

Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2047099.1981



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Experimental Study of the Effects of Dual-Fuel on the Output Power and Environmental Pollution of a Spark-Ignition (SI) Engine in Stoichiometric Equivalence Ratio

Seyyed Kazem Yekani^{1*}, Tuhid Pashae Golmarz¹, Faramaz Talati¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 25 Sep 2024

Accepted: 5 Nov 2024

Abstract

In the present research work, a research engine with the required measurement system along with laboratory equipment, experimental results of normal combustion (without knocking) at a compression ratio of 11, at two different engine speeds and stoichiometric equivalence ratio at different advances (selection of the optimal advance from at least 6 advances) were extracted for the conditions of G100 (100% gasoline), G87.5 (87.5% gasoline remaining natural gas), G75 (75% gasoline remaining natural gas) and G62.5 (62.5% gasoline remaining natural gas). To ensure the experimental data, information was obtained and stored from 350 consecutive cycles. After analyzing, the information was converted from raw results to usable results by a computer code. The experimental results were used to analyze the combustion, emissions, and performance of the gasoline and natural gas blend. In summary, the $IMEP_{AV}$ (average indicated mean effective pressure) and torque output of the gaseous fuel blend were comparable to the gasoline-burning state, while the levels of CO, HC, and NO pollutants were greatly reduced with increasing natural gas and engine speed.

Keyword: Dual fuel, SI, Combustion, Torque, Pollutant

* s.k.yekani@tabrizu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Yekani, S.K., Pashae Golmarz, T., Talati, F., "Experimental Study of the Effects of Dual-Fuel on the Output Power and Environmental Pollution of a Spark-Ignition (SI) Engine in Stoichiometric Equivalence Ratio", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 87, pp. 55-70, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2047099.1981



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

مطالعه تجربی موتور اشتعال جرقه ای با سوخت ترکیبی در حالت استوکیومتری از نظر توان خروجی و آلاینده‌گی محیط زیست

سید کاظم یکانی^{1*}، توحید پاشائی گلمرز¹، فرامرز طلعتی²

¹ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

² دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

دریافت: 1403/07/04 پذیرش: 1403/08/15

چکیده

در کار پژوهشی حاضر یک موتور پژوهشی دارای سیستم اندازه‌گیری مورد نیاز همراه با تجهیزات آزمایشگاهی، دست‌آوردهای تجربی احتراق نرمال (بدون کوبش) در نسبت تراکم 11، در دو سرعت موتور متفاوت و نسبت هم ارزی استوکیومتری در آوانس‌های متفاوت (انتخاب آوانس بهینه از حداقل 6 آوانس) برای حالت‌های G100 (صد درصد بنزین)، G87.5 (87/5 درصد بنزین مابقی گاز طبیعی)، G75 (75 درصد بنزین مابقی گاز طبیعی) و G62.5 (62/5 درصد بنزین مابقی گاز طبیعی) مستخرج گردید. برای اطمینان از داده‌های تجربی از 350 چرخه متوالی اطلاعات اخذ و ذخیره شده است و پس از تحلیل اطلاعات توسط یک کد کامپیوتری نتایج خام به نتایج مورد استفاده تبدیل گردید. از نتایج تجربی به دست آمده برای تجزیه و تحلیل احتراق، آلاینده‌گی و عملکرد ترکیب بنزین و گاز طبیعی استفاده شد. در جمع‌بندی این نتایج، فشار اندیکه داخل موتور و گشتاور خروجی ترکیب سوخت‌های گازدار قابل مقایسه با حالت بنزین‌سوز بود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش گاز طبیعی و سرعت موتور میزان آلاینده‌های CO، HC و NO به شدت کاهش می‌یابند.

کلمات کلیدی: سوخت ترکیبی، موتور اشتعال جرقه‌ای، احتراق، گشتاور، آلاینده

* s.k.yekani@tabrizu.ac.ir

1- مقدمه

مشکل عمده موتورهای احتراق داخلی (SI)¹ در حوزه آلاینده‌گی‌های شهری و کمبود منابع هیدروکربنی است پژوهشگران برای حل این معضل‌ها راهکارها معرفی سوخت جایگزین مناسب با قابلیت خوب در تقلیل آلاینده‌ها بجای سوخت بنزین را معرفی می‌کنند.

در سال‌های اخیر، اغلب پژوهش‌های نظری و تجربی که در مورد موتورهای اشتعال جرقه‌ای انجام گرفته در زمینه سوخت جایگزین، افزایش کارایی و کاهش آلاینده‌گی موتور بوده است. تعداد وسایل نقلیه با سوخت مورد استفاده گاز طبیعی در جهان تقریباً به 23 میلیون خودرو رسیده است که کشور خودمان ایران بزرگ‌ترین ناوگان گازسوز دنیا را دارا می‌باشد [1] موتورهای گازسوز در نوع خود دارای معایب و محاسنی هستند که از آن جمله می‌توان به کوبش و گشتاور کمتر نسبت به سوخت‌های فسیلی، امکان افزایش نسبت تراکم موتور احتراق داخلی، اختلاط آسان سوخت با هوا، کاهش آلاینده‌های موتور و صرفه اقتصادی آن در ایران اشاره نمود [2]. گاز طبیعی دارای مزایا متعددی اعم از افزایش راندمان حرارتی ترمزی موتور با افزایش نسبت تراکم موتور احتراق بدون وقوع کوبش مضر است [3] همچنین دامنه اشتعال گاز طبیعی بالاتر از بنزین بوده و سبب می‌شود در نسبت تراکم بالاتر پاسخ‌گویی بهتری داشته باشد [4-5] آلاینده‌های موجود در قسمت تنفسی زمین پژوهشگران را مجبور به تحقیق در مورد جایگزین سوخت بنزین و گازوئیل نموده است. برای کاهش انتشار آلاینده‌های و افزایش راندمان ترمودینامیکی موتورهای احتراق داخلی (SI) سوخت‌های ترکیبی یکی از راهکارهای مناسب با طیف متفاوت آلاینده‌گی و عملکردی می‌باشد [6-8]. لذا پژوهشگران حوزه موتور احتراق مفهوم احتراق سوخت دوگانه به صورت همزمان را در داخل محفظه احتراق ارائه نمودند و این نظریه عنوان طرح امیدوارکننده جهت حل معضل موجود مطرح گردید [9]. سرابی و عبدی اقدم [10] در یک پژوهش عددی پارامترهای عملکردی به همراه آلاینده‌گی موتور اشتعال جرقه‌ای (SI) را با سوخت ترکیب سوز بررسی نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که آلاینده‌های محیط زیست در حالت ترکیب سوزی، کاهش یافته و عملکرد موتور از نظر گشتاور تا حدی کاهشی بوده است. لوریو و همکاران [11] در فیلمبرداری از داخل محفظه موتور احتراق در حالت ترکیب سوز گاز و بنزین موفق شدند از گسترش جبهه شعله در حالت ترکیبی سوز مستندی تهیه نمایند که بیانگر از پیشروی جبهه شعله با سرعت بالا نسبت به سوخت بنزین صد در صد بود. یکانی و همکاران [12-13] با بررسی سوخت ترکیب سوز در موتور احتراق داخلی تأثیر تغییر نسبت تراکم بر میزان آلاینده‌های محیط زیست بررسی نمودند و در یک بررسی دیگر توانستند میزان اثر گذاری سوخت‌های فقیر دوگانه را بر آلاینده‌گی محیط زیست گزارش نمایند. عبدی اقدم و همکاران [14] نیز توانستند در راستای کالیبراسیون دقیق انژکتورهای سوخت‌های دوگانه نتایج تجربی مناسبی ارائه و راست آزمایی نمایند که این روش سبب بهره مندی سایر محققین از این موضوع گردید. راکاپولس و همکاران [15] با بررسی سوخت همزمان متانول و بنزین توانستند در یک موتور اشتعال جرقه‌ای نتایج گازهای آلاینده در محیط زیست را در سرعت بالای موتور به جامعه علمی گزارش نمایند. پیپتون و گنجی [16] در یک موتور اشتعال جرقه‌ای تک سیلندر، با سوخت ترکیبی LPG² و بنزین را مورد بررسی قرار داده و مقدار مقاومت کوبشی مخلوط را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که در سوخت ترکیبی افزودن LPG،

¹ Spark Ignition

² Liquefied Petroleum Gas

مقاومت در مقابل کوبش مضر را به مقدار زیاد افزایش می‌دهد و این امر سبب افزایش نسبت تراکم موتور می‌گردد. بارل و همکاران [17] کوبش مضر بر مبنی $MAPO^3$ را برای ترکیب دوسوخت نفت سفید و بنزین در موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای (SI) پژوهشی بررسی کردند. آن‌ها پس از پردازش داده‌ها به این نتیجه رسیدند که زیاد شدن درصد مقدار جرمی نفت سفید در ترکیب سوخت، تمایل به کوبش مضر در موتور و میزان آن را افزایش می‌دهد. ساقار و همکاران [18] در یک پژوهش تجربی بر روی یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای SI، با سوخت ترکیبی هیدروژن و گاز طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه آن‌ها با افزایش درصد هیدروژن در سوخت مخلوط شده در برگیرنده کاهش هیدروکربن نسوخته، CO و CO₂ و افزایش NO_x بود. خشکنامه و همکاران [19] با افزودن الکل به سوخت بنزین توانستند تراز انرژی و میزان عملکرد موتور احتراق داخلی را بررسی و گزارش نمایند در این گزارش علاوه چند نوع الکل مخلوط شده در بنزین سه سرعت متفاوت در موتور احتراق داخلی مورد بررسی قرار گرفت و میزان توان خروجی و شاخص‌های عملکردی گزارش شد.

حسینی راد و همکاران [20] نیز میزان تأثیرات آلاینده بر روی هوا و تخریب آن را که اکثراً برگرفته از آلاینده‌های موتورهای احتراق داخلی بود را بررسی و گزارش نمودند. پیپیتون و بکاری [21] یک ترکیب سوخت با درصد‌های متفاوت بنزین و گاز مایع را در داخل یک موتور چهار سیلندر پژوهشی مطالعه نمودند نتایج آن‌ها نشان می‌داد که با کاهش درصد جرمی بنزین در مخلوط، آلاینده‌های کربنی کاهش یافته و بازده حرارتی افزایش می‌یابد. این موضوع توانست جایگاه سوخت‌های ترکیبی در حوزه کاهش آلاینده‌ها نشان دهد. لیو و همکاران [22] بر روی سوخت ترکیبی متانول و بنزین مطالعه تجربی نمودند نتایج آن‌ها ضمن تأیید عملکرد و سرعت پیش روی جبهه شعله نشان دهنده افزایش پیک فشار در موتور بود. همچنین سینگ و همکاران [23] در کار تجربی بر روی یک موتور توربوشارژ اشتعال جرقه‌ای پژوهشی با سوخت مخلوط متان-بنزین که با درصد متفاوت جرمی ترکیب شده بودند دریافتند که با افزایش درصد متان در ترکیب شدت کوبش و imep کاهش می‌یابد. جین و همکاران [24] بهبود کارایی یک موتور دوگانه سوز در حال کار بر روی ترکیبی از بیودیزل و هیدروژن با بهینه سازی پارامترهای عملیاتی را مطالعه کردند. در کار ایشان نتایج نشان داد که حداکثر بازده حرارتی ترمز 28/11 درصد بود. آلاگو و همکاران [25] بیودیزل را از زیست توده آبی سنبل خشک شده در آفتاب تولید کرده‌اند که برای آزمایش موتور استفاده می‌شد. مشخص شد که ترکیب 40 درصد [WHB⁴] و ترکیب دیزل با هیدروکسی منجر به بهبود عملکرد می‌گردید [26]. در کار دیگری ترکیبات مختلفی از بیودیزل Mesua Ferrea و دیزل در موتورهایی با نسبت تراکم متفاوت استفاده شد [27]. دابی و ساها [28] از مخلوط‌های روغن دانه‌های Mesua Ferrea با دیزل استفاده کردند که منجر به افزایش انتشار HC و CO شد، در یک مطالعه جداگانه، MFB در موتور دیزل تحت شرایط زمان‌بندی تزریق و بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

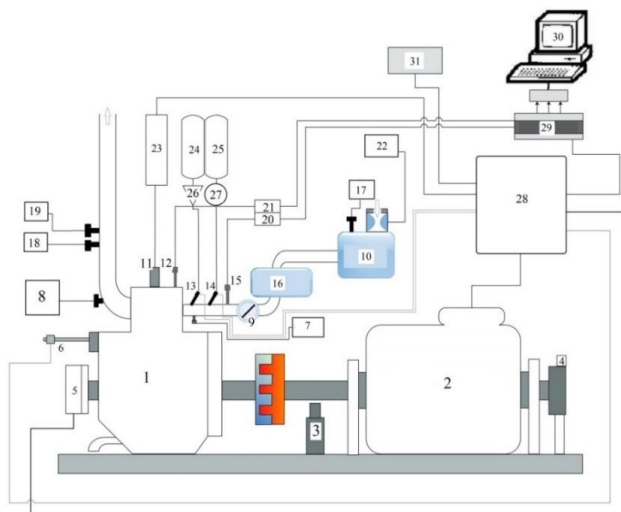
در پژوهش حاضر حسب اینکه به صورت تجربی با بهره‌گیری از تجهیزات آزمایشگاه صورت گرفته است کلیه تجهیزات و مواد مصرفی به تفکیک به شرح زیر توضیح داده می‌شود:

³ Maximum Amplitude of Pressure Oscillation

⁴ Water Hyacinth biomass

2-1- سکوی آزمایش

سکوی تست موجود، ساخت شرکت گونت آلمان (با مدل CT300) با یک موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای SI پژوهشی می‌باشد. این موتور تک سیلندر به یک دینامومتر آسنکرون که دارای مزیت کنترل سرعت می‌باشد کوپل شده است. در راستای تحقیقات سریالی سیستم سوخت‌رسانی و آوانس شمع از حالت کار براتوری و دستی به انژکتوری با قابلیت پاشش دو سوخت به صورت همزمان (بنزین و گاز) و الکترونیکی با قابلیت کنترل طول پاشش سوخت‌ها و آوانس توسط کاربر ارتقا داده شده است [29-31] این امر سبب امکان آزمایش سوخت ترکیبی را به مجموعه آزمایشگاهی داده است که در شکل و جدول شماره 1 ارائه شده است.



شکل 1- طرحواره تجهیزات بکار رفته در آزمایشگاه

جدول 1- عنوان اجزاء مشخص شده در شکل 1

عنوان	شماره تعلیقات	عنوان	شماره تعلیقات
سنسور دمای مخزن آرامش اولیه	17	موتور	1
آنالیزور گاز	18	دینامومتر	2
آنالیزور گاز	19	سنسور سرعت موتور	3
آمپلی فایر ترانسدیوسر فشار مطلق	20	سنسور گشتاور	4
آمپلی فایر ترانسدیوسر فشار دینامیکی	21	شفت انکودر	5
سنسور دبی هوای ورودی	22	مکشی TDC تشخیص	6
سیستم جرقه زنی	23	سنسور دمای مخلوط ورودی	7
مخزن سوخت گاز طبیعی	24	سنسور دمای گاز خروجی	8
مخزن سوخت بنزین	25	پروانه گاز	9
رگولاتور فشار گاز طبیعی	26	محفظه آرامش هوای اولیه	10
پمپ بنزین	27	شمع موتور	11
سیستم مدیریت موتور	28	ترانسدیوسر فشار دینامیکی	12
AD-Logger	29	انژکتور گاز طبیعی	13
PC	30	انژکتور بنزین	14
ورودی برق به سیستم	31	ترانسدیوسر فشار مطلق	15
		محفظه آرامش هوای ثانویه	16

2-2- موتور پژوهشی

موتور تحقیقاتی در پژوهش پیش رو تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای به مدل C 29 تولید شده در کارخانه فریمن دیزل بوده و توسط شرکت گونت آلمان ضمن تأیید، قابلیت سرعت متغیر را به آن اضافه نمودند. در جدول 2 مشخصات موتور مد نظر ارائه شده است.

جدول 2- مشخصات موتور تک سیلندر پژوهشی

مشخصه	توضیحات
قطر سیلندر	90 mm
کورس پیستون	74 mm
حجم جابجایی	470 Cm ³
نسبت تراکم	متغیر
سیستم جرقه زنی	الکترونیکی با قابلیت تنظیم زمانبندی جرقه
سیستم سوخت رسانی	انژکتوری گازسوز و بنزین سوز با قابلیت تنظیم فشاری-پاششی
سیستم روغن کاری	تک جریانی با آب
نوع خنک کاری	2OHV
تعداد و موقعیت سوپاپ‌ها	در 0 درجه TDC باز و در 50 درجه بسته می‌شود
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ ورودی	در 40 درجه باز و در 8 درجه بسته می‌شود
زاویه باز و بسته شدن سوپاپ خروجی	طبیعی
نوع تنفس	دیسکی
شکل محفظه	

2-3- سیستم‌های اندازه‌گیری

یکی از مهم‌ترین وجوه آزمایش تجربی ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده در تحقیقات تجربی می‌باشد، بر این اساس تمامی تجهیزات به اختصار بیان می‌شود:

2-3-1- سنجش سرعت موتور

برای سنجش سرعت موتور توسط یک ژنراتور تولید کننده پالس اپتوالکتریکی کوپل شده با موتور C 29، سرعت موتور بر حسب rpm اندازه گرفته می‌شود و در تابلو ساخته شده توسط شرکت گونت آلمان به نمایش گذاشته می‌شود.

2-3-2- اندازه‌گیری گشتاور خروجی موتور

با استفاده از یک کوپلینگ که مابین موتور و ماشین آسنکرون قرار داده شده گشتاور مبادله می‌شود. گشتاور خروجی این موتور توسط یک اهرم بازویی مجهز به یک گیج کرنشی اندازه‌گیری می‌گردد و بر حسب N.m به صورت دیجیتالی بر روی تابلو شرکت گونت نمایش داده می‌شود و بار موتور به وسیله ماشین آسنکرون به موتور اعمال می‌شود.

2-3-3- سنجش مصرف سوخت

یکی از مهم‌ترین موضوعات این پژوهش مقادیر سوخت پاشیده شده توسط انژکتورها به داخل سیلندر می‌باشد پس بنابراین باید رابطه مابین زمان پاشش انژکتورها و مقدار جرم پاشیده شده سوخت را بیابیم. در واقع به دنبال رابطه دبی جرمی سوخت پاشیده شده هستیم. از روابط سوخت و احتراق و کالبراسیون انژکتورها داریم [32]:

$$m_f (gr) = (0.00625 + 8.44429 \times 10^{-5} X + 7.92857 \times 10^{-7} X^2) + (-9.812 \times 10^{-5} + 3.3078 \times 10^{-6} X - 3.82857 \times 10^{-8} X^2 + 1.19792 \times 10^{-10} X^3) \times Y$$

در رابطه فوق X طول پالس پاشش سوخت به ازای IPD و فشار محل تخلیه انژکتور بر حسب کیلو پاسکال با نماد Y نشان داده شده است. همچنین کالیبراسیون انژکتور گاز طبیعی در فشارهای محل پاشش مختلف انجام شده و نتایج نشان داد که مقدار جرم گاز طبیعی پاشیده شده از فشار محل تخلیه متأثر نمی‌شود. ملاحظه می‌شود که رابطه زیر از کالیبراسیون انژکتور گاز طبیعی حاصل شده و IPD بر حسب واحد پاشش می‌باشد [32].

$$m_{fe}(gr) = -0.00226 + 2.55499 \times 10^{-4} IPD$$

در این بررسی، ترکیب گاز طبیعی به شرح جدول 3 بر پایه درصد حجمی گونه‌ها [33] با فرمول شیمیایی متوسط بخش هیدروکربن $C_{1.04}H_{3.97}$ استفاده شد. از ترکیب گاز طبیعی حدود 94/91 درصد مربوط به هیدروکربن‌ها و مابقی ناخالصی بصورت CO_2 و N_2 بود. فرمول شیمیایی متوسط بنزین $C_{7.76}H_{13.1}$ با چگالی 746 kg/m^3 در نظر گرفته شد [34].

جدول 3- اجزاء سازنده گاز طبیعی

محتویات	درصد
CH_4	88/323
C_2H_6	4/672
C_3H_8	1/137
C_4H_{10}	0/484
C_5H_{12}	0/181
CO_2	0/694
N_2	4/5
H_2S	0/849 ppm

2-3-4- اندازه‌گیری فشار داخل محفظه احتراق

فشار سنج مورد استفاده در این آزمایش ترانسدیوسر دینامیکی کیسلر مدل 6052C می‌باشد که دارای ویژگی‌های زیر است.

1- دقت بالا در اندازه‌گیری

2- مقاوم در برابر تغییرات دمایی

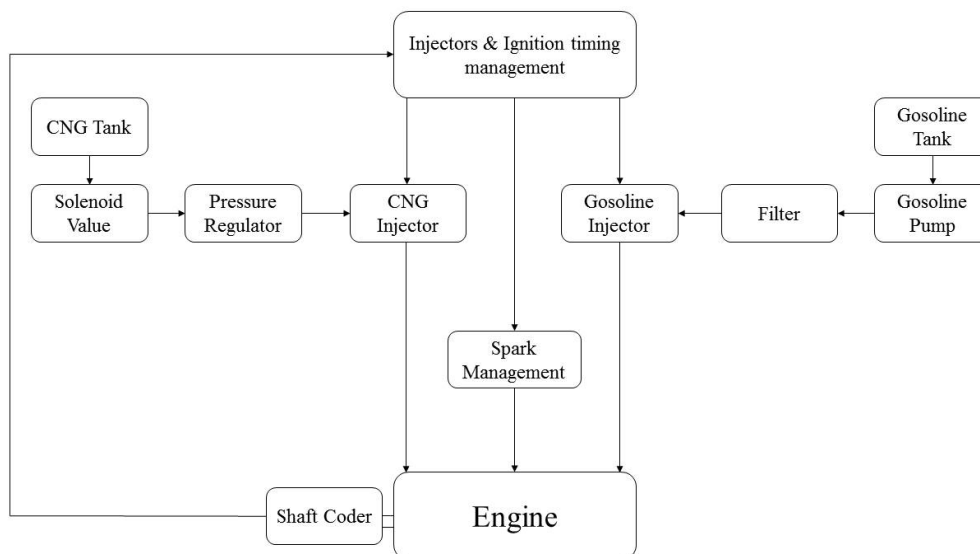
3- پایین بودن خطاهای

2-3-5- سیستم اندازه‌گیری آلاینده‌های موتور

برای اندازه‌گیری آلاینده‌های محیط زیست (CO ، HC و NO) و کیفیت مخلوط (λ)، دو دستگاه آنالیزور گاز -InfraLyte- CL ساکسون و Testo 350XL بکار گرفته شد. کلیه این دستگاه‌ها برای هر آزمایش‌ها ثابت بوده و خطاهای آن نیز بررسی گردیده است.

2-4- سیستم مدیریت موتور

برای اعمال تنظیمات دلخواه از قبیل زاویه آغاز پاشش، طول زمان پاشش، تعیین آوانس جرعه و مقدار درصد سوخت و اعمال درصدهای لازم برای ترکیب سوزی و غیره، کاربر با استفاده از سیستم مدیریت موتور طراحی می‌تواند اقدام کند. در شکل زیر فلودیاگرام مدیریت موتور ارائه می‌گردد.



شکل 2- فلودیاگرام سیستم کنترل پاشش سوخت‌ها و زمان‌بندی جرعه

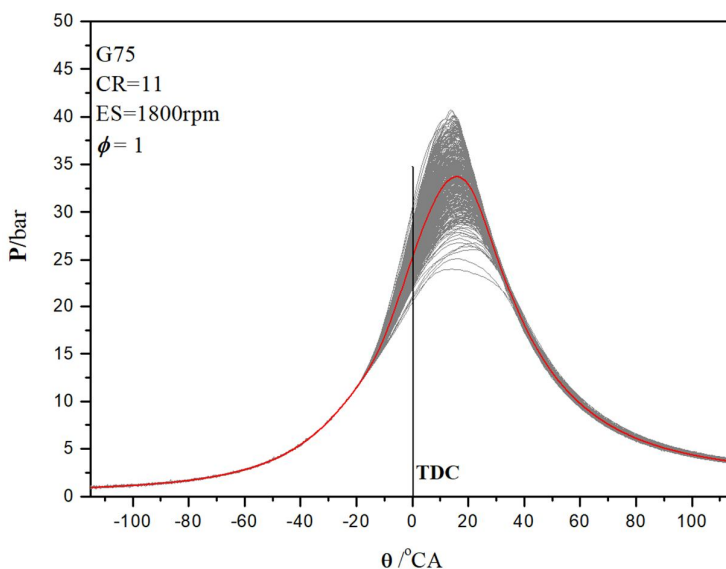
2-5- شیوه اجرای آزمایش‌ها

جهت دستیابی به شرایط آزمایش در نسبت تراکم 11 موتور راه‌اندازی و سرعت آن به 1800rpm رسانده شد تا موتور گرم شده و به حالت پایا برسد. سپس توسط سیستم مدیریت موتور درصدهای لازم جرمی برای ترکیب سوخت دستور داده شد. با توجه به دقت 1 درجه‌ای در میل‌لنگ، در هر آوانس 350 چرخه متوالی ثبت گردید. اطلاعات چرخه ثبت شده اعم از زاویه میل‌لنگ، فشار درون دینامیکی و استاتیکی و نقطه مرگ بالا بودند که از طریق دیتا لاگر جمع‌آوری و در نرم‌افزار مبدل آنالوگ به دیجیتال در سیستم مدیریت ثبت شد. اطلاعات خام توسط کد فرترن به چرخه‌های مجزا جدا شدند تا بتوان تغییرات $P-\theta$ (فشار درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ) و imep هر سیکل و متوسط چرخه‌ها را برآورد نمود. همچنین سرعت، گشتاور، دمای مخلوط ورودی به موتور، λ و مقادیر گونه‌های آلاینده خروجی (CO، HC، NO) و دمای گازهای خروجی اندازه‌گیری شدند. سپس به کمک بیشترین گشتاور خروجی موتور و imep حاصل از فشار درون سیلندر، آوانس بهینه جرعه (انتخاب از حداقل 6 آوانس جرعه) در محدوده‌ی غیرکوبشی (بدون کوبش مضر بر اساس MAPO) تعریف شده تعیین گردید. در ادامه شرایط کاری موتور به حالت تمام بار با 3 ترکیب جرمی دیگر دو سوخت با گام جرمی 12/5% توسط سیستم مدیریت موتور به ترتیب 87/5%، 75% و 62/5% بنزین و مابقی گاز طبیعی (G87.5، G75، G62.5) تغییر و ثبت گردید و کلیه اقدامات داده‌برداری برای همه ترکیب‌ها، همانند هم انجام شد.

3- نتایج و بحث

نتایج تست‌های تجربی بر روی موتور تک سیلندر CT300 در حالات مختلف 100% بنزین، 87/5% بنزین، 75% بنزین و 62/5% بنزین و مابقی گاز طبیعی در شرایط نسبت هم ارزی استوکیومتری در نسبت تراکم 11 و سرعت موتور 1500rpm و 1800rpm در آوانس‌های مختلف جرقه با گام زاویه‌ای 1 درجه میل‌لنگ برای 350 چرخه متوالی انجام گرفته و به کمک بیشترین imep و گشتاور بدست آمده در شرایط غیر کوبشی، آوانس بهینه جرقه هر حالت تعیین شده است.

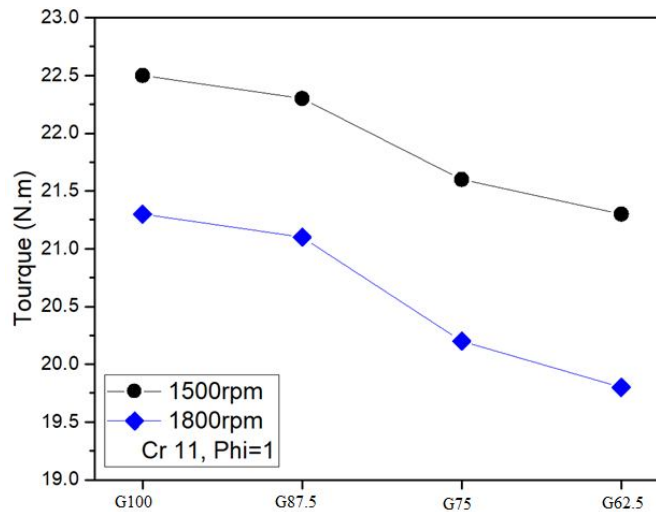
با توجه به اینکه مقادیر سوخت و هوای ورودی به موتور، انتقال حرارت از دیواره سیلندر، شرایط جرقه زنی در سر شمع و تشکیل شعله اولیه در سیکل‌های کاری پشت سرهم موتور با ثابت در نظر گرفتن شرایط اعمالی به مجموعه مدیریت موتور، کاملاً یکسان نمی‌باشد از این رو تغییرات imep و نمودار فشار درون سیلندر با گام زاویه‌ای میل‌لنگ محتمل می‌باشد. لذا برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر 350 سیکل پشت سر هم برای هر آزمایش همانند شکل 3 نمونه برداری شد و میانگین آن در محاسبات مورد بهره برداری قرار گرفته است.



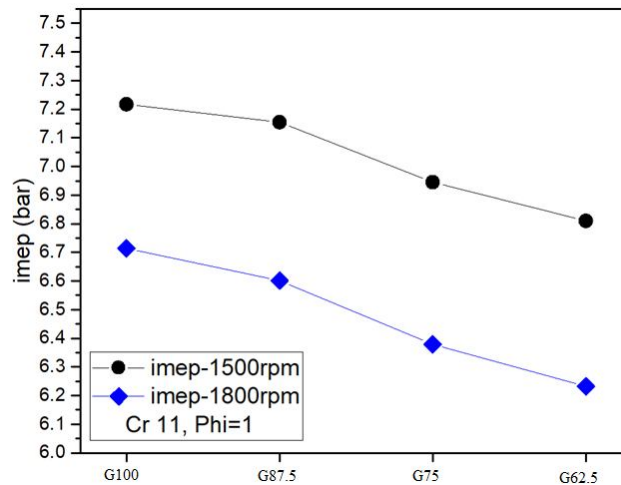
شکل 3- سیکل‌های تجربی و سیکل معادل فرضی در نسبت تراکم 11 و سرعت موتور 1800rpm

در شکل 4 و شکل 5 برای حالت 100% بنزین و سایر ترکیب‌های مخلوط دو سوخت، در آوانس بهینه مقدار تغییرات گشتاور و imep رسم شده است. در این نتایج می‌توان به مقدار بالاتر گشتاور و imep در سرعت موتور 1500rpm نسبت به 1800rpm اشاره کرد که علت این امر می‌تواند به مدت زمان بیشتر احتراق در هر سیکل و فرصت کافی برای تولید گشتاور ناشی از فشار ایجاد شده توسط احتراق درون سیلندر پیستون اشاره نمود. از سویی دیگر با توجه به اینکه موتورهای احتراق داخلی دارای اجزای گردنده می‌باشند و این مسئله منجر به ایجاد اصطکاک بین اجزای موتور و مصرف بخشی از گشتاور تولیدی می‌شود و عموماً با افزایش سرعت موتور گشتاور اصطکاک مصرفی درون موتور افزایش یافته و منجر به افزایش تلفات می‌شود. همچنین در موتورهای احتراق داخلی تنفس طبیعی با افزایش سرعت موتور، مدت زمان باز ماندن سوپاپ هوا کاهش یافته و فرصت ورود مخلوط سوخت هوای تازه با افزایش سرعت در هر سیکل کاهش می‌یابد بنابراین می‌توان دریافت که مقادیر گشتاور خالص تولیدی و همچنین imep با افزایش

سرعت کاهش خواهد یافت. نمودار نشان می‌دهد که با کاهش مقدار بنزین در ترکیب سوخت در حالت G87.5 گشتاور $imep$ کمی کاهش یافته است ولی با افزایش بیش از حد گاز طبیعی و کاهش مقدار بنزین مقدار گشتاور و $imep$ افت بیشتری می‌نمایند. همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر کاهش $imep$ برای G62.5 نسبت به G100 در سرعت 1500rpm در حدود 5/6% و در سرعت 1800rpm در حدود 7/1% کاهش را نشان می‌دهد.



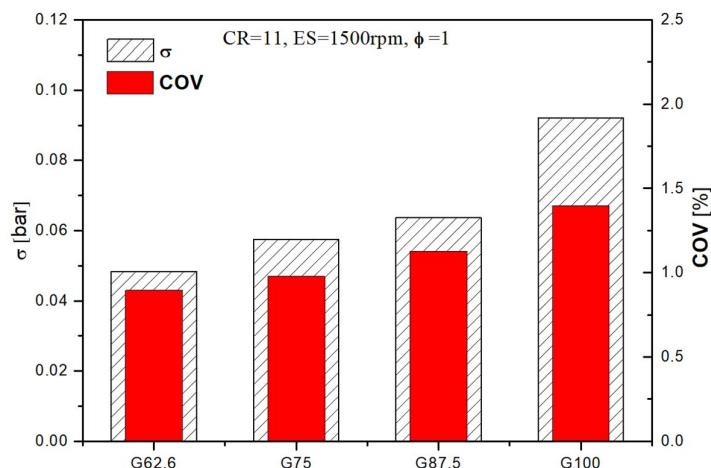
شکل 4- تغییرات گشتاور در سرعت‌های 1500rpm و 1800rpm در حالت‌های مختلف ترکیب دو سوخت



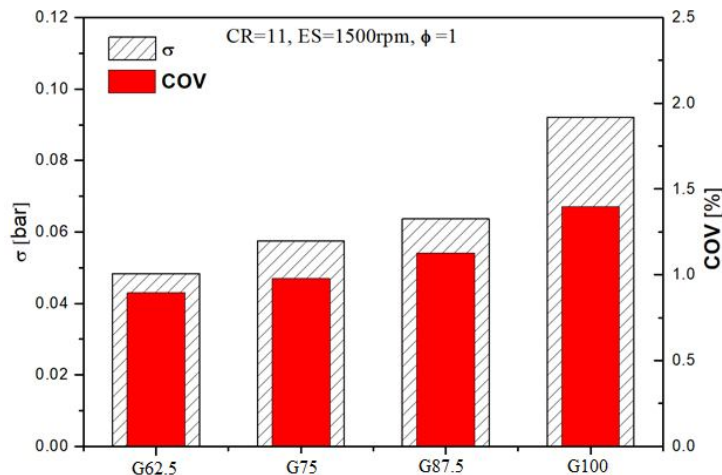
شکل 5- تغییرات $imep$ در سرعت‌های 1500rpm و 1800rpm در حالت‌های مختلف ترکیب دو سوخت

نظر به اینکه با اعمال شرایط کاری ثابت به موتور از طریق سامانه مدیریت، میدان جریان حاکم در درون سیلندر، مقادیر سوخت، هوا و گازهای باقیمانده، تبادل گرما با دیواره‌های سیلندر، تلاطم و کیفیت مخلوط در جوار شمع به هنگام جرقه و تشکیل شعله اولیه در سیکل‌های کاری پشت سر هم موتور، کاملاً یکسان نمی‌شود. ملاحظه می‌شود که پراکندگی در سیکل‌های پشت سر هم در حالت تمام بنزین نسبت به حالت ترکیب سوز بیشتر بوده و مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات که ناشی از تغییرات سیکلی می‌باشد، در حالت‌های مختلف در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. انحراف معیار و ضریب تغییرات ناشی از تغییرات سیکلی که از پارامتر $imep$ سیکل‌های تجربی بدست آمده در هر دو سرعت 1500rpm و 1800rpm با افزودن گاز طبیعی به بنزین کاهش یافته و در شرایط G62.5 به

کمترین حالت می‌رسد. علت این مسئله می‌تواند به اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا به علت ماهیت گازی سوخت گاز طبیعی و احتراق یکنواخت‌تر در ترکیبات با سوخت گاز طبیعی بیشتر مرتبط باشد. از سویی دیگر با توجه به این نکته که در سرعت موتور پایین‌تر مدت زمان انتقال حرارت مخلوط در حال سوختن با دیواره سیلندر بیشتر بوده و احتمال نوسان و کاهش دما درون مخلوط سوخت هوای در حال سوختن بالاتر می‌باشد بدین ترتیب مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات در سرعت موتور 1500rpm نسبت به 1800rpm کمی بیشتر بدست آمده است.



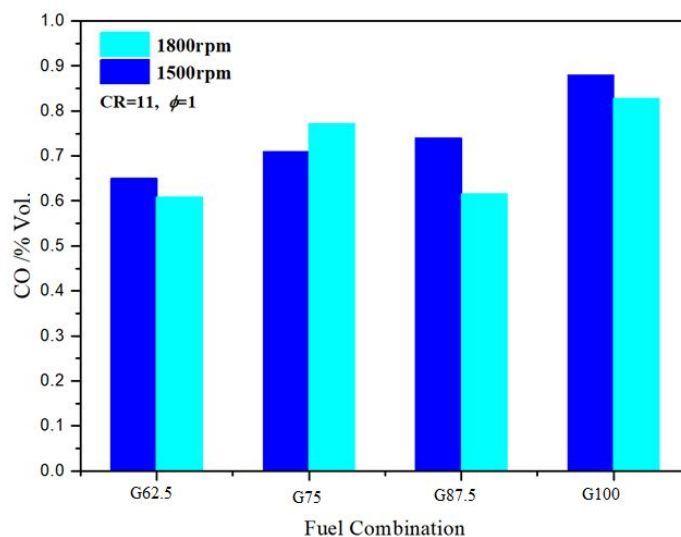
شکل 6- تغییرات مقادیر ضریب تغییرات و انحراف معیار در ترکیب‌های مختلف دو سوخت بنزین و گاز طبیعی در سرعت 1500rpm



شکل 7- تغییرات مقادیر ضریب تغییرات و انحراف معیار در ترکیب‌های مختلف دو سوخت بنزین و گاز طبیعی در سرعت 1800rpm

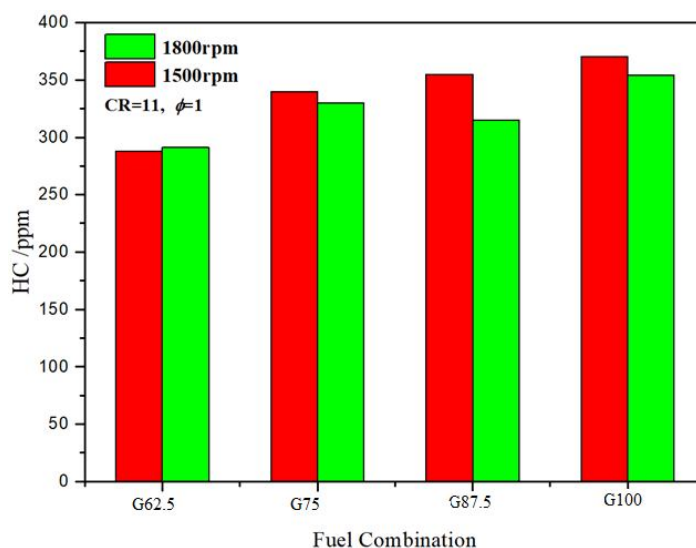
در شکل 8 ملاحظه می‌شود که عموماً با افزایش درصد گاز طبیعی در ترکیب دو سوخت مقادیر CO کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی حالات مقادیر CO تولید شده در سرعت 1800rpm نسبت به 1500rpm کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد احتراق انجام یافته در واحد زمان در سرعت بالاتر بیشتر می‌باشد از این رو می‌توان بیان نمود که تنش دمایی رخ داده و مدت زمان انتقال حرارت از دیواره و سرسیلندر در سرعت 1800rpm کمتر بوده و احتمال ایجاد

احتراق کامل تر در سرعت 1800rpm محتمل تر است و از این رو درصد CO تولیدی در این سرعت کمتر می تواند باشد. از سویی دیگر با افزودن مقداری گاز طبیعی به بنزین احتمال اختلاط بهتر سوخت و هوا به علت ماهیت گازی گاز طبیعی بیشتر بوده و همین امر منجر به سوختن بهتر مخلوط در ترکیب های با نسبت گاز طبیعی بیشتر شده و درصد تولید CO با افزایش درصد گاز طبیعی در ترکیب کاهش یافته است.



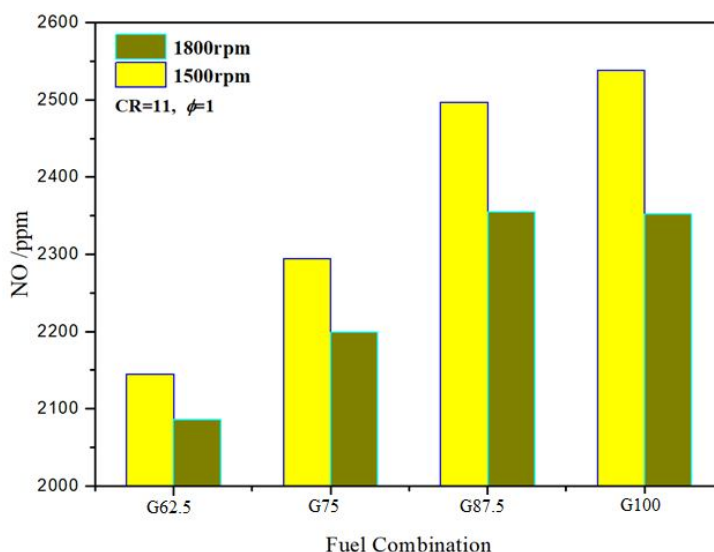
شکل 8- تغییرات تولید آلاینده CO در ترکیب های مختلف دو سوخت بنزین و گاز طبیعی

با توجه به شکل 8 و همچنین توضیحات ارائه شده در خصوص اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا با افزودن گاز طبیعی به مخلوط و همچنین انتقال حرارت کمتر با دیواره در سرعت بالاتر، تغییرات تولید HC نسبت به ترکیب دو سوخت در سرعت های 1500rpm و 1800rpm در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزودن گاز طبیعی به ترکیب مقادیر تولید HC کاهش یافته است و همچنین در سرعت 1800rpm نسبت به 1500rpm مقادیر تولید HC کمتر می باشد که می تواند ناشی از سوختن بهتر در سرعت بالاتر باشد.



شکل 9- تغییرات تولید آلاینده HC در ترکیب های مختلف دو سوخت بنزین و گاز طبیعی

شکل 10 تغییرات تولید آلاینده NO با تغییر سرعت موتور و همچنین تغییر مقادیر گاز طبیعی افزوده شده به ترکیب دو سوخت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که همواره با افزودن گاز طبیعی به ترکیب مقادیر تولید NO کاهش یافته است. از علل تشکیل آلاینده NO می‌توان به دو عامل دمای بالای احتراق و مدت زمان ماندگاری در دمای بالا اشاره کرد. به نظر می‌رسد بیشینه دمایی رخ داده در شرایطی رخ می‌دهد که مقادیر بنزین در ترکیب بیشینه باشد و از این رو حالات G87.5 و G100 دارای بیشترین مقادیر تولیدی آلاینده NO می‌باشند و با افزودن مقادیر بیشتر گاز طبیعی به ترکیب دو سوخت احتمالاً بیشینه دمایی احتراق کاهش یافته و منجر به کاهش NO گردیده است. همچنین در سرعت 1800rpm تولید آلاینده NO نسبت به 1500rpm کمتر بوده که علت این رویداد می‌تواند به کاهش زمان ماندگاری در دمای بالا در سرعت بیشتر مرتبط باشد.



شکل 10- تغییرات تولید آلاینده NO در ترکیب‌های مختلف دو سوخت بنزین و گاز طبیعی

4- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های تجربی بر روی موتور تک سیلندر CT300 در ترکیبات مختلف 100% بنزین، 87/5% بنزین، 75% بنزین و 62/5% بنزین و مابقی گاز طبیعی در شرایط نسبت هم ارزی استوکیومتری در نسبت تراکم 11 و سرعت موتور 1500rpm و 1800rpm در آوانس‌های مختلف جرعه با گام زاویه‌ای 1 درجه میل‌لنگ برای 350 سیکل متوالی انجام گرفته و به کمک بیشترین imep و گشتاور بدست آمده در شرایط غیر کوبشی، آوانس بهینه جرعه هر حالت تعیین شده است. سپس پارامترهای عملکردی و آلاینده‌گی حالت‌های مختلف مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تست‌ها و آزمایش‌ها به طور خلاصه به شرح زیر است:

- با افزودن گاز طبیعی به ترکیب سوخت مقادیر گشتاور و imep کاهش یافته و همچنین مقادیر پارامترهای بیان شده در سرعت موتور 1800rpm کمتر از سرعت موتور 1500rpm بدست آمده است.
- انحراف معیار و ضریب تغییرات با افزودن گاز طبیعی به ترکیب دو سوخت کاهش یافته و این امر می‌تواند ناشی از کاهش تغییرات سیکلی با افزایش گاز طبیعی در ترکیب دو سوخت در سیکل‌های کاری پشت سرهم موتور باشد.

- مقادیر آلاینده تولیدی CO با افزودن گاز طبیعی به ترکیب دو سوخت کاهش یافته است. همچنین مقادیر تولیدی CO در سرعت موتور 1800rpm کمتر از سرعت موتور 1500rpm بدست آمده است.
- تولید آلاینده HC با افزودن گاز طبیعی به مخلوط دو سوخت کاهش یافته است. همچنین مقادیر تولیدی آلاینده HC در سرعت موتور 1800rpm کمتر از سرعت موتور 1500rpm گزارش شده است.
- با افزودن گاز طبیعی به ترکیب دو سوخت تولید مقادیر آلاینده NO کاهش یافته است. از سویی دیگر تولید آلاینده NO در سرعت موتور 1800rpm کمتر از سرعت موتور 1500rpm گزارش شده است.

4- منابع

- [1] AH. Kakaee, A. Paykani, "Research and development of natural gas fueled engines in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: pp. 805-82, 2013.
- [2] HM. Cho, H. Bang, Quan, "Spark ignition natural gas engines – a review. *Energy Conversion and Management*", 48(2): pp. 608-618, 2007.
- [3] Z. Ran, D. Hariharan, B. Lawler, S. Mamalis, "Experimental study of lean spark ignition combustion using gasoline, ethanol, natural gas, and syngas", *Fuel*, 235: pp. 530-537, 2019.
- [4] R. Amirante., E. Distaso, S. Di Iorio, P. Sementa, P. Tamburrano, BM. Vaglieco, et al, "Effects of natural gas composition on performance and regulated, greenhouse gas and particulate emissions in spark-ignition engines", *Energy Convers Manage*, 143: pp. 338-47, 2017.
- [5] T. Korakianitis., AM. Namasivayam, RJ. Crookes, "Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions", *Prog Energy Combust Sci*, 37: pp. 89-112, 2011.
- [6] R. Kang, L. Zhou, J. Hua, D. Feng, H. Wei, R. Chen, "Experimental investigation on combustion characteristics in dual-fuel dual-injection engine", *Energy Convers Manage*, 181: 15-25, 2019.
- [7] SK. Nayak, PC. Mishra, "Achieving high performance and low emission in a dual fuel operated engine with varied injection parameters and combustion chamber shapes", *Energy Convers Manage*, 180: pp. 1-24, 2019.
- [8] M. Fathi., O. Jahanian, M. Shabbakhti, "Modeling and controller design architecture for cycle-by-cycle combustion control of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines– A comprehensive review", *Energy Convers Manage*, 139: pp.1-19, 2017.
- [9] G. Di Blasio, G. Belgiorno, C. Beatrice, "Effects on performances, emissions and particle size distributions of a dual fuel (methane-diesel) light-duty engine varying the compression ratio", *Appl Energy*, 204: pp. 726-40, 2017.
- [10] M, E Sarabi, A. Aghdam, "Experimental analysis of in-cylinder combustion characteristics and exhaust gas emissions of gasoline-natural gas dual-fuel combinations in a SI engine", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019.
- [11] S. Di Iorio., Sementa, P., Vaglieco, B. M. , & Catapano, F., "An experimental investigation on combustion and engine performance and emissions of a methane-gasoline dual-fuel optical engine", SAE Technical Paper, 2014.
- [12] SK. Yekani, E. Abdi Aghdam, M. Sarabi, "Experimental Study and Comparison of a Few Lean (gasoline-natural gas) Dual Fuels Based on Safe Optimum Spark Advance", *International Journal of Industrial Mathematics*, Jul 1;14(3), 2022.
- [13] SK. Yekani, E. Abdi Aghdam, M. Sarabi, "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*, 7(1): pp. 1-10, 2023

- [14] E. Abdi Aghdam, M. Sarabi, "Calibration of Gasoline-NG Dual-Fuel SI Engine Injectors and Comparison of the Performance and Emission of a Dual-Fuel and Single Fuel Cases", *Journal of Mechanical Engineering*, 2021.
- [15] CD. Rakopoulos, GM. Kosmadakis, TC. Zannis, DC. Kyritsis, "Studying the cyclic variability (CCV) of performance and NO and CO emissions in a methane-run high-speed SI engine via quasi-dimensional turbulent combustion modeling and two CCV influencing mechanisms", *Energy*, 1;272: 127042, 2023.
- [16] E. Pipitone., G. Genchi, "Experimental determination of LPG-gasoline mixtures knock resistance", *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014.
- [17] B. Baral, R. Raine, "Knock in a Spark Ignition Engine Fuelled with Gasoline-Kerosene Blends", SAE, 2008.
- [18] S. M. V Sagar, A. Agarwal, "Knocking behavior and emission characteristics of a port fuel injected hydrogen enriched compressed natural gas fueled spark ignition engine", *Applied Thermal Engineering*, 141: pp. 42–50, 2018.
- [19] D. khoshkname, B. Shadidi, H. Haji Agha Alizade, "Energy Balance Analysis of Gasoline Engine Using Different Alcohols as Additives in Gasoline Fuel", *Journal of Farayandno – Vol. 18 – No.84*, pp. 19-35, 2024.
- [20] R. Hosseinirad, H Mahdikia, "Removal of Air Pollution by Atmospheric Gliding Arc Plasma; Benzene, Methane, and Carbon Dioxide", *Journal of Farayandno*, Vol. 14 – No.68, pp. 20-29, 2019.
- [21] E. Pipitone, S. Beccari, "Performances and emissions improvement of an SI engine fuelled by LPG/gasoline mixtures", *SAE Technical Paper*. No. 2010-01-0615, 2010.
- [22] H. Liu., Z. Wang, J. Wang, "Methanol-gasoline DFSI (dual-fuel spark ignition) combustion with dual-injection for engine knock suppression", *Energy*. 73: pp. 686-93, 2014.
- [23] E. Singh., K. Morganti, R. Dibble, "Dual-fuel operation of gasoline and natural gas in a turbocharged engine", *Fuel*. 237: pp. 694-706, 2019.
- [24] A. Jain, B. Jyoti Bora, R. Kumar, P. Sharma, D. Barik, B. Jyoti Medhi, Ü. Ağbulut, "Experimental and Statistical Assessment for Hydrogen-Powered Dual-fuel Diesel Engine Using a Novel Biodiesel Blend at Variable Injection Pressure", *International Journal of Thermo fluids*, 2024.
- [25] SK. Dash, P. Lingfa, SB. Chavan, "An experimental investigation on the application potential of heterogeneous catalyzed Nahar biodiesel and its diesel blends as diesel engine fuels", *Energy Sources Part Recovery Util Environ Eff*, 40: pp. 2923–32, 2018.
- [26] M. Dabi, BB. Sahoo, UK. Saha. "Increase of efficiency and reduction of CO and Nox emissions in a stationary compression ignition engine run on Mesua ferrea Linn oildiesel and diethyl ether", *Therm Sci Eng Prog*, 25:100980, 2021.
- [27] A. Jain, B. Jyoti Bora, R. Kumar, P. Sharma, B. Jyoti Medhi, G. Venkata Rambabu, et al. "Energy, exergy and emission [3E] analysis of Mesua Ferrea seed oil biodiesel fueled diesel engine at variable injection timings", *Fuel* 353: p. 129115, 2023.
- [28] M. Kumar, S. Bhowmik, A. Paul, "Effect of pilot fuel injection pressure and injection timing on combustion, performance and emission of hydrogen-biodiesel dual fuel engine", *Int J Hydrog Energy*, 47: pp. 29554–67, 2022.
- [29] E. Abdi Aghdam, M. Bashi, "Effectiveness of performance characters of a SI engine by varying injection start position of gasoline and natural gas fuels", *Modares Mechanical Engineering*, 15(8), pp. 134-142, 2015.
- [30] M. Ghorbanzadeh, "The effect of different fuels (gasoline & natural gas) on cyclic variations of a spark ignition engine running on lean mixture", *Modares Mechanical Engineering*, 13(12), pp. 101-108, 2013.
- [31] E. Abdi Aghdam, M. Ataee Tarzanagh, "The Effect of Burned Residual Gases on Optimum Ignition Timing using Skip Fire Technique", *JER*, 50 (50): pp. 67-75, 2018.

- [32] E. Abdi Aghdam, M. Sarabi, "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", *Tabriz University of Mechanical Engineering Journal*, 1401; 52(1): pp. 109-117, 2022.
- [33] E. Abdi Aghdam, M. Sarabi, M. Mehrbod Khomeyrani, "Experimental study of laminar burning velocity for dual fuel (Gasoline-NG) -Air mixture using pressure record in a spherical combustion bomb at higher primary pressure", *Fuel and Combustion*, 11(1), pp. 121-134, 2018.
- [34] J. B. HEYWOOD, "Internal combustion engine fundamentals", *McGraw-Hill New York*, 1988.