

کالیبراسیون انژکتورهای موتور اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی و مقایسه نتایج تجربی شرایط کارکردی و آلاینده‌گی موتور ترکیب‌سوز با تک‌سوز

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
 eaaghdam@uma.ac.ir **ابراهیم عبدی اقدم***
 دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
 m_sarabi@uma.ac.ir **مهرداد سرابی**

چکیده

از عوامل مهم برای احتراق کامل، می‌توان به آوانس جرقه و تناسب پاشش مقدار سوخت با هوای ورودی به محفظه احتراق موتور اشاره نمود. در کار حاضر کالیبراسیون انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی انجام شده و عملکرد موتور در حالت‌های تک‌سوخت و ترکیب‌سوز با سوخت‌های مزبور، در نسبت تراکم ۱۰ و سرعت ۱۵۰۰ rpm بررسی شد. مقادیر سوخت پاشش شده توسط انژکتورها در شرایط مختلف اندازه‌گیری شده و برای هر انژکتور یک رابطه کالیبراسیون پاشش سوخت بدست آمد. نتایج کالیبراسیون نشان داد که فشار محل پاشش بر مقدار جرم سوخت پاشیده شده از انژکتور بنزین در طول پاشش معین تاثیر داشته، اما در انژکتور گاز طبیعی تغییری را در مقدار جرم گاز پاشیده شده نشان نداد. در بررسی پارامترهای عملکردی موتور در حالت‌های مختلف، مقادیر گشتاور و imep تک‌سوخت بنزین بیشتر از حالت ترکیب‌سوز بوده و حالت تک‌سوخت گاز طبیعی کمترین مقدار را داشت. همچنین مقادیر تولید آلاینده‌های HC و CO با افزایش آوانس جرقه افزایش یافته و عموماً در حالت تک‌سوخت با بنزین بیشتر از سایر حالت‌ها مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون انژکتور، موتور اشتعال جرقه‌ای، ترکیب‌سوز، بنزین، گاز طبیعی، آلاینده‌گی.

Calibration of Gasoline-NG Dual-Fuel SI Engine Injectors and Comparison of The Performance and Emission of a Dual-Fuel Mode with Single Fuel Case

E. Abdi Aghdam Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

M. Sarabi Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

Abstract

Spark advance and fuel injection in proportion with inlet air into the engine combustion chamber are important factors in achieving complete combustion. In the current study, gasoline and NG injectors were calibrated and engine performance in dual fuel and single fuel modes were analyzed at the compression ratio of 10 and engine speed of 1500 rpm. The amounts of fuel injected by the injectors were measured in different modes and a calibration relationship for fuel injection was obtained for each of the injectors. The calibration results indicated that the pressure at injection location affected the amount of the fuel injected by the gasoline injector; however, no such changes were observed in the NG injector. The analysis of engine performance parameters demonstrated that engine torque and imep in gasoline single fuel mode were higher than those in gasoline-NG dual fuel mode, while the lowest values in this regard belonged to NG single fuel mode. Results also showed that HC and CO emissions increased with the increase of spark advance, the highest levels of which were observed in gasoline single fuel mode.

Keywords: Injector Calibration, Spark Ignition Engine, Dual Fuel, Gasoline, Natural Gas, Emission.

گشتاور بالاتری را در نسبت تراکم برابر نسبت به گاز طبیعی دارند [۳]. با توجه به نکات ذکر شده می‌توان با ترکیب این دو سوخت معایب کارکرد موتور با هر یک از این سوخت‌ها به صورت تک‌گانه را کم‌رنگ کرده و به بهترین حالت عملکرد موتور و کمترین میزان تولید آلاینده‌گی دست یافت، پس مناسب است از موتور تک‌گانه‌سوز به سمت موتور ترکیب‌سوز حرکت نمود. امروزه انژکتورها وظیفه پاشش سوخت به راهگاه ورودی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای پاشش راهگاهی را بر عهده داشته و به کمک سیستم مدیریت موتور، مقدار سوخت مورد نیاز برای احتراق کامل را با دقت بیشتری در هر چرخه کاری موتور تامین می‌کنند. همچنین عملکرد مناسب انژکتورهای سوخت و کالیبراسیون دقیق آنها در موتورهای اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که در این نوع موتورها دو سوخت با نسبت‌های مختلف بطور همزمان پاشش انجام داده و از این رو برای حفظ نسبت

۱- مقدمه

از عوامل مهم برای ایجاد احتراق کامل در یک موتور احتراق داخلی، ورود مقدار سوخت و هوای معین و عموماً استوکیومتری به داخل محفظه احتراق می‌باشند و به همین منظور سیستم‌های پاشش انژکتوری در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با دقت بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و با توجه به کنترل بازخورد آلاینده‌ها برای مطابقت با مقررات آلاینده‌گی جهانی استفاده گسترده‌ای یافته است [۱]. بخشی از سیستم حمل‌ونقل از موتورهای اشتعال جرقه‌ای استفاده می‌کنند که در نسبت تراکم پایین و با خروجی گازهای آلاینده بالا کار می‌کنند و به طور کلی موتورهای اشتعال جرقه‌ای بنزین‌سوز، آلاینده‌های HC، CO و CO₂ بالاتری را نسبت به گاز طبیعی تولید می‌کنند [۲]. همچنین موتورهای بنزین‌سوز مقاومت به کوبش کمتر و تولید توان و

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eaaghdam@uma.ac.ir

معین دو سوخت و برقراری نسبت هوا به سوخت معین در محفظه احتراق نیازمند دقت بالای کالیبراسیون انژکتور است.

لان و همکارانش [۴] یک مدل شبیه‌ساز برای کالیبراسیون سوخت در استارت سرد موتورهای بنزینی انژکتوری پاشش راهگاهی بر اساس داده‌های در دسترس آزمایش‌های منظم موتور ارائه دادند. آنها مدل را بر روی دو موتور بنزینی اشتعال جرقه‌ای پاشش راهگاهی چند منطقه-ای اعمال کرده و مدل، مقدار سوخت تبخیر شده در راهگاه ورودی و در داخل سیلندر را برای هر زاویه میل‌لنگ به صورت چرخه به چرخه در طی فرآیند استارت سرد تخمین زد. کاظمی و مظاهری [۵] در یک پژوهش تجربی تاثیر پارامترهای هندسی انژکتور پیچشی به عملکرد آن را بررسی کرده و اثرات پارامترهای هندسی را بر روی اندازه و سرعت اسپری قطرات مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند آزمایش‌های عملکردی انجام یافته و همچنین بانک اطلاعاتی تدوین شده می‌تواند برای کالیبراسیون نرم‌افزارهای طراحی انژکتور مورد استفاده قرار گیرد. دیکسون و شنتون [۶] در موتور پاشش راهگاهی اشتعال جرقه‌ای یک روش کالیبراسیون دینامیکی را ارائه دادند. آنها نشان دادند که برای کالیبراسیون سیستم‌های سوخت‌رسانی و استراتژی کنترل سرعت موتور، یک اعتبار سنجی تجربی برای شناسایی متد سیستم نیاز است. انانند و همکاران [۷] مشخصه‌های پاشش مخلوط بنزین و اتانول را در یک انژکتور پاشش راهگاهی چند روزه بررسی کردند. آنها ساختار پاشش و گسترش قطرات برای مخلوط اتانول-بنزین را در فشار پایین انژکتور به کمک تکنیک تصویربرداری لیزری مطالعه و مقدار جرم سوخت پاششی، ساختار پاشش مخلوط، میزان نفوذ و رشد اندازه قطرات سوخت را در دو فشار پاشش انژکتور متفاوت تخمین زدند. همچنین نشان دادند که نتایج برای پاشش بنزین و اتانول با در نظر گرفتن تفاوت در لزجت دو سوخت، دارای مشخصه‌های نزدیک به هم از جمله پیشروی پاشش و اندازه قطرات سوخت مشابه هستند.

راجاگوپالان و همکاران [۸] یک سیستم کنترل برون خطی و بهینه‌سازی شده به کمک الگوریتم ژنتیک برای نسبت هوا به سوخت در موتورهای بنزینی را طراحی و کالیبره نموده و نشان دادند که روش مورد ارائه به طور همزمان و به مقدار قابل توجهی با معیارهای کارایی و ثبات تطابق داشته و نیاز به تنظیم مجدد و مکرر نسبت هوا به سوخت در خودرو را کاهش می‌دهد.

عبدی‌اقدم و فرهنگ [۹] پاسخ آنالیزور گاز به تغییر کیفیت مخلوط ورودی در یک موتور تک سیلندر پژوهشی در حالت گازسوز را بررسی کردند. آنها از آنالیزور گاز مارک ساکسون^۱ استفاده کرده و مدت زمان پاسخ آنالیزور گاز خروجی به تغییر شرایط موتور را ارزیابی نمودند. آنها نشان دادند که میزان تاخیر در تشخیص تغییر برای HC نسبت به CO و λ (کیفیت هوا به سوخت) طولانی‌تر است و همچنین طول تغییرات سریع برای HC سریعتر از CO و برای CO سریعتر از λ است. هه و همکارانش [۱۰] تاثیر رقیق کردن بار تنفسی موتور را به روی فرآیند احتراق و آلاینده‌ها در یک موتور چهارسیلندر اشتعال جرقه‌ای با استفاده از سوخت گاز طبیعی بررسی کردند. آنها آلاینده‌های HC، CO و NO_x را به کمک آنالیزور گازهای خروجی موتور اندازه-

گیری کردند.

عبدی اقدم و همکارانش [۱۱] آلاینده‌های خروجی یک موتور تک‌سیلندر پژوهشی اشتعال جرقه‌ای را در حالت‌های بنزین‌سوز و گازسوز در نسبت تراکم‌های ۹ و ۱۰ بررسی کردند. آنها به کمک آنالیزور گاز نسبت هم‌ارزی مورد نظر در موتور را تنظیم نموده و همچنین مقادیر HC، CO و CO_2 موجود در گازهای حاصل از احتراق را بدست آوردند. در پژوهش دیگری عبدی اقدم و زمزم [۱۲]، به کمک یک مدل شبیه‌ساز ترمودینامیکی، نشستی موتور XU7JP/L3 را با تغییر سرعت و عمر کارکرد موتور بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش کارکرد موتور میزان نشستی سیلندر موتور افزایش چشمگیری می‌یابد. چوپنگ [۱۳] اثر کارایی انژکتور بنزین تک سوراخه را در حالی که اتانول در دمای بالا پاشش شود از حیث جرم سوخت پاششی، نرخ جریان و ضریب تخلیه بررسی کرد. او دریافت که در دمای کاری 40°C انژکتور، اتانول مقدار سوخت بیشتری نسبت به بنزین تحویل داده و منجر به ضریب تخلیه بیشتر می‌شود. پارک و همکاران [۱۴] استراتژی بهینه‌سازی و کالیبراسیون برای یک موتور دیزل را با طرح آزمایش بیان نموده و همچنین پارامترهای راهگاه ورودی و کنترل سوخت را به کمک بهینه‌سازی‌های عددی و مدل رگرسیون کالیبره و تنظیم نمودند.

دی‌لوریو و همکاران [۱۵] در یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای ترکیبی‌سوز بنزین-گازطبیعی با پاشش مستقیم بنزین و پاشش راهگاهی گازطبیعی اقدام به فیلم‌برداری سریع از داخل محفظه احتراق نمودند. آنها نشان دادند که گسترش جبهه شعله در حالت ترکیب‌سوز سریعتر از حالت گازطبیعی است و همچنین در شرایط استوکیومتری با افزودن درصد گازطبیعی ضریب تغییرات (COV) مربوط به imep^2 کاهش می‌یابد. پن و همکاران [۱۶] رفتار احتراق را در حالت بار جزئی موتور با پاشش مستقیم بنزین و پاشش راهگاهی متان بررسی کرده و نشان دادند با افزایش درصد متان قله فشار داخل سیلندر کاهش یافته است. راماسامی و همکاران [۱۷] یک پژوهش تجربی بر روی یک موتور اشتعال جرقه‌ای چهار سیلندر ترکیب‌سوز بنزین-گازطبیعی با درصد سوخت غالب گازطبیعی انجام دادند. آنها پارامترهای آلاینده‌گی و عملکردی موتور در حالت ترکیبی سوز با حالت تک سوخت گازطبیعی را مقایسه کردند و نشان دادند با افزایش بنزین در مخلوط، گشتاور و آلاینده HC افزایش یافته است. همچنین سیگ و همکاران [۱۸] در پژوهشی بر روی یک موتور تک سیلندر توربوشارژ اشتعال جرقه‌ای ترکیبی‌سوز بنزین-متان با پاشش مستقیم بنزین و پاشش راهگاهی متان، نشان دادند که با افزایش درصد متان در مخلوط، imep و شدت کوبش کاهش می‌یابد. صفر و همکاران [۱۹]، تاثیر شمع‌های چند الکترودی در راستای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌های خروجی موتور اشتعال جرقه‌ای را بررسی کرده و نشان دادند که شمع‌های چند الکترود میزان گشتاور ترمزی را افزایش داده و آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته را کاهش می‌دهد. موتورهای ترکیب‌سوز با دو سیستم سوخت‌رسانی مجزا به‌خاطر نیاز به دقت بالا در پاشش مقدار سوخت لازم از هر سوخت در هر

^۱ Indicated mean effective pressure

^۱ Saxon

چگالی 746 kg/m^3 در نظر گرفته شد. ترکیب گاز طبیعی به شرح جدول ۲ با پایه درصد حجمی گونه‌ها [۲۲] با فرمول شیمیایی متوسط بخش هیدروکربن $C_{1.04}H_{3.97}$ استفاده شد. از ترکیب گاز طبیعی حدود ۹۴/۹۱

جدول ۱- مشخصات موتور پژوهشی CT300

قطر سیلندر	۹۰ mm
کورس پیستون	۷۰ mm
حجم جابجایی	470 cm^3
نسبت تراکم	۱۰
سیستم جرقه‌زنی	الکترونیکی با قابلیت تنظیم یک درجه میل‌لنگ
سیستم سوخت‌رسانی	پاشش به مسیر ورودی موتور
سیستم روغن‌کاری	فشاری
روش خنک‌کاری	با آب
تعداد و موقعیت سوپاپ	۲ OHV
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ ورودی	50° aBDC و باز و بسته شدن سوپاپ
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ خروجی	40° bBDC و باز و بسته شدن سوپاپ
نوع تنفس	طبیعی با صافی و مخزن آرامش
شکل محفظه	دیسکی با پیستون سر تخت



شکل ۱- نمای از موتور پژوهشی تک سیلندر

درصد مربوط به هیدروکربن‌ها و مابقی بصورت ناخالصی از CO_2 و N_2 بود. با این فرض که برای گاز طبیعی کسر حجمی را می‌توان بصورت کسر مولی نیز بکار گرفت، رابطه استوکیومتری مخلوط هوا با سوخت ترکیبی بنزین و گاز طبیعی را می‌توان بصورت رابطه (۱) بیان کرد.

$$\bar{x}C_{7.76}H_{13.1} + (1 - \bar{x})(0.9491C_{1.04}H_{3.97} + 0.00694CO_2 + 0.045N_2) + \alpha_x(O_2 + 3.76N_2) \quad (1)$$

که در آن \bar{X} کسر مولی بنزین در سوخت ترکیبی و α_x 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 (\bar{X}) و جرمی (x) بنزین در سوخت ترکیبی را می‌توان بصورت رابطه (۲) بدست آورد:

چرخه کاری موتور، نیازمند کالیبراسیون دقیق هر یک از انژکتورهاست. همچنین در بررسی پیشینه پژوهش در ادبیات فن باز تا کنون به طور واضح و روشنی مطالبی در خصوص کالیبراسیون انژکتورهای سوخت بنزین و گاز طبیعی بیان نشده است و همواره سایر پژوهشگران به طور ضمنی به کالیبراسیون انژکتورها اشاره کوتاهی نموده‌اند، بنابراین ارائه یک متد عملی و کاربردی کالیبراسیون انژکتورهای سوخت بنزین و گاز طبیعی در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش راهگامی با انژکتورهای مرسوم و پرکاربرد ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه سوخت گاز طبیعی از جمله سوخت‌های در دسترس، ارزان و با آلاینده‌گی کم است، بدین جهت ترکیب‌سوزی گاز طبیعی با بنزین در راستای بهبود اقتصاد سوخت، کاهش آلاینده‌گی و رفع مشکل کوبش در موتورهای بنزینی از جمله نوآوری‌های کار حاضر می‌توان تلقی کرد. در کار حاضر ابتدا انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی در شرایط پاشش مشابه به راهگاه ورودی موتور در طول پاشش‌ها و فشارهای مختلف محل پاشش کالیبره شدند. در مرحله بعد از موتور پژوهشی به صورت تک سوخت بنزین و گاز طبیعی در نسبت تراکم ۱۰ و سرعت 1500 rpm در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری و بار کامل در آوانس‌های مختلف جرقه داده‌های تجربی استخراج شده و سپس موتور مزبور در حالت ترکیب‌سوز ۶۰٪ جرمی بنزین و ۴۰٪ جرمی گاز طبیعی تنظیم شده و نتایج تجربی بدست آمد.

۲- ابزار تجهیزات تجربی

در این پژوهش از سکوی آزمایش ساخت شرکت گونت^۱ آلمان مدل CT300 با یک موتور پژوهشی تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای کوپله شده به یک دینامومتر آسنکرون با قابلیت تنظیم سرعت استفاده شده است. سیستم‌های سوخت‌رسانی به صورت دو مجموعه مجزا برای سوخت‌های گاز طبیعی و بنزین و همچنین زمانبندی جرقه [۲۰] از حالت کاربراتوری و مکانیکی به انژکتوری الکترونیکی با قابلیت تنظیم زمان آغاز پاشش و طول پاشش سوخت‌ها و زمانبندی جرقه توسط کاربر ارتقا یافته است بطوریکه امکان کار موتور با سوخت بنزین و یا گاز طبیعی و حالت ترکیب‌سوز (بنزین-گاز طبیعی) وجود دارد. طی کار حاضر پیستون کاسه‌دار موتور به حالت سر تخت تبدیل شد. مشخصات موتور پژوهشی مزبور در جدول ۱ به اختصار ذکر شده و شکل ۱ نمای از این موتور پژوهشی تک سیلندر را نشان می‌دهد.

پاشش سوخت‌های گاز طبیعی و بنزین به صورت انژکتوری به راهگاه ورودی موتور مذکور انجام گرفت و میزان پاشش هر انژکتور (طول پاشش)، زاویه آغاز پاشش و زمانبندی جرقه به کمک مجموعه مدیریت موتور تنظیم شد. نظر به امکان تاثیر فشار محل پاشش، انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی موتور تحت شرایط مختلف طول پاشش و فشار محل پاشش کالیبره شدند، بطوریکه با استفاده از روابط همبستگی حاصله براحتی می‌توان مقدار سوخت‌های پاشیده شده را از طول پاشش و فشار محل پاشش برآورد کرد. در کار حاضر از یک دستگاه آنالیزور ساکسون InfraLyte-CL [۹] برای آنالیز گازهای خروجی شامل CO و HC استفاده شد.

در این بررسی فرمول شیمیایی متوسط بنزین $C_{7.76}H_{13.1}$ [۲۱] با

^۱ Gunt

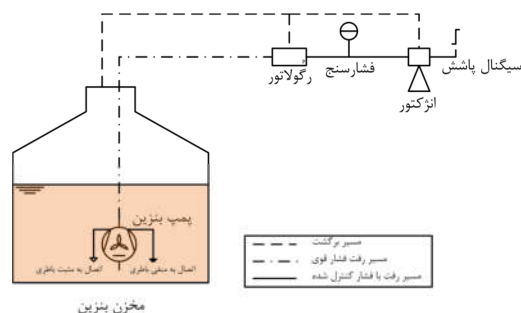
$$\bar{x} = \frac{x}{\frac{M_G}{M_{NG}} + \left(1 - \frac{M_G}{M_{NG}}\right) \times X} \quad (2)$$

جدول ۲: اجزاء سازنده گاز طبیعی [۲۳]

درصد اجزا	ترکیبات سازنده
۷۸٫۳۳۲٪	CH ₄
۴٫۶۷۲٪	C ₂ H ₆
۱٫۱۳۷٪	C ₃ H ₈
۰٫۴۸۴٪	C ₄ H ₁₀
۰٫۱۸۱٪	C ₅ H ₁₂
۰٫۶۹۴٪	CO ₂
۰٫۴۵٪	N ₂

۲-۱- کالیبراسیون انژکتور

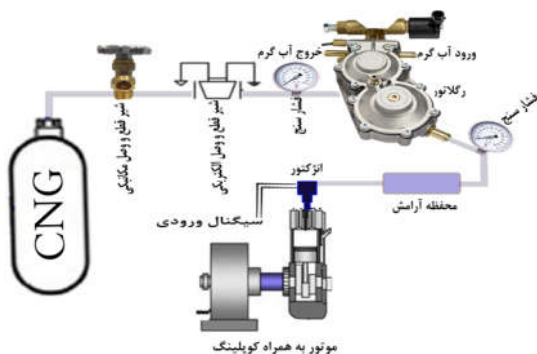
با توجه به اینکه سوخت تزریقی بایستی در طول کورس مکش توانایی تغذیه موتور را داشته باشد، لذا ضروری است فشار پشت انژکتورها در حد معین و مطلوبی باشد. همچنین این فشار باید توسط مکانیزمی در محدوده ثابتی حفظ شود. در تامین فشار پشت انژکتور بنزین از یک پمپ بنزین مستغرق استفاده شد. همچنین مکانیزم به کار رفته در پاشش گاز طبیعی که بتواند چنین فشاری را تامین کند یک سیستم پرفشار به همراه رگلاتور تنظیم فشار و مدار بای پس است. سوخت گاز طبیعی توسط انژکتور خودرو وانت نیسان مدل رومانو^۱ و کد Class2 67R-010092 با فشار نسبی ۲٫۵ بار پشت انژکتور و سوخت بنزین توسط انژکتور بنزین والتو^۲ با شماره فنی H001-01P002A که اغلب بر روی موتور پژو ۲۰۶ نصب می‌گردد، با فشار نسبی پشت انژکتور ۳٫۵ بار پاشیده شد. شکل ۲ طرحواره‌ای از مکانیزم سوخت‌رسانی به انژکتور بنزین ترسیم شده است. در این سیستم، سوخت



شکل ۲- شماتیکی از سیستم تنظیم فشار انژکتور بنزین

اضافی ناشی از کاهش فشار به مخزن بازگردانده می‌شود. همچنین یک دستگاه فشارسنج، فشار پشت انژکتور را می‌سنجد. برای جلوگیری از توقف حباب گاز پشت انژکتور و توقف پاشش، سوخت پشت انژکتور به صورت چرخه در جریان است [۲۳].

در سیستم سوخت‌رسانی گاز طبیعی هیچ مسیر برگشتی برای گاز وجود ندارد. همچنین دو عدد فشارسنج برای نمایش فشار پشت انژکتور و فشار مخزن تعبیه شده است. شکل ۳ طرحواره سیستم سوخت‌رسانی به انژکتور گاز را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طرحواره‌ای از سیستم تنظیم فشار انژکتور گاز طبیعی

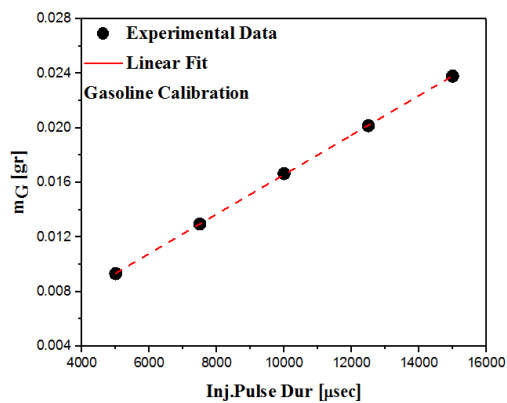
قبل از انجام آزمایشات مربوط به تست موتور و مشخصه‌های عملکردی و آلاینده‌گی حالت ترکیب‌سوز با نسبت‌های جرمی معین، کالیبراسیون انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی به کمک مکانیزم طراحی شده که طرحواره‌ای از تجهیزات مربوط به آن‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده انجام گردید.

به منظور شبیه‌سازی مانیفولد ورودی از دو محفظه مجزای مجهز به مانومتر یکی برای انژکتور گاز طبیعی و دیگری برای انژکتور بنزین استفاده شد که برای ایجاد فشارهای متغیر در داخل محفظه یک کمپرسور به کار گرفته شد. با توجه به ماهیت سوخت بنزین سنجش میزان جرم پاشش سوخت برای پالس‌های تنظیم‌شده به راحتی انجام شد بطوری که تعداد پالس پاشش برای هر طول پاشش چنان در نظر گرفته شد که حداقل ۲۲gr بنزین به داخل پیمانه‌ی اندازه‌گیری تزریق شود. دقت اندازه‌گیری ترازو ۰٫۰۱gr بود که خطایی کمتر از ۰٫۰۰۵٪ نتیجه می‌دهد. اما برای سوخت گاز طبیعی و با توجه به ماهیت گازی شکل آن و عدم توانایی در سنجش دقیق جرم پاشیده شده از سیستم سیلندر و نایلکس ایزوله استفاده شد. شکل ۴ طرحواره‌ای از تجهیزات کالیبراسیون انژکتور گاز طبیعی را نشان می‌دهد. گاز طبیعی توسط انژکتور به درون یک نایلکس انعطاف‌پذیر، که درون یک محفظه بسته با قابلیت کنترل فشار محفظه توسط دمش یا مکش کمپرسور برای شبیه‌سازی فشار راهگاه پاشش سوخت موتور قرار گرفته بود، تزریق شد. پس از خاتمه‌ی مجموعه‌ی پالس‌های آزمایش این گاز به کمک مکانیزم سیلندر پیستون، از نایلکس به کیپسول انتقال داده شد و جرم آن بصورت تغییر جرم کیپسول با استفاده از یک ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. از تقسیم جرم سوخت به تعداد پالس‌های پاشش آزمایش جرم سوخت پاشیده شده در هر پالس برآورد شد. بدین ترتیب تأثیرات فشار و دمای مانیفولد بر روی کارکرد انژکتورها و میزان جرم پاشیده شده در طول پاشش‌های مشخص مورد سنجش و بررسی قرار گرفت. با توجه به دقت ۰٫۰۱gr ترازو و مقدار جرم گاز در هر سنجش (حدود ۱gr) خطای نسبی جرم سوخت هر پالس حدود ۰٫۱۴٪ حاصل شد که با ۱۰ بار تکرار در هر شرایط آزمایش و میانگین‌گیری از آنها دقت

^۱ ROMANO

^۲ Valeo

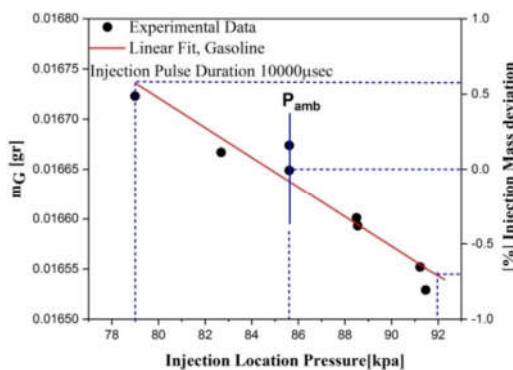
بنزین برحسب طول پاشش حاصل از نتایج تجربی، تحت شرایط تزریق به فشار جو را نشان داده و رابطه (۳) برازش خطی مربوط به داده‌های تجربی نشان داده شده در شکل ۵ را بیان می‌کند.



شکل ۵- منحنی تغییرات جرم سوخت پاششی بنزین برحسب طول پاشش، تحت شرایط تزریق به فشار جو به همراه برازش خطی

$$m_G = 0.0021 + 1.4472E-6 \times IPD \quad (3)$$

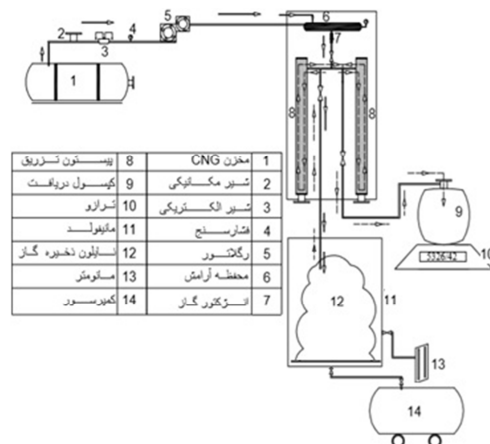
که در آن m_G مقدار جرم سوخت بنزین پاشیده شده و IPD طول پالس پاشش سوخت به ازای واحد میکروثانیه می‌باشد را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ممکن است فشار در مانیفولد ورودی موتور (محل پاشش سوخت) نسبت به فشار محیط انحرافات داشته باشد، عمل کالیبراسیون در طول پاشش‌های مختلف تحت شرایط پاشش به فشارهای انحراف یافته از فشار جو (گستره‌ی $\pm 6kPa$) انجام گرفت. شکل ۶ تغییرات گستره‌ی جرم سوخت پاششی بنزین با طول پالس $10000\mu sec$ را برحسب فشار محل پاشش سوخت از بازه $92kPa-79kPa$ که تقریباً $\pm 6kPa$ انحراف از فشار جو را شامل می‌شود به همراه برازش خطی مربوطه و درصد انحراف نسبی جرم پاششی نسبت به مقدار پاشش سوخت در فشار جو نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی تغییرات جرم پاشیده شده برحسب فشار محل تزریق بنزین و درصد انحراف نسبی جرم پاششی تحت طول پاشش $10000\mu sec$

ملاحظه می‌شود که در گستره‌ی فشار مذکور حداکثر انحراف نسبی جرم پاشیده شده حدود 0.6% درصد است. برای سایر طول پاشش‌های

برآورد بمراتب بالاتر برده شد.



شکل ۴- طرحواره مکانیزم کالیبراسیون انژکتور گاز

۲-۲- داده برداری تجربی از موتور

پس از اتمام مرحله کالیبراسیون انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی و استخراج روابط آنها، موتور اشتعال جرقه‌ای در شرایط تک‌سوز بنزین و گاز طبیعی در نسبت تراکم ۱۰، سرعت موتور $1500rpm$ و نسبت هم-ارزی استوکیومتری اقدام به راه‌اندازی شده و پس از رسیدن موتور به دمای کاری و شرایط پایا، داده‌های تجربی ثبت و ضبط شدند. در مرحله بعد به کمک روابط کالیبراسیون انژکتورها، مقادیر متناسب با نسبت استوکیومتری و شرایط ترکیب‌سوز مد نظر، مقدار سوخت پاشیده شده از هر انژکتور بدست آمده و داده‌های تجربی از موتور اشتعال جرقه‌ای در شرایط ترکیب‌سوز 60% جرمی بنزین و 40% جرمی گاز طبیعی استخراج گردیدند. داده‌برداری برای هر حالت در آوانس‌های مختلف جرقه با گام 2% درجه میل‌لنگ و با تناوب 400 چرخه‌ی فرکانس داده‌برداری $120kHz$ انجام یافته و داده‌های مستخرج خام آزمایش‌های تجربی، توسط کد کامپیوتری مبتنی بر زبان برنامه نویسی فورتن پردازش شد. همچنین برای سنجش λ و آلاینده‌های CO_2 ، CO و HC از دستگاه آنالیزور مارک ساکسون [۹] بهره برده شد.

۳- بحث بر روی نتایج

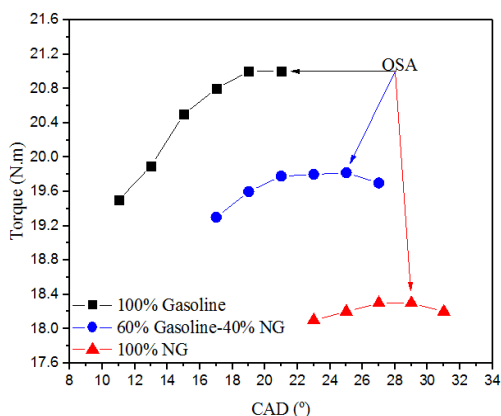
از عوامل موثر در عملکرد بهینه موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی، احتراق مطلوب مخلوط سوخت و هوا درون محفظه احتراق موتور است. بدین ترتیب بررسی و مطالعه شرایط احتراقی و فراهم‌سازی شرایط بهینه احتراق دارای اهمیت ویژه‌ای است. در کار حاضر ابتدا نتایج تجربی مقادیر سوخت پاشش یافته به ازای طول پاشش‌ها و فشار محل پاشش مختلف انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی بدست آمده و انژکتورها کالیبره شد، سپس نتایج تجربی عملکردی و آلاینده‌ی حاصله از موتور پژوهشی برای شرایط تک سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب‌سوز 60% جرمی بنزین و 40% جرمی گاز طبیعی در نسبت تراکم ۱۰ و سرعت $1500rpm$ حداقل در پنج آوانس مختلف جرقه انجام گرفت. با توجه به موارد ارائه شده بر بخش توضیحات سازوکار کالیبراسیون انژکتورها، ابتدا انژکتور بنزین در شرایط پاشش به فشار جو مورد سنجش قرار گرفت. شکل ۵ تغییرات جرم سوخت پاششی

که در آن m_{CNG} مقدار جرم سوخت گازطبیعی پاشیده شده بر حسب گرم و IPD طول پالس پاشش سوخت به ازای واحد میکروثانیه است. با توجه به اینکه در جریان سیال گازی از یک روزنه یا شیپوره در حالت خفگی، تغییرات جزئی فشارهای گلوبی و فشار سکون تغییری در مقدار جرم عبوری گاز از روزنه نمی‌کند، لذا می‌توان عدم تغییرات مقدار سوخت گازطبیعی پاشیده شده از انژکتور بر حسب تغییر فشار محل پاشش را به کمک نظریه جریان سیال از شیپوره در حالت خفگی بررسی کرد. در جریان گاز از یک روزنه یا شیپوره نسبت فشار بحرانی برای حالت خفگی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود [۲۴].

$$\frac{P_T}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (6)$$

که در آن P_0 و P_T به ترتیب فشار در گلوبی و فشار سکون و γ نسبت گرمای ویژه است و به ازای $\gamma = 1.3$ (مربوط به متان) نسبت فشار بحرانی برابر با ۰.۵۴۶ به دست می‌آید. با توجه به اینکه در کار حاضر فشار مطلق محل تخلیه حدود ۰.۸۶bar و فشار مطلق پشت انژکتور تقریباً ۳.۳۶bar می‌باشد، بنابراین نسبت فشارها ۰.۲۵۶ حاصل می‌شود و این مقدار بسیار کمتر از نسبت فشار بحرانی است. لذا با تغییر $\pm 6kPa$ فشار محل تخلیه، نسبت فشارهای مطلق محل تخلیه و پشت انژکتور کمتر از نسبت فشار بحرانی باقی مانده و جریان جرمی سیال گازی گذرنده از روزنه انژکتور گازطبیعی در شرایط خفگی باقی بوده و دبی جریان جرمی ثابت می‌ماند.

پس از اتمام کالیبراسیون انژکتورهای بنزین و گازطبیعی، نتایج تجربی شرایط عملکردی و آلاینده‌گی موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گازطبیعی و ترکیب‌سوز بنزین-گازطبیعی در شرایط غیر کوبشی [۳] استخراج شد. شکل ۸ گشتاور خروجی موتور را در سرعت ۱۵۰۰rpm و در حالت‌های تک سوخت بنزین و گازطبیعی و ترکیب‌سوز ۶۰٪ جرمی بنزین و مابقی گازطبیعی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که گشتاور خروجی در حالت تک سوخت بنزین بالاتر از سایرین و گشتاور خروجی در حالت گازطبیعی کمترین است، همچنین گشتاور خروجی حالت ترکیب‌سوز مابین حالت تک سوخت بنزین و گازطبیعی قرار گرفته است. رزولوشن دستگاه در این اندازه‌گیری ۰.۱N.m بود.



شکل ۸- تغییرات گشتاور خروجی موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گازطبیعی و ترکیب‌سوز ۶۰٪ جرمی بنزین

شکل ۹ تغییرات imep بر حسب آوانس جرعه را در حالت‌های تک

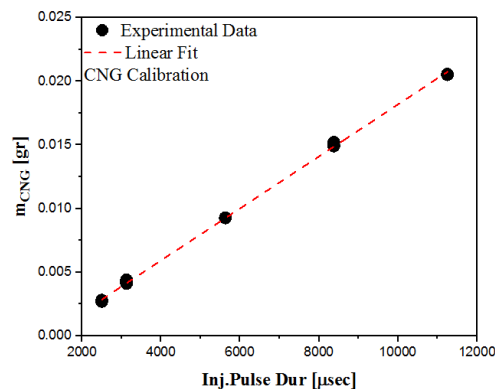
انتخاب‌شده نیز روند مشابه طی شده و ملاحظه گردید که با افزایش فشار نسبت به فشار اتمسفر، میزان جرم سوخت پاشیده شده اندکی کاهش و با کاهش فشار نسبت به فشار اتمسفر میزان جرم سوخت اندکی افزایش می‌یابد که این تغییرات رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. در ادامه برای سوخت بنزین توسط برازش مقادیر سوخت پاشیده شده بر حسب فشار محل پاشش در طول پاشش‌های مختلف، فرآیند برازش منحنی به مجموع آن‌ها اعمال شده و نهایتاً رابطه کلی مقدار سوخت پاشیده شده بر حسب طول پاشش و فشار محل تخلیه به صورت رابطه (۴) حاصل شد.

$$m_G (\text{gr}) = \left(\begin{aligned} &0.00625 + 6.75543 \times 10^{-7} IPD \\ &+ 5.07428 \times 10^{-11} IPD^2 \end{aligned} \right) \times P_{Port} \left(\begin{aligned} &-9.812 \times 10^{-5} \\ &+ 2.64624 \times 10^{-8} IPD - 2.45028 \times 10^{-12} IPD^2 \\ &+ 6.13 \times 10^{-17} IPD^3 \end{aligned} \right) \quad (4)$$

که در آن m_G مقدار جرم سوخت بنزین پاشیده شده بر حسب گرم، IPD طول پالس پاشش سوخت به ازای واحد میکروثانیه و P_{Port} فشار محل تخلیه انژکتور بنزین بر حسب کیلو پاسکال است. حداکثر خطای اندازه‌گیری در برآورد جرم سوخت پاششی از روابط (۳) و (۴) $\pm 0.05\%$ حاصل شد. با توجه به روش اشاره شده در قبل، نحوه کالیبراسیون انژکتور گازطبیعی با شبیه‌سازی مانیفولد ورودی و ایجاد فشارهای مختلف تشریح شد، داده‌برداری پاشش انژکتور گاز طبیعی در طول پالس‌های مختلف و فشارهای محل پاشش مختلف در گستره‌ی $\pm 6kPa$ ۸۷ انجام گرفت. نتایج نشان داد که تحت شرایط فشار حاکم، مقدار جرم گاز پاشیده شده از فشار محل پاشش متأثر نمی‌شود. لذا کالیبراسیون انژکتور گاز تحت شرایط دما و فشار پاشش اتمسفری کافی تشخیص داده شد.

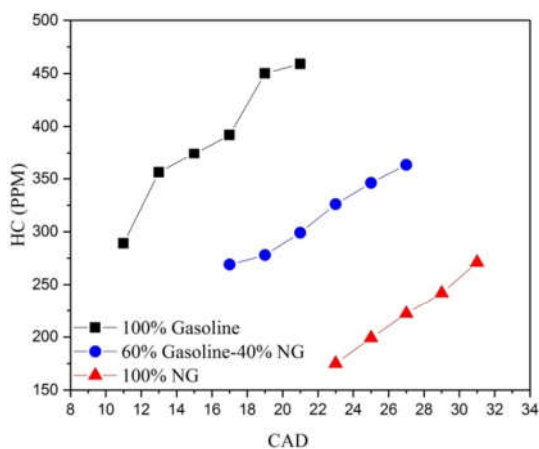
شکل ۷ مقدار جرم گازطبیعی پاشیده شده در هر پالس بر حسب طول پاشش را تحت شرایط تزریق به فشار جو به همراه برازش خطی مربوطه نشان می‌دهد که در گستره‌ی طول پاشش ۲۵۰۰μsec تا ۱۱۲۵۰μsec انحراف بین خط برازش و داده‌ها خیلی کوچک بوده و رفتار خطی قابل قبول می‌باشد. از برازش خطی داده‌های تجربی شکل ۷ رابطه (۵) حاصل شده است،

$$m_{CNG} (\text{gr}) = -0.00226 + 2.0439 \times 10^{-6} IPD \quad (5)$$



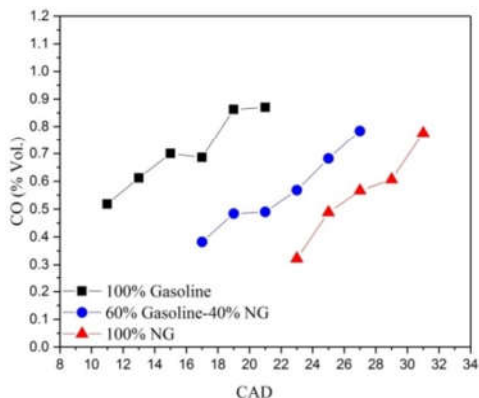
شکل ۷- منحنی تغییرات جرم سوخت پاششی انژکتور گازطبیعی بر حسب طول پاشش، تحت شرایط تزریق به فشار جو

شکل ۱۱ تغییرات آلاینده HC بر حسب تغییرات آوانس جرقه را در شرایط تکسوخ بنزین و گاز طبیعی و همچنین ترکیب سوز ۶۰٪ بنزین و مابقی گاز طبیعی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در حالت با سوخت بنزین مقدار آلاینده HC بیشترین است و همچنین در حالت ترکیب سوز، مقادیر این آلاینده در بین حالت تکسوخ بنزین و گاز طبیعی قرار گرفته است. همچنین با افزایش آوانس جرقه مقادیر آلاینده HC در تمامی حالت‌ها افزایش یافته است. با توجه به اینکه با افزایش آوانس جرقه مدت زمان نشت جرم گاز نسوخته به شکاف بالای سیلندر-پیستون در مرحله تراکم و احتراق افزایش یافته، مقدار جرم گاز نسوخته بیشتری وارد روزه‌ها شده و این گازها در مرحله انبساط به درون سیلندر بازگشته و یکی از منابع اصلی تولید آلاینده HC [۲۵] است. خطای اندازه‌گیری HC از اطلاعات سازندهی دستگاه آنالیزور گاز ± 12 ppm است.



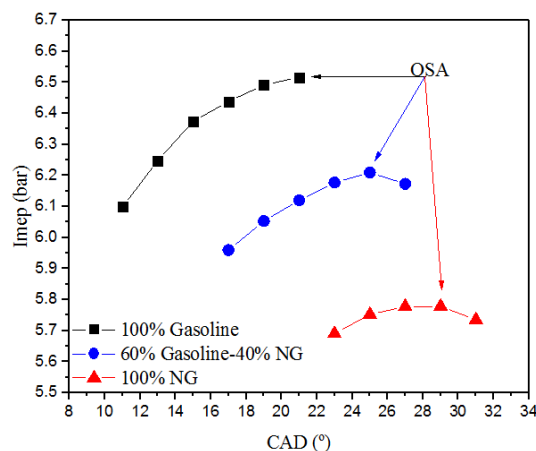
شکل ۱۱- تغییرات آلاینده HC خروجی موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب سوز ۶۰٪ جرمی بنزین

شکل ۱۲ تغییرات مقادیر آلاینده CO را در ترکیب‌های مختلف و با تغییرات آوانس جرقه نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که عموماً مقادیر این آلاینده با افزایش آوانس جرقه روند صعودی داشته است که یکی از علل این امر با توجه به شکل ۱۰ می‌تواند ناشی از کاهش نسبت



شکل ۱۲- تغییرات آلاینده CO خروجی موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب سوز ۶۰٪ جرمی بنزین

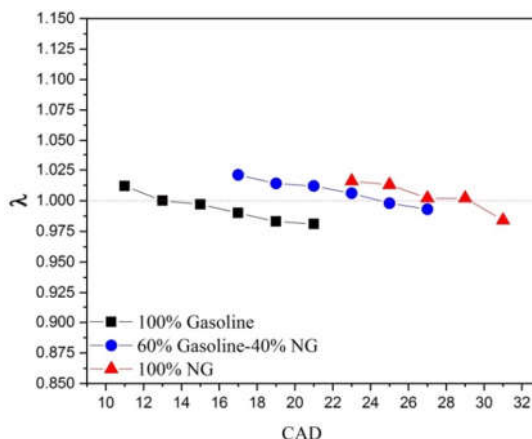
سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب سوز ۶۰٪ جرمی بنزین و مابقی گاز طبیعی نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که imep در حالت تک- سوخت گاز طبیعی کمتر از دو مورد دیگر است.



شکل ۹- تغییرات imep موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب سوز ۶۰٪ جرمی بنزین

با بررسی شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده شد که گشتاور خروجی و imep محل یکسانی را برای آوانس بهینه جرقه در ترکیبات مختلف نمایش داده و آوانس بهینه جرقه در حالت ترکیب سوز بنزین- گاز طبیعی بیشتر از شرایط تکسوخ بنزین است. افزایش آوانس جرقه در شرایط تکسوخ گاز طبیعی می‌تواند ناشی از سرعت سوختن آرام پایین‌تر گاز طبیعی نسبت به بنزین باشد.

شکل ۱۰ تغییرات نسبت هوا به سوخت ترکیب‌های مختلف را با تغییر آوانس جرقه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش آوانس جرقه نسبت هوا به سوخت کاهش یافته است و با توجه به ثابت بودن مقدار پاشش سوخت برای هر ترکیب علت این مساله می‌تواند ناشی از تغییرات دبی هوای ورودی با تغییر آوانس جرقه باشد که دمای گازهای خروجی و گازهای باقیمانده از چرخه قبل را متاثر می‌کند.

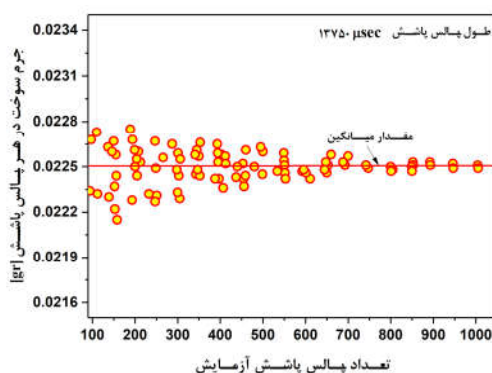


شکل ۱۰- تغییرات نسبت هوا به سوخت (lambda) موتور در حالت‌های تک سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب سوز ۶۰٪ جرمی بنزین

هوا به سوخت با افزایش آوانس جرقه باشد. خطای اندازه‌گیری این گاز توسط آنالیزور دستگاه $\pm 0.5\% \text{Vol}$ بیان شده است.

۴- آنالیز خطا

دلیل اهمیت خطا در کارهای تجربی، قبل از استخراج داده‌های اصلی سوخت بنزین به ازای طول پالس پاشش معین $13750 \mu\text{sec}$ تست‌های متعددی با تعداد پالس‌های پاشش متفاوت انجام گرفت و با اندازه‌گیری جرم سوخت پاشیده شده مقدار سوخت هر پالس پاشش محاسبه شد. شکل ۱۳ تغییرات جرم سوخت برآوردی در هر پالس را برحسب تعداد پالس پاشش آزمایش مربوطه به همراه میانگین آنها برای 105 آزمایش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وقتی تعداد پالس در آزمایش بیشتر می‌شود مقدار برآوردی به مقدار میانگین آزمایش‌ها نزدیکتر می‌شود. با توجه به اینکه دقت اندازه‌گیری ترازوی این بررسی $\pm 0.05 \text{gf}$ بود و مقدار بنزین در تعداد پالس 1000 حدود $22/5 \text{gf}$ اندازه‌گیری شده بود خطا در تعیین جرم سوخت هر پالس ناشی از ترازو 0.22% حاصل می‌شود.



شکل ۱۳ تغییرات جرم سوخت در هر پالس پاشش برحسب تعداد پالس پاشش آزمایش برای 105 آزمایش در طول پالس پاشش $13750 \mu\text{sec}$

در استخراج داده‌های گزارش شده در قسمت ۳ از ترازوی دقیق‌تر با دقت $\pm 0.1 \text{gf}$ استفاده شد و در انجام آزمایشات برای طول پالس پاشش‌های دیگر، تعداد پالس آزمایش‌ها طوری انتخاب شدند تا جرم سوخت بیش از $22/5 \text{gf}$ باشد که نتیجه آن خطایی کمتر از 0.05% را می‌دهد.

یکی از موارد مهم در آنالیز خطا دقت در کسر دو سوخت بکار رفته در کار حاضر است. با تعریف کسر جرمی بنزین در ترکیب از رابطه‌ی (۷ الف) می‌توان خطای کسر جرمی بنزین ناشی از خطا در تعیین جرم دو سوخت را یکمک رابطه‌ی (۷ ب) بدست آورد.

$$x = \frac{m_G}{m_G + m_{\text{CNG}}} = f(m_G, m_{\text{CNG}}) \quad (7 \text{ الف})$$

$$\frac{dx}{x} = \frac{\partial f / \partial m_G}{f(m_G, m_{\text{CNG}})} dm_G + \frac{\partial f / \partial m_{\text{CNG}}}{f(m_G, m_{\text{CNG}})} dm_{\text{CNG}} \quad (7 \text{ ب})$$

از انجام مشتقات جزئی رابطه‌ی (۷ ب) و اصل روی هم‌گذاری خطاها رابطه (۷ ج) حاصل می‌شود.

$$\frac{\Delta x}{x} = (1-x) \left(\frac{\Delta m_G}{m_G} + \frac{\Delta m_{\text{CNG}}}{m_{\text{CNG}}} \right) \quad (7 \text{ ج})$$

با توجه به اینکه در کار حاضر کسر بنزین $0/6$ بوده است و حداکثر خطاهای نسبی اندازه‌گیری دو سوخت 0.0005 و 0.0014 برآورد شد، خطای نسبی کسر بنزین 0.00076 یا 0.076% حاصل می‌شود که دقت مطلوبی است.

۵- نتیجه‌گیری

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی، مقدار پاشش هر یک از سوخت‌ها به ازای هر چرخه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و نیازمند دقت عملکردی و تعیین دقیق مقدار سوخت پاشیده شده توسط هریک از انژکتورها است. لذا کالیبراسیون انژکتورها در وضعیت مشابه به شرایط عملکردی و فشار محل پاشش در راهگاه ورودی موتور حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده، کالیبراسیون هر دو انژکتور مربوط به موتور پژوهشی تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز بنزین و گاز طبیعی انجام یافته و نتایج زیر حاصل شد:

- در گستره طول پاشش‌های معین برای هر دو سوخت در شرایط تزریق سوخت به فشار اتمسفر نتایج داده‌های تجربی و برازش خطی آنها کاملاً بر هم منطبق بوده و رفتاری خطی از خود نشان می‌دهند.
- با شبیه‌سازی مانیفولد ورودی و ایجاد فشارهای مختلف برای انژکتور گاز طبیعی مشاهده شد که مقدار جرم گاز پاشیده شده از فشار محل تخلیه متأثر نمی‌شود، ولی در انژکتور بنزین، فشار محل پاشش بر مقدار سوخت بنزین پاشش یافته اثر می‌گذارد.

موتور پژوهشی مورد استفاده در این پژوهش یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای مجهز به سیستم کنترل الکترونیکی توسط کاربر بود. پس از کالیبراسیون انژکتورهای بنزین و گاز طبیعی، داده‌های تجربی مورد نیاز از این موتور تحت حالت‌های تک‌سوخت بنزین و گاز طبیعی و ترکیب‌سوز بنزین-گاز طبیعی با 0.6% جرمی بنزین و مابقی گاز طبیعی استخراج شد.

همچنین با تثبیت طول پاشش سوخت در هر حالت، آوانس جرقه در بازه غیر کوبشی تغییر داده شد و پارامترهای عملکردی و آلاینده‌ی استخراج شد. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده نتایج زیر حاصل شد:

- مقادیر گشتاور و imep تک‌سوخت بنزین بیشتر از حالت ترکیب‌سوز و تک‌سوخت گاز طبیعی بود.
- آوانس بهینه جرقه در حالت تک‌سوخت بنزین کمترین و در حالت تک‌سوخت گاز طبیعی بیشترین مقدار به دست آمد.
- آلاینده HC با افزایش آوانس جرقه افزایش یافته و همچنین در حالت تک‌سوخت با بنزین بیشینه شد.
- آلاینده CO با افزایش آوانس جرقه در تمامی حالت‌ها روند صعودی داشت.

۶- نمادها

CAD	زاویه میل‌لنگ (°)
IPD	طول پالس پاشش سوخت به ازای میکروثانیه (μsec)

[۱۲] عبدی اقدم ا. و زمزم ا. بررسی اثر سرعت و کارکرد موتور XU7JP/L3 روی پدیده نشتی در حالت موتورگردانی با سوخت. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۸(۴): ۲۰۹-۲۱۸، ۱۳۹۷.

[13] Chuepeng S., Effects of heated ethanol on retrofit single-hole gasoline injector performance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8 p. 245-249, 2016.

[14] Park S., Kim Y., Woo S., Lee K., Optimization and calibration strategy using design of experiment for a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 1; 123:917-28, 2017.

[15] Di Iorio S., Sementa P., Vaglicco BM., Catapano F., An experimental investigation on combustion and engine performance and emissions of a methane-gasoline dual-fuel optical engine. *SAE Technical Paper*, (No. 2014-01-1329), 2014.

[16] Pan J., Li N., Wei H., Hua J., Shu G., Experimental investigations on combustion acceleration behavior of methane/gasoline under partial load conditions of SI engines. *Applied Thermal Engineering*. 5; 139:432-44, 2018.

[17] Ramasamy D., Goh CY., Kadirgama K., Benedict F., Noor MM., Najafi G., Carlucci AP., Engine performance, exhaust emission and combustion analysis of a 4-stroke spark ignited engine using dual fuel injection. *Fuel*, 1; 207:719-28, 2017.

[18] Singh E., Morganti K., Dibble R., Dual-fuel operation of gasoline and natural gas in a turbocharged engine. *Fuel*, 1; 237:694-706, 2019.

[۱۹] صفر م.، امی ف.، صوحی ز.، بررسی تجربی اثرات شمع های چند الکترودی در جهت بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌ها در موتور XU7JP/L3. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹، ۵۰(۴): ۱۰۵-۱۱۳.

[۲۰] عبدی اقدم ا.، عطایی ترزنگ م.، تأثیر گازهای سوخته مانده از چرخه قبل روی زمانبندی بهینه جرقه به کمک راهبرد پرش جرقه. فصلنامه تحقیقات موتور، ۵۰(۵): ۶۷-۷۵، ۱۳۹۷.

[21] Heywood J.B., *Internal combustion engine fundamentals*. Vol. 930, McGraw-hill New York, 1988.

[۲۲] عبدی اقدم ا.، سرایی م.، مهرداد خمیرانی م.، مطالعه تجربی سرعت سوزش آرام مخلوط دو سوخت (گازطبیعی - بنزین) با هوا در محفظه حرارتی کروی با فشار اولیه بالا. سوخت و احتراق، ۱۱(۱): ۱۲۱-۱۳۴، ۱۳۹۷.

[۲۳] علیپور ض.، مطالعه تأثیر تغییرات درون سیکلی سرعت موتور روی کسر جرمی سوخته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۳.

[24] Abdi Aghdam E., Kabir MM., Validation of a blowby model using experimental results in motoring condition with the change of compression ratio and engine speed. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1; 34(2):197-209, 2010.

[25] Namazian M., Heywood JB., Flow in the piston-cylinder-ring crevices of a spark-ignition engine: Effect on hydrocarbon emissions, efficiency and power. *SAE transactions*, 1:261-88, 1982.

ضریب تغییرات (٪)	COV
فشار موثر متوسط اندیکاتوری (bar)	imep
جرم بنزین (gr)	m _G
جرم گازطبیعی (gr)	m _{CNG}
جرم مولکولی بنزین (gr/mol)	M _G
جرم مولکولی گازطبیعی (gr/mol)	M _{NG}
فشار محیط اتمسفری (bar)	P _{amb}
فشار محل پاشش (تخلیه) (bar)	P _{port}
کسر جرمی	x
کسر مولی	\bar{x}
نسبت هوا به سوخت	λ
تعداد مول اکسیژن	α_s
نسبت گرمای ویژه	γ

۷- مراجع

[1] Wang X., Chen Z., Ni J., Liu S., Zhou H., The effects of hydrous ethanol gasoline on combustion and emission characteristics of a port injection gasoline engine. *Case Studies in Thermal Engineering*. 1; 6:147-54, 2015.

[2] Chandra R., Vijay VK., Subbarao PM., Khura TK., Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied Energy*. 1; 88(11):3969-77, 2011.

[3] Behrad R., Abdi Aghdam E., 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*. 25:1-9, 2019.

[4] Luan, Y., Henein, N.A., and Tagomori M.K., Port-Fuel-Injection Gasoline Engine Cold Start Fuel Calibration. *SAE Technical Paper*, (No. 2006-01-1052), 2006.

[۵] کاظمی ک. و مظاهری ک.، بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی انژکتور پیچشی بر عملکرد آن با استفاده از سیستم PDA، نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۹، ص ۱۰۳-۹۵، پاییز ۱۳۸۷.

[6] Dickinson P., Shenton A., Dynamic calibration of fuelling in the PFI SI engine. *Control Engineering Practice*, 17(1): p. 26-38, 2009.

[7] Anand T., Mohan A.M., Ravikrishna R., Spray characterization of gasoline-ethanol blends from a multi-hole port fuel injector. *Fuel*, 102: p. 613-623, 2012.

[8] Rajagopalan SS., Midlam-Mohler S., Yurkovich S., Dudek KP., Guezennec YG., Meyer J., A control design and calibration reduction methodology for AFR control in gasoline engines. *Control Engineering Practice*. 1; 27:42-53, 2014.

[۹] عبدی اقدم ا. و فرهنگ ب.، بررسی پاسخ آنالیزور گاز به تغییر کیفیت مخلوط ورودی در یک موتور تک سیلندر پژوهشی در حالت گازسوز، نهمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز و نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران، ۱۳۹۵.

[10] He Z., Jing Q., Zhu L., Zhang W., Huang Z., The effects of different intake charge diluents on the combustion and emission characteristics of a spark ignition natural gas engine. *Applied Thermal Engineering*. 5; 89:958-67, 2015.

[۱۱] عبدی اقدم ا.، فرهنگ ب.، سرایی م.، بررسی تجربی آلاینده‌های خروجی موتوری تک استوانه پژوهشی اشتعال جرقه‌ای در حالت‌های بنزین‌سوز و گازسوز، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات موتور، شماره ۳۹، ص ۵۵-۴۹، ۱۳۹۴.