

بررسی تجربی تأثیر تغییرات آوانس جرقه بر میزان گازهای مضر خروجی موتور گازسوز XU7/JPL3

سید آرش سید شمس طالقانی^{۱*} داریوش روشنی^۲

پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷، انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.9.3>

چکیده

موتورهای احتراق داخلی جرقه‌ای نسبت به زمان جرقه‌زنی حساس هستند. زمان بهینه جرقه‌زنی به سرعت و بار موتور و حتی نوع سوخت وابسته است. اگر به هر دلیلی این زمان دست‌کاری شود، روی عملکرد و محصولات احتراق موتور و در نتیجه میزان تولید آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. با توجه به بحران جهانی سوخت و لزوم استفاده از موتورهای با کارایی بالاتر و مصرف سوخت کمتر راهکارهای متنوعی جهت کاهش مصرف سوخت و افزایش کارایی موتورهای احتراق داخلی ارائه شده است. از آنجاکه موتور XU7/JPL3 محصول شرکت پژو دومین موتور پرتیراژ داخلی‌سازی شده کشور می‌باشد، این موتور به‌عنوان موتور مورد مطالعه در این تحقیق انتخاب شده است. بررسی نتایج آزمون تمام بار نشان می‌دهد که افزایش آوانس جرقه تا یک حد معین نسبت به حالت بنزینی باعث افزایش نسبی توان و افزایش میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن می‌شود. نتایج آزمون نیمه بار بیانگر این موضوع است که افزایش مقدار آوانس جرقه موجب کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی و افزایش آلاینده‌های هیدروکربن و اکسیدهای نیتروژن شده است، درحالی‌که بر روی آلاینده منو اکسید کربن تأثیر ندارد. مقادیر بهینه آوانس جرقه در حالت تمام بار و نیمه بار در شرایط گازسوز پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: موتور احتراق داخلی، آوانس جرقه، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن، منو اکسید کربن.

Experimental Investigation of Spark Advance of XU7/JPL3 Engine Effect on Exhaust Gas Emissions

Shams Taleghani, A.

Roshani, D.

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran Islamic Azad University, Dezful branch, Dezful, Iran

(Received: 2022/07/08 ; revised: 2023/01/15 ; Accepted: 2023/01/27 ; published: 2023/03/02)

ABSTRACT

Spark-ignition internal combustion engines are sensitive to ignition time. The optimum ignition timing depends on speed, engine load and even fuel type. If this time is manipulated for any reason, it affects on engine performance and combustion products and consequently the amount of pollutants. Due to the fuel crisis and the need to use engines with higher performance and lower fuel consumption, various strategies for reducing fuel consumption and increasing efficiency of internal combustion engines are presented. Since the XU7/JPL3, made by Peugeot, is the second high production engine in Iran, it has been selected in this investigation. The test results in full load condition show the ignition advance increment to a certain extent, increases power and NOx emissions relative to gasoline mode. The half load results indicate that the increment of the ignition advance angle reduces the brake specific fuel consumption, and NOx and HC emissions, whereas does not have any effect on CO emissions. Optimum amounts of the ignition advance in half and full load conditions have been presented for the gas engine.

Keywords: Internal Combustion Engine, Ignition Advance, NOx, HC, CO.

^۱ دانشیار(نویسنده پاسخگو): arash.taleghani@gmail.com

^۲ کارشناسی ارشد: dariushroshani@yahoo.com

۱- مقدمه

بیشترین راندمان را داشته باشد، کمترین آلودگی را هم به وجود آورد [۴].

اوان و همکاران [۵] عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای را با سوخت‌های گاز طبیعی و بنزین مطالعه کردند. آنها نشان دادند که قدرت ترمزی ۱۱/۳ درصد در وضعیت مصرف گاز طبیعی پایین‌تر از وضعیت مصرف بنزین است. رین و جون [۶] دمای گاز خروجی، دمای سطح محفظه احتراق و دمای سرسیلندر را در موتور اشتعال جرقه‌ای برای سوخت‌های گاز طبیعی و بنزین اندازه‌گیری کردند. با تنظیم زمان جرقه در موقعیت بیشینه گشتاور ترمزی، دمای سطح محفظه احتراق برای وضعیت مصرف گاز طبیعی در مخلوط رقیق بالاتر و در مخلوط غنی پایین‌تر از وضعیت مصرف بنزین به دست آمد. گوپتا و همکاران [۷] مشخصات عملکرد و گازهای خروجی یک موتور اشتعال جرقه‌ای را در وضعیت مصرف گاز طبیعی بررسی کرده و نتایج آن را با وضعیت مصرف سوخت بنزین مقایسه کردند. نتایج ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش در توان موتور در وضعیت مصرف گاز طبیعی در مقایسه با موتور در وضعیت مصرف بنزین را نشان داد. لارسن و والاس [۸] آلودگی مصرف سوخت هیتان شامل ۱۵ درصد حجمی هیدروژن و ۸۵ درصد حجمی گاز طبیعی و مصرف سوخت گاز طبیعی را در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پرخوران شده بررسی و مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تنظیم مناسب شرایط کارکرد موتور برای وضعیت مصرف هیتان می‌تواند باعث کاهش آلاینده‌های اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته در مقایسه با وضعیت مصرف گاز طبیعی شود.

اسلام و همکاران [۹] عملکرد و آلودگی موتور اشتعال جرقه‌ای را برای سوخت‌های بنزین و گاز طبیعی بررسی کرده و در ادامه مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که موتور با سوخت گاز طبیعی دارای فشار مؤثر متوسط ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی پایین‌تری نسبت به موتور با سوخت بنزین است. همچنین مقدار گازهای تولیدی منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته از موتور در وضعیت مصرف گاز طبیعی کمتر از وضعیت مصرف بنزین است. در هر صورت مقدار آلاینده‌های اکسید نیتروژن برای موتور با مصرف گاز طبیعی بالاتر از وضعیت مصرف بنزین در این تحقیق به دست آمد.

نتایج حاصل از پژوهش حق‌گویی [۱۰] نشان می‌دهد که

گازهای خروجی از موتور خودروهای سواری، یکی از عوامل عمده در آلودگی هوای جهان می‌باشند. اخیراً تحقیقات و پیشرفت‌هایی انجام شده است که کاهش عمده‌ای در انتشار آلاینده‌های خروجی از موتور ایجاد کرده است. در این راستا، سوخت‌های گازی به دلیل قیمت پایین، عدد اکتان بالا و آلودگی پایین به‌عنوان اصلی‌ترین سوخت جایگزین به شمار می‌روند [۱] که گاز طبیعی اصلی‌ترین آنها در جهان به شمار می‌رود. اگرچه آلاینده‌های مضر منتشر شده توسط موتورها، از سال ۱۹۴۰ تا حال بیش از ۹۰ درصد کاهش یافته‌اند، ولی هنوز هم مشکل زیست‌محیطی بزرگی محسوب می‌شوند. سابقه استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت جایگزین در خودروها به سال ۱۹۲۰ برمی‌گردد [۲]. در فاصله زمانی ۱۰۲ سال، محققان زیادی اقدام به انجام تحقیقات بر روی موتور گاز طبیعی سوز کرده‌اند. گاز طبیعی در ایران در ذخایر زیرزمینی به طور وسیع وجود دارد به‌گونه‌ای که ایران را در رتبه دومین کشور دارنده گاز طبیعی جهان قرار داده است. این امر باعث شده است که بتوان پیش‌بینی کرد که ایران با بهره‌برداری از همه منابع شناسایی شده تا حدود ۱۷۰ سال گاز طبیعی را با بهای ثابت داشته باشد و از این لحاظ گاز طبیعی سوخت ایده‌آل برای خودرو محسوب می‌شود [۳].

چهار آلاینده اصلی که توسط موتورهای احتراق داخلی تولید می‌شوند، هیدروکربن‌ها، منو اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق می‌باشند. دو روش برای کاهش آلاینده‌های مضر خروجی از موتور استفاده می‌شود. یکی اصلاح فناوری موتورها و سوخت‌هاست، به‌نحوی که احتراق بهتری حاصل شود و آلاینده‌های کمتری تولید گردند. روش دوم، تصفیه گازهای خروجی می‌باشد. مورد اخیر، با استفاده از مبدل‌های حرارتی و کاتالیزوری که واکنش‌های شیمیایی را در جریان گازهای خروجی از موتور افزایش می‌دهد، صورت می‌پذیرد. این واکنش‌های شیمیایی، آلاینده‌های مضر را به گازهای قابل قبول نیتروژن، دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌کنند. اما در مورد اصلاح فناوری موتورها، یکی از مواردی که باید روی تغییرات آن بحث کرد اصلاح تایمینگ جرقه است. با تغییر زاویه جرقه می‌توان بررسی کرد که احتراق در چه زاویه‌ای قبل از نقطه مرگ بالا رخ دهد تا در عین این که

مختلف موتور و تخریب اگزوزی مورد آزمایش قرار دادند. آنتور و همکاران [۱۶] از یک کد شبیه‌سازی موتور جرقه‌زنی برای مطالعه اثرات مختلف پارامترهای عملکرد یک موتور شامل نسبت فشرده‌سازی، نسبت معادل سوخت به هوا، کسر جرم باقیمانده و زمان شروع احتراق - آزادسازی حرارت به‌صورت جداگانه بر اساس عملکرد استفاده نمودند. نتایج کار آنها نشان داد که حداکثر فشار و دما در نسبت معادل سوخت به هوا، ۱/۰۱ رخ می‌دهد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که عقب انداختن یا پیشبرد زمان احتراق از زمان حداکثر گشتاور ترمز باعث کاهش قدرت خروجی سیکل و در نتیجه کاهش بازده حرارتی چرخه نیز می‌شود. جوشی [۱۷] تأثیر تغییر نرخ اکتان سوخت و زمان جرقه بر شدت ضربه را مورد مطالعه قرارداد. اریکسون به مدل‌سازی و کنترل آوانس جرقه پرداخت [۱۸]. تأثیر زمان‌بندی جرقه بر عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌گی یک موتور معمولی چهارزمانه مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از الکل‌ها به‌عنوان سوخت جایگزین کامل بنزین همراه با تغییر مناسب زمان جرقه، می‌تواند راه‌حلی امیدوارکننده برای بهبود کارایی یک موتور جرقه‌زنی بدون ایجاد هیچ‌گونه مشکل مضر در طول عمر موتور آن باشد. سنز و همکاران [۲۰] به توسعه و ساخت یک موتور احتراق جرقه‌ای پرداختند.

با توجه به تحقیقات قابل‌دسترس در داخل و خارج از کشور تا کنون هیچ گزارش علمی از تأثیر تغییرات آوانس جرقه موتور بومی XU7/JPL3 بر میزان گازهای مضر خروجی منتشر نشده است. لذا تحقیق حاضر به این مسئله می‌پردازد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی اثرات آوانس جرقه بر عملکرد و آلاینده‌های موتور، نیاز به آزمون‌های عملکردی روی آن در شرایط تمام بار و بارهای جزئی می‌باشد. معمولاً این آزمون‌ها برای بررسی وضعیت احتراقی موتور با سوخت جدید در مقایسه با سوخت پایه انجام می‌شود.

آزمایش‌ها بر روی موتور ۱/۸ لیتری چهارسیلندر در حالت سوخت گاز انجام گرفته است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

با افزایش دمای هوای ورودی سیلندر از ۳۳ به ۶۶ درجه سانتیگراد، برای جلوگیری از وقوع کوبش باید زاویه لنگ (KLSA) را ۵° کاهش داد، یعنی به‌ازای هر ۷° افزایش دما، ۱° کاهش آوانس جرقه آستانه کوبش (1 CA/7K).

پژوهش دیگری که در مرکز تحقیقات فورد [۱۱] بر روی محدوده بزرگ‌تری از شرایط عملکردی (۲۷ تا ۵۴ درجه سانتیگراد، ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، نسبت هوا به سوخت ۱۱/۵ تا ۱۳ و عدد اکتان تحقیقی ۹۱ تا ۹۷) انجام‌گرفته، نشان می‌دهد که آوانس جرقه آستانه کوبش اختلاف کمی با مقدار فوق داشته و برای هر ۹° کلوبین افزایش دما، باید ۱° آوانس جرقه آستانه کوبش را کاهش داد تا از کوبش جلوگیری شود (1 CA/9K).

نتایج تحقیق تجربی امی و همکاران [۱۲] بر روی موتور XU7/JPL3 نشان داد که افزایش میزان اتانول در مخلوط سوخت، بازده تنفسی، توان و گشتاور موتور را افزایش می‌دهد و مصرف سوخت ویژه در سرعت‌های کند کاهش و در سرعت‌های تند افزایش می‌یابد. یک مدل ریاضی از انتشار آلاینده‌گی در موتور تویینگو D7F توسعه داده شد [۱۳]. اثرات تغییرات نسبت تراکم، نسبت سوخت به هوا، آوانس جرقه و مدت‌زمان احتراق تحت انتشار آلاینده‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق یک استراتژی کنترل برای تضمین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اجرا شد. هان مهم‌ترین منابع تغییرپذیری سیکل به سیکل در موتور احتراق جرقه‌ای در حالت آماده‌به‌کار را مورد بررسی قرارداد [۱۴]. برای تجزیه‌وتحلیل تغییرات چرخه‌ای در یک موتور آزمایشی، پارامترهای سوختگی بر اساس سیکل به سیکل از طریق تجزیه‌وتحلیل داده‌های فشار موتور تعیین شدند. برنامه تجزیه‌وتحلیل نرخ سوختگی در تحقیق هان مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای سوختگی برای تعیین تغییرات در پارامتر ورودی استفاده شد. آمایا و همکاران [۱۵] مدل ریاضی و عددی جریان و فرایند احتراق برای موتورهای احتراق جرقه را با استفاده از اصول قانون اول و دوم ترمودینامیک توسعه دادند. تجزیه‌وتحلیل اگزوزی برای استوانه موتور احتراق داخلی جرقه‌ای در طول فرآیند احتراق با استفاده از مدل احتراق دو منطقه‌ای اعمال شد. آنها برای پیش‌بینی تولید گازهای گلخانه‌ای یک مکانیسم اسکلتی شامل ۳۲ گونه و ۶۱ واکنش توسعه داده و برای عملکردهای

از حسگرهای مختلف، دستگاه داده‌برداری و اندازه‌گیری متغیرهای احتراقی از نوع AVL 670 Indimaster/Indistation.

جدول (۲): ابزارهای اندازه‌گیری استفاده شده در آزمایش

کمیت مورد اندازه‌گیری	ابزار اندازه‌گیری
دور و گشتاور موتور	لگام ترمز 120kW
اندازه‌گیری آلاینده‌ها	Gas Analyzer Horiba
نسبت هوا به سوخت	Lambda Sensor Horiba
دمای هوای چند راه ورودی	دماسنج نوع J
اندازه‌گیری مصرف سوخت	AVL Dynamic Fuel Balance
داده‌برداری متغیرهای احتراقی	AVL 670 Indimaster/Indistation

۳- روش آزمون

پس از نصب تجهیزات داده‌برداری روی موتور و لگام ترمز، دسته سیم دوگانه‌سوز و اجزاء سامانه گاز روی موتور نصب شد. هدف از تنظیم موتور در این مرحله، جمع‌آوری اطلاعات و تنظیم عوامل زمان پاشش سوخت (تنظیم نسبت هوا به سوخت)، اختلاف زاویه جرکه‌زنی در حالت گازسوز نسبت به بنزین و زاویه پاشش سوخت نسبت به نقطه مرگ بالا (TDC) در شرایط تمام بار و بارهای جزئی است. در شرایط تمام بار، موتور حداکثر توان خود را در یک دور خاص تولید می‌کند و در شرایط نیمه بار، موتور نیمه توان حداکثری خود را در یک دور خاص تولید می‌کند. روند آزمون‌های انجام شده روی موتور، به‌منظور دستیابی به اهداف یادشده بوده که با توجه به موارد طرح شده در چکیده مقاله، نتایج مربوط به تنظیم و کالیبراسیون و بررسی تأثیر زاویه جرکه‌زنی روی عوامل عملکردی و آلاینده‌گی موتور در ادامه آمده است.

همان‌طور که می‌دانیم، راهبرد کالیبراسیون (تنظیم و انتخاب مقدار بهینه عوامل یاد شده) در شرایط تمام بار، بر اساس دستیابی به بهترین عملکرد از لحاظ توان و گشتاور موتور است. درحالی‌که در شرایط نیمه‌بار، با توجه به حرکت خودرو در چرخه رانندگی شهری و برون‌شهری، راهبرد کالیبراسیون، دستیابی به کمترین مقدار آلودگی و مصرف سوخت خواهد بود. با توجه به این مهم، فعالیت‌های کالیبراسیون در دو ناحیه تمام بار و نیمه‌بار به‌صورت مجزا صورت گرفته است.

به‌منظور پایداری مقادیر عملکردی موتور، قبل از هر آزمون باید دمای آب و روغن موتور به دمای کاری موتور

جدول (۱): مشخصات موتور XU7jpl3

کمیت	مقدار
نوع موتور	XU7jpl3
حجم موتور	1761 cc
نسبت تراکم	9.3:1
تعداد سیلندر	4
سیستم سوخت‌رسانی	SAGEMS2000-10
کورس پیستون	81.4 mm
قطر پیستون	83 mm
قطر سوپاپ دود	41.6 mm
قطر سوپاپ هوا	34.5 mm
زاویه نشست سوپاپ‌ها	90°
ضخامت واشر سرسیلندر	1.2 mm
طول شاتون	150.5 mm axe-axe
زاویه باز شدن سوپاپ هوا	8.5 BTDC (deg @ 1mm lift)
زاویه بسته‌شدن سوپاپ هوا	29.3 ABDC (deg @ 1mm lift)
زاویه باز شدن سوپاپ دود	43.3 BBDC (deg @ 1mm lift)
زاویه بسته‌شدن سوپاپ دود	5.5 ATDC (deg @ 1mm lift)

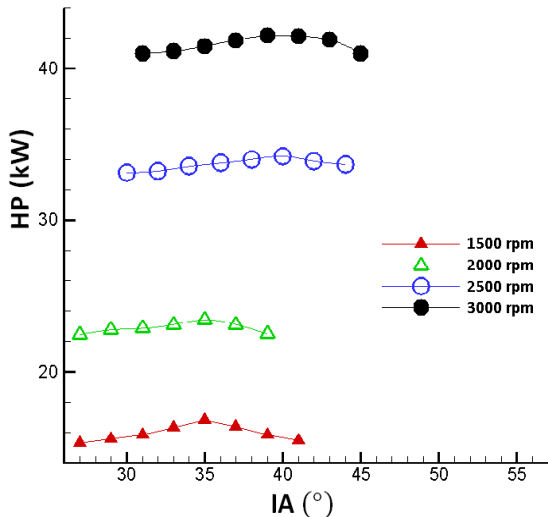
آزمایش‌های بیان شده در کار حاضر در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو) انجام شده است. ابزارهای اندازه‌گیری داده‌های تجربی در جدول ۲ داده شده است.

لگام استفاده شده در این تحقیق با توان 120 kW و از نوع آسنکرون می‌باشد. بیشترین دور آن ۸۰۰۰ دور بر دقیقه و بیشترین گشتاوری که می‌تواند تحمل کند، ۵۰۹ نیوتن متر است.

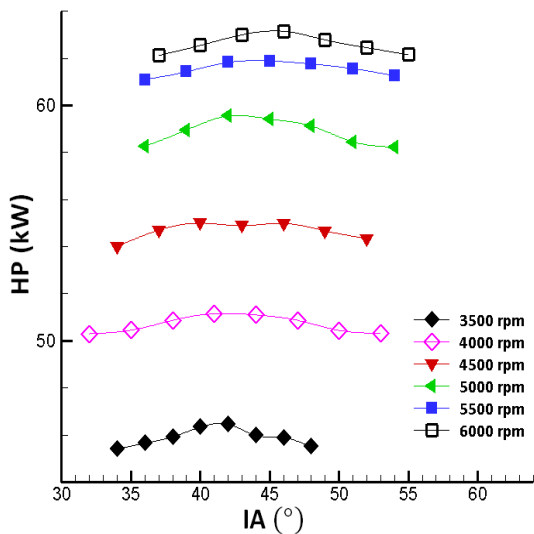
برای محاسبه و ثبت داده‌های مربوط به میزان آلاینده‌ها از تحلیل‌گر هوریا مدل Ak 7000-MEXA استفاده شده است. در تحلیل‌گر هوریا برای اندازه‌گیری اکسیدهای نیتروژن، از تحلیل‌گر ۷۵۶-CLA، برای اندازه‌گیری هیدروکربن از تحلیل‌گر ۷۲۶-FIA و برای اندازه‌گیری منو اکسید کربن از تحلیل‌گر AIA استفاده شده است.

تجهیزات جانبی مورد استفاده نیز عبارتند از: دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت از نوع AVL Dynamic Fuel Balance، سامانه تنظیم خودکار تثبیت دمای آب و روغن، مجموعه حسگرهای اندازه‌گیری دما، فشار و اضافه‌کردن هوا در نقاط مختلف موتور، جعبه جمع‌آوری سیگنال (RACK)

میزان آوانس جرّقه برای حالت گاز مانند وضعیت بنزینی در نظر گرفته شده سپس میزان آوانس با گام‌های ۲ یا ۳ درجه افزایش یافته است.



شکل (۲): توان موتور به ازاء مقادیر مختلف آوانس جرّقه در شرایط تمام بار و حالت گازسوز برای دورهای پایین موتور

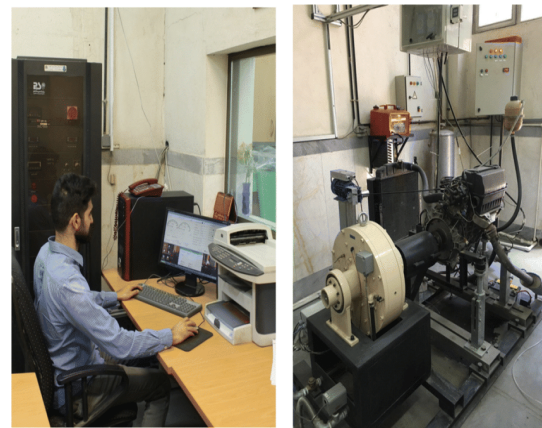


شکل (۳): توان موتور به ازاء مقادیر مختلف آوانس جرّقه در شرایط تمام بار و حالت گازسوز برای دورهای بالای موتور

در حین آزمون به جهت بررسی دقیق تأثیر آوانس جرّقه بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتور باید در تمامی مقادیر آوانس جرّقه، مقادیر نسبت هم‌ارزی و زاویه پاشش سوخت ثابت باقی بمانند. با توجه به ملاحظات تئوری و تجربیات به دست آمده، به‌خاطر کند بودن سرعت شعله در حالت گاز، افزایش آوانس جرّقه باید تا حدی سبب بهبود احتراق و در

(حدود ۹۰ درجه سانتیگراد) برسد. برای این منظور موتور روشن شده و در شرایط کاری 2000rpm، 2 دقیقه کار می‌کند تا دمای قسمت‌های مختلف موتور به حالت پایدار برسد و پس از آن آزمون اصلی آغاز می‌شود. آزمایش‌ها در دو حالت بار کامل و بار جزئی انجام گرفت.

در حالت بار کامل، موتور در دور 1500rpm قرار گرفت. زمان جرّقه‌زنی با نرم‌افزار اینکا در حالت‌های مختلف تنظیم شده است. داده‌برداری که شامل ثبت فشار داخل استوانه، مصرف سوخت ویژه، توان، گشتاور، آلاینده‌ها و غیره است، انجام شد. داده‌برداری در هر دور برای ۷ آوانس مختلف و هر کدام ۳ بار تکرار صورت گرفت و متوسط آن ثبت شد. خطای ناشی از تکرارپذیری نتایج در بیشترین حالات کمتر از ۱٪ نسبت به متوسط نتایج بود. آزمایش بار جزئی، ابتدا در 1500rpm انجام شد. سپس با افزایش دور به میزان گام 500rpm تا 4000rpm تکرار شد و در هر نقطه میزان آلاینده‌ها و مصرف سوخت ویژه ترمزی ثبت گردید. شکل ۱ تجهیزات نصب شده روی موتور مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

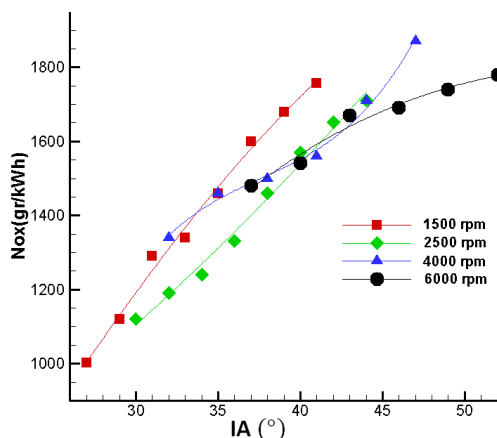


شکل (۱): تجهیز موتور در آزمایشگاه جهت کالیبراسیون

۴- نتایج آزمون

الف) نتایج آزمون تمام بار

در شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر توان و آلاینده اکسیدهای نیتروژن در حالت گازسوز و در شرایط تمام بار به ازاء مقادیر مختلف آوانس جرّقه در سرعت‌های مختلف موتور آمده است. مقادیر اختلاف آوانس جرّقه در حالت گاز با بنزین با گام اختلاف ۲ یا ۳ درجه روبش شده است، بدین معنی که ابتدا



شکل (۵): تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن به ازاء مقادیر مختلف آوانس جرقه در شرایط تمام بار و حالت گازسوز

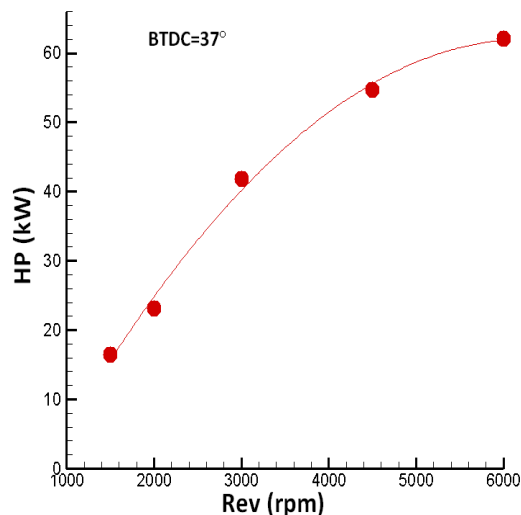
جدول (۳): مقادیر بهینه آوانس جرقه در حالت تمام بار

دور موتور (rpm)	تفاوت آوانس جرقه بحالت بنزینی بر حسب درجه	آوانس جرقه بهینه برای حالت بنزینی بر حسب درجه
۱۵۰۰	+۸	+۲۷
۲۰۰۰	+۸	+۲۷
۲۵۰۰	+۸	+۳۰
۳۰۰۰	+۸	+۳۱
۳۵۰۰	+۸	+۳۴
۴۰۰۰	+۹	+۳۲
۴۵۰۰	+۶	+۳۴
۵۰۰۰	+۶	+۳۶
۵۵۰۰	+۶	+۳۶
۶۰۰۰	+۹	+۳۷

ب) نتایج آزمون بار جزئی

در شرایط نیمه بار نیز آوانس جرقه با گام‌های ۳ درجه نسبت به حالت بنزینی مورد روبش قرار گرفته است. در این آزمون دوره‌های ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه مورد توجه بوده‌اند، چرا که سهم بیشتری از کارکرد خودرو را در حالت نیمه بار به خود اختصاص می‌دهند. در شکل‌های ۶ تا ۸ مقادیر آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن و منو اکسید کربن به‌ازای مقادیر مختلف آوانس جرقه و همچنین مصرف ویژه سوخت ترمزی در شرایط گازسوز و نیمه بار آورده شده است. در این شکل‌ها نتایج آزمون نیمه بار در برخی دوره‌های موتور انتخابی آورده شده است. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷

پی آن افزایش توان شود، که این موضوع در نتایج به دست آمده مشهود است. با مشاهده شکل ۴ دیده می‌شود که تغییرات توان موتور بر حسب دور موتور در یک زاویه آوانس جرقه ثابت (۳۷ درجه) روندی افزایشی دارد.



شکل (۴): تغییرات توان موتور بر حسب دور موتور در یک زاویه آوانس جرقه ثابت (۳۷ درجه)

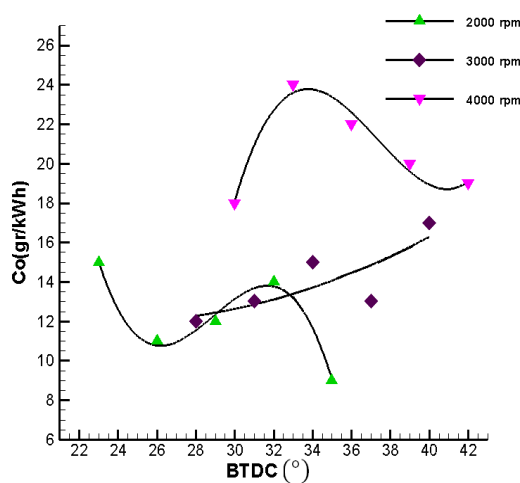
با توجه به شکل ۵ پارامتر دیگری که از تغییرات آوانس، تأثیر پذیرفته آلاینده اکسیدهای نیتروژن است. با توجه به تغییرات اکسیدهای نیتروژن نسبت به مقادیر آوانس جرقه در شرایط تمام بار، مشاهده می‌شود که با افزایش آوانس، میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد، چرا که یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر میزان تولید اکسید نیتروژن در موتورهای بنزینی، دما و فشار احتراق می‌باشد. از آنجایی که سرعت احتراق گاز کندتر از بنزین است و پیش انداختن موعد جرقه‌زنی (افزایش آوانس جرقه) فرصت بیشتری برای احتراق ایجاد می‌کند، احتراق گاز کامل‌تر شده، اثر افزایش میزان دما و فشار را در موتور تشدید می‌کند و طبیعتاً باعث افزایش میزان اکسید نیتروژن تولیدی خواهد شد. با توجه به راهبرد کالیبراسیون در شرایط تمام بار، توان خروجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا مقادیری برای آوانس انتخاب می‌شود که توان خروجی بیشینه را در پی داشته باشند که مقادیر پیشنهادی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۴): مقادیر پیشنهادی آوانس جرجه در شرایط نیمه

تفاوت آوانس جرجه بحالت بنزینی بر حسب درجه	دور موتور (rpm)
+۳	۱۵۰۰
+۳	۲۰۰۰
+۳	۲۵۰۰
+۳	۳۰۰۰
+۳	۳۵۰۰
+۳	۴۰۰۰

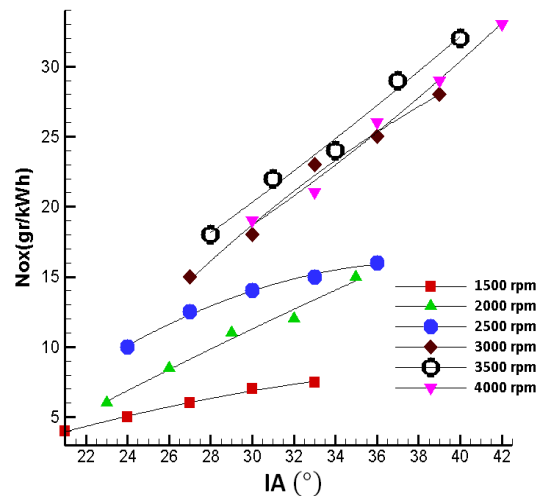
شکل ۷ تولید آلاینده هیدروکربن بر حسب آوانس جرجه در شرایط نیمه بار را نشان می‌دهد. آوانس زاویه جرجه باعث به‌وجود آمدن پیک فشار در سیلندر می‌گردد. افزایش فشار، مخلوط بیشتر هوا و سوخت را به داخل درزها و شکاف می‌کشانند که در حقیقت فضای بین تاج پیستون و دیواره سیلندر را در بر می‌گیرد. نتیجه اینکه در این فضاها، هیدروکربن‌ها و اکسیژن واکنش کمتری نشان داده که این مسئله خود باعث افزایش مقدار اکسیژن و هیدروکربن‌های نسوخته در خروجی خواهد بود.

شکل ۸ میزان آلاینده منوکسید کربن بر حسب آوانس جرجه در شرایط نیمه بار را نشان می‌دهد. با افزایش آوانس جرجه در حالت گازسوز، میزان آلاینده منوکسید کربن از تغییرات آوانس جرجه پیروی نمی‌کند.

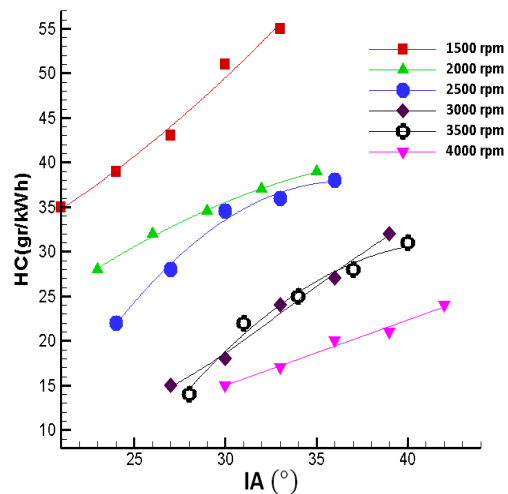


شکل (۸): تولید آلاینده منو اکسید کربن بر حسب آوانس جرجه در شرایط نیمه بار

در هر دور با افزایش آوانس جرجه میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن افزایش یافته است و بالعکس مصرف ویژه سوخت کاهش می‌یابد. میزان آلاینده منو اکسید کربن روند خاصی را دنبال نکرده است. از میان آلاینده‌ها، آلاینده اکسیدهای نیتروژن از اهمیت بیشتری برخوردار است [۲۱]. از آنجایی که راهبرد کالیبراسیون در شرایط نیمه بار، با توجه به حرکت خودرو در شرایط رانندگی شهری و برون‌شهری، دستیابی به کمترین میزان آلاینده‌ها و مصرف سوخت ویژه ترمزی می‌باشد، لذا مقادیر جدول ۴ برای آوانس جرجه در شرایط نیمه بار پیشنهاد شده است.



شکل (۶) تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن بر حسب آوانس جرجه در شرایط نیمه بار



شکل (۷): تولید آلاینده هیدروکربن بر حسب آوانس جرجه در شرایط نیمه بار

د) در شرایط نیمه بار حالت گازسوز، میزان آلاینده منو اکسید کربن خروجی از موتور مورد آزمون از تغییرات آوانس جرعه پیروی نمی‌کند.

ن) در حالت گازسوز و در شرایط نیمه بار میزان آلاینده‌های هیدروکربن و اکسیدهای نیتروژن با افزایش آوانس جرعه نسبت به حالت بنزینی، افزایش می‌یابند.

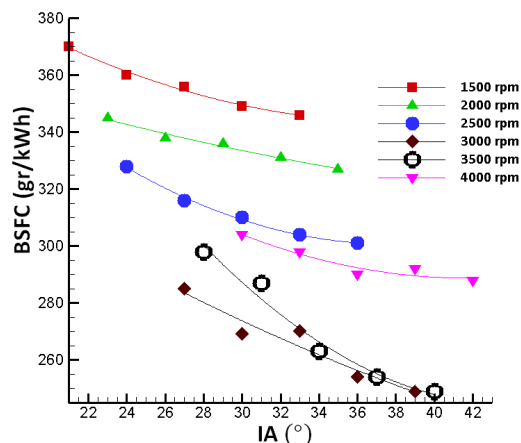
و) با افزایش آوانس جرعه در حالت گازسوز نسبت به حالت بنزینی، راندمان حرارتی افزایش یافته و مصرف سوخت ویژه ترمزی کاهش می‌یابد.

ه) با انتخاب آوانس جرعه بهینه در حالت گازسوز و نیمه بار می‌توان ضمن داشتن آلودگی قابل قبول، به مصرف سوخت ترمزی کمتری دست پیدا کرد. مقادیر پیشنهادی این آوانس‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

فهرست علائم

آوانس جرعه	IA
توان	HP
دور موتور	Rev
مصرف سوخت ویژه ترمزی	BSFC
قبل از نقطه مرگ بالا	BTDC
بعد از نقطه مرگ پایین	ABDC
قبل از نقطه مرگ پایین	BBDC
بعد از نقطه مرگ بالا	ATDC

شکل ۹ مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب آوانس جرعه در شرایط نیمه بار را نشان می‌دهد. شکل ۹ نشان می‌دهد که در محدوده مورد مطالعه مصرف سوخت ویژه ترمزی تمایل به بهبود وضعیت دارد. مصرف سوخت ویژه ترمزی، مقدار سوخت استفاده شده در طول زمان یک ساعت به ازای هر یک کیلووات قدرتی که موتور تولید می‌کند، می‌باشد. از طرفی راندمان حرارتی برابر با کار خروجی تقسیم بر انرژی ورودی است که در این عبارت انرژی ورودی برابر با انرژی محصولات (جرم سوخته شده) می‌باشد. بنابراین کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی موجب افزایش راندمان حرارتی موتور می‌شود، لذا با افزایش آوانس جرعه، راندمان حرارتی افزایش یافته و مصرف سوخت ویژه ترمزی کاهش می‌یابد.



شکل (۹): مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب آوانس جرعه در شرایط نیمه بار

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های ارائه شده، می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود.

الف) با افزایش آوانس جرعه در حالت تمام بار و در شرایط گازسوز، تا یک حد معین افزایش نسبی در توان ترمزی حاصل می‌گردد.

ب) با افزایش آوانس جرعه در حالت تمام بار و در شرایط گازسوز، میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد.

ج) با افزایش آوانس جرعه در حالت گازسوز نسبت به حالت بنزینی می‌توان ضمن کنترل نسبی آلودگی اکسیدهای نیتروژن به توان بالاتری دست یافت. میزان این افزایش در شرایط تمام بار مطابق جدول ۳ پیشنهاد شده است.

۶- مراجع

1. Ebrahimi, R. "Experimental Study on the Auto Ignition in HCCI Engine", Ph.D. Thesis, Universite de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France, 2006.
2. Mercier, M. "Contribution to the Study of the Behavior of a Spark Ignition Engine Fueled with Groningen Natural Gas", Ph.D. Thesis, Universite de Valenciennes et du Hainaut Cambresis (UVHC), 2006.
3. Vatani, A., Habibi, M., and Amin Naji, M. "Comparison CNG with Other Fuels and Emissions of CNG-Burning Vehicles", 2th International Conference and Exhibition on CNG, Tehran, Iran, 2009. (In Persian)
4. Putkrabek, W.W. "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", 2nd Edition, Prentice Hall, 1997.

14. Han, S.B. "Cycle-to-Cycle Variations Under Cylinder-Pressure-Based Combustion Analysis in Spark Ignition Engines", *KSME INT J.* Vol. 14, pp. 1151–1158, 2000.
15. Duque Amaya, A.F., Díaz Torres, A.G., and Acosta Maya, D.A. "First and Second Thermodynamic Law Analyses Applied to Spark Ignition Engines Modelling and Emissions Prediction", *Int J Interact Des Manuf.* Vol. 10, pp. 401–415, 2016.
16. Anetor, L., Osakue, E.E., and Odetunde, C. "Parametric Studies of Some Operating Variables on Spark-Ignition Engine Performance", *ARAB J SCI ENG.* Vol. 42, pp. 2141–2156, 2017.
17. Joshi, A.S. "Effect of Spark Advance and Fuel on Knocking Tendency of Spark Ignited Engine", Open Access Master's Report, Michigan Technological University, 2017.
18. Eriksson, L. "Spark Advance Modeling and Control, Linköping Studies in Science and Technology", Dissertations No. 580, 1999.
19. Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, D.C., and Rakopoulos, C.D. "Theoretical Study of the Effects of Spark Timing on the Performance and Emissions of a Light-Duty Spark Ignited Engine Running Under Either Gasoline or Ethanol or Butanol Fuel Operating Modes", *Energies* Vol.10, No.8, 2017.
20. Sens, M., Günther, M., Medicke, M., and Walther, U. "Developing a Spark-Ignition Engine with 45 % Efficiency", *MTZ Worldwide* Vol. 81, pp. 46–51, 2020.
21. Wang, L., Wang, J., Tan, X., Fang, C., "Analysis of NO_x Pollution Characteristics in the Atmospheric Environment in Changchun City Atmosphere", *Atmosphere* Vol. 11, Issue 1, 2019.
5. Evans, R.L. and Blaszczyk, J.A. "Comparative Study of the Performance and Exhaust Emissions of a Spark Ignition Engine Fuelled by Natural Gas and Gasoline", *P I MECH ENG D-J AUT.* Vol. 211, pp. 39-47, 1997.
6. Raine, R.R. and Jones, G.M. "Comparison of Temperatures Measured in Natural Gas and Gasoline Fuelled Engines", *SAE Paper 901503*, 1990.
7. Gupta, M., Bell, S.R., and Tillman, S.T. "An Investigation of Lean Combustion in a Natural Gas-Fueled Spark Ignited Engine", *J ENERG RESOUR-ASME.* Vol. 118, Issue 2, pp. 145-165, 1996.
8. Larsen, J.F. and Wallace, J.S. "Comparison of Emissions and Efficiency of a Turbocharged Lean-Burn Natural Gas and Hythane-Fueled Engine", *J ENG GAS TURB POWER.* Vol. 119, pp. 218-226, 1997.
9. Aslam, M.U., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Abdesselam, H., Mahlia, T.M.I., and Amalina, M.A. "An Experimental Investigation of CNG as an Alternative Fuel for a Retrofitted Gasoline Vehicle", *Fuel* Vol. 85, pp. 717-724, 2006.
10. Haghgooe, M. "The Effect of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine", *SAE Paper 902134*, 1990.
11. Warren, C.C., and Mencik, D. "Correction of Borderline Detonation Spark Advance for Engine Inlet Air Temperature", *Ford SRM* Vol. 4, No. 2, pp. 85-19, 1985.
12. Ommi, F., Farhang, K., and Shafiei Sabet, A. "Experimental Investigation of the Combustion of a Spark Ignition Engine, with Gasoline-Ethanol-MTBE Blends as Fuel, to Reduce Fuel Consumption and Pollutants", *The Journal of Engine Research*, Issue 16, 2010. (In Persian)
13. Amaya, A.F.D., Torres, A.G.D., and Acosta, D.A. "Control of Emissions in an Internal Combustion Engine: First Approach for Sustainable Design", *Int J Interact Des Manuf.* Vol. 10, pp.275–289, 2016.