

Measuring the mass of fuel injected into the engine cycle by introducing a gas pressure fueling system

Majid Ataee Tarzanagh¹, Ebrahim Abdi Aghdam^{1*}, Seyyed Kazem Yekani²

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

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Spark-Ignition Engine
Mass Of Fuel Injected
Intake Port Injection
Fueling System

ABSTRACT

Innovation in internal combustion engine design is crucial for advancing the automotive industry. In conventional spark-ignition (SI) engines, the mass of fuel delivered by the injector is highly dependent on the pressure differential across it and the injection duration. However, the downstream pressure at the injection point is difficult to control due to complex phenomena such as airflow separation and fuel vaporization, which complicates the accurate estimation of injected fuel mass. This study introduces a Gas Pressure Fueling System (GPFS) designed to enable precise, cycle-by-cycle measurement of injected fuel mass. Experiments were conducted on a single-cylinder research SI engine under specific operating conditions. First, baseline data were collected using a Conventional Engine Fueling System (CEFS) for over 550 consecutive cycles, recording cylinder pressure, intake manifold pressure, Top Dead Center (TDC), and crank angle signals. Subsequently, the engine was operated with the GPFS at various gas pressures, and for over 2500 consecutive cycles, the same engine parameters were recorded along with the total volume of consumed fuel, allowing for the estimation of the fuel injected per cycle. An extensive search identified a GPFS operating point that replicated the engine performance of the CEFS. A configuration with a gas pressure set 0.25 bar above the CEFS fuel line pressure was found to yield comparable performance. The data from these two cases—the baseline CEFS and the optimized GPFS—are examined and compared. The results demonstrate that the GPFS, operating at a 0.25 bar pressure increase, successfully matches the performance of the conventional system while simultaneously enabling the direct measurement of cycle-resolved injected fuel mass.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: eaaghdam@uma.ac.ir (E. Abdi Aghdam)

Received 16 November 2025; Accepted 28 April 2026

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Ataee Tarzanagh M, Abdi Aghdam E, Yekani SK. Measuring the mass of fuel injected into the engine cycle by introducing a gas pressure fueling system. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):36-49. doi: [10.22034/ER.2026.2076356.1111](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2076356.1111)

اندازه‌گیری جرم سوخت تزریقی به چرخه موتور با معرفی یک سامانه سوخت‌رسانی با گاز فشرده (سوگاف)

مجید عطائی ترزنق^۱، ابراهیم عبدی اقدم^{۱*}، سید کاظم یکانی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

بکارگیری روش‌های نوین و خلاقانه در طراحی موتورهای احتراق داخلی امری ضروری برای توسعه چشمگیر صنایع خودروسازی است. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با مدار سوخت‌رسانی متداول (سوُمُت)، مقدار سوخت پاششی افشانه علاوه بر دوره پاشش، قویا به فشار پشت افشانه و فشار محل پاشش سوخت وابسته است. فشار محل پاشش به دلیل پدیده‌های قطع و وصل جریان هوا و کسر تبخیر سوخت قابل مهار نیست و موجب پیچیدگی‌هایی در برآورد مقدار سوخت پاششی می‌شود. در کار حاضر برای برآورد مقدار جرم سوخت پاششی به هر چرخه، یک سامانه سوخت‌رسانی با گاز فشرده (سوگاف) طراحی شد. در این مطالعه یک موتور تک استوانه اشتعال جرقه‌ای پژوهشی تحت شرایط کاری معین استفاده شد. ابتدا به ازای دوره پاشش مشخص با سامانه سوخت‌رسانی متداول موتور، داده‌های تجربی فشار استوانه و چندراهه ورودی، نقطه مکث بالا و زاویه میل‌لنگ برای بیش از ۵۵۰ چرخه متوالی استخراج شد. سپس با روش سوگاف در فشار گازهای مختلف علاوه بر داده‌های مذکور، حجم سوخت مصرفی بیش از ۲۵۰۰ چرخه متوالی اندازه‌گیری و ذخیره شد. با این روش سوخت تزریقی به هر چرخه برآورد شد. برای پیدا کردن فشار گازی که عملکرد همسانی را با روش سوُمُت نتیجه دهد تلاش فراوانی بعمل آمد و آزمایشی که فشار گاز آن ۰.۲۵ بار بیشتر از فشار خط سوُمُت بود عملکرد نسبتاً همسانی را نشان داد. در این مطالعه داده‌های این دو حالت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان داد که متغیرهای عملکردی روش سوگاف با فشار ۰.۲۵ بار بیشتر، عملکرد همسانی را با روش سوُمُت داشت، ضمن اینکه امکان اندازه‌گیری جرم سوخت بر چرخه نیز فراهم بود.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

موتور اشتعال جرقه‌ای
جرم سوخت پاششی
پاشش در راهگاه ورودی
سامانه سوخت‌رسانی



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: eaaghdam@uma.ac.ir (ابراهیم عبدی اقدم)

دریافت ۲۵ آبان ۱۴۰۴؛ پذیرش ۸ اردیبهشت ۱۴۰۵

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Ataee Tarzanagh M, Abdi Aghdam E, Yekani SK. Measuring the mass of fuel injected into the engine cycle by introducing a gas pressure fueling system. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):36-49. doi: 10.22034/ER.2026.2076356.1111

۱- مقدمه

بکارگیری روش‌های نوین و خلاقانه در طراحی موتورهای احتراق داخلی امری ضروری برای توسعه چشمگیر صنایع خودروسازی است. در حال حاضر، تحلیل مصرف سوخت به‌عنوان یک اولویت اصلی در صنعت خودروسازی با هدف کاهش آلایندگی‌ها، کاهش هزینه‌های اقتصادی و بهبود کیفیت سوخت‌ها مطرح است. سامانه‌های تزریق سوخت، بویژه تزریق سوخت به مسیر ورودی و تزریق مستقیم داخل محفظه، نقش اساسی در بهینه‌سازی عملکرد و بازده موتورهای اشتعال جرقه‌ای ایفا می‌کنند. روش پاشش در راهگاه به دلیل پیش‌مخلوط شدن بهینه سوخت و هوا، سادگی، هزینه کم و کاهش آلایندگی، برای موتورهای بنزینی و گاه پیش‌رانه‌های هیبریدی مناسب است، اما محدودیت‌هایی نظیر فشار تزریق ضعیف و تنظیم غیردقیق میزان سوخت در آن وجود دارد که استفاده از آن را در راهبردهای احتراق پیشرفته محدود می‌کند. علاوه بر این، نوسانات فشار در سامانه‌های رایج می‌تواند باعث خطا در تعیین جرم سوخت پاششی شود. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با مدار سوخت‌رسانی متداول، مقدار سوخت پاششی افشانه علاوه بر دوره پاشش، قویاً به فشار پشت افشانه و فشار محل پاشش سوخت وابسته است. فشار محل پاشش به دلیل پدیده‌های قطع و وصل جریان هوا و کسر تبخیر سوخت قابل تنظیم نیست و موجب پیچیدگی‌هایی در برآورد مقدار سوخت پاششی می‌شود. به همین دلیل، استفاده از سامانه‌های پیشنهادی با فشار پشت افشانه ثابت می‌تواند این مشکل را برطرف کرده و به بهبود دقت در فرآیند تزریق سوخت کمک کند. در این راستا، با توجه به پیشرفت‌های صنعتی و عدم امکان حذف کامل فناوری موتورهای احتراق داخلی در آینده نزدیک، درک عمیق فرآیندهای ترموشیمیایی و دینامیکی درون این موتورها ضروری است. تحلیل دقیق این فرآیندها و استفاده از روش‌های نوآورانه در طراحی موتورهای اشتعال جرقه‌ای می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش مصرف سوخت کمک کند [۱، ۲].

پیانو و همکاران [۳] در یک مطالعه تجربی اثر زاویه و زمان‌بندی تزریق سوخت را در یک موتور اشتعال جرقه‌ای بررسی کردند. برای این منظور آن‌ها از یک موتور شش‌استوانه دوگانه‌سوز استفاده کردند و سامانه پاشش راهگاه آن را به تزریق مستقیم تبدیل نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر در راهبرد پاشش توسط افشانه، توزیع مخلوط هوا - سوخت را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین طراحی دقیق و تنظیم مناسب سامانه سوخت‌رسانی، بازده حرارتی موتور را افزایش داده و آلایندگی را کاهش می‌دهد. در نهایت مشخص شد که نوع افشانه و زمان‌بندی تزریق آن نقش کلیدی در نرخ آزادسازی حرارت و بهبود عملکرد موتور دارند. یکی از عوامل محدودکننده برای افزایش نسبت تراکم در موتورهای اشتعال جرقه‌ای پدیده کوبش است. در این نوع موتورها نمی‌توان پیش‌رسی جرقه را تا یک حد معینی بالا برد [۴].

سوخت رایج استفاده شده در موتورهای اشتعال جرقه‌ای عموماً بنزین است. هیدروکربن‌های تشکیل دهنده بنزین C_5 تا C_{12} بوده ولی خواص آن معادل اکتان (C_8H_{18}) در نظر گرفته می‌شود [۵]. ارزش حرارتی پایین بنزین استفاده شده در موتورهای اشتعال جرقه‌ای معادل 44 MJ/kg و ارزش حرارتی بالای آن نزدیک به 47.3 MJ/kg است. با توجه به ویژگی‌های خاصی که این سوخت دارد، به عنوان سوخت متداول برای احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. نظر به اینکه این نوع سوخت دمای اشتعال خود به خودی پایینی نسبت به سوخت‌های گازی دارد به دلیل ایجاد پدیده کوبش، نمی‌توان نسبت تراکم و پیش‌رسی جرقه را از مقادیر حدی بالا برد [۷].

فانسکو و همکاران [۸]، به منظور درک بهتر رفتار پاشش سوخت، با استفاده از یک سیال با ویژگی‌های مشابه اتانول فرآیند تزریق یک نوع افشانه به داخل محیط اتمسفری را بررسی کردند. آن‌ها این تزریق را در ۴ فشار عملیاتی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ بار انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش فشار پشت افشانه طول نفوذ عمودی پاشش سوخت افزایش می‌یابد.

پوستریوتی و همکاران [۹]، با استفاده از یک موتور اشتعال جرقه‌ای مجهز به سامانه سوخت‌رسانی PFI^۱، به بررسی

¹ Port Fuel Injection

پراکندگی تزریق جرم و نحوه نرخ تزریق سوخت در شرایط عملیاتی واقعی پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که تغییرات در مقدار و زمان تزریق سوخت در هر چرخه کاری موتور، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد موتور و مصرف سوخت دارد. این یافته‌ها حاکی از آن است که بهینه‌سازی سامانه تزریق سوخت می‌تواند به طور همزمان کارایی موتور را افزایش داده و میزان انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد.

زن هو و همکاران [۱۰]، در یک مطالعه تجربی به مقایسه روش‌های تزریق پرفشار و کم‌فشار سوخت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد حالت تزریق کم فشار در موقعیتی دیرتر از موقعیت متداول، عملکرد احتراق را بهبود می‌بخشد. با تنظیم قطر سوراخ نیز عملکرد احتراق بهبود می‌یابد. تزریق سوخت با فشار پایین علاوه بر سهولت آب‌بندی افشانه دوام آن را افزایش می‌دهد و مقدار بازده احتراق را بهبود می‌بخشد.

چوپنگ و همکاران [۱۱]، در یک کار تجربی به مطالعه تأثیر اتانول گرم شده بر عملکرد افشانه تک سوراخ پرداختند. با توجه به گزارش آن‌ها افزایش دمای اتانول می‌تواند پاشش سوخت و شکل‌گیری مخلوط را بهبود بخشد. اتانول گرم شده باعث کاهش اندازه قطرات سوخت می‌شود از طرف دیگر توزیع قطرات سوخت در محفظه احتراق را بهینه می‌کند و در نتیجه این اقدامات بازده احتراق افزایش و مقدار انتشار آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که گرم کردن اتانول عملکرد افشانه‌های بنزین را بهبود می‌بخشد.

وانگ و همکاران [۱۲]، با استفاده از یک الگوی شبیه‌سازی، به بررسی مقدار تبخیر لایه سوخت در چرخه‌های پشت سرهم در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پرداختند. الگوی پیشنهادی آن‌ها جهت بهبود در قابلیت پیش‌بینی شبیه‌ساز موتور با توجه به تأثیر لایه تبخیر بر مخلوط‌سازی هوا و سوخت بود. نتایج حاکی از آن بود که زمانبندی تزریق و تغییر در شرایط فشار ورودی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و انتشار آلاینده‌ها دارد.

عبدالله و همکاران [۱۳]، در یک موتور اشتعال جرقه‌ای کوچک، تأثیر فشار محل پاشش بر مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها را بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش فشار چندراهه ورودی بازده احتراق را افزایش داده و میزان مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. اما این افزایش فشار باعث افزایش مقدار اکسیدهای ازت در خروجی موتور می‌شود. به عقیده آن‌ها با تنظیم مقدار مناسب فشار در محل ورودی می‌توان تعادل مناسبی بین مصرف سوخت، بازده موتور و مقدار انتشار آلاینده‌ها برقرار کرد.

اراکي و همکاران [۱۴]، اثر شرایط تزریق سوخت بر میزان سوخت رسوب کرده روی دیواره درپچه ورودی موتور اشتعال جرقه‌ای در زمان راه‌اندازی سرد موتور را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از سه نوع افشانه و دو شاخص α و β نقش اندازه قطره، زاویه و سرعت پاشش را در نفوذ و تبخیر سوخت تحلیل نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش عدد استوکس موجب کاهش سوخت دیواره‌ای می‌شود، الگوی پیشنهادی آنها توانست عملکرد موتور در چرخه‌های ابتدایی احتراق را با دقت شبیه‌سازی کند.

کوبویا و همکاران [۱۵]، به بررسی تشکیل و تبخیر فیلم مایع سوخت بر دیواره چندراهه ورودی در موتورهای بنزینی با پاشش درپچه‌ای پرداختند. روش آن‌ها توسعه یک حسگر MEMS با قابلیت سنجش ظرفیت برای اندازه‌گیری دمای سطح حسگر بود. آن‌ها ابتدا حساسیت حسگر را در شرایط آزمایشگاه بررسی کردند سپس آن را در لوله ورودی موتور تک‌استوانه با سوخت ترکیبی نصب و عملکردش را در سرعت ثابت ۲۰۰۰rpm آزمایش کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که حسگر توانایی تشخیص تشکیل فیلم مایع سوخت و تبخیر آن روی دیواره را دارد، مخصوصاً با سوخت E20 حساسیت کافی دارد و در زمان بهره‌برداری موتور می‌توان فرآیند برخورد سوخت به دیواره و تبخیر آن را به صورت زنده رصد کرد. عبدی اقدم و همکاران [۱۶]، اثر تنظیم افشانه‌های بنزین و گاز طبیعی بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور اشتعال جرقه‌ای تک‌استوانه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سوخت ترکیبی انتشار مونواکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته را کاهش می‌دهد.

فراری و همکاران [۱۷]، تنظیم جرم سوخت تزریقی در موتورهای احتراق داخلی را در طی یک مقاله مروری بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه روش‌های مختلف تنظیم جرم سوخت از جمله اندازه‌گیری مستقیم، برآورد الگومحور، یادگیری ماشین و رویکردهای ترکیبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سامانه‌های ترکیبی که شامل اندازه‌گیری‌های مستقیم و الگوهای پیش‌بینی است، می‌تواند کارایی احتراق، تنظیم آلاینده‌ها و مصرف سوخت را بهبود بخشد. این مطالعه بر لزوم تحقیق بیشتر در زمینه بهینه‌سازی سامانه‌های تزریق سوخت برای موتورهای احتراق داخلی نسل آینده تأکید می‌کند تا بتوانند با استانداردهای زیست‌محیطی سختگیرانه هماهنگ شوند. رینو و همکاران [۱۸]، تغییرات فشار پشت افشانه سوخت را برای بهبود پاشش و همچنین دامنه پاشش افشانه در سامانه‌های تزریق چند نقطه‌ای بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش فشار تزریق و کاهش زمان پالس پاشش باعث کاهش مصرف سوخت و بهبود پاشش سوخت می‌شود.

هدف از این پژوهش، طراحی یک سامانه سوخت‌رسانی گاز فشرده (سوگاف) است که در آن نقش تلمبه سوخت کم‌رنگ شده و فشار پشت افشانه از طریق فشار گاز روی سوخت تأمین می‌شود. حسن این روش علاوه بر کاهش مصرف انرژی توسط تلمبه، امکان اندازه‌گیری سوخت تزریقی بر چرخه موتور را در کارهای پژوهشی فراهم می‌کند. برای بیان کارایی این روش، نتایج تجربی حاصله از آن با نتایج مربوط به استفاده از سوخت‌رسانی متداول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- زمانبندی بهینه چرخه

پیش‌ررسی بهینه چرخه (OSA¹) یک متغیر اصلی در طراحی و توسعه موتورهای اشتعال جرقه‌ای است که می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند سوخت استفاده شده، بار موتور، سرعت موتور، کیفیت مخلوط و شرایط ورودی متغیر باشد. با توجه به اینکه فرایند سوختن مخلوط آبی اتفاق نمی‌افتد و نیاز به زمان دارد جرقه شمع چند درجه قبل از نقطه مرگ بالای تراکمی نقطه مکث بالا زده می‌شود. برای یک شرایط کاری معین موتور، یک زمان‌بندی جرقه بهینه می‌توان یافت که بیشترین گشتاور در آن حالت تولید شود [۱].

۳- چرخه معادل

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای وجود تغییرات چرخه در نمودارهای $P-\theta$ چرخه‌های پشت سرهم استخراج شده تحت شرایط آزمایش همسان دور از انتظار نیست. معمولاً استفاده از چرخه معادل تئوریک حاصله از نتایج تجربی چرخه‌های هم شرایط یک روش معمول در ادبیات فن موتور است. تغییرات $P-\theta$ چرخه معادل را می‌توان بکمک رابطه ۱ از روی تغییرات $P-\theta$ چرخه‌های هم شرایط در هر زاویه θ محاسبه کرد.

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

که در آن θ زاویه میل‌لنگ P_{eq} و P_i بترتیب فشار استوانه چرخه معادل و چرخه i ام در زاویه θ است. معادله کار بر چرخه معادل و چرخه‌های تجربی هم شرایط را می‌توان بصورت معادله ۲ بیان کرد.

$$W_{Ceq} = \oint P_{eq} dV = \frac{1}{N} \oint P_i dV \quad (2-الف)$$

$$W_{Ceq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{Ci} \quad (2-ب)$$

که در آن W_{Ci} و W_{Ceq} به ترتیب کار چرخه معادل و چرخه i ام است یعنی کار بر چرخه معادل با متوسط کار بر چرخه‌های تجربی برابر است و می‌توان فشار مؤثر متوسط چرخه معادل ($imep_{eq}$) را با معادله ۳ بیان کرد

$$imep_{eq} = \frac{W_{Ceq}}{V_d} \quad (3)$$

¹ Optimum Spark Advance

که در آن V_d حجم جابجا شده استوانه است. در کار حاضر برای تشخیص پیش‌رسی بهینه جرقه از imep استفاده شده است.

۴- موتور و تجهیزات استفاده شده در کار تجربی حاضر

در مقاله حاضر یک موتور پژوهشی تک‌استوانه اشتعال جرقه‌ای که بخشی از سکوی آزمایشگاه نوع CT300 ساخت شرکت GUNT آلمان است، استفاده شد. این موتور به یک لگام‌ترمز آسنکرون با قابلیت تنظیم سرعت و بار متصل شده است. سامانه لگام‌ترمز به گونه‌ای طراحی شده که می‌تواند در حالت مولد برق، توان مکانیکی تولیدی موتور را به توان برقی تبدیل کرده و از طریق یک واحد بازیابی انرژی به شبکه برق انتقال دهد. اتصال موتور به لگام‌ترمز توسط یک اتصال‌دهنده انعطاف‌پذیر از نوع پنجه‌ای انجام شده که به جذب ارتعاشات پیچشی و محافظت از تجهیزات کمک می‌کند. به منظور افزایش انعطاف‌پذیری در انجام آزمایش‌ها و بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی، سامانه‌های تنظیم افشانه سوخت و زمان جرقه‌زنی (زاویه پیش‌رسی جرقه) به صورت قابل تنظیم و قابل برنامه‌ریزی ارتقاء یافته‌اند. این موتور پژوهشی همچنین دارای ویژگی منحصر به فرد نسبت تراکم متغیر است که امکان شبیه‌سازی شرایط مختلف احتراق را فراهم می‌کند.

برای تنظیم نسبت هم‌ارزی توسط کاربر، از یک پردازشگر گاز ساکسون نوع اینفرالیت سی‌ال^۱ استفاده شده است. این دستگاه برای پردازش گازهای خروجی، در محل منیفولد خروجی موتور قرار داده می‌شود. این دستگاه با استفاده از سامانه مکند خود، نمونه گاز را از منیفولد خروجی دریافت کرده و غلظت گونه‌های گازی شامل CO_2 ، O_2 ، CO (برحسب درصد حجمی) و هیدروکربن‌های نسوخته HC برحسب PPM را به همراه نسبت هوا به سوخت نسبی λ اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از مقدار λ و تنظیم طول پاشش سوخت کیفیت مخلوط مورد نظر از طریق سامانه مدیریت موتور اعمال می‌شود. در این پژوهش، به منظور ثبت سیگنال‌های آنالوگ شامل فشار داخل استوانه، فشار چندراهه ورودی، دستورهای موقعیت زاویه‌ای میل‌لنگ و نقطه مکث بالا از زاویه‌سنج و همچنین دستور افشانه از سامانه داده‌برداری نوع DAQ2005 ساخت شرکت Adlink استفاده شد. داده‌های خام توسط نرم‌افزار اختصاصی به زبان FORTRAN پردازش شدند و متغیرهایی نظیر فشار مؤثر متوسط اندیکه imep، بیشینه فشار احتراق، زاویه وقوع بیشینه فشار و سایر شاخص‌های عملکردی استخراج شدند. شکل ۱ نمای کلی تجهیزات به کار رفته و آرایش آن‌ها را نشان می‌دهد و مشخصات موتور در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ نمایی از موتور پژوهشی و تجهیزات موجود در آزمایشگاه

¹ Saxon Infralyt CL

جدول ۱ مشخصات موتور استفاده شده در آزمایش

نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد) و توضیحات
قطر استوانه	۹۰ mm
پیمایش سنبه	۷۴ mm
حجم جابجایی	۴۷۰ cm ³
نسبت تراکم	قابل تغییر (در کار حاضر ۱۱)
سامانه جرقه‌زنی	الکترونیکی باقابلیت تنظیم یک درجه میل‌لنگ
سامانه سوخت‌رسانی	پاشش به مسیر ورودی موتور
سامانه روغن‌کاری	فشاری
تعداد و موقعیت دریچه‌ها	۲ OHV
نوع خنک‌کاری	آب خنک
زاویه باز و بسته شدن دریچه ورودی	۰ درجه نقطه مکث بالا باز و ۵۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا، بسته
زاویه باز و بسته شدن دریچه خروجی	۴۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا، باز و ۸ درجه قبل از نقطه مکث بالا، بسته
شکل محفظه	گرد با سنبه سر تخت
نوع تنفس	طبیعی با صافی و مخزن آرامش

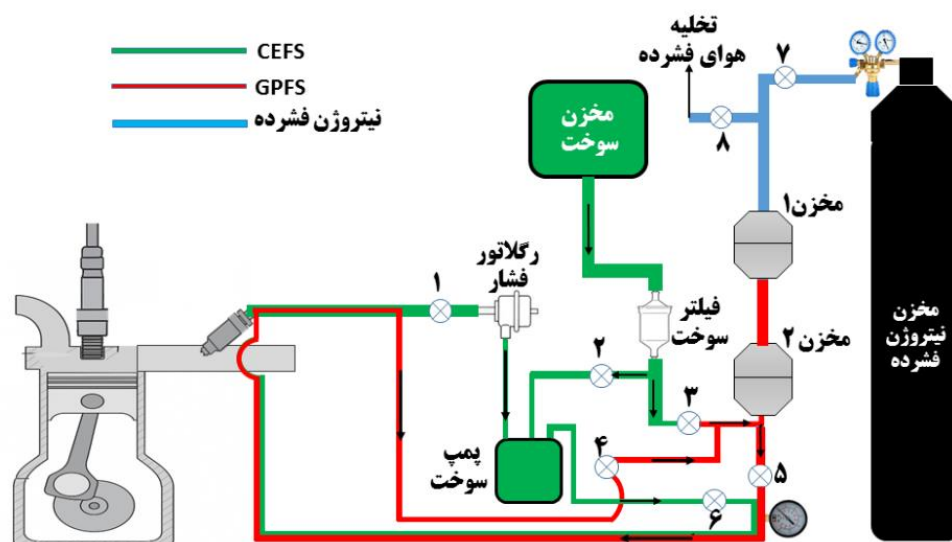
۵- سامانه سوخت‌رسانی طراحی شده

مقدار پاشش افشانه سوخت در موتورهای اشتعال جرقه‌ای علاوه بر دوره پاشش به فشار پشت افشانه و فشار محل پاشش سوخت وابسته است. تنظیم فشار محل پاشش در موتورهای با پاشش در چندراهه ورودی به دلیل وجود پدیده‌های مختلف در ورودی مثل طع و وصل جریان هوا و سوخت و تبخیر سوخت، دشوار بوده و موجب پیچیدگی‌هایی در تحلیل داده‌ها می‌شود. یکی از اهداف کار حاضر تعیین مقدار سوخت تزریقی به هر چرخه موتور در یک شرایط کاری معین است. برای رسیدن به این هدف یک سامانه سوخت‌رسانی با گاز فشرده که بتواند سوخت تحت فشار افشانه را تأمین کند، طراحی شد و به جای روش متداول سوخت‌رسانی مجهز به تلمبه چرخشی برقی به کار گرفته شود. با استفاده از این سامانه، می‌توان حجم سوخت مصرفی برای تعداد مشخص چرخه موتور را تعیین کرد و حتی با استفاده از ثبت λ از طریق دستگاه پردازشگر گاز مقدار متوسط هوای ورودی به هر چرخه و بازده حجمی موتور را برآورد نمود. در این سامانه به منظور تنظیم فشار پشت افشانه ابتدا سوخت به مقدار کافی در مسیر مربوطه تا پشت افشانه بکمک تلمبه بنزین قرار داده شد. با فعال کردن مسیر سامانه جایگزین سوگاف و تنظیم فشار مسیر توسط تنظیم‌کننده مخزن ازت فشرده، فشار مورد نظر پشت افشانه تأمین شد. طراحی سامانه سوخت‌رسانی جدید طوری است که براحتی می‌توان با باز و بستن شیرها شرایط را به سوخت تبدیل کرد. با تغییر فشار پشت افشانه در سامانه سوخت‌رسانی جدید داده‌های تجربی متعددی استخراج شد تا از پردازش آن‌ها و داده‌های سامانه سوخت‌رسانی مرسوم تحت طول پاشش و زمان آغاز پاشش یکسان بتوان حالت و عملکرد موتور همسان برای دو سامانه سوخت‌رسانی را پیدا کرد. شکل ۲ نمایی از نقشه سامانه طراحی شده را نشان می‌دهد. در این سامانه مسیر روش سوخت با رنگ سبز و مدار سامانه سوگاف با رنگ قرمز مشخص شده است.

۶- شیوه انجام آزمایش‌ها

ابتدا موتور با استفاده از سامانه سوخت راه‌اندازی شد. برای احراز شرایط اخذ داده شار آب موتور به گونه‌ای تنظیم شد که دمای موتور به حالت پایا برسد. منظور از حالت پایا در داده‌برداری عدم تغییر دماهای روغن و آب خنک‌کاری در حالت

احتراق موتور است. با استفاده از سامانه مدیریت موتور، پیش‌رسی جرقه، طول پاشش و زاویه شروع پاشش برای یک افشانه چهار سوراخه تنظیم شد. در ادامه مقدار سوخت پاششی توسط افشانه به گونه‌ای تنظیم شد تا $\lambda=1.06$ از دستگاه پردازشگر گاز مشاهده شود. سپس با حفظ شرایط قبلی، موتور تحت سامانه سوگاف راه‌اندازی شد و فقط فشار پشت افشانه در گستره محدودی تغییر داده شد و داده‌های مربوطه ثبت و ذخیره شد تا مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۲. نمایی از سامانه سوخت‌رسانی سوّمُت و سوگاف

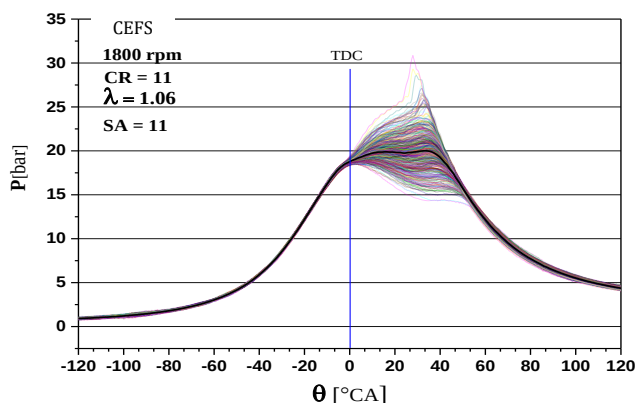
۷- نتایج و بحث

چنانچه از توضیحات قبلی مشخص است سوّمُت یک مدار سوخت‌رسانی چرخشی دارد و تلمبه بنزین در حین کار موتور فعال است و در سوگاف، سوخت تحت فشار ایستای گاز قرار می‌گیرد. از بررسی‌های به عمل آمده مشاهده شد که وقتی فشار پشت افشانه سوخت در هر دو سامانه همسان بود نتایج حاصله از تحلیل کار بر چرخه مشابه هم حاصل نشد. لذا در حالت سوگاف با تغییر فشار پشت افشانه آزمایش‌های متعددی انجام و داده‌بردی‌های مربوطه عملیاتی شد. از مقایسه داده‌های قرائتی آن‌ها ملاحظه شد که تحت تنظیم فشار خاصی که در آن فشار پشت افشانه حدود ۰.۲۵bar بیشتر از حالت سوّمُت بود نتایج قابل مقایسه‌ای بین دو روش حاصل شد. در آزمایش مذکور حجم سوخت مصرفی (۸۷.۸۸ cc) برای ۲۷۲۸ چرخه متوالی اندازه‌گیری شد و با استفاده از چگالی سوخت مقدار 0.02356 gr/cycle برآورد شد. دلیل اصلی تفاوت در فشار به اختلاف فشار دینامیکی جریان سوخت مربوط می‌شود که در خصوص روش سوگاف نزدیک به صفر است اما برای روش سوّمُت بخاطر جریان چرخشی قوی توسط تلمبه قابل توجه است. این بررسی نشان داد که مقدار پاشش سوخت نه به فشار ایستا بلکه به فشار کل پشت افشانه وابسته است. در جدول ۲ داده‌های قرائتی استخراج شده برای دو روش سوخت‌رسانی با عملکرد همسان موتور آمده است.

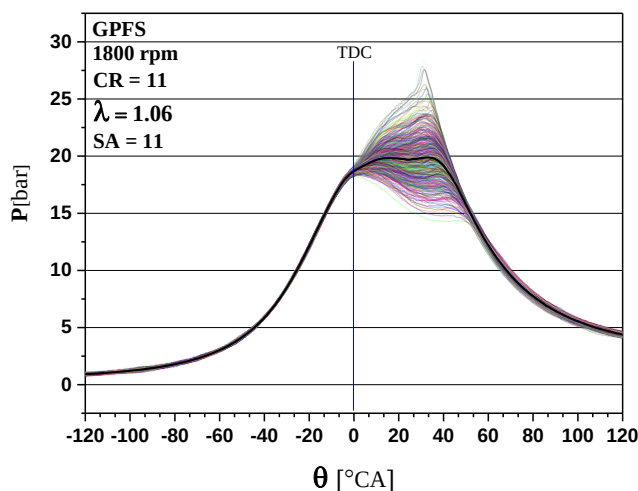
ملاحظه می‌شود که مقادیر ثبت شده برای دو روش سوخت‌رسانی تفاوت قابل توجه ندارند و تصمیم بر این شد که داده‌های فشار داخل استوانه و متغیرهای استخراجی از آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. شکل ۳-الف و ۳-ب بترتیب تغییرات فشار داخل استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ را برای دو حالت بترتیب سوّمُت و سوگاف به‌همراه چرخه میانگین فرضی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که شکل عمومی دو حالت مشابه است و تغییرات چرخه‌ای قابل توجه در هر دوی آن‌ها دیده می‌شود. برخی چرخه‌ها دو قله‌ای ظاهر شده که آثار این وضعیت در چرخه‌های میانگین فرضی مشهود است.

جدول ۲ داده‌های قرائتی استخراج شده در دو روش سوخت‌رسانی

ویژگی	سومت	سوگاف	دقت اندازه‌گیری
سرعت موتور (rpm)	۱۸۰۰	۱۸۰۰	± 1 rpm
گشتاور (N.m)	۲۰/۵۰	۲۰/۵۵	± 0.05 N.m
شار هوا (L/min)	۳۱۸	۳۱۸	± 1 L/min
دمای سوخت ($^{\circ}\text{C}$)	۲۸	۲۸	± 1 $^{\circ}\text{C}$
دمای آب ورودی ($^{\circ}\text{C}$)	۴۲	۴۲	± 1 $^{\circ}\text{C}$
دمای آب خروجی ($^{\circ}\text{C}$)	۵۸	۵۹	± 1 $^{\circ}\text{C}$
شار آب ورودی (L/h)	۱۷۰	۱۷۰	± 1 L/h
دمای هوای محیط ($^{\circ}\text{C}$)	۲۷	۲۷	± 1 $^{\circ}\text{C}$
دمای مخلوط ورودی ($^{\circ}\text{C}$)	۳۵/۲۰	۳۵/۵۰	± 0.1 $^{\circ}\text{C}$
دمای گازهای خروجی ($^{\circ}\text{C}$)	۶۷۸	۶۷۹	± 1 $^{\circ}\text{C}$
دمای روغن ($^{\circ}\text{C}$)	۷۵	۷۵	± 1 $^{\circ}\text{C}$
فشار روغن (bar)	۴/۹	۴/۹	± 0.1 bar
پهنای فرمان پاشش (mSec)	۸/۳۲۵	۸/۳۲۵	± 0.13 mSec
پیش‌رسی جرقه (CABTDC)	۱۱	۱۱	± 0.5 CA



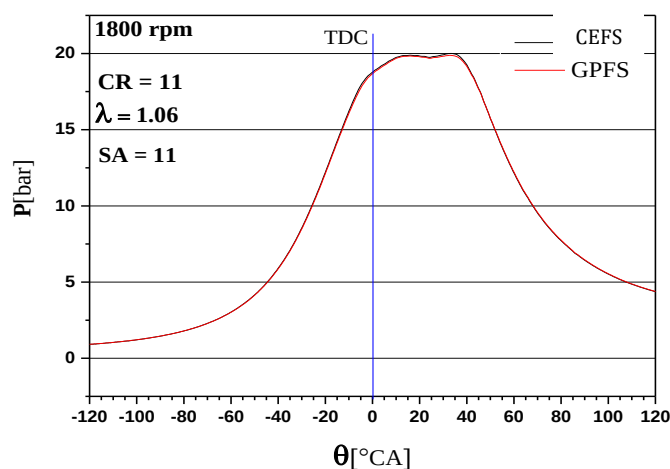
(الف)



(ب)

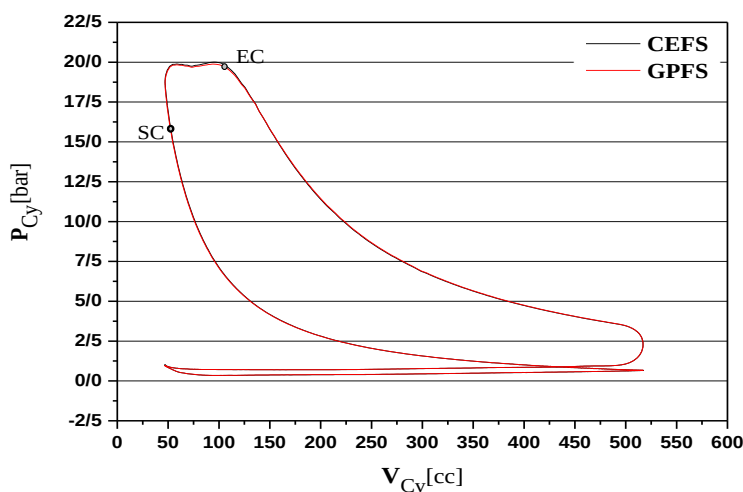
شکل ۳ تغییرات فشار داخل استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ برای حالت‌های الف) سومت و ب) سوگاف

با توجه به اینکه از لحاظ مقایسه کار بر چرخه، چرخه‌های میانگین فرضی قابل استفاده‌اند. در شکل ۴ تغییرات فشار میانگین فرضی دو حالت بر حسب زاویه میل‌لنگ نشان داده شده است. انطباق بسیار خوبی بین دو حالت مشهود است و در بخش عمده محدوده احتراق فشار استوانه تقریباً ثابت است. با توجه به نتایج حاصله داده‌های تغییرات فشار داخل استوانه دو روش سوخت‌رسانی همبستگی و انطباق بسیار خوبی با هم دارند. حالت دو قله‌ای فشار در هر دو سامانه سوخت‌رسانی مشهود است و این وضعیت ناشی از محدودیت در وقوع کوبش بوده که از پیش‌رسی جرعه پایین‌تر در نسبت تراکم قید شده بوجود آمده است. با این عمل بنوعی حداکثر دمای گازهای نسوخته در طول احتراق تقلیل داده شده که با محدود کردن حداکثر فشار همراه است. با توجه به هم‌پوشانی داده‌های هر دو روش به نظر می‌رسد که فرآیند احتراق مسیر یکسانی را طی می‌کند.



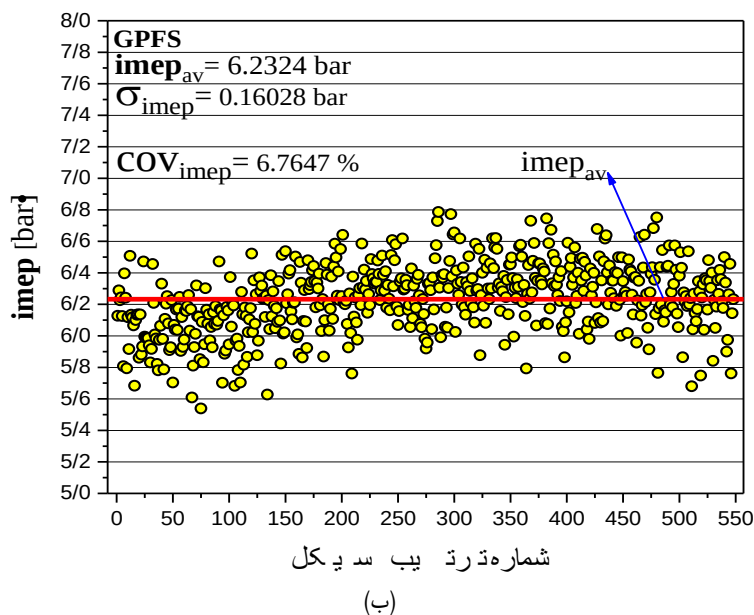
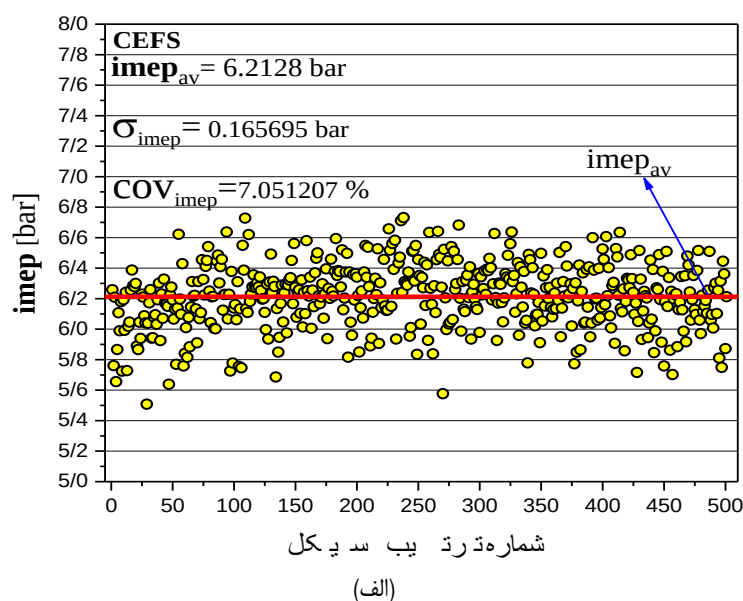
شکل ۴ تغییرات فشار داخل استوانه چرخه میانگین دو روش سوگاف و سوئت

با استفاده از مشخصات هندسی موتور تغییرات حجم استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ محاسبه و امکان ترسیم نمودار P-V فراهم شد. شکل ۵ تغییرات فشار بر حسب حجم استوانه را برای هر دو حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود انطباق خیلی خوبی بین آن‌ها نیز وجود دارد و شروع و خاتمه احتراق آن‌ها مشابه چرخه فشار محدود شده، ظاهر شده است.



شکل ۵ نمودار P-V در دو روش سوگاف و سوئت

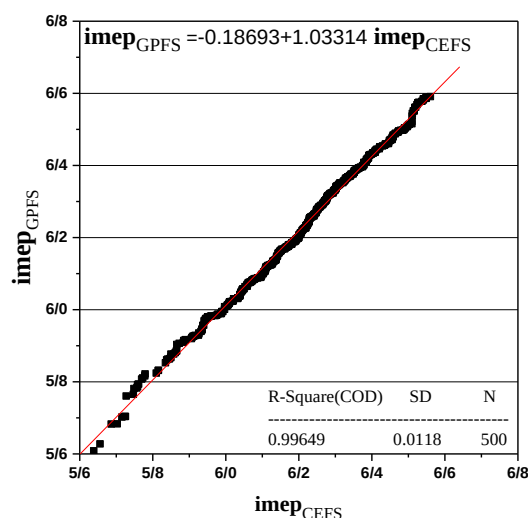
در کار حاضر بررسی تغییرات چرخه‌ای دو حالت سوخت‌رسانی نیز مدنظر قرار گرفته است. با توجه به ماهیت اتفاقی تغییرات چرخه‌ای معمولاً مطالعه در این مورد با توجه به روش‌های آماری انجام می‌گیرد. متغیرهایی که از لحاظ عملکردی در این خصوص بررسی می‌شوند. فشار مؤثر متوسط اندیکه (imep) است که برای چرخه‌های پشت سرهم متفاوت ظاهر می‌شود و مستقیماً با کار بر چرخه متناسب است. مقدار متوسط، انحراف معیار و ضریب تغییرات imep می‌تواند با تغییر شرایط کاری، نوع سوخت و نسبت هم‌ارزی متأثر شود. شکل ۶-الف و ۶-ب تغییرات imep برحسب شماره ترتیب وقوع ۵۰۰ چرخه متوالی را بترتیب برای حالت‌های سوخت و سوگاف نشان می‌دهد. نتایج تحلیل تغییرات فشار مؤثر متوسط نشان می‌دهد که مقدار میانگین و انحراف معیار imep دو روش خیلی به هم نزدیک است و در روش سوگاف ضریب تغییرات اندکی کمتر از روش سوخت است که می‌تواند از موارد عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها باشد. با توجه به نتایج حاصله در حالت کلی می‌توان گفت که حساسیت روش سوگاف به تغییرات چرخه‌ای اندکی کمتر از روش سوخت مشاهده می‌شود.



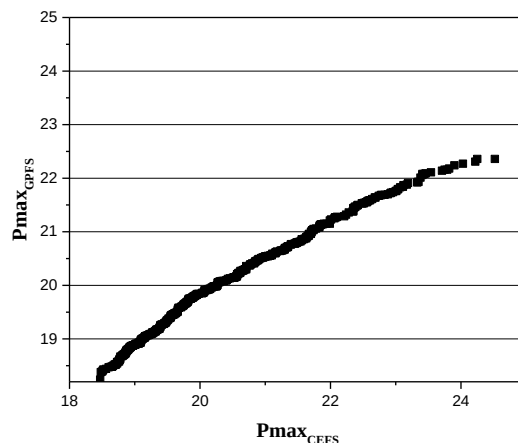
شکل ۶ تغییرات imep برحسب شماره ترتیب وقوع ۵۰۰ چرخه متوالی برای دو حالت (الف) سوخت و (ب) سوگاف

طی یک عملیات ریاضی imep چرخه‌های متوالی دو حالت از کوچک به بزرگ ترتیب‌بندی شد تا وضعیت آن‌ها نسبت به هم مقایسه شود. شکل ۷ تغییرات مقادیر به دست آمده برای imep_{CEFS} با imep_{GPFS} را به همراه برازش خطی آن‌ها نشان می‌دهد. در این نمودار هر چه نقاط حاصله در امتداد خط ۴۵ درجه واقع شده باشد نشانگر وقوع یک به یک چرخه‌های دو حالت است. برازش خطی با مقدار $R^2=0.99649$ و انحراف استاندارد پایین‌تر $SD=0.0118$ بیانگر این است که داده‌های دو حالت با دقت بالا از یک الگوی خطی پیروی می‌کند و ضریب خط ۱۰۳۳۱۴ نمودی از شیب خط خیلی نزدیک به ۴۵° است. نتایج بدست آمده نشانگر هماهنگی بسیار بالا بین داده‌های imep دو روش مذکور است و می‌توان روش سوگاف را با قابلیت اطمینان بالا برای سوخت‌رسانی و در برآورد جرم سوخت هر چرخه جایگزین روش سوّمّت کرد.

قله فشار داخل استوانه یکی دیگر از شاخص‌های چرخه در موتورهای اشتعال جرقه‌ای است که در تحلیل فرآیند احتراق مورد توجه قرار می‌گیرد. در شکل ۸ تغییرات مقدار قله فشار مرتب شده دو روش سوّمّت و سوگاف نسبت به هم نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، منحنی خمیده‌ای مشاهده می‌شود که شیب قسمت ابتدایی آن تقریباً به زاویه ۴۵ درجه نزدیک است اما در فشارهای بیشینه قوی‌تر به دلیل دو قله‌ای بودن و احتمال وقوع کوبش‌های جزئی، انحرافاتی از شیب ۴۵ درجه مشهود است و قله فشارهای متناظر سوّمّت اندکی بیشتر از سوگاف مشاهده می‌شود که می‌تواند منشاء عدم قطعیت در اندازه‌گیری و در نتیجه عدم انطباق دقیق دو روش بکار رفته باشد.



شکل ۷ تغییرات فشار موثر متوسط سوگاف بر حسب سوّمّت



شکل ۸ تغییرات مقدار قله فشار دو روش سوّمّت و سوگاف نسبت به هم

در جدول ۳ نسبت هوا به سوخت نسبی و مقادیر آلاینده‌های خروجی ثبت شده با دو روش سوّمْتُ و سوگاف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار آلاینده‌ها و λ در هر دو روش مشابه هم هستند.

جدول ۳ نسبت هوا به سوخت نسبی و آلاینده‌های خروجی سوّمْتُ و سوگاف

مشخصه	عدم قطعیت	سوّمْتُ	سوگاف
CO (vol%)	± 0.4 (%Vol)	۰/۱۶۸	۰/۱۷۰
CO ₂ (vol%)	± 0.5 (%Vol)	۱۱/۸۹	۱۱/۸۸
HC (ppm)	± 8 (ppm)	۱۵۶	۱۴۶
O ₂ (vol%)	± 0.1 (%Vol)	۱/۳۴	۱/۳۷
λ	± 0.02	۱/۰۶۴	۱/۰۶۶

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه سوخت‌رسانی با گاز فشرده (سوگاف) به منظور پایدارسازی فشار پشت افشانه و افزایش دقت اندازه‌گیری جرم سوخت تزریقی طراحی شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. یک موتور تک استوانه اشتعال جرقه‌ای پژوهشی تحت شرایط کاری معین استفاده شد. ابتدا به ازای دوره پاشش مشخص با سامانه سوخت‌رسانی متداول موتور سوّمْتُ، داده‌های تجربی فشار استوانه و چندراهه ورودی، نقطه مکث بالا و زاویه میل‌لنگ برای بیش از ۵۵۰ چرخه متوالی استخراج شد. سپس با روش سوگاف در فشار گازهای مختلف علاوه بر داده‌های مذکور، حجم سوخت مصرفی بیش از ۲۵۰۰ چرخه متوالی اندازه‌گیری و ذخیره شد. با این روش سوخت تزریقی به هر چرخه قابل برآورد شد. برای پیدا کردن فشار گازی که عملکرد همسانی را با روش سوّمْتُ نتیجه دهد تلاش فراوانی بعمل آمد و آزمایشی که فشار گاز آن ۰.۲۵ bar بیشتر از فشار خط سوّمْتُ بود عملکرد نسبتاً همسانی را نشان داد. در آزمایش مذکور حجم سوخت مصرفی (۸۷.۸۸ cc) برای ۲۷۲۸ چرخه متوالی اندازه‌گیری شد و با استفاده از چگالی سوخت، مقدار ۰.۰۳۳۵۶ gr/cycle برآورد شد.

دلیل اصلی تفاوت در فشار به اختلاف فشار دینامیکی جریان سوخت مربوط می‌شود که در خصوص روش سوگاف نزدیک به صفر است اما برای روش سوّمْتُ بخاطر جریان چرخش قوی توسط تلمبه قابل توجه است. این مطالعه نشان داد که مقدار پاشش سوخت به فشار کل پشت افشانه وابسته است.

از مقایسه داده‌های دو روش سوخت‌رسانی، انطباق قابل توجه مشاهده شد که می‌تواند تایید خوبی برای استفاده از سامانه سوخت‌رسانی فشار گازی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با پاشش راهگاه باشد و در کارهای پژوهشی امکان برآورد سوخت پاششی به هر چرخه را فراهم می‌کند.

فهرست علائم

SA	پیش‌رسی جرقه
TDC	نقطه مکث بالا
CR	نسب تراکم
ppm	قسمت در میلیون
%vol	درصد حجمی
Conventional Engine Fueling System	سوّمْتُ
Gas Pressure Fueling System	سوگاف

References

- [1] Abdi Aghdam E, Ataee Tarzanagh M, Kanani J. The output performance of the 25% gasoline-75% NG combination mode and its comparison with NG mode. The Journal of Engine Research. 2024 Mar 20;71(1):40-51. doi: 10.22034/er.2024.2025041.1037 [In Persian]
- [2] Abdi Aghdam E, Ataee Tarzanagh M. The effect of burned residual gases on optimum ignition timing using skip fire technique. The Journal of Engine Research. 2022 Nov 27;50(50):67-75. [In Persian]
- [3] Piano A, Pucillo F, Millo F, Giordana S, Rapetto N, Schuette C. Experimental investigation on the optimal injection and combustion phasing for a direct injection hydrogen-fuelled internal combustion engine for heavy-duty applications. International Journal of Hydrogen Energy. 2025 Jan 27;100:398-406. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.194
- [4] 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. 2020;139(4):2489-97. doi: 10.1007/s10973-019-08579-w
- [5] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. 2nd ed. McGraw-Hill Education; 2018.
- [6] Syamsulbahri WS, Suhaimy AD, Abidin SF, Hushim MF, Manshoor B, Zaman I. Effects of Fuel Additive on Combustion, Performance and Emissions of Internal Combustion Engine. Fuel, Mixture Formation and Combustion Process. 2022;4(2).
- [7] Yekani SK, Abdi Aghdam E, Sarabi M. An experimental investigation of knock limit, performance and economic parameters in a gasoline-natural gas dual fuel spark-ignition engine at the compression ratio of 10. Journal of Energy Management and Technology. 2023 Mar 1;7(1):1-0. doi: 10.22109/jemt.2022.320776.1358
- [8] Guzzo ME, Fonseca LG, Baeta JG, Rodrigues Filho FA, Pujatti FJ. Experimental Investigation of Spray Characteristics Direct Injected in Atmospheric Ambient Conditions by an Inwardly-Opening Pressure Swirl Injector. SAE Technical Paper; 2024 Dec 20. doi: 10.4271/2024-36-0142
- [9] Postrioti L, Maka C, Martino M. Analysis of injected mass shot-to-shot dispersion and injection rate profile for a PFI injector in actual operating conditions. SAE Technical Paper; 2025 Nov 3. doi: 10.4271/2025-32-0019
- [10] Hu Z, Yuan S, Wei H, Huang Z, Wei H, Chan SH, Zhou L. High-pressure injection or low-pressure injection for a direct injection hydrogen engine?. International Journal of Hydrogen Energy. 2024 Mar 15;59:383-9. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.018
- [11] Chuepeng S. Effects of heated ethanol on retrofit single-hole gasoline injector performance. Case Studies in Thermal Engineering. 2016 Sep 1;8:245-9. doi: 10.1016/j.csite.2016.08.003
- [12] Wang Y, Long W, Lu M, Dong P, Tian H, Wang Y, Xie C, Tang Y, Zhang W. A quasi-dimensional model of multiple-cycle fuel film evaporation in a port fuel injection spark-ignition methanol marine engine. Energy. 2024 Nov 1;308:132992. doi: 10.1016/j.energy.2024.132992
- [13] Abdullah NR, Shahrudin NS, Mamat AM, Kasolang S, Zulkifli A, Mamat R. Effects of air intake pressure to the fuel economy and exhaust emissions on a small SI engine. Procedia Engineering. 2013 Jan 1;68:278-84. doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.180
- [14] Araki M, Sakairi K, Kuribara T, González Palencia JC, Shiga S, Ishima T, Haibara T, Mitani S. Effects of injection parameters on the amount of wall-wet fuel in a port-fuel-injected spark-ignition engine during cold start. International Journal of Engine Research. 2021 Jan;22(1):184-98. doi: 10.1177/1468087419837768
- [15] Kuboyama T, Yoshihashi T, Moriyoshi Y, Nakabeppu O, Takayama S. Measurement of Liquid Fuel Film Attached to the Wall in a Port Fueled SI Gasoline Engine. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2023 Oct 24;6(2023-01-1818):2314-20. doi: 10.4271/2023-01-1818
- [16] Abdi Aghdam E, Sarabi M. Calibration of gasoline-natural gas spark ignition engine injectors and comparison of the experimental results of the working conditions and emissions of the combination-burning mode with the single-burner. Mechanical Engineering, University of Tabriz. 2022 Apr 21;52(1):109-17. doi: 10.22034/JMEUT.2021.44065.2829 [In Persian]
- [17] Ferrari A, Gurri S, Vento O. Injected Fuel Mass and Flow Rate Control in Internal Combustion Engines: A Systematic Literature Review. Energies. 2024 Dec 21;17(24):6455. doi: 10.3390/en17246455
- [18] Rojas-Reinoso V, Duque-Escobar S, Guapulema-Guapulema C, Soriano JA. Study of the Variation of Fuel Pressure to Improve Spraying and the Range of the Injection Jet. Energies. 2023 Jul 19;16(14):5472. doi: 10.3390/en16145472