



## بررسی تجربی سطح صدای احتراق در موتور احتراق دما پایین

فرید جهاننیده<sup>۱</sup>، بهرام بحری<sup>۲\*</sup>، محسن تیموری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی مکانیک، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران، [Jahandideh@gmail.com](mailto:Jahandideh@gmail.com)

<sup>۲</sup>گروه مهندسی مکانیک، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران، [Bahri@iaush.ac.ir](mailto:Bahri@iaush.ac.ir)

<sup>۳</sup>گروه مهندسی مکانیک، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران، [Mohsenteimouri16@gmail.com](mailto:Mohsenteimouri16@gmail.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۵ تیر ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۲ آبان ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

موتور احتراق دما پایین

اتانول

سطح صدای احتراق

شدت صدای موتور

### چکیده

در سال های اخیر از روشهای نویدبخشی برای افزایش بازده حرارتی، کاهش آلودگی های اکسید نیتروژن و ذرات معلق موتورها استفاده شده است که از موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول می توان به عنوان نمونه نام برد. ولی با وجود مزایای فراوان این موتورها، همچنان با مشکلاتی نظیر افزایش تولید مونوکسید کربن، هیدرو کربن نسوخته و تولید صدای احتراق در بارهای بالا روبرو هستند. در این مقاله از داده های تجربی یک موتور دیزل تک-سیلندر، هوا-خنک، پاشش مستقیم، چهار-زمانه یا نمار توسعه داده شده به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول استفاده شده است. با استفاده از ۳۸ نقطه عملکردی که در دور موتور ثابت ۱۵۵۰ دور بر دقیقه با تغییرات دمای هوای ورودی و نسبت هم ارزی (نسبت سوخت به هوا) بدست آمده اند، ارتباط تغییرات پارامترهای عملکردی، احتراقی و آلودگی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سطح صدای احتراق مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که نرخ افزایش فشار بیشینه در سطح صدای احتراق پایین تر (افزایش چشمگیری ندارد ولی با افزایش نرخ افزایش فشار بیشینه از ۴ بار بر درجه زاویه لنگ، سطح صدای احتراق افزایش یافته و به محدوده احتراق صدادر ۹۰ دسی بل نزدیک شده و باعث تولید صدای احتراق بیشتر می شود. همچنین بیشترین فشار تولیدی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه برابر ۶۲ بار بوده که در محدود سطح صدای احتراق کمتر از ۹۰ دسی بل می باشد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

یکی از مسائل حاد که شهرهای بزرگ با آن روبرو هستند، بحران انرژی و آلودگی می باشد که سالهاست به معضلی پیچیده تبدیل شده است. با توجه به افزایش آلودگی های خطرناک تولید شده توسط موتورهای احتراق داخلی<sup>۱</sup>، لزوم جایگزینی و استفاده از موتورهای جدید جهت کاهش نشر آلودگی ها و بهبود کارایی موتورهای احتراق داخلی، احساس می شود [۱]. یکی از مدل های نوید بخش ارائه شده برای رسیدن به اهداف ذکر شده موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن می باشد [۲]. کاربرد این موتورها همزمان دارای ترکیبی از ویژگی های کاربردی موتورهای اشتعال جرقه ای، از نظر فرآیند اختلاط سوخت و هوا به صورت همگن و موتورهای اشتعال تراکمی از نظر اشتعال تراکمی برای شروع اشتعال می باشد. در این موتورها برای شروع اشتعال، دما و فشار گاز درون سیلندر تا حد خوداشتعالی کل مخلوط توسط تراکم گاز پیش می رود در نتیجه گرمای تولید شده بقدری بالا می رود، که احتراق بدون نیاز به جرقه، صورت می پذیرد. [۳].

در مقایسه با اشتعال تراکمی معمولی<sup>۲</sup> و موتورهای اشتعال جرقه ای<sup>۳</sup>، موتورهای احتراق دمای پایین<sup>۴</sup> از جمله موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن<sup>۵</sup>، یک فناوری جدید بوده که با کاهش دمای احتراق آلودگی های ناشی از احتراق دما بالا نظیر اکسیدهای نیتروژن و دوده را کاهش می دهد. همچنین دارای استراتژی احتراق بهتر با توجه به احتراق خود به خودی و سریع، بازده حرارتی بالاتر، ذرات معلق خروجی از موتور کمتر، تولید گاز اکسید نیتروژن کمتر و امکان استفاده از مخلوط بسیار رقیق سوخت و هوا می باشد [۴].

در مقابل مزایای ذکر شده موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، محدودیت های مهم این موتورها نیز بایستی بررسی شود. برخی از این محدودیت ها شامل محدوده ی باریک عملکردی بین احتراق ناقص<sup>۶</sup> و صدا دار<sup>۷</sup>، سطوح بالایی از تولید مونوکسید کربن، تولید هیدروکربن نسوخته و همچنین قابلیت کنترل احتراق موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن می باشد [۵و۶]. علاوه بر این، سطح بالایی از شدت صدای احتراق، مخصوصاً در ناحیه بار بالایی موتور، یکی دیگر از معایب موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن می باشد، که به قطعات موتور آسیب می زند و باعث پدیده ی تولید صدای احتراق بالا گردد [۷].

اشتعال تراکمی مخلوط همگن در حوزه با صدای احتراق زیاد (بار زیاد)، همراه با احتراق سریع<sup>۸</sup> و نرخ بالایی افزایش فشار می باشد که منجر به ایجاد صدای آزار دهنده، از دست رفتن بازده گرمایی و افزایش فشار مکانیکی وارد بر قطعات موتور می شود. به طور کلی صدا یا فرکانس

بالا تولید شده از موتورها یا آلودگی صوتی را می توان به صورت صدای ناخواسته ای دانست که موجب برهم زدن آرامش در زمان استراحت یا تمرکز افراد در حین انجام کار می شود و بر سلامت روان و جسم فرد تاثیر منفی بجای می گذارند [۸و۹]. آلودگی صوتی بعنوان یکی از مهمترین آلاینده های زیست محیطی در ایجاد اینگونه مشکلات در شهرهای بزرگ سهم بسزایی را به خود اختصاص داده است.

نرخ افزایش فشار بیشینه<sup>۹</sup>، شدت صدای موتور<sup>۱۰</sup> و سطح صدای احتراق<sup>۱۱</sup> سه معیار اصلی هستند که برای شناسایی تولید صدا در موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن به کار رفته اند [۶]. در شکل ۱ روش های استفاده شده برای مطالعه میزان صدای موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن نشان داده شده است [۲۲-۸].

در سال ۲۰۰۲، اینگ [۱۰] صدای احتراق یک موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن را مورد تحقیق قرار داد و شاخص تولید صدا را به عنوان یک معیار برای تحلیل آزمایشات و به عنوان یک معیار برای تحلیل شبیه سازی صدای احتراق معرفی کرد. در این تحقیق نشان داده شد که شدت موج فشار داخل سیلندر در احتراق موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن می تواند مربوط به شاخص تولید صدا باشد.

شاه لری و همکارانش [۷و۱۲] یک الگوریتم اندازه گیری صدای احتراق توسعه دادند تا شاخص تولید صدا و بیشینه نرخ افزایش فشار را با سطح صدای احتراق مقایسه کنند. تعداد زیادی از موتورهایی که در حالت پایدار کار می کردند از جمله موتورهای با اشتعال تراکمی معمولی و موتورهای اشتعال جرقه ای، موتورهای احتراق دمای پایین آزمون شدند. صدای قابل شنیده شدن و نوسانات فشار داخل سیلندر در موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن توسط ویسینیک و همکارانش [۱۳] مورد بررسی قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسید که به هنگام تغییر شرایط مختلف و استراتژی های احتراق، سطح صدای احتراق اندازه گیری شده، عموماً با شاخص تولید صدا و بیشینه نرخ افزایش فشار نسبتی نداشت. مقایسه های بین معیارهای صدای احتراق (شدت تولید صدا و بیشینه نرخ افزایش فشار) و اندازه گیری صدای احتراق توسط دستگاه صدا سنج AVL تحت شرایط موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن بهبود یافته، توسط اسزیبیست و همکارانش انجام شد [۱۴]. نشان داده شد که هم شدت تولید صدا و بیشینه نرخ افزایش فشار، در مقایسه با صدا سنجش AVL در شرایط بهبود یافته، قابل پیش بینی هستند.

مسی و همکارانش یک موتور تک سیلندر از نوع اشتعال تراکمی مخلوط همگن را جهت اندازه گیری صدای احتراق مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که صدا مربوط به تشدید نیست و تولید صدا از

7 Ringing combustion

8 Rapid combustion

9 Peak pressure rise rate (PPRR)

10 Ringing intensity (RI)

11 Combustion noise level (CNL)

1 Internal combustion engine (ICE)

2 Compression ignition (CI) engine

3 Spark ignition (SI) engine

4 Low temperature combustion (LTC) engine

5 Homogenous charge compression ignition (HCCI)

6 Misfire combustion

بلوکه سیلندر موتور با استفاده از یک فن خنک کننده کنترل می شود. مصرف هوای موتور توسط یک مخزن هوای نسبتاً بزرگ، یک اریفیس و مانومتر دیجیتال اندازه گیری می شود. اندازه گیری میزان آلودگی گازهای خارج شده از اگزوز با یک آلودگی سنج پنج گازی قابل حمل انجام شده که هیدروکربن نسوخته و کربن مونوکسید را با دقت ۴ و ۰.۰۶٪ به ترتیب، اندازه گیری می کند. در مجموع، داده های موتور برای ۱۲۰ سیکل متوالی جمع آوری شده و در هر نقطه از عملکرد ثابت، تحلیل می شود. زمانبندی سوپاپ ها در این مطالعه ثابت نگه داشته می شود، بنابراین تفاوت های کوچکی در کسری از گاز باقی مانده در کورس های متوالی مورد انتظار بود.

### ۱-۲- تعیین سطح صدای احتراق برای سوخت اتانول

سطح صدای احتراق از طریق آنالیز فشار داخل سیلندر، طبق الگوریتم سطح صدای احتراق شکل ۳ محاسبه شد. الگوریتم سطح صدای احتراق از فشار داخل سیلندر برای تمام چرخه های موتور استفاده می کند و سطح صدای احتراق را با مراحل زیر محاسبه می کند:

مرحله ۱: فشار داخل سیلندر  $P(t)$  را با اعمال یک تبدیل فوریه سریع<sup>۱۲</sup> از حوزه ی زمان به حوزه ی فرکانس  $P(\omega)$  تبدیل می شود [۷].

مرحله ۲: دو فیلتر به  $P(\omega)$  اعمال می شود تا دامنه سیگنال حوزه فرکانس را کاهش داده و برای واکنش به گوش انسان آماده نماید و فشار فیلتر شده  $P_{filt}$  را بدست آورد.

مرحله ۳: مقدار مربع میانگین مربعات<sup>۱۳</sup> برای  $P_{filt}$  محاسبه می شود.

مرحله ۴: مقدار مربع میانگین مربعات با یک سطح صدای مرجع مقایسه می شود و سطح صدای احتراق به واحد dB محاسبه می شود (مخرج تابع لگاریتم میکرو پاسکال ( $\mu Pa$ ) می باشد) [۷].

جدول ۱: مشخصات موتور استفاده شده در آزمایشها

| مقدار | مشخصه های موتور (واحد)                         |
|-------|--|
| ۱     | تعداد سیلندر (-)                               |
| ۱۹/۵  | نسبت تراکم (-)                                 |
| ۷۸    | قطر سیلندر (میلیمتر)                           |
| ۶۲    | کورس (میلیمتر)                                 |
| ۰/۲۵۶ | حجم جایجایی (لیتر)                             |
| ۲     | تعداد سوپاپ (-)                                |
| ۱۵۵   | باز شدن سوپاپ هوا (زاویه لنگ بعد از مکث بالا)  |
| ۵۹    | بسته شدن سوپاپ هوا (زاویه لنگ بعد از مکث بالا) |
| -۵۹   | باز شدن سوپاپ دود (زاویه لنگ بعد از مکث بالا)  |
| -۱۵۵  | بسته شدن سوپاپ دود (زاویه لنگ بعد از مکث بالا) |

واکنش های ساختمان موتور در برابر بار ضربه گونه از افزایش ناگهانی فشار سیلندر ایجاد می شود [۱۵].

منبع تولید صدای احتراق در موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن توسط درنوته و همکارانش با الگوریتم شاه لری مورد مطالعه قرار گرفت. در تحلیل نوین احتراق [۸]، روش های سطح صدای احتراق و شدت صدای موتور با یکدیگر مقایسه شدند. اثرات افزایش فشار و نرخ سوخت رسانی در روش های سطح صدای احتراق و شدت صدای موتور مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند که شدت صدای موتور یک معیار خوب برای پیش بینی ضربه و صدای شدید احتراق است در حالی که مخصوصاً برای پیش بینی صدا از فشار افزایشی یکسان مناسب نیست و سطح صدای احتراق برعکس آن می باشد و برای پیش بینی سطح صدای کلی مناسب است.

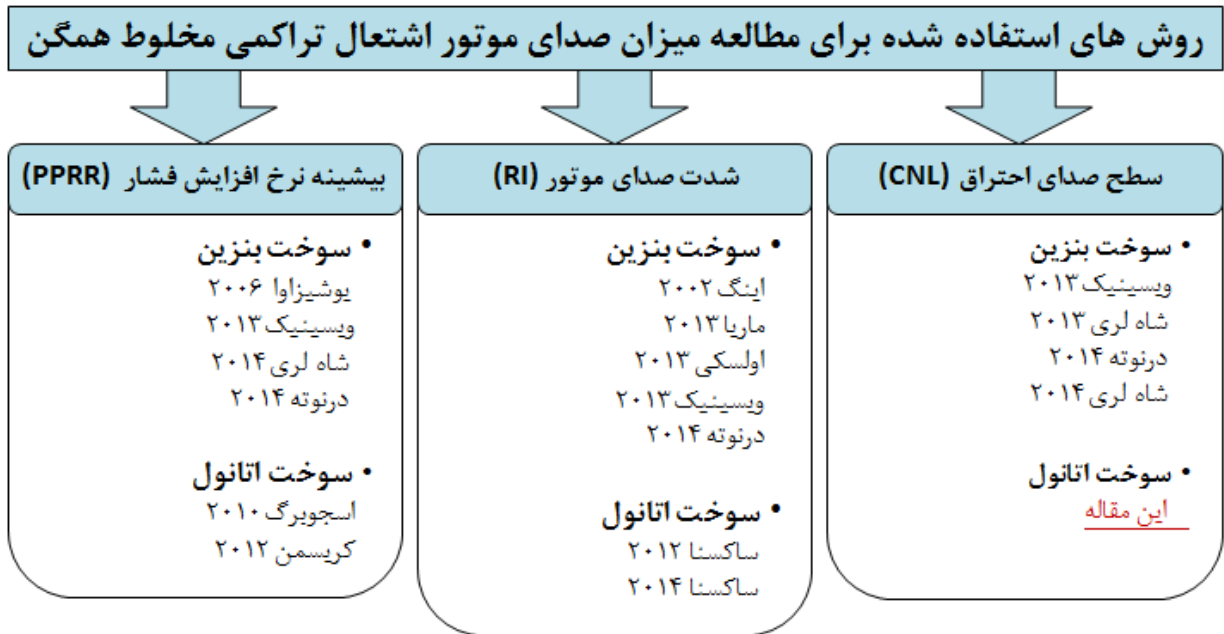
بیشتر مطالعات قبلی موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، سطح صدای احتراق برای سوخت بنزین بررسی می کردند (شکل ۲). اما در این مطالعه اتانول انتخاب شده است زیرا در مقایسه با بنزین، عدد اکتان بالاتر و ویژگی های ضربه ای مطلوبی دارا می باشد که به موتور موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن کمک می کند که در نسبت فشار بالاتر و شرایط باری بالاتری کار کند. احتراق اتانول در مقالات قبلی [۱۵ و ۱۶] بطور کامل بررسی شده است و در این مقاله به بررسی صدای احتراق سوخت اتانول پرداخته شده است.

### ۲- روش کار

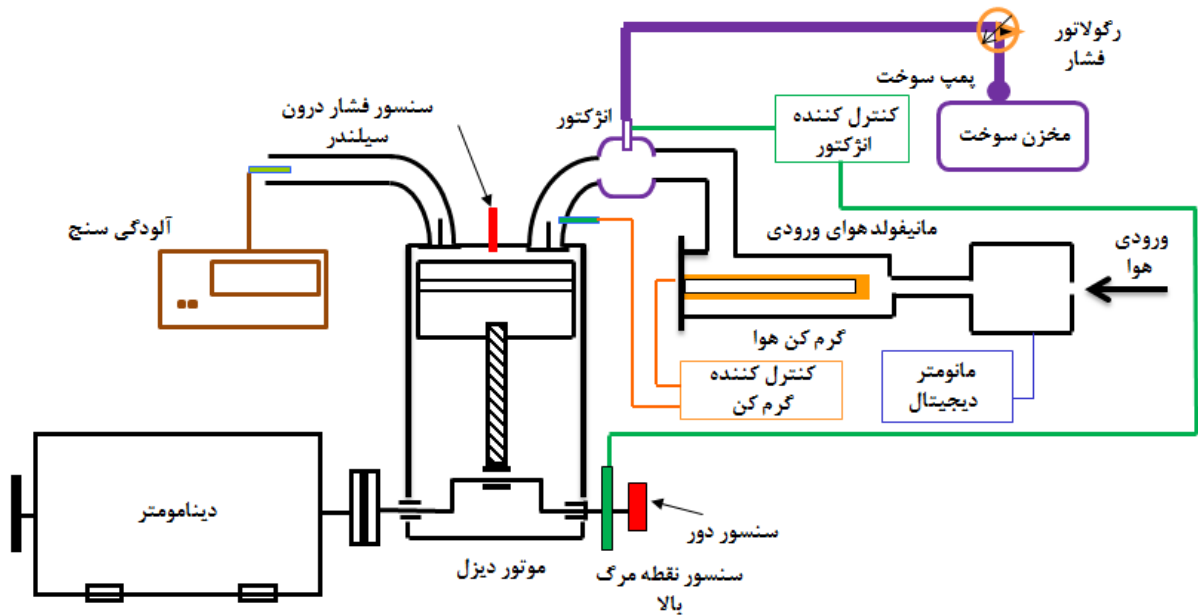
در این تحقیق یک موتور دیزل تک-سیلندر، هوا-خنک، پاشش مستقیم، چهار-زمانه یانمار به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول تبدیل شده است که مشخصات موتور استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ شماتیکی از تمام اجزا تست و راه اندازی موتور نشان داده شده است. سرعت موتور و بار توسط یک دینامومتر مجهز به ترمز جریان گردابی Magtrol ۳۰ کیلو وات تنظیم می شود. در گذرگاه ورودی هوای موتور، یک انژکتور سوخت اتانول به صورت درگاهی استفاده شده است. یک گرم کننده ی الکتریکی سه کیلو واتی برای تسهیل گرم کردن هوای ورودی استفاده شده است به نحوی که برای هر آزمایش، دمای هوای ورودی ثابت نگه داشته می شود. ثبت داده ها با یک سیستم جمع آوری داده به نام DEWE-5000 و نرم افزار آنالیز احتراق DEWECa انجام می گردد. در سر سیلندر موتور دیزل، یک حسگر فشار با فرکانس بالا (601A Kistler) تعبیه شده تا فشار درون سیلندر را با زاویه میل لنگ ۰.۲ درجه اندازه گیری و ثبت نماید. مقدار زاویه میل لنگ به وسیله حسگر زاویه میل لنگ (Kistler 2613B) که به میل لنگ متصل شده است، اندازه گیری می شود. ترموکوپل های نوع K با دقت  $\pm 1.5$  درجه سانتی گراد برای اندازه گیری دمای هوای ورودی و اگزوز موتور استفاده شده است. دمای

<sup>13</sup> Root mean square (RMS)

<sup>12</sup> Fast Fourier transform (FFT)



شکل ۱: روش های استفاده شده برای مطالعه میزان صدای موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن



شکل ۲: تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده برای جمع آوری داده ها در موتور

[۷] و [۸]. همچنین قبلا توسط شاهلری [۷] نشان داده شده بود که دقت این مدل در مقایسه با میکروفن برای تشخیص شدت صدای احتراق بسیار نزدیک می باشد ( $R^2 = 0.98$ ).

در این مطالعه داده های با سطح صدای احتراق  $CNL > 90$  dB در ناحیه احتراق صدا دار قرار گرفته اند. مرز بین ناحیه احتراق صدا دار و معمولی ( بدون صدا ) با  $CNL = 90$  dB تعیین می شود و محدوده بین احتراق ناقص و ناحیه معمولی با  $CNL = 72.5$  dB تعیین می شود

آلودگی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سطح صدای احتراق مطالعه شود.

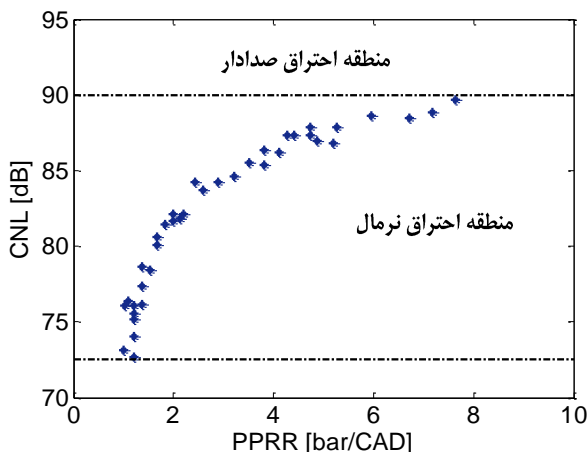
در تمام منحنی های نشان داده شده در این بخش سطح صدای احتراق بین ۷۴ تا ۹۰ dB تغییر می کند، که مرز بین کارکرد طبیعی موتور و احتراق صدا دار با سطح صدای احتراق بالای ۹۰ و شدت صدای احتراق موتور بالای ۶ MW/m<sup>2</sup> مشخص شده است.

نرخ افزایش فشار بیشینه (PPRR) به عنوان یک شاخص مطالعه صدای موتور مطرح شده است. در نمودار شکل ۴ نرخ افزایش فشار بیشینه در مقابل سطح صدای احتراق نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، نرخ افزایش فشار بیشینه در سطح صدای احتراق پایین تر (CNL < 85) افزایش چشمگیری ندارد ولی با افزایش نرخ افزایش فشار بیشینه از ۴ bar/cad سطح صدای احتراق افزایش می یابد و به محدوده احتراق صدا دار ۹۰ dB نزدیک می شود و باعث تولید صدای احتراق بیشتر می شود. فرایند افزایش نرخ افزایش فشار بیشینه ناگهانی باعث تولید صدای زیادی در موتور می گردد. در نرخ های افزایش فشار بیشینه کمتر از ۷ bar/cad (مرز بین کارکرد طبیعی و صدا دار موتور احتراق تراکمی مخلوط همگن) احتراق صدا دار مشاهده نشده است.

جدول ۲: مشخصات شرایط آزمایش جهت داده برداری ۳۸ نقطه

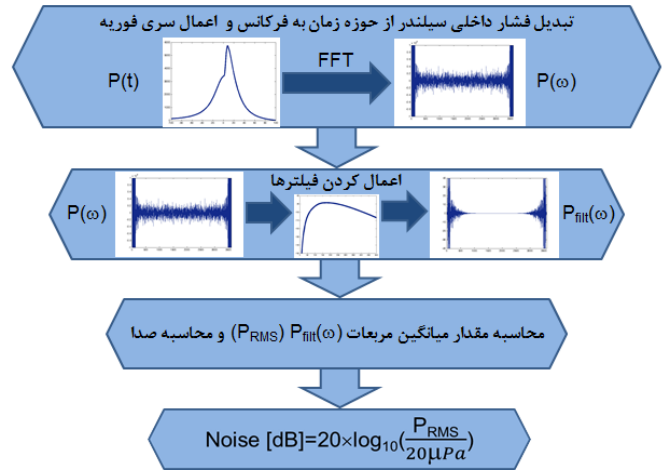
عملکردی موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن

| مقدار     | مشخصه های موتور (واحد) |
|-----------|------------------------|
| ۱۵۵۰      | دور موتور (rpm)        |
| ۱۶۳-۱۳۵   | دمای هوای ورودی (°C)   |
| ۰/۰-۲۳/۳۸ | نسبت هم ارزی (-)       |



شکل ۴: مقایسه نرخ افزایش فشار بیشینه در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

شدت صدای احتراق موتور (RI) به عنوان یک شاخص دیگر مطالعه صدای موتور مطرح شده است. در نمودار شکل ۵ شدت صدای احتراق



شکل ۳: شماتیک نحوه محاسبات صدای احتراق [۷]

## ۲-۲- تعیین شدت صدای موتور

شدت صدای موتور برای اولین بار توسط اینگ [۷] مطرح گردید که بوسیله رابطه ۱ نشان داده شده است و بسیاری از محققین جهت تعیین شدت صدای موتور از این رابطه استفاده کرده اند [۱۱-۱۳]. در این رابطه  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه،  $R$  ثابت گاز،  $P_{max}$  بیشینه فشار سیلندر،  $T_{max}$  بیشینه دمای هوای سیلندر و  $(dp/dt)_{max}$  نرخ افزایش فشار بیشینه سیلندر می باشد. در این تحقیق توسط نرم افزار مطلب الگوریتمی توسعه داده شده است که شدت صدای موتور را در نرم افزار مطلب محاسبه می نمود.

$$RI \equiv \frac{1}{2\gamma} \frac{(0.05 \times (dp/dt)_{max})^2}{P_{max}} \sqrt{\gamma RT_{max}} \quad (1)$$

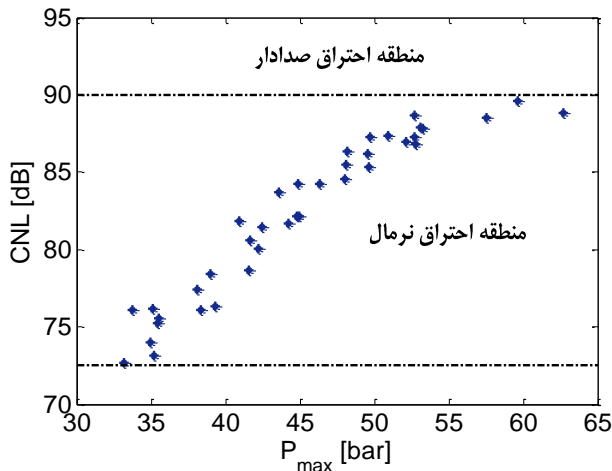
## ۲-۳- داده های آزمایشگاهی و نقاط عملکردی استفاده شده در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن

با استفاده از ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه بین دو منطقه احتراق ناقص و احتراق صدا دار، ارتباط پارامترهای عملکردی، احتراقی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سطح صدای احتراق مطالعه شود. شرایط آزمایشگاهی جهت جمع آوری داده های آزمایشگاهی و نقاط عملکردی استفاده شده در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول در جدول ۲ نمایش داده شده است. داده ها در دور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه که توسط دینامومتر ثابت شده است جمع آوری و اندازه گیری شده اند. نرخ های افزایش فشار متفاوت در موتور HCCI با تغییر نسبت هم ارزی (نسبت سوخت به هوا) و دمای هوای ورودی در طول تست های مختلف صورت پذیرفته است.

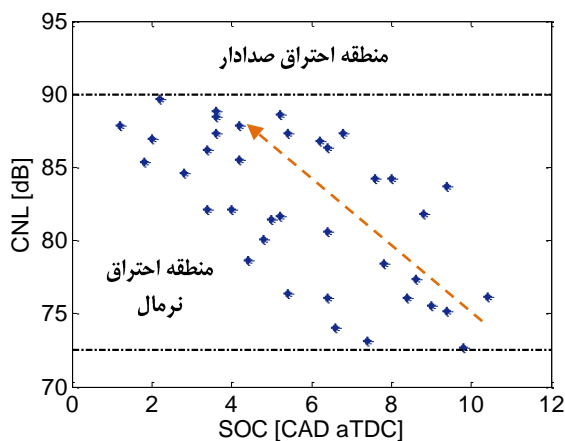
## ۳- بحث روی نتایج

در این مقاله سعی شده است که با استفاده از ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه ارتباط پارامترهای عملکردی، احتراقی و

صدادار نزدیک می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین فشار تولیدی در دور ۱۵۵۰ برابر ۶۲ bar بوده که در محدود سطح صدای احتراق کمتر از ۹۰ dB می‌باشد.



شکل ۶: مقایسه فشار بیشینه سیلندر در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

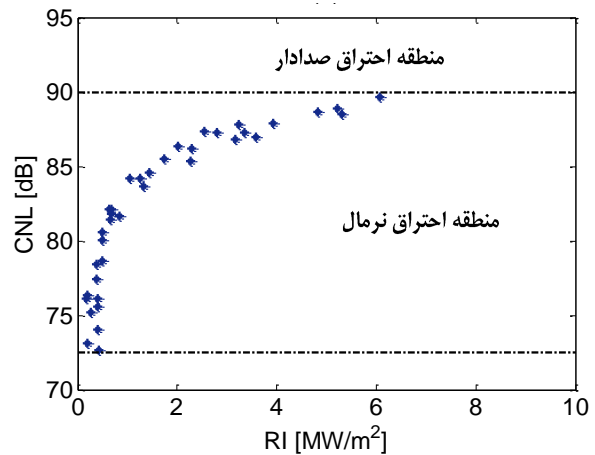


شکل ۷: مقایسه شروع احتراق در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

در موتورهای احتراق داخلی همگن مخلوط همگن هوا و سوخت طی مرحله تراکم تا حدی فشرده می‌شود که به افزایش فشار و دما در شرایط خود اشتعالی رسیده و محترق شود. شروع سوختن سوخت در ابتدای مرحله احتراق رخ می‌دهد. شروع احتراق زاویه پیموده شده میل لنگ بین شروع جرقه تا هنگامی که بخشی کوچک اما قابل ملاحظه از جرم مخلوط می‌سوزد و مقدار زاویه میل لنگ در ۵ تا ۱۰ درصد از آزادسازی انرژی سوخت می‌باشد.

در شکل ۷ شروع احتراق در مقابل سطح صدای احتراق نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هرچه احتراق سریعتر رخ دهد (از ۱۰ به ۲ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) مقدار سطح صدای تولیدی موتور زیادتر می‌شود (از ۷۵ به ۹۰ dB) و از طرفی احتراق دیرتر (حدود ۱۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) هم باعث تولید صدای کمتری می‌شود. با

موتور در مقابل سطح صدای احتراق نشان داده شده است. شدت صدای احتراق موتور به عنوان تابعی از نرخ افزایش فشار بیشینه بوده و برای محاسبه از نرخ افزایش فشار بیشینه استفاده می‌شود.



شکل ۸: مقایسه شدت صدای احتراق موتور در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

شایان ذکر است در محدوده سطح صدای احتراق کمتر یا مساوی ۸۵ dB، تغییرات شدت صدای احتراق موتور بسیار کم می‌باشد ولی در نقاط عملکردی با سطح صدای احتراق بیشتر مقدار شدت صدای احتراق موتور افزایش چشمگیری می‌یابد و این مقدار بین ۲-۶ MW/m<sup>2</sup> تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر بالای سطح صدای احتراق موتور، شدت صدای احتراق و مقدار سطح صدای احتراق به عنوان دو پارامتر در تشخیص احتراق صدادار می‌توانند استفاده شوند و رابطه این با هم به صورت مستقیم می‌باشند، یعنی با افزایش مقدار شدت صدای احتراق، سطح صدای احتراق هم به نسبتی معین تغییر می‌کند.

در شکل ۶ نرخ فشار بیشینه سیلندر در مقابل سطح صدای احتراق نشان داده شده است. بیشینه فشار به بیشترین فشاری گفته می‌شود که در سیکل احتراق در موتور رخ می‌دهد. با توجه به نمودار وقتی فشار بیشینه افزایش می‌یابد و سطح صدای احتراق تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

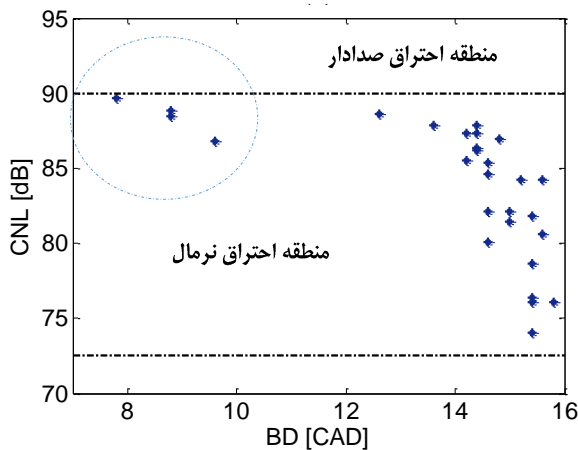
با کم شدن بیشینه فشار (مقادیر کمتر از ۳۵ بار)، احتراق ناقص در موتور ایجاد می‌شود و با ادامه این روند موتور به سمت محدوده کارکردی احتراق ناقص و نهایتاً خاموش شدن پیش می‌رود.

در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن، به دلیل اینکه سوخت بدون هیچ گونه محترق کننده (شمع) محترق می‌شود، لذا بایستی به این نکته توجه داشت که این احتراق در بعضی از اوقات باعث به وجود آمدن صدای احتراق می‌گردد. هنگامی که احتراق صدادار ایجاد می‌شود، باعث آزادی سریع انرژی گاز و باعث افزایش فشار موضعی شدید و انتشار امواج فشاری در امتداد محفظه احتراق می‌شود.

شکل ۶ نشان می‌دهد که در بیشینه فشار سیلندر بیشتر (حدود ۶۰ بار) سطح صدای احتراق بیشتر شده و به مرز ورود به محدوده احتراق

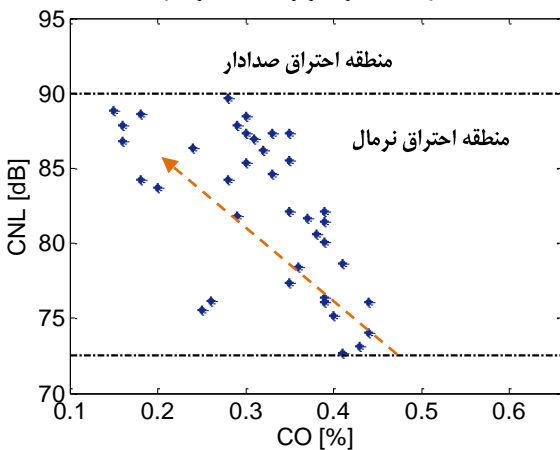
کم باشد، احتراق سریعتر (حدود ۸ تا ۱۰ درجه زاویه میل لنگ) و کارکرد موتور به سمت تولید احتراق صدادرار می‌رود (دایره خط چین). بدیهی است در ناحیه احتراق صدادرار داده (مدت احتراق کمتر از ۸ درجه زاویه میل لنگ)، احتراق بسیار سریع بوده (CNL > 90 db) که باعث صدمه به موتور می‌گردد.

مونوکسید کربن به دلیل احتراق ناقص باعث ایجاد مشکلات تنفسی می‌شود و گاهی هم باعث مرگ انسان می‌شود. شکل ۱۰ مقایسه تولید آلودگی مونوکسید کربن در مقابل سطح صدای احتراق را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مونواکسید کربن در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول بین ۰/۱ تا ۰/۴۵ درصد تغییر می‌کند. میزان پراکندگی تولید صدا در مقابل مونوکسید کربن زیاد می‌باشد، ولی در هر صورت میزان تولید صدا در مقادیر مونوکسید کربن کمتر (حدود ۰/۲ درصد) بیشتر است. علت این امر بالا رفتن دمای احتراق در نقاط با احتراق آوانس شده می‌باشد.



شکل ۹: مقایسه مدت احتراق در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸

نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

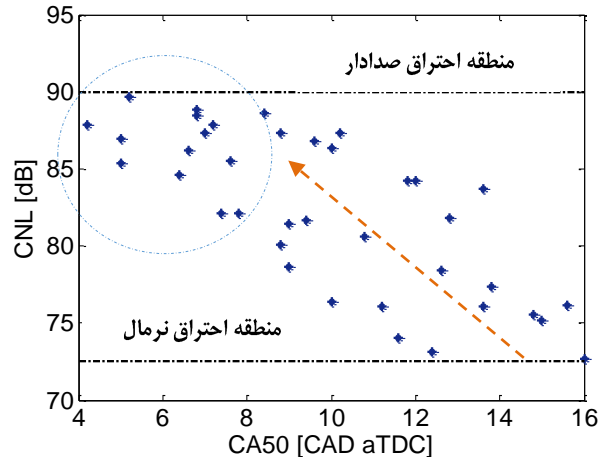


شکل ۱۰: مقایسه تولید آلودگی مونوکسید کربن در مقابل سطح

صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه  
شکل ۱۱ مقایسه تولید آلودگی هیدروکربن نسوخته در مقابل سطح صدای احتراق را نشان می‌دهد. تغییرات هیدروکربن نسوخته با افزایش

توجه به نمودار شروع احتراق در مقابل سطح صدای احتراق، شروع احتراق نباید خیلی کم شود (کمتر از ۲ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) زیرا باعث ورود موتور به محدوده احتراق صدادرار می‌گردد و از طرفی نباید زیاد با تاخیر انجام شود (بیشتر از ۱۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) زیرا باعث ورود موتور به محدوده احتراق ناقص می‌شود و بیشینه فشار سیلندر افت می‌کند و باعث تولید توان کمتر در موتور می‌گردد.

زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق معیاری برای کنترل موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن می‌باشد. در این موتورها بر اساس پارامتر فوق می‌توان احتراق را آوانس و ریتارد کرد. مقایسه زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق در مقابل سطح صدای احتراق در شکل ۸ نشان داده شده است. محدوده دایره ای شکل که با خط چین مشخص شده است محدوده تولید صدای احتراق بیشتر می‌باشد و همانطور که ملاحظه می‌شود دارای زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق کمتری برخوردار بوده (حدود ۴ تا ۸ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) و در محدوده پایین و کمتر از حد استاندارد تولید صدا (۹۰ dB) می‌باشد.



شکل ۸: مقایسه زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

هر چه مقدار زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق کمتر باشد (حدود ۴ تا ۸ درجه بعد از نقطه مرگ بالا)، مقدار سطح صدای تولیدی بیشتر می‌شود و هر چه مقدار مقدار زاویه میل لنگ در ۵۰٪ احتراق بیشتر باشد این مقدار سطح صدای تولیدی به طور نزولی کاهش پیدا می‌کند و تا ۷۵ dB که مرز احتراق ناقص بوده، می‌رسد.

یکی از مشکلات اصلی موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مدت زمان احتراق کم آنها می‌باشد و در بارهای بالا این احتراق سریع به صورت بسیار آبی رخ می‌دهد و صدای احتراق بسیار زیادی تولید می‌شود. لذا بایستی موتور طوری بارگذاری شود که احتراق صدای کمتری داشته باشد و مدت زمان احتراق در حد استاندارد و قابل قبولی باشد. مدت احتراق تفاضل بین شروع احتراق و پایان احتراق می‌باشد. طول مدت احتراق در مقایسه با سطح صدای احتراق در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، وقتی مدت زمان احتراق

۶۲bar بوده که در محدود سطح صدای احتراق کمتر از ۹۰ می‌باشد.

- کاهش فشار بیشینه سیلندر، افزایش مدت احتراق، کاهش نرخ افزایش فشار بیشینه و ریتارد کردن احتراق اثر های قابل توجهی بر کاهش صدای احتراق موتور و عدم ورود به ناحیه احتراق صدا دار را دارند ولی اثرات مخربی از جمله افزایش آلاینده های مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته دارند. مقدار مجاز تاخیر در احتراق برای شروع احتراق کمتر از ۱۰ درجه زاویه میل لنگ می باشد زیرا از این مقدار کمتر موتور وارد ناحیه احتراق ناقص شده و مقادیر تولید آلاینده های مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته افزایش چشمگیری خواهد داشت.
- برای کاهش صدای موتور (عدم ورود به ناحیه احتراق صدا دار) و در ضمن حفظ عملکرد مناسب موتور راهکارهای کاهش مقدار دمای هوای ورودی، کاهش مقدار نسبت سوخت به هوا و بهینه نگه داشتن بیشینه فشار سیلندر توصیه می گردد که باعث می گردد موتور در شرایط کار کند که زیاد به مناطق احتراق صدا دار و ناقص نزدیک نشود. همچنین در مواقعی که صدای احتراق کاهش می یابد افزایشی در مقادیر مونوکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته ایجاد می شود که در نتیجه بایستی تعاملی بین تولید آلودگی صوتی به واسطه افزایش مقدار سطح صدای احتراق و تولید هیدروکربن نسوخته در هنگام کارکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن صورت پذیرد.

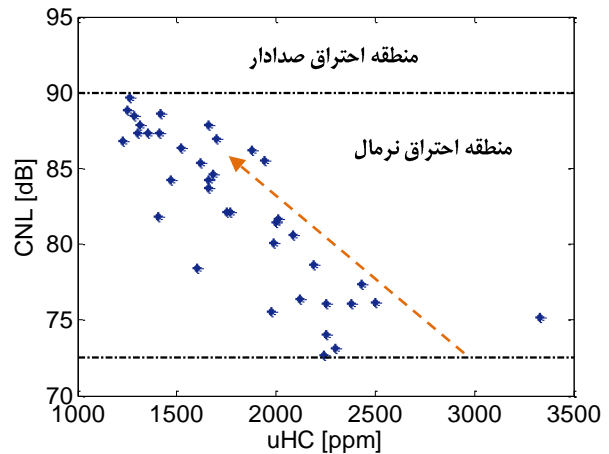
### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله نهایت تشکر از مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و آلودگی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا و مرکز توسعه خودرو دانشگاه صنعتی مالزی را داشته که با همکاری آنها نگارش این مقاله میسر گردید.

### مراجع و منابع

- [1] J. Rezaei, M. Shahbakhti, B. Bahri, A.A. Aziz, Performance prediction of HCCI engines with oxygenated fuels using artificial neural networks, *Applied Energy*, 138 (2015) 460-473.
- [2] M. Bidarvatan, V. Thakkar, M. Shahbakhti, B. Bahri, A. Abdul Aziz, Grey-box modeling of HCCI engines, *Applied Thermal Engineering* 70 (2014) 397-409.
- [3] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Ethanol fuelled HCCI engine: A review. *International Journal of Mechanic, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* 7 (2013) 437-43.
- [4] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Misfire detection based on statistical analysis for an ethanol fuelled HCCI engine., *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 6 (2012) 1276-

صدای تولیدی موتور ، روندی مانند تغییرات مونوکسید کربن دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، در مقادیر تولیدی هیدروکربن کمتر (حدود ۱۲۰۰ ppm) صدای احتراق بیشتری تولید می‌شود. در نتیجه بایستی تعاملی بین تولید آلودگی صوتی به واسطه افزایش مقدار سطح صدای احتراق و تولید هیدروکربن نسوخته در هنگام کارکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن صورت پذیرد.



شکل ۱۱: مقایسه تولید آلودگی هیدروکربن نسوخته در مقابل سطح صدای احتراق برای ۳۸ نقطه عملکردی در دور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه

### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک موتور دیزل تک-سیلندر، هوا-خنک، پاشش مستقیم، چهار-زمانه یانمار به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول تبدیل شده است و با استفاده از ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه ارتباط پارامترهای عملکردی، احتراقی و آلودگی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سطح صدای احتراق مطالعه شده است. نتایج به صورت خلاصه در ادامه بیان شده است:

- نرخ افزایش فشار بیشینه در سطح صدای احتراق پایین تر ( $CNL < 85$ ) افزایش چشمگیری ندارد ولی با افزایش نرخ افزایش فشار بیشینه از ۴ bar/cad سطح صدای احتراق افزایش یافته و به محدوده احتراق صدا دار ۹۰dB نزدیک شده و باعث تولید صدای احتراق بیشتر می‌شود.
- فرایند افزایش نرخ افزایش فشار بیشینه ناگهانی باعث تولید صدای زیادی در موتور می‌گردد. در نرخ های افزایش فشار بیشینه کمتر از ۷ bar/cad احتراق صدا دار مشاهده نشده است.
- در نقاط عملکردی با سطح صدای احتراق بیشتر مقدار شدت صدای احتراق موتور افزایش چشمگیری می‌یابد و این مقدار بین ۲-۶ MW/m<sup>2</sup> تغییر می‌کند.
- در بیشینه فشار سیلندر بیشتر سطح صدای احتراق بیشتر شده و به مرز ورود به محدوده احتراق صدا دار نزدیک می‌شود. همچنین بیشترین فشار تولیدی در دور موتور ۱۵۵۰ دور بر دقیقه برابر

- dominant combustion characteristics on homogeneous charge compression ignition engine noise, *International Journal of Engine Research* 16 (2015) 518-530.
- [16] K Yoshizawa, A Teraj, H Miyakubo, K Yamaguchi, T. Urushihara, Study of high load operation limit expansion for gasoline compression engines, *J Eng Gas Turb Power* 128 (2006) 377-387.
- [17] LM. Olesky, JB. Martz, GA. Lavoie, J. Vavra, DN. Assanis, A. Babajimopoulos, The effects of spark timing, unburned gas temperature, and negative valve overlap on the rates of stoichiometric spark assisted compression ignition combustion, *Applied Energy* 105 (2013) 407-417.
- [18] A. Maria, W. Cheng, K. Kar, W. Cannella, Understanding knock metric for controlled auto-ignition engines, SAE Paper No. 2013-01-1658.
- [19] M. Sjöberg, JE. Dec, Ethanol autoignition characteristics and HCCI performance for wide ranges of engine speed, load and boost, *International Journal of Engine Research* 3 (2010) 84-106.
- [20] A. Krisman, ER. Hawkes, S. Kook, M. Sjöberg, JE. Dec, On the potential of ethanol fuel stratification to extend the high load limit in stratified-charge compression-ignition engines, *Fuel* 99 (2012) 45-54.
- [21] S Saxena, S. Schneider, S. Aceves, R. Dibble, Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels, *Applied Energy* 98 (2012) 448-457.
- [22] S. Saxena, D. Vuilleumier, D. Kozarac, M. Kriek, R. Dibble, S. Aceves, Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery, *Applied Energy* 116 (2014) 269-277.
- [23] B. Bahri, A. Abdul Aziz, A. Salavati-Zadeh, V. Esfahanian, The effect of ethanol combustion on HCCI engine performance and emissions, *The Journal of Engine Research* 41 (2016) 21-30.
- 1282.
- [5] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Understanding and detecting misfire in an HCCI engine fuelled with ethanol, *Applied Energy* 108 (2013) 24-33.
- [6] B. Bahri, A. Aziz, M. Shahbakhti, M. Said, Analysis and modeling of exhaust gas temperature in an ethanol fuelled HCCI engine, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27 (2013) 3531-3539.
- [7] A. Shahlari, C. Hocking, E. Kurtz, J. Ghandhi, Comparison of compression ignition engine noise metrics in low-temperature combustion regimes. *SAE International Journal of Engines* 6 (2013) 541-552.
- [8] J. Dernette, J. Dec, C. Ji, Investigation of the sources of combustion noise in HCCI engines, *SAE International Journal of Engines* 7 (2014) 730-761.
- [9] B. Bahri, M. Shahbakht, k. Kanna, AA. Aziz, Identification of ringing operation for low temperature combustion engines, *Applied Energy* 171 (2016) 142-152.
- [10] JA. Eng, Characterization of pressure waves in HCCI combustion, SAE Paper No. 2002-01-2859.
- [11] B. Bahri, M. Shahbakht, AA. Aziz, Real time modeling of ringing in HCCI Engines using artificial neural network, *Energy* 125 (2017) 509-518.
- [12] A. Shahlari, E. Kurtz, CH. Hocking, S. Antonov, Correlation of cylinder pressure-based engine noise metrics to measured microphone data, *International Journal of Engine Research* 1 (2014) 1-22.
- [13] M. Wissink, Z. Wang, D. Splitter, A. Shahlari, RD. Reitz, Investigation of pressure oscillation modes and audible noise in RCCI, HCCI, and CDC, SAE Paper No. 2013-01-1652.
- [14] JP. Szybist, KD Edward, M. Foste, K. Confe, W. Moore, Characterization of engine control authority on HCCI combustion as the high load limit is approached, SAE Paper No. 2013-01-1665.
- [15] JA. Massey, JA. Drallmeier, Identification of the



## Experimental study of combustion noise level in LTC engine

F. Jahandideh<sup>1</sup>, B. Bahri<sup>2\*</sup>, M. Teimouri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran, [Jahandideh@gmail.com](mailto:Jahandideh@gmail.com)

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran, [Bahri@iaush.ac.ir](mailto:Bahri@iaush.ac.ir)

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Department, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran, [Mohsenteimouri16@gmail.com](mailto:Mohsenteimouri16@gmail.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 17 July 2018

Accepted: 13 November 2018

#### Keywords:

LTC

Ethanol

Combustion noise level

Ringling intensity

### ABSTRACT

In recent years, promising methods have been used to increase thermal efficiency, reduce nitrogen oxide and particle matter, which can be described as an example of an ethanol fuelled HCCI engine. But despite the many benefits of these engines, they continue to face problems such as increasing carbon monoxide production, unburned hydrocarbon, and producing combustion noise at high loads. In this paper, one single cylinder, air cooled, direct injection Yanmar diesel engine is converted to HCCI engine fuelled with ethanol. With using 38 steady state HCCI operating points at 1550 RPM, the variation of operating, combustion parameters and air pollution were studied with combustion noise level (CNL). The results indicate that the maximum pressure rise rate at lower combustion noise (CNL <85) does not increase significantly, but with increasing the maximum pressure rise rate of 4 bar/cad, CNL increases dramatically and reaches to the vibrational range of 90 dB which produces combustion noise. Also, the maximum in-cylinder pressure at 1550 rpm is 62 bar, with a limit of combustion noise of less than 90 dB.

