



# اثر نوع سوخت (بنزین و گاز طبیعی) روی تغییرات سیکلی یک موتور اشتعال جرقه‌ای در حالت مخلوط فقیر

ابراهیم عبدی اقدم<sup>۱\*</sup>، مجتبی قربانزاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل  
\* اردبیل، صندوق پستی ۱۷۹، eaaghdam@uma.ac.ir

**چکیده-** شناخت تغییرات سیکلی که به نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، سرعت و بار موتور و مشخصه‌های هندسی موتور وابسته است از اهداف اصلی است و می‌تواند سبب نوسانات قدرت خروجی و هیدروکربن نسوخته شود. در کار حاضر اثر دو نوع سوخت بنزین و گاز طبیعی روی تغییرات سیکلی در حالت مخلوط فقیر مورد بررسی قرار گرفته و از اندازه‌گیری تغییرات فشار داخل سیلندر بیش از ۴۰۰ سیکل پشت سرهم یک موتور پژوهشی استفاده شده است. این بررسی برای مخلوط‌های بنزین-هوا و گاز طبیعی-هوا در بار کامل، سرعت ۱۸۰۰ rpm و نسبت تراکم ۸ با نسبت هم‌ارزی ۰/۹۴ صورت گرفته است. تحلیل آماری نتایج حاصله نشان داد که ضریب تغییر (COV) فشار مؤثر متوسط اندیکه (*imep*)، قله فشار ( $P_{max}$ ) و مکان زاویه‌ای قله فشار ( $\theta_{p_{max}}$ ) در حالت مخلوط بنزین-هوا بترتیب ۲/۴، ۱/۲۹ و ۱/۰۴ برابر مخلوط گازطبیعی-هوا است. همچنین در زمان‌بندی بهینه جرقه تغییرات *imep* مخلوط بنزین-هوا نسبت به  $P_{max}$  سیر صعودی و نسبت به  $\theta_{p_{max}}$  سیر نزولی دارد در حالی که برای مخلوط گازطبیعی-هوا وابستگی خاصی ملاحظه نمی‌شود.  
**کلیدواژگان:** تغییرات سیکلی، موتور اشتعال جرقه‌ای، گازطبیعی، مخلوط فقیر.

## The effect of different fuels (gasoline & natural gas) on cyclic variations of a spark ignition engine running on lean mixture

E. Abdi Aghdam<sup>1\*</sup>, M. Ghorbanzadeh<sup>2</sup>

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Mohagheghe Ardebili Univ., Ardebil, Iran  
2- MSc. student, Mech. Eng., Mohagheghe Ardebili Univ., Ardebil, Iran  
\* P.O.B. 179, Ardebil, Iran. eaaghdam@uma.ac.ir

**Abstract-** Reorganizations of cyclic variations, depending on fuel type, equivalence ratio, engine load and speed, and engine geometry, are the major purposes and may cause fluctuations of output power and unburned hydro-carbon. During this study, the effects of gasoline and natural gas (NG) as fuel on cyclic variations were investigated utilizing the recorded cylinder pressure of a research SI engine over more than 400 successive cycles. This work was performed at full load, 1800rpm and compression ratio of 8 with 0.94 equivalence ratio using gasoline-air and NG-air mixtures. Statistical analysis of the obtained results showed that at the above conditions the coefficient of variations (COV) of indicated mean effective pressure (*imep*), peak pressure ( $P_{max}$ ) and the crank angle position of the peak pressure ( $\theta_{p_{max}}$ ) for gasoline-air mixture were 2.4, 1.29 and 1.04 times of those for NG-air mixture, respectively; at the optimum ignition timing, *imep* of gasoline-air mixture is increasing with rising  $P_{max}$  and decreasing with enhancing  $\theta_{p_{max}}$ , however, *imep* of NG-air mixture seems to be independent to  $P_{max}$  and  $\theta_{p_{max}}$ .

**Keywords:** Cyclic Variations, Spark Ignition Engine, NG, Lean Mixture.

## ۱- مقدمه

پدیده احتراق در موتور بسیار پیچیده و شناخت دقیق آن خیلی دشوار است، لذا در مطالعه این پدیده باید به مشاهده ناقص آنچه که در درون موتور اتفاق می افتد اکتفا کرد. در مورد بسیاری از مشخصه‌های اصلی احتراق بخصوص در حالت متلاطم فقط به حدس و گمان می توان متوسل شد و متغیرهای بسیار زیاد آن از هم متمایز نشده‌اند. بطور ایده‌ال احتراق در هر سیلندر یک موتور یا سیکل‌های پشت سرهم هر سیلندر می‌بایست بطور کامل یکسان باشد، ولی در موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای وقتی نمودار فشار داخل محفظه احتراق برحسب زاویه میل لنگ برای تعدادی سیکل پی در پی با هم ترسیم شوند، مشاهده می‌شود که پراکنده‌گی زیادی بین منحنی فشار مرحله احتراق ظاهر می‌شود در حالی که در موتور اشتعال تراکمی این پدیده قابل توجه نیست [۱].

علت اساسی این تغییرات سیکلی در طبیعت انتشار مغشوش شعله پیش‌آمیخته موتور نهفته است و به هیچ وجه آنرا نباید به نامنظم بودن موتور نسبت داد [۲، ۳]. مستقل از نوع سوخت، سه عامل اصلی برای این تغییرات بیان شده است: تغییرات سیکل به سیکل در حرکت گاز داخل سیلندر در طول احتراق، تغییرات سیکل به سیکل در مقدار سوخت، هوا، گازهای باقی‌مانده و گازهای باز یافتی و تغییرات در ترکیب مخلوط داخل سیلندر در هر سیکل مخصوصاً در جوار شمع [۴، ۵]. برای یک سوخت معلوم تغییرات سیکل به سیکل مستقیماً روی عملکرد خروجی موتور اثر می‌گذارد؛ علاوه بر این ازدیاد پراکنده‌گی سیکلی برای مخلوط‌های فقیر یکی از اهم موانع بهره برداری از موتور با مخلوط فقیر است. با کم کردن یا حذف تغییرات سیکل به سیکل می‌توان مقدار زیادی بر میزان استقامت و توان‌دهی موتور افزود چرا که تغییرات سیکلی به عنوان عامل محدود کننده قدرت موتور، بازده تبدیل سوخت و گشتاور خروجی می‌باشد.

محمد سده قهفرخی و همکاران با استفاده از یک موتور چهار سیلندر اشتعال جرقه‌ای گازسوز، تغییرات سیکلی قله فشار با نسبت هم‌ارزی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه‌گیری کردند که با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۷۵ تا ۰/۹ مقدار متوسط قله فشار افزایش، اما تغییرات سیکلی قله فشار می‌یابد [۶].

وینسور و همکاران با استفاده از یک موتور تک سیلندر در حالت موتورگردانی با استفاده از سرعت‌سنج سیم داغ، سرعت مخلوط ورودی به داخل سیلندر را در سرعت موتور ۱۰۰۰rpm برای سیکل‌های پی‌درپی اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که سرعت مخلوط تغییراتی در محدوده ۶/۵ ft/s برای سرعت میانگین معادل با ۱۴/۵ ft/s داشت. تغییرات جریان سیال موجب تغییر در شدت تلاطم مخلوط در اطراف شمع می‌شود و این تغییرات موجب شکل‌گیری هسته‌های شعله متفاوت در طی سیکل‌های پی‌درپی می‌شود [۷].

یانگ و همکاران به‌وسیله فیلم برداری سریع از احتراق، مطالعه‌ای را بر روی تغییرات سیکل به سیکل انجام دادند، نتایج آنها نشان داد که تغییرات سیکلی در مدت مراحل اولیه فرآیند احتراق از زمان جرقه شمع تا توسعه کامل شعله اتفاق می‌افتد. آنها دریافتند که توسعه سریع شعله می‌تواند تاثیر خیلی بزرگی روی فرآیند احتراق بگذارد و تغییرات سیکلی را کاهش دهد [۸].

هیوود و همکاران نشان دادند که نوع سوخت در طی مرحله احتراق به خصوص در مراحل اولیه گسترش هسته شعله بر روی تغییرات سیکلی اثر می‌گذارد. در این مطالعه آنها با استفاده از تکنیک عکس‌برداری شلیرن<sup>۱</sup> اندازه و شکل شعله در محفظه احتراق یک موتور تک سیلندر را که در آن از سوخت‌های پروپان و هیدروژن استفاده شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که اندازه و شکل شعله هیدروژن-هوا خیلی مشابه هم تکرار می‌شود و رشد شعله خیلی سریع است در حالی که برای مخلوط پروپان-هوا تغییرات اساسی سیکل به سیکل در اندازه و شکل شعله حاصل می‌شود [۹].

زرواس و همکاران ارتباط بین تغییرات سیکل به سیکل و پارامترهای احتراقی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از یک موتور تک سیلندر با نسبت تراکم ۱۱/۸۷، سرعت ۱۵۰۰rpm و سوخت CNG<sup>۲</sup> استفاده کردند و پس از اندازه‌گیری فشار داخل سیلندر برای ۱۵۰ سیکل در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و آنالیز آنها فرایند احتراق را در سه قسمت آغاز احتراق، پایان احتراق و زمانی که کسر جرمی سوخته<sup>۳</sup>  $x = 50\%$  باشد بررسی کردند و

1. Schlieren
2. Compressed Natral Gas
3. Mass Fraction Burned

کاهش می‌یابد، ولی وقتی نسبت تراکم بیشتر از ۱۲ می‌شود تغییرات سیکی در بار کامل افزایش می‌یابد زیرا مخلوط فقیر در نسبت تراکم بالاتر از ۱۲ باعث می‌شود که یکنواختی مخلوط تزریق شده از انژکتور تزریق گاز به هم بخورد و عملکرد موتور را محدود کند [۱۴].

در کار حاضر تأثیر نوع سوخت روی تغییرات سیکی یک موتور پژوهشی تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای با استفاده از دو نوع سوخت بنزین و CNG و ثبت فشار داخل سیلندر بیش از ۴۰۰ سیکل پشت‌سرهم در شرایط نسبتاً همسان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- تجهیزات استفاده شده

موتور پژوهشی استفاده شده در کار حاضر، یک موتور تک سیلندر با قابلیت کارکرد در دو حالت بنزینی و دیزلی است که در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات فنی آن در جدول ۱ آمده است. این موتور احتراقی به یک موتور-ژنراتور آسنکرون که قابلیت تنظیم سرعت موتور را فراهم می‌کند کویله شده است.

برای تعیین کیفیت مخلوط از یک آنالیزور گاز مدل اینفرالیت سی ال<sup>۳</sup> استفاده شد. این آنالیزور با نمونه‌برداری از مسیر گازهای خروجی موتور، علاوه بر اندازه‌گیری نسبت هوا به سوخت نسبی ( $\lambda$ )، میزان CO، CO<sub>2</sub>، HC و O<sub>2</sub> را بر حسب در صد حجمی و یا p.p.m مشخص می‌کند.



شکل ۱ نمای از موتور پژوهشی تک سیلندر

برای اندازه‌گیری تغییرات فشار داخل محفظه سیلندر از

3. InfraLyt CL

به این نتیجه رسیدند که تغییرات سیکی در مرحله‌ای که ۵۰٪ جرم تزریقی سوخته باشد بیشترین مقدار می‌باشد [۱۰].

در ادامه سویز و همکاران تغییرات سیکی سوخت بنزین و LPG در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۱۴ تا ۱ را به ازای ۸۰ سیکل پی‌درپی بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات سیکی هر دو سوخت با افزایش نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد، ولی نسبت این تغییرات برای LPG در مقایسه با بنزین خیلی کم می‌باشد که علت آن زیاد بودن سرعت سوختن آرام<sup>۱</sup> LPG نسبت به بنزین و تبخیر کامل LPG قبل از مجرای ورودی و مخلوط شدن خوب آن با هوای ورودی می‌باشد و چون نسبت H/C در LPG نسبت به بنزین بیشتر است، آلودگی حاصل از آن در مقایسه با بنزین کمتر است [۱۱].

وانگ و همکاران مطالعه‌ای بر روی تغییرات سیکی مخلوط گاز طبیعی- هیدروژن با استفاده از یک موتور چهار سیلندر، در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۱۴ و سرعت‌های ۲۰۰۰rpm و ۳۰۰۰rpm انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد هیدروژن به مخلوط گاز طبیعی- هوا قله فشار داخل سیلندر افزایش می‌یابد و در مخلوط فقیر با افزایش هیدروژن به علت افزایش سرعت سوختن مخلوط تغییرات سیکی به سیکل کاهش می‌یابد [۱۲].

موری و همکاران اثر نسبت هم‌ارزی بر روی تغییرات سیکی به سیکل را مورد بررسی قرار دادند و آنها در این مطالعه از یک موتور چهار سیلندر در نسبت تراکم ۹، سرعت ۱۵۰۰rpm و سوخت بنزین استفاده کردند. آنها با اندازه‌گیری فشار داخل سیلندر و دمای گاز خروجی از موتور به ازای ۲۵۰ سیکل در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۷ تا ۱ به این نتیجه رسیدند که تغییرات سیکی فشار متوسط اندیکه و تغییرات ماکزیمم دمای خروجی با کاهش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد [۱۳].

در ادامه زنگ و همکاران تأثیر تراکم بر روی تغییرات سیکی به سیکل را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه از یک موتور تک سیلندر، با تزریق مستقیم<sup>۲</sup> گاز به محفظه احتراق در سرعت موتور ۱۲۰۰rpm و نسبت هم‌ارزی ۰/۷۱۴ تا ۱، در نسبت تراکم ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش نسبت تراکم به علت کاهش مدت زمان توسعه شعله و مدت زمان کل مرحله احتراق تغییرات سیکی

1. Laminar Burning Velocity

2. Direct Injection

سیگنال‌های تغییرات فشار داخل سیلندر و TDC ثبت و ذخیره شد. برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شد و این داده‌ها به عنوان ورودی به آن تعریف شد. این برنامه قادر است با استفاده از سیگنال TDC تغییرات فشار هر سیکل را جدا کرده، قله فشار و موقعیت زاویه میل‌لنگ قله فشار آنها را تعیین و همچنین کار بر سیکل و فشار مؤثر متوسط اندیکهٔ خالص را برای هر سیکل مستقلاً محاسبه و ذخیره نماید.

از روی گسترهٔ تغییرات نمی‌توان به رفتار مقادیر درون گستره دست یافت. در این مقاله برای تحلیل آماری داده‌های حاصله مثل  $imep$ ،  $P_{max}$  و  $\theta_{p_{max}}$  از مفاهیم مقدار میانگین ( $\mu$ )، انحراف معیار ( $\sigma$ ) و درصد ضریب تغییر ( $COV$ ) استفاده شده است. با فرض این که تعداد کل نمونه  $N$  و  $x_i$  نمونهٔ  $i$ ام از مجموعهٔ آماری مورد نظر باشد، مقدار میانگین از رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

انحراف معیار مجموعهٔ آماری با رابطهٔ (۲) بیان می‌شود:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

پارامتری که انحراف معیار را در مقایسه با مقدار میانگین ارزیابی می‌کند ضریب تغییر ( $COV$ ) است که معمولاً بصورت رابطهٔ (۳) برحسب درصد تعریف می‌شود:

$$COV(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (3)$$

این مفاهیم درک پدیده‌های راندمی از جمله تغییرات سیکلی را روشن‌تر می‌کند.

#### ۴- نتایج و بحث

در شکل ۲- الف و ب تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویهٔ میل لنگ چندین سیکل پشت سرهم به ترتیب برای مخلوط بنزین- هوا و گازطبیعی- هوا نشان داده شده است.

شرایط کاری برای دو حالت فوق از نظر نسبت هم‌ارزی، نسبت تراکم، سرعت و بار موتور همسان است و زمان‌بندی بهینهٔ جرقه برای هر حالت انتخاب شده است. ملاحظه می‌شود که گسترهٔ تغییرات در حالت بنزین‌سوز بیشتر از حالت گازسوز است.

یک ترانسدیوسر فشار دینامیک کیسلر<sup>۱</sup> مدل 6052C که مخصوص موتورهای احتراق داخلی با حساسیت بالا و خطای شوک حرارتی پایین است، استفاده شد.

جدول ۱ مشخصات موتور پژوهشی

مشخصه	توضیحات
قطر سیلندر	۹۰mm
کورس پیستون	۷۴mm
حجم جابجایی	۴۷۰cm <sup>3</sup>
شعاع لنگی / طول شاتون	۳/۵۷
بیشترین سرعت	۳۶۰۰rpm
تعداد سوپاپ	۲
سیستم سوخت رسانی	کاربراتور دریچه‌ای با یک ژیکلور سوزنی و ساسات
نوع خنک‌کاری	با آب

#### ۳- نحوه انجام آزمایش و تحلیل آماری

برای انجام آزمایش‌ها نسبت تراکم موتور به ۸ و سرعت موتور در ۱۸۰۰rpm تنظیم شد. سپس موتور در حالت استفاده از سوخت بنزین راه‌اندازی و با استفاده از آنالیزور گاز خروجی کاربراتور بنزین به نسبت هم‌ارزی ۰/۹۴ تنظیم شد. با نصب ترانسدیوسر فشار به سرسیلندر موتور و استفاده از آمپلی‌فایر مربوطه، تولید سیگنال الکترونیکی متناسب با تغییرات فشار داخل سیلندر فراهم شد. برای تبدیل سیگنال آنالوگ آن به دیجیتال از سیستم اخذ داده چهار کانال مدل DAQ2016 ادلینک<sup>۲</sup> و نرم‌افزار ذخیرهٔ مربوطه استفاده شد. در بار کامل سیگنال‌های تغییرات فشار داخل سیلندر و نقطه مرگ بالا<sup>۳</sup> (TDC) با فرکانس تبدیل ۱۰۰kHz برای بیش از ۴۰۰ سیکل ثبت و ذخیره شد. برای اخذ داده‌ها در حالت گازسوز، ابتدا کاربراتور لازم در مسیر ورودی موتور نصب و به مدار CNG طراحی شده متصل شد. با راه‌اندازی موتور در حالت استفاده از سوخت گازطبیعی و بار کامل، در همان نسبت تراکم و دور موتور، جریان گاز از مدار CNG طوری تنظیم شد که با کنترل کیفیت محصولات احتراق توسط آنالیزور گاز خروجی از موتور، نسبت هم‌ارزی ۰/۹۴ حاصل شد. بطور مشابه

1. Kistler
2. Adlink
3. Top Dead Centre

می تواند مفید باشد.

جدول ۲ نتایج حاصله از تحلیل آماری در حالت بنزین سوز.

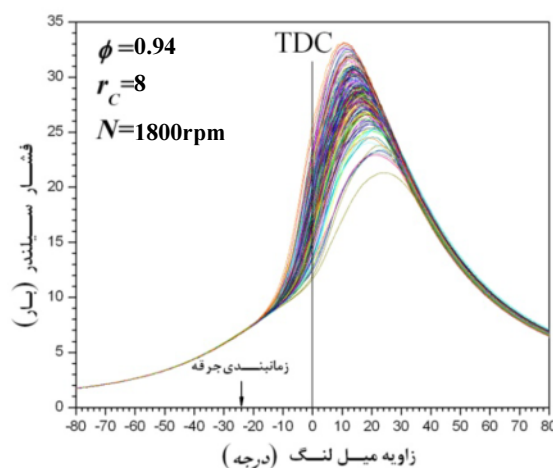
کمیت‌ها	مقدار میانگین ( $\mu$ )	انحراف معیار ( $\sigma$ )	ضریب تغییر (%)
$imep$	۶/۴۸۶ (bar)	۰/۲۰۱۳ (bar)	۳/۱۰۳
$P_{max}$	۲۸/۴۷ (bar)	۲/۱۲۰ (bar)	۷/۴۴۶
$\theta_{P_{max}}$	۱۶/۱ (CAaTDC)	۲/۴۳ (CA)	۱۵/۰۶

جدول ۳ نتایج حاصله از تحلیل آماری در حالت گازسوز.

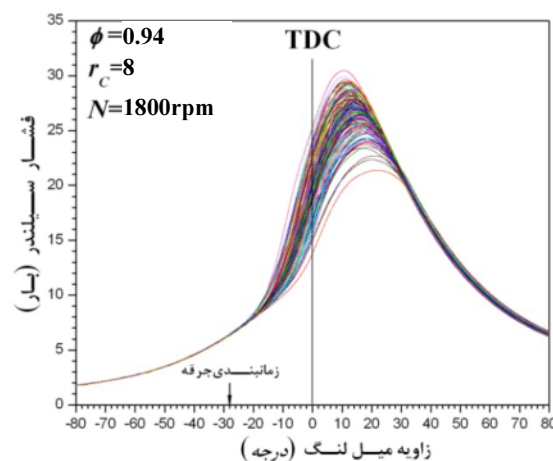
کمیت‌ها	مقدار میانگین ( $\mu$ )	انحراف معیار ( $\sigma$ )	ضریب تغییر (%)
$imep$	۵/۹۲۲ (bar)	۰/۰۷۶۵ (bar)	۱/۲۹۱
$P_{max}$	۲۶/۸۷ (bar)	۱/۵۴۶ (bar)	۵/۷۵۳
$\theta_{P_{max}}$	۱۴/۹ (CAaTDC)	۲/۱۵ (CA)	۱۴/۴۳

شکل ۳- الف و ب تغییرات  $imep$  ۴۲۵ سیکل پشت سرهم را به ترتیب برای دو حالت بنزین سوز و گازسوز در شرایط مشابه نمایش می‌دهد. برای تسهیل در مقایسه ظاهری، مقیاس و طول گستره محورهای قائم نمودارها یکسان در نظر گرفته شده است. از نتایج آنالیز آماری داده‌ها (جدول ۲ و ۳) مشاهده می‌شود که مقدار میانگین  $imep$  حالت بنزین سوز ۶/۴۸۶ bar و حالت گازسوز ۵/۹۲۲ bar است. حالت گازسوز حدود ۹٪ کاهش نسبت به حالت بنزین سوز را نشان می‌دهد. آهنگ خاصی در تکرار مقادیر  $imep$  برای سیکل‌های پشت سرهم وجود ندارد. احتراق ناقص یک سیکل که با کاهش  $imep$  همراه است، سبب کاهش دما و افزایش هیدروکربن نسوخته گازها در انتهای مرحله انبساط آن سیکل نسبت به یک سیکل نرمال می‌شود. گازهای باقی‌مانده از چنین سیکلی دو اثر متقابل می‌تواند روی سرعت شعله در سیکل بعدی بگذارد، افزایش هیدروکربن نسوخته سرعت شعله را بالا می‌برد در حالی که کاهش دمای مخلوط سرعت شعله را می‌کاهد. این وضعیت می‌تواند عدم وقوع آهنگ خاص در تکرار مقادیر  $imep$  را توجیه کند. انحراف معیار و ضریب تغییر  $imep$  حالت بنزین سوز بترتیب حدود ۲/۶ و ۲/۴ برابر مقادیر متناظر در حالت گازسوز است.

در شرایط کاری و زمانبندی بهینه جرعه تعریف شده، مقدار  $imep$  حالت بنزین سوز حدود ۹٪ بیشتر از حالت گازسوز است که دلیل اصلی آن می‌تواند تأثیر منفی گاز طبیعی روی بازده حجمی موتور و تقلیل انرژی فسیلی ورودی به هر سیکل باشد.



الف- حالت بنزین سوز



ب- حالت گازسوز

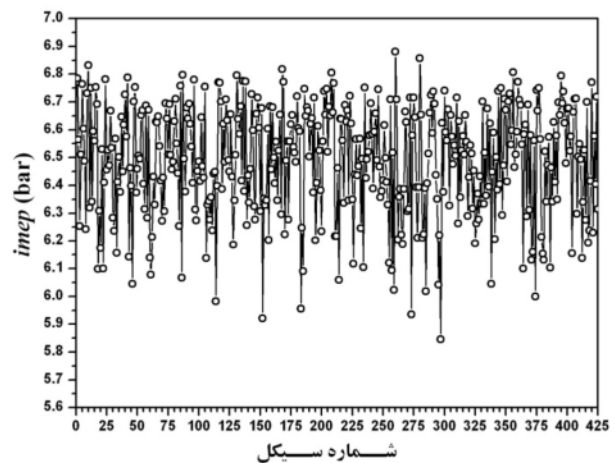
شکل ۲ تغییرات فشار داخل سیلندر برحسب زاویه میل‌لنگ سیکل‌های پشت سرهم در حالت بار کامل

پس از محاسبه فشار مؤثر متوسط اندیکه خالص ( $imep$ )<sup>۱</sup>، مقدار قلّه فشار و مکان زاویه‌ای وقوع آن برای سیکل‌های مختلف در دو حالت بنزین سوز و گاز سوز، محاسبات آماری آنها با استفاده از روابط بخش ۳ انجام شد که در جداول ۲ و ۳ جمع‌بندی شده است.

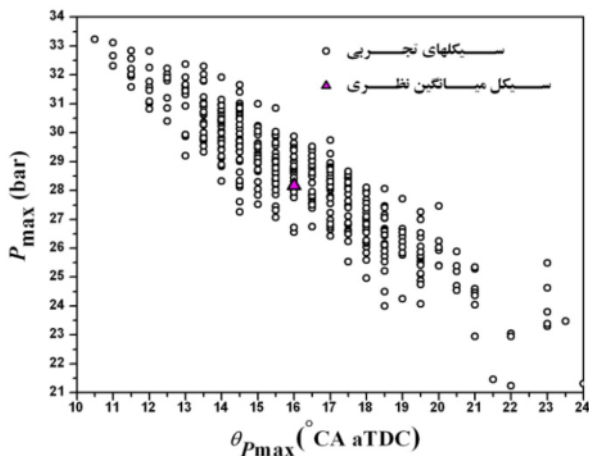
با توجه به این که در هر سیکل کاری بخشی از مخلوط داخل سیلندر در مرحله تراکم را گازهای سوخته باقی‌مانده از سیکل قبلی تشکیل می‌دهد، نمایش مشخصه سیکل‌ها مثل فشار مؤثر متوسط اندیکه خالص با حفظ ترتیب وقوع آنها

1. Net Indicated Mean Effective Pressure

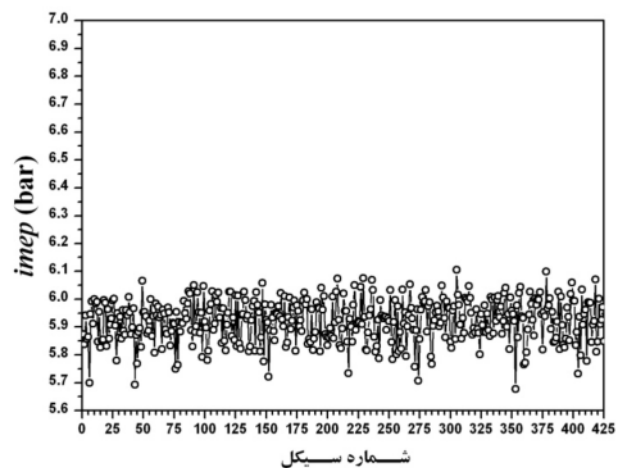
نظری که نمودار  $P-\theta$  آن از متوسط‌گیری روی فشار سیکل‌های ثبت شده در هر زاویه میل‌لنگ حاصل شده است، نمایش می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که انحراف‌های معیار قله فشار و موقعیت وقوع آن در حالت بنزین‌سوز بترتیب حدود  $1/4$  و  $1/1$  برابر مقادیر مربوط به حالت گازسوز است. ضریب تغییر قله فشار حالت بنزین‌سوز حدود  $1/3$  برابر مقدار مربوط به حالت گازسوز است در حالی که در ضریب تغییر موقعیت وقوع قله فشار تفاوت چندانی دیده نمی‌شود. برای هر دو حالت مذکور رفتار کلی کاهش  $P_{max}$  با رشد  $\theta_{P_{max}}$  ملاحظه می‌شود.



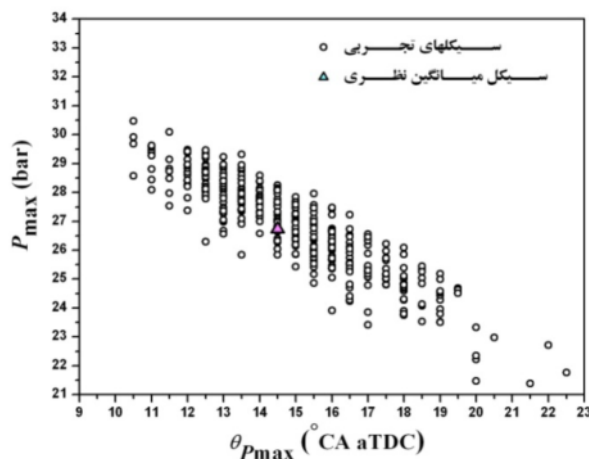
الف- حالت بنزین سوز



الف- حالت بنزین سوز



ب- حالت گازسوز



ب- حالت گازسوز

شکل ۳ تغییرات فشار مؤثر متوسط اندیکه خالص سیکل‌های پشت سرهم در بار کامل در زمان بندی بهینه جرقه

غیر از دلیل اصلی فوق، تغییر ارزش گرمایی سوخت، تغییر بازده گرمایی، تغییر سرعت سوختن و سرعت شعله مخلوط با نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی و کیفیت و کمیت گازهای سوخته در آن نیز از موارد تأثیرگذار روی تفاوت مقدار  $imep$  برای دو حالت فوق می‌تواند باشد.

شکل ۴- الف و ب تغییرات قله فشار<sup>۱</sup> ( $P_{max}$ ) برحسب موقعیت زاویه میل‌لنگ قله فشار<sup>۲</sup> ( $\theta_{P_{max}}$ ) مربوط به  $425$  سیکل در شرایط تعریف شده برای دو حالت به ترتیب بنزین سوز و گازسوز را به همراه  $P_{max}$  برحسب  $\theta_{P_{max}}$  سیکل میانگین

شکل ۴ تغییرات  $P_{max}$  بر حسب  $\theta_{P_{max}}$  برای سیکل‌های تجربی استخراج شده و سیکل میانگین نظری

به نظر می‌رسد سبکی مولکول‌های سوخت گاز طبیعی در

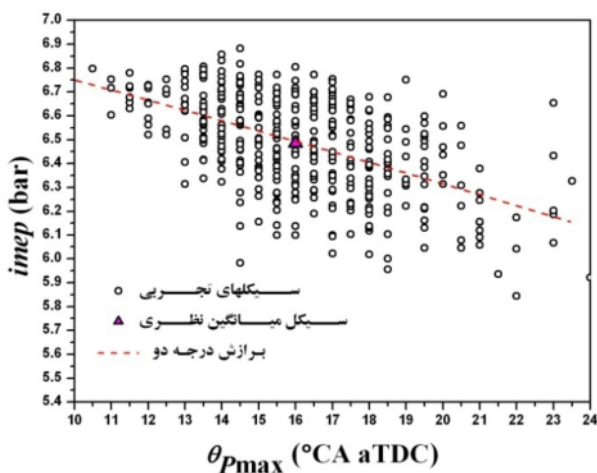
1. Peak Pressure
2. Peak Pressure Crank Angle Position

از نتایج تحلیل آماری ملاحظه می‌شود که نسبت انحراف معیارهای قله فشار به فشار مؤثر متوسط در حالت بنزین‌سوز حدود ۱۰/۵ است درحالی که این نسبت برای حالت گازسوز ۲۰/۲ می‌باشد.

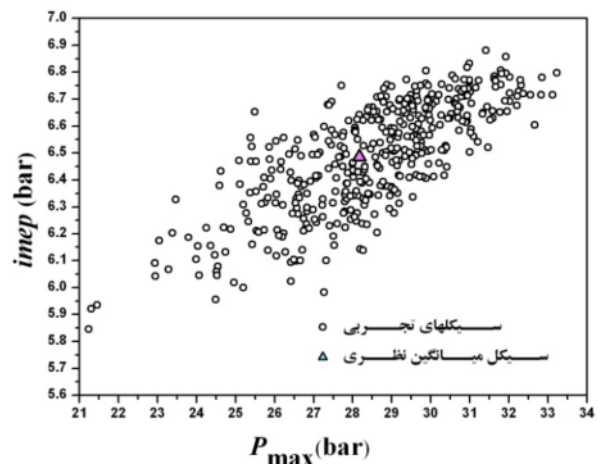
شکل ۶- الف و ب تغییرات  $imep$  مربوط به ۴۲۵ سیکل تجربی استخراج شده و سیکل میانگین نظری نسبت به  $\theta_{p_{max}}$  را برای دو حالت به ترتیب بنزین‌سوز و گازسوز نشان می‌دهد. باتوجه به توزیع داده‌ها روی نمودار، چند جمله‌های درجه یک تا سه برای برازش مورد ارزیابی قرار گرفت و از روی انحراف معیار حاصله برای آنها، برازش منحنی درجه دو مناسب‌ترین برازش برای مقایسه دو حالت تشخیص داده شد که در نمودارهای شکل ۶ بصورت خط‌چین ارائه شده است.

مقایسه با بنزین، موجب می‌شود که در نسبت هم‌ارزی همسان تعداد مولکول‌های سوخت در مخلوط بیشتر شود و حضور آن در فاز گازی می‌تواند مخلوط نسبتاً همگن‌تری را نسبت به سوخت بنزین فراهم کند.

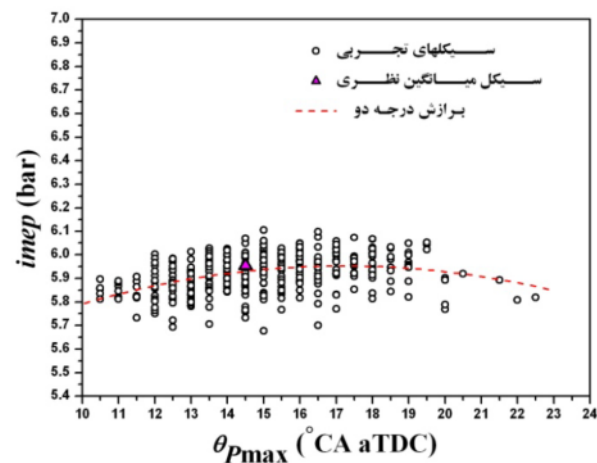
شکل ۵- الف و ب تغییرات  $imep$  بر حسب  $P_{max}$  را برای ۴۲۵ سیکل تجربی اخذ شده و سیکل میانگین نظری در حالت‌های بترتیب بنزین‌سوز و گازسوز نمایش می‌دهد. باز برای مقایسه ظاهری این دو حالت، طول گستره تغییرات و مقیاس‌های افقی و قائم نمودارها یکسان در نظر گرفته شده است. در حالت بنزین‌سوز یک روند کلی افزایش در  $imep$  با رشد  $P_{max}$  مشاهده می‌شود در حالی که چنین تمایلی در حالت گازسوز دیده نمی‌شود و ارتباط خاصی قابل تشخیص نیست.



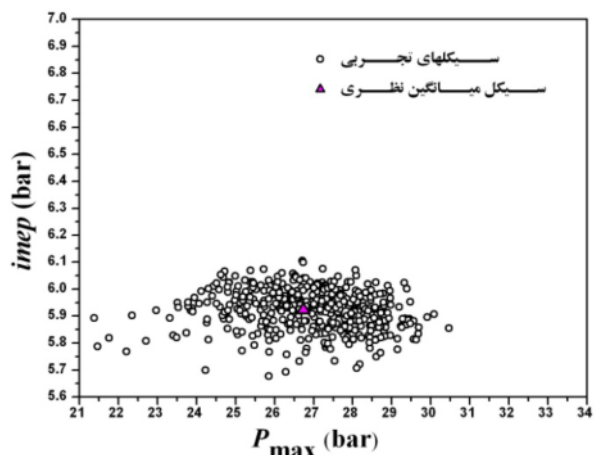
الف- حالت بنزین سوز



الف- حالت بنزین سوز



ب- حالت گازسوز



ب- حالت گازسوز

شکل ۶ تغییرات  $imep$  بر حسب  $\theta_{p_{max}}$  برای سیکل‌های تجربی و سیکل میانگین نظری

شکل ۵ تغییرات  $imep$  بر حسب  $P_{max}$  برای سیکل‌های تجربی و سیکل میانگین نظری در بار کامل و نسبت هم‌ارزی ۰/۹۴

- control on in-cylinder flow in an IC engine”, *Fluids Engineering*, Vol. 132, 2010, pp. 51107-51115.
- [2] Fischer J., Velji A., Spicher U., “Investigation of cycle-to-cycle variations of in-cylinder processes in gasoline direct injection engines operating with variable tumble systems”, *SAE*, 2004, paper No: 40044.
- [3] Ma F., Ding S., Wang Y., Wang J., Zhao S., “Study on combustion behaviors and cycle-by-cycle variations in a turbocharged lean burn natural gas S.I. engine with hydrogen enrichment”, *Hydrogen Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 7245-7255.
- [4] Heywood J.B., *Internal Combustion Engines Fundamentals*, New York, McGraw-Hill, 1988, pp. 413-424.
- [5] Wang X., Zhang H., Yao B., Lei Y., Sun X., Wang D., Ge Y., “Experimental study on factors affecting lean combustion limit of S.I engine fueled with compressed natural gas and hydrogen blends”, *Energy*, Vol. 38, 2012, pp. 58-65.
- [6] Sadeh Gahfarrokhi, M., Saffarian, M., Ebrahimi, R., “Investigation of Cycle Changes in Spark Ignition Engines with Gaseous Fuel”, *International Conference on Mechanical Engineering and Advanced Technology (ICMEAT)*, Islamic Azad University-Majlesi Branch, 2012. (In Persian)
- [7] Winsor R.E., Patterson D.J., “Mixture turbulence-a key to cyclic combustion variation”, *SAE*, 1973, Paper No: 730086.
- [8] Young M.B., “Cyclic dispersion in the homogeneous-charge spark-ignition engine a literature survey”, *SAE*, 1981, Paper No: 810020.
- [9] Heywood J.B., Vilchis F.R., “Comparison of flame development in a spark ignition engine fueled with propane and hydrogen”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 38, 1984, pp. 313-320.
- [10] Zervas, E. “Correlations between cycle-to-cycle variations and combustion parameters of a spark ignition engine”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, 2004, pp. 2073-2081.
- [11] Ceviz M.A., Yuksel F., “Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine”, *Renewable Energy*, Vol. 31, 2006, pp. 1950-1960.
- [12] Wang J., Chen H., Liu B., Huang Z., “Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends”, *Hydrogen Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 4876-4883.
- [13] Morey F., Seers P., “Comparison of cycle-by-cycle variation of measured exhaust-gas temperature and in-cylinder pressure measurements”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, 2010, pp. 487-491.
- [14] Zheng J., Huang Z., Wang J., Wang B., Ning D., Zhang Y., “Effect of compression ratio on cycle-by-cycle variations in a natural gas direct Injection Engine”, *Energy & Fuels*, Vol. 23, 2010, pp. 5357-5366.

برای حالت بنزین-سوز سیر نزولی  $imep$  با افزایش  $\theta_{p_{max}}$  از برازش منحنی مشهود است در حالی که برای حالت گاز سوز وضعیت نسبتاً مسطح و تغییرات معنی‌داری بین  $imep$  و  $\theta_{p_{max}}$  ملاحظه نمی‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج حاصله از تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌توان نکات مفید زیر را از کار حاضر نتیجه‌گیری کرد:

- در شرایط کاری و زمان‌بندی بهینه جرقه تعریف شده، مقدار  $imep$  حالت بنزین‌سوز بیشتر از حالت گازسوز است که دلیل آن می‌تواند تأثیر منفی گازطبیعی روی بازده حجمی موتور و تقلیل انرژی فسیلی ورودی به هر سیکل باشد. تغییر ارزش گرمایی سوخت و تغییر بازده گرمایی نیز از موارد تأثیرگذار روی تفاوت مقدار  $imep$  برای دو حالت فوق می‌تواند باشد.

- به نظر می‌رسد سبکی مولکول‌های سوخت گازطبیعی در مقایسه با بنزین، موجب می‌شود که در نسبت هم‌ارزی همسان تعداد مولکول‌های سوخت در مخلوط بیشتر شود و حضور آن در فاز گازی می‌تواند مخلوط نسبتاً همگن‌تری را نسبت به سوخت بنزین فراهم کند. با این وجود سرعت جبهه شعله و پیشروی آن برای دو مخلوط مورد نظر می‌تواند متفاوت باشد.

- برای کیفیت مخلوط مورد بحث، اختلاف دامنه تغییرات  $P_{max}$  و  $imep$  بین دو حالت بنزین‌سوز و گازسوز قابل توجه بود بطوری که طول گستره‌های تغییرات  $P_{max}$  و  $imep$  حالت بنزین‌سوز به ترتیب بیش از ۱/۵ و ۲ برابر مقادیر مربوط به حالت گازسوز مشاهده شد و گستره تغییرات  $\theta_{p_{max}}$  حالت بنزین‌سوز اندکی بیشتر از حالت گازسوز بود.

- در حالت بنزین‌سوز وابستگی قابل توجهی بین  $imep$  و  $P_{max}$  مشاهده شد درحالی که چنین رفتاری در حالت گازسوز ظاهر نشد.

- وابستگی  $imep$  به  $\theta_{p_{max}}$  در حالت بنزین‌سوز محسوس بود، اما در حالت گازسوز وابستگی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. این نکته لازم است در شرایط کاری و نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نیز برای دو سوخت مذکور مورد بررسی قرار گیرد.

## ۶- مراجع

- [1] Mittal M., Schock HJ., “A study of cycle-to-cycle variations and the influence of charge motion