش، نتایج و نکات زیر حاصل شد:

- 13- Ran Z, Hariharan D, Lawler B, Mamalis S. Experimental study of lean spark ignition combustion using gasoline, ethanol, natural gas, and syngas. *Fuel*. 2019;235:530-537.
- 14- Behrad R, Abdi Aghdam E. Experimental study of knocking phenomenon in different gasoline-naturalgas combinations with gasoline as the predominant fuel in a SI engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019;139:2489-2497.
- 15- 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. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019;139:3165-3178.
- 16- Yekani k, Abdi Aghdam, Sadegh Moghanlou F. Experimental investigation of the performance response of a spark ignition engine to adding natural gas to gasoline in lean-burn condition. *International Journal of Industrial Mathematics*. 2019;11(4):307-317.
- 17- Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill; 1988.
- 18- Abdi Aghdam E, Sarabi M, Mehrbod Khomeyrani M. Experimental study of laminar burning velocity for dual fuel (Gasoline-NG)-Air mixture using pressure record in a spherical combustion bomb at higher primary pressure. *Fuel and Combustion*. 2018;11(1):121-134. Persian.
- 19- Li T, Yin T, Wang B. A phenomenological model of knock intensity in spark-ignition engines. *Energy Conversion and Management*. 2017;148:1233-1247.
- 20- Ahmadi Alni H. Study of knock intensity of gasoline and natural gas-air Mixtures at 10 compression ratio in a CT300 research engine [dissertation]. Ardabil: University of Mohaghegh Ardabili; 2016. [Persian]
- 21- Wei HQ, Feng DQ, Pan MZ, Pan JY, Rao XK, Gao DZ. Experimental investigation on the knocking combustion characteristics of n-butanol gasoline blends in a DISI engine. *Applied Energy*. 2016;175:346-355.
- 22- Wei H, Feng D, Pan J, Shao A, Pan M. Knock characteristics of SI engine fueled with n-butanol in combination with different EGR rate. *Energy*. 2017;118:190-196.
- 3- Akansu SO, Dulger Z, Kahraman N, Veziroglu TN. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004;29(14):1527-1539.
- 4- Jahirul MI, Masjuki HH, Saidur R, Kalam MA, Jayed MH, Wazed MA. Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(14-15):2219-2226.
- 5- Kalam MA, Masjuki HH. An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection. *Energy*. 2011;36(5):3563-3571.
- 6- Rahim AA, Rosli Abdullah N. Effect of alcohol-gasoline blends (ethanol) on performance and emission of SI engine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(20):11898-11901.
- 7- Yua X, Guoa Z, Hea L, Donga W, Suna P, Shia W, et al. Effect of gasoline/n-butanol blends on gaseous and particle emissions from an SI direct injection engine. *Fuel*. 2018;229:1-10.
- 8- Pipitone E, Beccari S. Performances improvement of a S.I. CNG bi-fuel engine by means of double-fuel injection. *SAE Technical Paper*. 2009 September.
- 9- Delpech V, Obiols J, Soleri D, Mispreveu L, Magere E, Kermarrec S. Towards an innovative combination of natural gas and liquid fuel injection in spark ignition engines. *SAE International Journal of Fuels Lubricants*. 2010;3(2):196-209.
- 10- Yontar AA, Doğu Y. 1-D modelling comparative study to evaluate performance and emissions of a spark ignition engine fuelled with gasoline and LNG. *MATEC Web of Conferences*. 2016;81:05003.
- 11- Putrasari Y, Praptijanto A, Nur A, Wahono B, Santoso WB. Evaluation of performance and emission of SI engine fuelled with CNG at low and high load condition. *Energy Procedia*. 2015;68:147-156.
- 12- Ha JY, Park JS, Kang JH. Effects of the throttle opening ratio and the injection timing of CNG on the combustion characteristics of a DI engine. *International Journal of Automotive Technology*. 2010;11:11-17.