



## بررسی تجربی تأثیر استفاده از محیط متخلخل بر آلاینده‌ها و مصرف سوخت در موتور سیکلت‌ها

وحید تنگستانی<sup>۱</sup>، امیر همایون مقدادی<sup>۲\*</sup>، بابک مهباندوست<sup>۳</sup>، سید عبدالله حسن‌دخت<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران [vahid.tangestani@iaukhsh.ac.ir](mailto:vahid.tangestani@iaukhsh.ac.ir)

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران [amir\\_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir](mailto:amir_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir)

<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران [mehmandoust@iaukhsh.ac.ir](mailto:mehmandoust@iaukhsh.ac.ir)

<sup>۵</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران [a\\_hasandokht@yahoo.com](mailto:a_hasandokht@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۷ فروردین ۱۳۹۵

پذیرش: ۹ تیر ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

موتور احتراق داخلی

محیط متخلخل

احتراق همگن

آلاینده‌ها

مصرف سوخت

### چکیده

تولید و نشر آلاینده‌ها و افزایش مصرف سوخت توسط موتورهای احتراق درونی در کلان شهرها چالشی مهم است. یکی از کارآمدترین راه‌های کاهش نشر آلاینده‌ها و مصرف سوخت در فرایند احتراق، فراهم کردن شرایط لازم برای ایجاد احتراق همگن است. استفاده از محیط متخلخل به منظور تشکیل مخلوط همگن سوخت و هوا در موتور احتراق درونی مزایای زیادی از جمله کاهش قابل توجه آلاینده‌ها (HC, CO)، کاهش مصرف سوخت ویژه و افزایش بازده را در پی دارد. در این مقاله نتایج حاصل از آزمون موتور چهار زمانه موتور سیکلت هوندا با توزیع سوخت غیر مستقیم و استفاده از محیط متخلخل در چندراهه ورودی ارائه شده است. مقدار آلاینده‌ها، مصرف سوخت ویژه، گشتاور و توان خروجی موتور با استفاده از دستگاه لگام‌تریزی و تحلیلگر گاز بررسی و با عملکرد موتور مرسوم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از محیط متخلخل تولید مونواکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته را تا ۷۰٪ و مصرف سوخت ویژه را تا ۲۷٪ کاهش می‌دهد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

نشر گازهای آلاینده ناشی از فرایند احتراق می‌تواند اثرات بسیار مخربی بر محیط زیست، انسان و آب و هوا بگذارد. اولین قدم برای کاهش و کاهش این آلودگی‌ها شناخت منابع ایجاد این آلودگی‌ها است. علت وجود (HC, CO) در گازهای خروجی از موتور به ساختارهای مختلف سوخت، هندسه محفظه احتراق و متغیرهای عملکردی موتور وابسته است.

تمام ترکیبات (HC) به غیر از متان در اثر ترکیب با هوا باعث ایجاد پدیده مه دود شیمیایی می‌شود.

رقیق کردن مخلوط سوخت و هوا، ایجاد آشوب در محفظه احتراق و استفاده از شمع دوم بر روی بستر از راهکارهای کاهش (HC, CO) است.

این روشها معایبی همچون احتراق ناقص و کاهش بازده حرارتی را به همراه دارد. افزایش انتشار (NOx) در جو و ترکیب آن با عناصر هوا باعث افزایش غلظت ازن و تشکیل مه دود شیمیایی می‌شود.

تولید اکسید نیتروژن در محفظه احتراق به دما، فشار، نسبت سوخت به هوا و زمان احتراق وابسته است. احتراق سریع، تنظیم زمان شروع جرقه، کاهش هوای اضافی، تزریق آب یا بخار به محفظه احتراق و بازیابی گازهای خروجی به محفظه احتراق (EGR) از مهمترین روشهای کاهش (NOx) است.

یکی از مهمترین منابع تولید گازهای ناشی از احتراق، موتورسیکلتها اند. معایب روشهایی که به اصلاح فرآیند احتراق در قبل و بعد از محفظه احتراق می‌پردازد از جمله، توزیع ناهمگن سوخت در محفظه احتراق و کاهش گازهای آلاینده توسط واکنشگر با عمر مفید کم و هزینه تعویض زیاد برای موتورهای احتراق درونی، پژوهشها را به سمت استفاده از روشهای جدید و بهینه تر برای کمینه کردن این آلایندهها هدایت می‌کند [۱].

یکی از این روشها استفاده از محیط متخلخل در واکنش احتراق است. استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق درونی سبب ایجاد اختلاط یکنواخت سوخت و هوا و در نتیجه احتراق همگن می‌شود که این امر سبب افزایش بازده احتراق و کاهش آلایندهها می‌شود. بررسیهای زیادی توسط افراد مختلف طی سالهای گذشته دربارهٔ مبحث احتراق در محیط متخلخل و اثرات آن بر روی آلایندههای محیط زیست صورت گرفته است.

اولین تحقیقات در زمینهٔ احتراق در محیط متخلخل و کاربرد آن به اوایل قرن بیستم باز می‌گردد. در سال ۱۹۱۲، بن<sup>۱</sup> اولین بویلر و هیتر متخلخل را طراحی نمود [۲]. در سال ۱۹۷۴، اسکرینبرگ<sup>۲</sup> با استفاده از

یک عنصر متخلخل در مقابل افشانه توانست با ایجاد احتراق همگن، درصدی از آلایندهها را کاهش دهد [۳].

در سال ۱۹۷۵، هوزنلوب<sup>۳</sup> با استفاده از عنصر متخلخل در چندراههٔ هوا با گرم کن برقی و بازیافت گازهای خروجی توانست از آنتالپی دود برای پیش گرمایش و تبدیل سوخت به بخار و ایجاد مخلوط همگن استفاده کند. از معایب این طرح استفاده از انرژی برقی برای پیش گرمایش، رسوب گرفتگی مجاری به خاطر استفاده از دود و کاهش بازده حجمی به دلیل گرم شدن هوای ورودی است [۴].

در سال ۲۰۰۰، در تحقیقی که توسط ترمیس<sup>۴</sup> و دراست<sup>۵</sup> ارائه شد مقایسهٔ بین شعلهٔ آزاد آرام احتراق درون ماده متخلخل به صورت تجربی انجام پذیرفته است. در این مقایسه ابعاد مشعل با توجه به توان حرارتی آن، مقدار نشر آلایندهها و محدودهٔ پایداری آنها بررسی شد [۵].

در سال ۲۰۰۱، ترمیس<sup>۴</sup> و همکاران، موتور احتراق خارجی (موتور بخار) با آلودگی بسیار پایین را اختراع کردند. در این موتور گرم کردن سیال عامل به وسیلهٔ مشعلهای متخلخل انجام می‌شود [۶].

در سال ۲۰۰۶، چین<sup>۶</sup> و همکاران، محیط متخلخل را روی سببهٔ موتوری دیزل تک استوانه نصب کردند. نتایج نشان داد (NOx) کم می‌شود اما (HC, CO) افزایش می‌یابد و صدای حاصل از کارکرد موتور، به دلیل کاهش بیشینه فشار، کم می‌شود [۷].

در سال ۲۰۱۱، وکلاس<sup>۷</sup>، چگونگی کاربرد محفظهٔ احتراق متخلخل را در موتورهای احتراق درونی مطالعه کرد. در این تحقیق بر مزایای ترمودینامیکی و زیست محیطی این گونه موتورها تاکید شده است [۸]. در سال ۲۰۱۲، وکلاس<sup>۷</sup> با استفاده از مانع کوچک برای شبیه‌سازی واکنشگر متخلخل توانست با جذب گرمای حاصل از احتراق آلایندهها از جمله (NOx) را به دلیل کاهش دمای احتراق بکاهد از کاستیهای این طرح استفاده از انرژی برقی برای پیش گرمایش است. در این تحقیق بر مزایای ترمودینامیکی و زیست محیطی این گونه موتورها تأکید شده است [۹].

با استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق درونی می‌توان چندین مزیت نسبی مانند افزایش پایداری، بیشینهٔ نرخ آزادسازی انرژی و کاهش نشر آلایندهها را بهبود بخشید. در این پژوهش تأثیر محیط متخلخل بر متغیرهای مختلف مانند آلایندهها، مصرف سوخت، گشتاور و توان برای موتور چهارزمانه موتورسیکلت هوندا بررسی شده و بین عملکرد آن با موتور احتراق درونی مرسوم مقایسه‌ای انجام شده است.

## ۲- ساختارهای مختلف موتور برای استفاده از محیط متخلخل

<sup>5</sup> Drust

<sup>6</sup> Chien

<sup>7</sup> Weclas

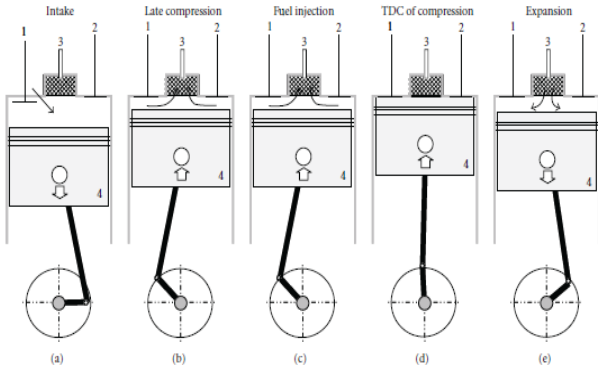
<sup>1</sup> Bone

<sup>2</sup> Eskrynbg

<sup>3</sup> Hutzenlaub

<sup>4</sup> Trimis

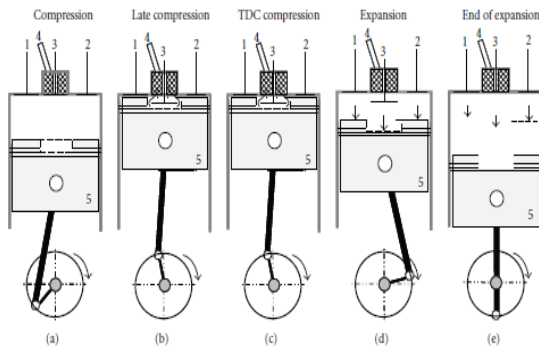
داخل محفظه متخلخل وارد و سوخت گرد شده به داخل محیط تزریق می‌شود. به علت دمای بالای محیط متخلخل و ظرفیت گرمایی ویژه و همچنین سطح انتقال حرارت بسیار زیاد محیط متخلخل، سوخت به سرعت تبخیر و مخلوط یکنواخت سوخت و هوا تشکیل می‌شود. در این محیط با اختلاط یکنواخت سوخت و هوا می‌توان احتراقی همگن را در محیط متخلخل ایجاد کرد [۱۰].



شکل ۲: موتور با محفظه احتراق متخلخل باز

### ب) موتور با محفظه احتراق متخلخل بسته:

در این نوع موتور، محفظه احتراق با یک دریچه از فضای کاری سامانه جدا می‌شود. شکل (۳) به این ترتیب می‌توان سوخت را در مرحله مکش در فضای بسته محفظه احتراق تزریق و زمان بیشتری برای تزریق سوخت و مخلوط شدن با هوای باقیمانده در محفظه احتراق ایجاد نمود. با استفاده از این دریچه می‌توان هوا را تا فشار نیرومندتری فشرده کرد زیرا زمان باز شدن این دریچه انتهای مرحله تراکم و قبل از رسیدن سمبه به نقطه مکث بالا است [۱۱].

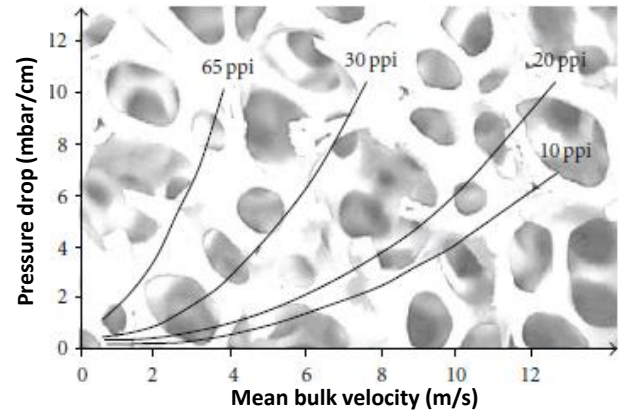


شکل ۳: موتور با محفظه احتراق متخلخل بسته

در شکل (۴) مقایسه‌ای بین چرخه‌های حاکم بر این دو موتور با چرخه اتو مرسوم و کارنو انجام شده است. در چرخه اتو مرحله ورودی چرخه یک فرایند فشار ثابت است. مرحله دوم چرخه (۱-۲)، مرحله تراکم است که تراکم هم‌آنتروپی<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. پس از مرحله تراکم، فرایند احتراق در حجم ثابت اتفاق می‌افتد (۲-۳)، در این مرحله مقدار زیادی انرژی به هوای داخل استوانه افزوده می‌شود که حداکثر دما و فشار چرخه در نقطه (۳) رخ می‌دهد. مرحله انبساط هم‌آنتروپی (۳-۴) پس از

محیط متخلخل یک جسم جامد است که می‌تواند ساختار منظم یا تصادفی داشته باشد. مقاومت و پایداری در دمای گرم، مقاومت در برابر ضربه حرارتی، هدایت حرارتی مطلوب و ظرفیت گرمایی ویژه قوی از مهمترین خواصی است که مواد بکار رفته در محیط متخلخل دارا اند. محیط متخلخل با انتقال گرمای قوی از حالت جامد برای تبخیر سریع سوخت مایع می‌تواند کلیه شرایط لازم برای احتراق همگن را فراهم سازد. در ساختار محیط‌های متخلخل مورد استفاده در فرایند احتراق، معمولاً از  $(Al_2O_3)$  و  $(SiC)$  استفاده می‌شود.

ساختار متخلخل از نظر ظاهری بدون ناحیه بسته است و قطر منافذ محیط متخلخل بین ۱ تا ۳ میلی‌متر است که بر حسب (PPI) تعداد خلل و فرج در هر اینچ خطی شناخته می‌شود. ضریب اصطکاک برای جریانی که از داخل یک محیط متخلخل عبور می‌کند وابسته به هندسه محیط متخلخل به خصوص ضریب تخلخل است. به دلیل ساختار نامنظم محیط متخلخل و منافذ بسته در بعضی از نقاط سیال دچار افت فشار می‌شود شکل (۱) [۱۰].



شکل ۱: افت فشار در ساختار محیط متخلخل با تراکم مختلف

برای استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق درونی می‌توان از ساختارهای زیر استفاده کرد.

### ۱-۲- استفاده از محیط متخلخل در داخل محفظه احتراق:

استفاده از محیط متخلخل در محفظه احتراق یک راهکار امیدوار کننده برای کاهش گازهای خروجی و تشکیل مخلوط همگن سوخت و هوا است. فضای متخلخل می‌تواند بر روی بستار یا سمبه جای گیرد. برای موتورها با محفظه احتراق متخلخل دو ساختار عملی می‌توان در نظر گرفت.

### الف) موتور با محفظه احتراق متخلخل باز

نحوه عملکرد این موتور در شکل (۲) نشان داده شده است. عملکرد این موتور مانند موتور دیزل مرسوم است با این تفاوت که با رسیدن سمبه به نزدیکی نقطه مکث بالا هوای فشرده شده در مرحله تراکم به

<sup>8</sup> Isentropic

آلاینده‌های (CO, HC, NOx) در زمان فرایند احتراق، کاهش مصرف سوخت و احتراق همگن اشاره کرد و همچنین کاستی‌های این طرح پیچیدگی بستار، عدم پوشش کامل سوخت تزریق شده در محفظه احتراق و عدم دسترسی به یک ساختار با مقاومت شدید برای پشتیبانی از تنش‌های موجود در محفظه احتراق است [۱۲].

### ۲-۲- استفاده از محیط متخلخل قبل از فرایند احتراق:

با توجه به محدودیت فضا و ضعف در ساختار محیط متخلخل از جمله شکنندگی، عدم تحمل تنش و فشار قوی برای برنامه‌های کاربردی محفظه احتراق موتور، می‌توان از محیط متخلخل در خارج از محفظه و قبل از فرایند احتراق استفاده کرد.

استفاده از محیط متخلخل قبل از فرایند احتراق برای پیش ترکیب کردن مخلوط سوخت و هوا و تشکیل مخلوط همگن است. محیط متخلخل به دلیل ظرفیت گرمای ویژه قوی در مقایسه با ظرفیت گرمایی سوخت و هوا بخشی از حرارت آزاد شده در طی فرایند احتراق را در خود ذخیره و در چرخه بعدی این گرمای ذخیره شده را به مخلوط منتقل و سوخت را به بخار تبدیل می‌کند.

در اثر ترکیب همگن مخلوط سوخت و هوا، واکنش احتراق به صورت کامل انجام می‌شود و باعث کاهش نشر آلاینده‌ها، بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی، کاهش مصرف سوخت ویژه و همچنین بهبود عملکرد موتور می‌شود.

هدف از این مقاله بررسی دقیق مقدار کاهش آلاینده‌ها، مصرف سوخت، تغییرات گشتاور و توان با جایگذاری محیط متخلخل در چندراهه ورودی متصل به بستار موتور و آزمون با دستگاه لگام ترمزی و تحلیلگر گاز است.

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- معادلات حاکم

موتور به ازای هر بار تولیدی یک گشتاور و دور منحصر به فرد دارد که توان خروجی موتور را بر اساس رابطه زیر به ما می‌دهد:

$$P = \frac{TN}{K} \quad (۴)$$

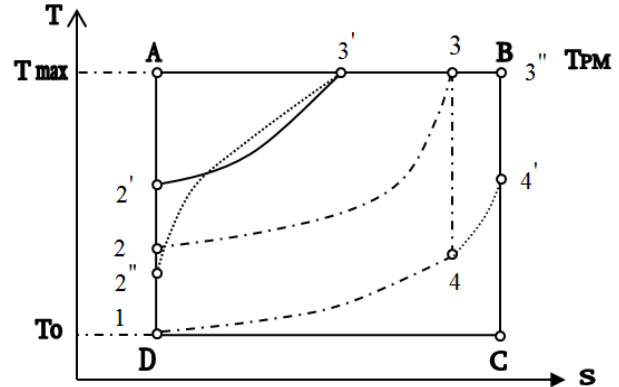
که  $T$  گشتاور،  $N$  سرعت دورانی و  $K$  یک عدد ثابت است. این توان را که توان خروجی موتور و جذب شده توسط ژنراتور است، توان ترمزی گویند. یکی دیگر از متغیرهای مورد بحث در موتور، مصرف سوخت ویژه ترمزی<sup>۹</sup> (BSFC) است که مقدار سوخت مصرفی برای تولید یک کیلووات توان را نشان می‌دهد.

$$BSFC = \frac{\dot{m}}{P} \quad (۵)$$

که  $\dot{m}$  شار جرمی سوخت و  $P$  توان ترمزی است.

#### ۳-۲- بستر آزمون موتور مجهز به محیط متخلخل

احتراق آغاز می‌شود. خروجی آنی گازها در مرحله (۱-۴) فرایندی حجم ثابت است. در این مرحله مقدار زیادی انرژی و آنتالپی به همراه گازهای خروجی بیرون می‌رود که باعث کاهش بازده حرارتی موتور می‌شود.



1-2-3-4-1: Idealized Otto cycle  
1-2'-3'-3''-4'-1: PM engine with closed chamber  
1-2''-3'-3''-4'-1: PM engine with open chamber  
شکل ۴: مقایسه چرخه ترمودینامیکی موتورهای مختلف [۱۵]

محیط متخلخل می‌تواند گرمای ناشی از دود خروجی را در خود ذخیره کرده و از آن برای پیش گرم نمودن هوای احتراق استفاده کند. در واقع این کار باعث می‌شود اتلاف انرژی ناشی از خروج گازهای گرم کاهش یابد. به عبارت دیگر اختلاف میان دمای دود خروجی با دمای محیط و همچنین اختلاف میان دمای هوای ورودی با دمای احتراق کاهش یافته و فرایند انتقال حرارت به حالت نظری خود یعنی انتقال حرارت در دمای ثابت نزدیک‌تر می‌شود که این امر سبب افزایش بازده چرخه می‌شود. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که به علت ظرفیت گرمای ویژه قوی محیط متخلخل، مرحله (۳''-۳') (انتقال حرارت در دمای ثابت) به چرخه اضافه شده و باعث افزایش چشمگیر بازده می‌شود.

بازده چرخه اتو مرسوم برابر است با:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} \quad (۱)$$

که  $\eta$  بازده حرارتی،  $C_v$  گرمای ویژه در حجم ثابت و  $T$  دما هستند [۱۲].

با توجه به گرمای ورودی و کار خالص چرخه، بازده چرخه با محفظه احتراق بسته بدین شرح محاسبه می‌شود:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{C_v(T_{4'} - T_1)}{C_v(T_{3'} - T_2') + RT_3 \ln \frac{V_{3''}}{V_{3'}}} \quad (۲)$$

که  $V$  حجم استوانه و  $R$  ثابت گاز است. بازده چرخه با محفظه احتراق باز نیز بدین صورت زیر بدست می‌آید [۱۳].

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{C_v(T_{4''} - T_1)}{C_v(T_{3''} - T_2'') + RT_3 \ln \frac{V_{3''}}{V_{3''}}} \quad (۳)$$

از مزایای استفاده از محیط متخلخل باز و بسته در داخل محفظه احتراق می‌توان به سرعت بخشیدن تشکیل مخلوط سوخت و هوا، کاهش نشر

<sup>۹</sup> Brake Specific Fuel Consumption

تبدیل سوخت به بخار با تأمین حرارت محیط متخلخل از بدنه موتور، می‌توان از مزایای احتراق همگن بهرمنند شد. در شکل (۶) محل نصب محیط متخلخل و ارتباط موتور با لگام ترمزی نشان داده شده است. به منظور جبران افت فشار مخلوط سوخت و هوای در حال عبور از محیط متخلخل برای بررسی و تحلیل نتایج، از دو ساختار با تخلخل ۰,۸۷ و ۰,۵۵ مطابق با خصوصیات جدول (۲) استفاده شده است. برای هر دو ساختار متخلخل از قطر و طول یکنواخت ۶۵ و ۱۵ میلی متر استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی موتور هوندا ۱۲۵

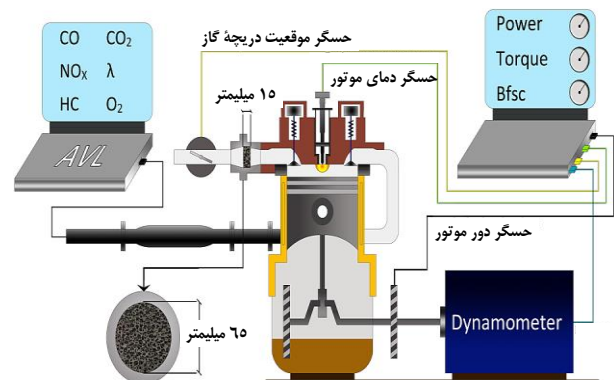
۱۲۵,۰	حجم استوانه (تک استوانه) (L)
۸,۹ : ۱	نسبت تراکم
کاربراتور	روش توزیع سوخت
۷۳,۸	بیشینه توان (KW)
۸۰۱۶	دور میل لنگ در بیشینه توان (RPM)
۴۹۷	مصرف سوخت ویژه در بیشینه توان (gr/kwh)
۵۹,۱۰	حداکثر گشتاور (N.M)
۷۰۰۱	دور میل لنگ در بیشینه گشتاور (RPM)
۴۸۲	مصرف سوخت ویژه در بیشینه گشتاور (gr/kwh)



شکل ۶: تصویر آزمون موتور با دستگاه دینامومتر و محل قرارگیری محیط متخلخل

به منظور انجام آزمایش از امکانات آزمایشگاهی شرکت نیرو محرکه قزوین استفاده شده است. سکوی آزمون موتور به سرویسهای ضروری نظیر سوخت، خنک کن، سامانه برقی و آگزوز مجهز است به نحوی که رانندگی طولانی موتور تحت بار ممکن شود. در این آزمون از یک دستگاه لگام ترمزی جذبی مدل (AG 15KW) که کار انجام یافته توسط موتور بر روی خود را به گرما تبدیل می‌کند استفاده شده است. در ابتدا به کمک دینامومتر، توان تولیدی موتور به انرژی برقی تبدیل گشته و سپس با عبور از یک مقاومت برقی به گرما تبدیل می‌شود. آزمایش مورد نظر برای موتور در حالت بار متغیر انجام گرفته است. به این منظور مقدار ورود سوخت به موتور ثابت نگاه داشته شده و دستگاه آزمایش مقدار بار اعمالی روی موتور را به صورت اتوماتیک تغییر می‌دهد. با تغییر بار اعمالی روی موتور، گشتاور و دور موتور تغییر می‌کند. بار اعمالی روی موتور به مدت ۲ تا ۳ دقیقه ثابت نگاه داشته می‌شود تا داده‌های آزمایش به حالت دایم برسد و پس از آن به صورت خودکار بار اعمالی روی موتور تغییر می‌کند. دستگاه آزمایش قادر است مقادیر گشتاور، توان خروجی موتور و مصرف سوخت ویژه ترمزی را به ترتیب با دقت ۰,۰۱ N.m، ۰,۰۱ kW و  $10^{-5}$  gr/kWh اندازه گیری نماید. به دلیل نبود نتایج تجربی منتشر شده برای موتور مجهز به محیط متخلخل در خارج از محفظه احتراق با طراحی و ساخت چندراهه مجهز به محیط متخلخل برای موتور سیکلت هوندا و با استفاده از دستگاه تحلیلگر گاز مدل (AVL) به بررسی عملکرد و نتایج موتور با دو ساختار محیط متخلخل می‌پردازیم.

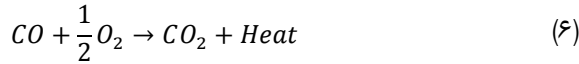
در شکل ۵ نمودار سامانه آزمایش نشان داده شده است. در این آزمایش مقادیر اندازه‌گیری شده با دستگاه لگام ترمزی از جمله گشتاور، دور موتور، زاویه دریچه گاز و دمای موتور توسط رایانه تحلیل و اطلاعات به دست آمده ذخیره می‌شود.



شکل ۵: تصویر شماتیک موتور و نحوه اتصال آن با دینامومتر، تحلیلگر گاز و محیط متخلخل

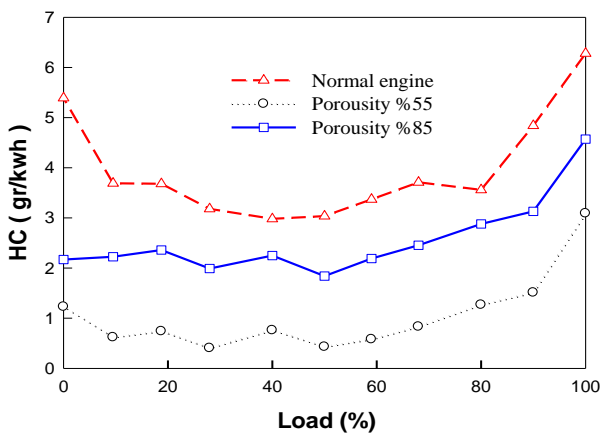
در جدول (۱) مشخصات فنی موتور آزمون شده ارائه شده است. به علت در دسترس نبودن ساختار متخلخل با مقاومت قوی در برابر تنش‌های محفظه احتراق و نبود فضای کافی در داخل بستار موتور با قرار دادن محیط متخلخل در چندراهه هوا با تشکیل مخلوط همگن و

بیشترین مقدار (CO) در زمان بار زیاد موتور بدلیل استفاده از مخلوط غنی سوخت و هوا تولید می‌شود. بیشترین مقدار کاهش (CO) تا ۴۰٪ در بارهای ۰٪ تا ۶۰٪ برای تخلخل ۵۵٪ است. استفاده از محیط متخلخل اکسیژن کافی را در اختیار تمام کربن‌ها قرار داده و با انجام واکنش زیر مقدار منواکسیدکربن کاهش می‌یابد:

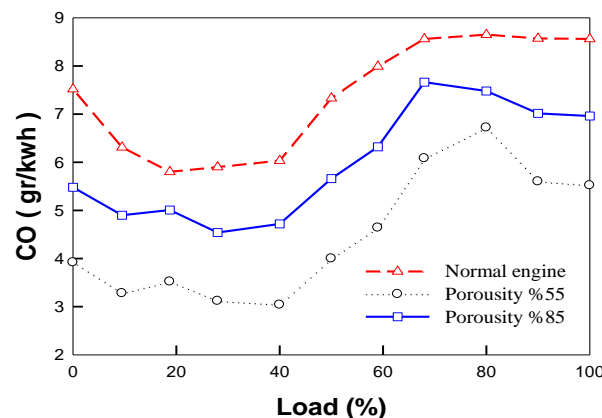


افزایش تخلخل بدین معنی است که موانع صلب کاهش یافته و فضای باز محیط بیشتر می‌شود و در نتیجه اثرات وجود محیط متخلخل کاهش می‌یابد. بالعکس، کاهش تخلخل باعث اثر پذیری دمایی دو حالت گاز و جامد از یکدیگر است.

با افزایش تخلخل همانطور که در شکل نشان داده شده است اثر کاهش منواکسیدکربن در خروجی موتور به دلیل کاهش انتقال حرارت از محیط متخلخل به مخلوط گازها و عدم تشکیل مخلوط و احتراق همگن کاهش می‌یابد.



شکل ۷: اثر محیط متخلخل بر HC در بارهای مختلف



شکل ۸: اثر محیط متخلخل بر CO در بارهای مختلف

### ۴-۳- اثر محیط متخلخل بر اکسیدهای نیتروژن (NOx)

استفاده از محیط متخلخل در خارج از محفظه احتراق باعث افزایش دمایی مخلوط سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق، افزایش دمایی

جدول ۲: خصوصیات ترمو فیزیکی محیط متخلخل

هدایت <sup>۱۰</sup>	۱,۲۱ $(\frac{W}{m \cdot K})$
چگالی روزنه <sup>۱۱</sup>	۲۵,۶ (ppc)
C	۰,۶۳۸
m	۰,۴۲
چگالی	۵۱۰ $(\frac{kg}{m^3})$
گرمای ویژه	۸۲۴ $(\frac{kg}{m^3})$

### ۴-۲- نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه نتایج آزمون به دست آمده از موتور مرسوم با دو ساختار محیط متخلخل با تخلخل ۰,۸۷ و ۰,۵۵ در خارج از محفظه احتراق می‌پردازیم.

### ۴-۱- بررسی اثر محیط متخلخل بر هیدروکربن‌های

#### نسخته (HC)

در شکل (۷) نمودار تغییر مقادیر (HC) در بارهای مختلف موتور به ازای تخلخل‌های مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با کاهش تخلخل مقدار (HC) موجود در محصولات احتراق کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این کاهش به ۷۰٪ نیز می‌رسد. با افزایش تخلخل ضریب انتقال حرارت جابجایی حجمی کاهش و در نتیجه دمایی حالت گاز و جامد در محیط متخلخل از یکدیگر دور می‌شوند. در این حالت گرمای لازم برای تیخیر ذرات سوخت با قطر بزرگتر در دسترس نیست و ترکیب همگن سوخت و هوا تشکیل نمی‌شود. همانطور که از شکل (۷) مشخص است افزایش تخلخل باعث کاهش اثر محیط متخلخل بر مقدار هیدروکربن‌های نسخته می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با کاهش بار، مقدار (HC) کاهش می‌یابد. این پدیده به آن علت است که در اثر تشکیل مخلوط و احتراق همگن، دما و فشار محفظه احتراق افزایش می‌یابد که باعث افزایش شدت انتقال حرارت به بدنه موتور و در نتیجه محیط متخلخل می‌شود و محیط متخلخل به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه قوی حرارت اضافه را در خود ذخیره کرده و در چرخه بعدی به مخلوط سوخت و هوا انتقال می‌دهد که باعث تبدیل تمام ذرات سوخت به بخار می‌شود.

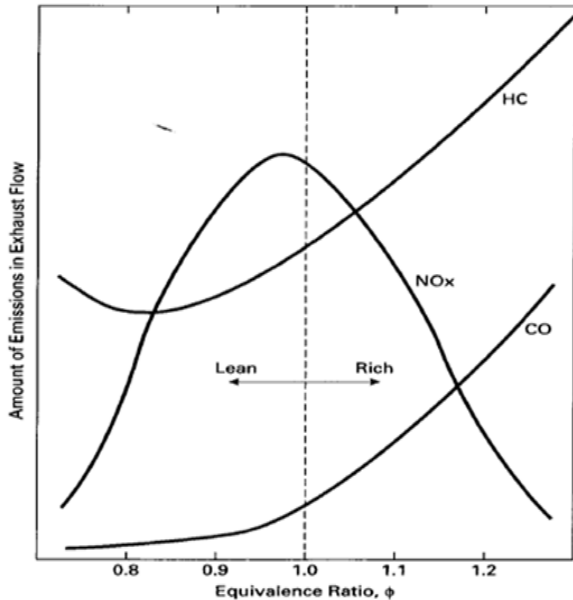
### ۴-۲- اثر محیط متخلخل بر منواکسید کربن (CO)

در اثر احتراق ناقص در موتورسیکلت‌ها مقدار زیادی گاز سمی مونوکسیدکربن تولید می‌شود. به عبارت دیگر اگر اکسیژن کافی برای تبدیل تمام کربن‌ها به دی‌اکسیدکربن نباشد مقداری از کربن‌ها نمی‌سوزد و به صورت (CO) از موتور خارج می‌شود. نسبت سوخت به هوای ورودی، نسبت تراکم، زمان چرخه زنی و سرعت موتور می‌تواند در تولید (CO) مؤثر باشد. همانطور که از شکل (۸) مشخص است

<sup>11</sup> Pore density

<sup>10</sup> Conductivity

و NOx افزایش می‌یابد. پس نتیجه می‌گیریم که محیط متخلخل نه تنها باعث غلیظ شدن مخلوط سوخت و هوا نمی‌شود بلکه باعث کاهش آن و فراهم کردن شرایط برای تشکیل مخلوط درست با نسبت هم ارزی یک و احتراق کامل می‌شود. ضمناً باید در نظر داشت که نتایج با ثابت نگه داشتن زاویه دریچه گاز و تغییر بار موتور از صفر تا ۱۰۰ به دست آمده است.



شکل ۱۰: آلاینده‌های خروجی از موتور به صورت تابعی از نسبت هم ارزی [۱۶]

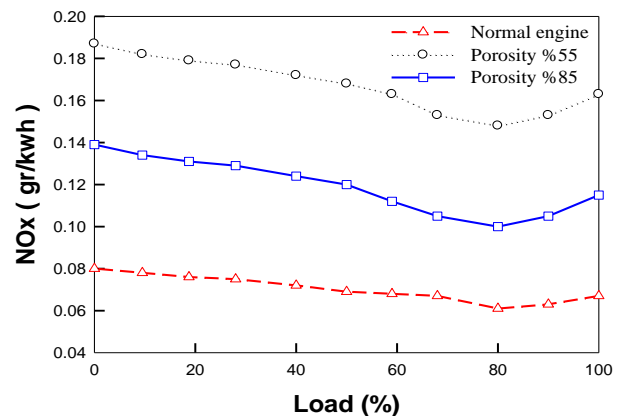
#### ۴-۴- اثر محیط متخلخل بر توان و گشتاور موتور

روش‌هایی که به اصلاح فرآیند احتراق می‌پردازد یا روش‌هایی که بعد از فرآیند احتراق برای کاهش نشر گازهای آلاینده مورد استفاده قرار می‌گیرد معمولاً به اندازه کافی کارآمد نیست و باعث کاهش بسیار زیاد بازده حرارتی، کاهش توان، کاهش گشتاور خروجی و افزایش هزینه سرویس و نگهداری در موتور می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان دریافت که استفاده از محیط متخلخل تأثیر زیادی در کاهش توان و گشتاور خروجی از موتور تا بارهای کم تر از ۴۰٪ نخواهد داشت. کاهش توان بدلیل افت فشار سیال عبوری از محیط متخلخل است. با افزایش تخلخل این افت فشار و توان کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با کاهش بار توان تا مقداری بیشینه افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. این بدان دلیل است که در بارهای ضعیف، توان اصطکاکی نیز سست است. از طرف دیگر، در دوره‌های تند موتور قادر نیست هوای مورد نیاز را به صورت کامل فرورد که باعث کاهش بازده حجمی یا ضریب پر شدن استوانه و نزول منحنی گشتاور می‌شود. بنابراین منحنی توان موتور، دارای یک نقطه بیشینه است که در حقیقت نقطه بهینه عملکرد موتور

بیشینه احتراق و نهایتاً افزایش (NOx) تولیدی به روش زلدویج حرارتی می‌شود.

در شکل (۹) اثر تخلخل بر مقدار تولید (NOx) نشان داده شده است. با افزایش تخلخل مقدار (NOx) تولیدی کاهش می‌یابد. می‌توان با استفاده همزمان از محیط متخلخل و رقیق سازی مخلوط گازهای ورودی با مواد غیر قابل احتراق با استفاده از برگرداندن بخشی از گازهای خروجی به داخل استوانه<sup>۱۲</sup> (EGR)، حداکثر دمای احتراق را کاهش داد و در نتیجه مقدار (NOx) خروجی از موتور سیکلت‌ها و دیگر آلاینده‌های محیط زیست را کاهش داد. علاوه بر کاهش بیشینه دمای احتراق، (EGR) دمای محیط متخلخل را افزایش می‌دهد که در تبخیر ذرات سوخت مایع، مؤثر است.



شکل ۹: اثر محیط متخلخل بر NOx در بارهای مختلف

با توجه به سوخت آم<sup>۱۳</sup> بودن موتور، با ثابت نگه داشتن مصرف سوخت و اضافه کردن یک محیط متخلخل، عملاً هوای ورودی به موتور در هر دور و به تبع آن نسبت هوا به سوخت در موتور تغییر کرده است. از آنجا که تغییر نسبت هوا به سوخت تأثیر زیاد روی آلاینده‌ها دارد، ممکن است علت تغییر در آلاینده‌ها تغییر نسبت هوا به سوخت باشد نه افزودن محیط متخلخل.

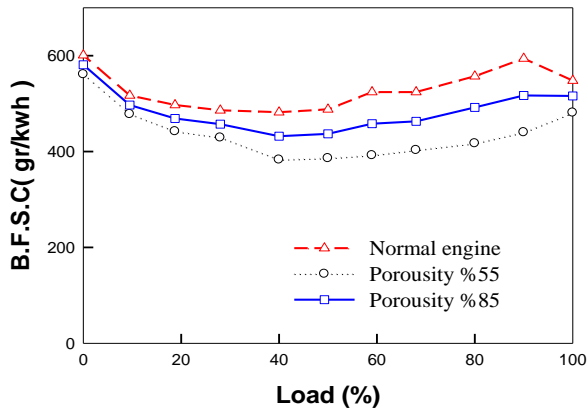
در اینجا لازم به توضیح است که شکل ۱۰ نمودار آلاینده‌های خروجی از موتور را به صورت تابعی از نسبت هم ارزی نشان می‌دهد. از بررسی شکل می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تولید آلاینده‌ها از جمله هیدروکربن‌های نسوخته و منواکسیدکربن در حالت درست<sup>۱۴</sup> با نسبت هم ارزی یک با حفظ بازده احتراق کاهش خواهد یافت و (NOx) افزایش می‌یابد. اما در سایر نسبت‌ها از جمله نسبت‌های بزرگتر از یک به دلیل افزایش سوخت نسبت به هوا (HC, CO) افزایش و مقدار تولید (NOx) به دلیل عدم تشکیل مخلوط همگن و کاهش دمای محفظه احتراق کاهش می‌یابد. اگر با قرار دادن محیط متخلخل در مسیر سوخت و هوا از مقدار شار هوای ورودی کم شود و مخلوط غنی شود.

طبق نمودار درست (HC, CO) باید افزایش یابد و (NOx) کم شود اما با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون، در تمام دوره‌ها (HC, CO) کاهش

<sup>14</sup> Stoichiometric

<sup>12</sup> Exhaust gas recycle (EGR)

<sup>13</sup> Carburetor



شکل ۱۳: اثر محیط متخلخل بر مصرف سوخت ویژه در بارهای مختلف

### ۵- نتیجه گیری

استفاده از محیط متخلخل در موتور احتراق درونی یک راهکار امیدوار کننده برای تحولات بیشتر موتور به خصوص از نقطه نظر کاهش گازهای خروجی آگروز و کاهش مصرف سوخت ویژه است. با توجه به مزایا، معایب و خواص ساختاری محیط متخلخل مناسب ترین روش برای استفاده از محیط متخلخل در موتور احتراق درونی بکارگیری محیط متخلخل در خارج از محفظه احتراق و قبل از دریچه هوا است. در این مقاله اثر استفاده از محیط متخلخل بر متغیرهای عملکردی موتور چهار زمانه موتور سیکلت هوندا ارائه شده است. مهمترین نتایج بدست آمده از این بررسی تجربی عبارتند از:

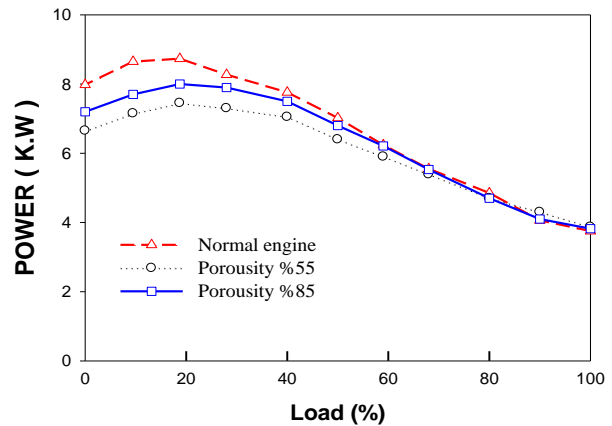
۱- استفاده از محیط متخلخل باعث کاهش نشر هیدروکربن‌های نسوخته (HC) تا ۷۰٪ در تخلخل‌های کم می‌شود. با توجه به دقت اندازه گیری میلیون در ذره<sup>۱۵</sup> (PPM) مقدار کاهش قابل توجه است.

۲- با کاهش تخلخل بیشترین مقدار کاهش منواکسیدکربن (CO) موجود در محصولات احتراق در بارهای ۰٪ تا ۶۰٪ به میزان ۴۰٪ می‌رسد.

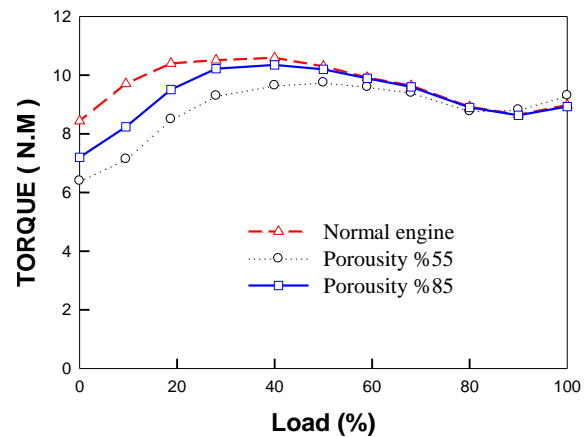
۳- نتایج نشان می‌دهد تأثیر محیط متخلخل بر افزایش اکسیدهای نیتروژن (NOx) بسیار ناچیز است. (NOx) تولیدی در این روش را می‌توان با بهرمندی از روش بازگردانی گازهای خروجی (EGR) تا حد مطلوب کاهش داد.

۴- روش‌هایی که بعد و قبل از محفظه احتراق برای کاهش آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند به دلیل ایجاد مقاومت در مسیر ورود و یا خروج گازها باعث کاهش گشتاور و توان موتور می‌شوند. از جمله مزایای استفاده از محیط متخلخل قبل از محفظه احتراق نسبت به واکنشگر سه راهه، طول عمر و کارایی بیشتر همچنین کاهش هزینه خدمات و نگهداری است.

است. با توجه به نمودار شکل (۱۰) مشخص می‌شود که استفاده از محیط متخلخل اثری بر بار بهینه موتور نداشته است.



شکل ۱۱: اثر محیط متخلخل بر توان موتور در بارهای مختلف



شکل ۱۲: اثر محیط متخلخل بر گشتاور در بارهای مختلف

### ۴-۵- اثر محیط متخلخل بر مصرف سوخت ویژه ترمزی

شکل (۱۳) اثر محیط متخلخل بر مصرف سوخت ویژه ترمزی را نشان می‌دهد. با کاهش تخلخل، مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش، برای تخلخل ۵۵٪ اتفاق افتاده است که مقدار متوسط آن در بارهای ۴۰٪ تا ۹۰٪، برابر ۲۷٪ است.

این کاهش بدلیل پیشگرم شدن مخلوط سوخت و هوا و افزایش بازده احتراق است. نتایج نشان می‌دهند که در بارهای کم تر از ۴۰٪ و بارهای بیش تر از ۹۰٪ استفاده از محیط متخلخل تأثیر چندانی بر مصرف سوخت ویژه ندارد و بیشترین تأثیر آن در بارهای متوسط و زیاد اتفاق می‌افتد. کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی علاوه بر صرفه جویی در مصرف سوخت باعث کاهش گازهای آلاینده محیط زیست و گاز دی‌اکسیدکربن نیز می‌شود.

Brennstoffen, German Patent Application no, DE 2343185, 1975.

[5] G. Brenner, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis, K. Wawrzinek, and T. Weber, Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media, *Combustion and flame*, 123, no. 1: 201-213, 2000.

[6] Mößbauer, Stephan, Franz Durst, Dimosthenis Trimis and Tobias Haas, Zero Emission Engine-a Novel Steam Engine for Automotive Applications, In *Proceedings The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMBURA 2001)*, 473-8, 2001.

[7] L. D. Chien, C. J. Ou and Kwak Yong Hwan, Improving surface characteristics of Porous medium reactor in diesel engine by Plasma technology, F2006C27, 2006.

[8] Weclas, Miroslaw. "Potential of Porous-Media Combustion Technology as Applied to Internal Combustion Engines." *Journal of Thermodynamics* 2010, 2011.

[9] Weclas, M. J. Cypris and TMA Maksoud, Thermodynamic Properties of Real Porous Combustion Reactor under Diesel Engine-Like Conditions, *Journal of Thermodynamics* 2012.

[10] Mujeebu, M. Abdul, MZ. Abdullah, MZ. Abu Bakar, AA. Mohamad and MK. Abdullah, Applications of Porous Media Combustion Technology—a Review, *Applied Energy* 86, no. 9 (2009): 1365-1375 2009.

[11] M. Weclas and F. Durst, Application of Porous Medium Technology to IC Engines as a New Strategy for Reduction of Exhaust Emissions, 3 Int, *Jahrestagung für die Entwicklung von Kleinmotoren, Offenburg, Germany*, 1999

[12] Macek, Jan, and M. Polášek, Via homogeneous combustion to low NOx emission, *Proceedings of EAEC congress-CD-ROM, Bratislava: SAITS*. Vol. 1. 2001.

[13] Liu, Hongsheng, M. Xie, and D. Wu, Thermodynamic analysis of the heat regenerative cycle in porous medium engine, *Energy Conversion and Management* 50.2 (2009): 297-303, 2009.

[14] Buschmann, Gerhard, T. Haas, M. Hoetger and B. Mayr, *Iav's Steam Engine a Unique Approach to Fulfill Emission Levels from Sulev to Zev*, SAE Technical Paper, 0148-7191, 2001.

[15] Liu, Hongsheng, Maozhao and Dan Wu, Thermodynamic Analysis of the Heat Regenerative Cycle in Porous Medium Engine, *Energy Conversion and Management* 50, no. 2: 297-303, 2009.

[16] Willard W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Pearson; 2 edition, 2003.

۵- بیشترین مقدار کاهش مصرف سوخت ویژه در بارهای ۴۰٪ تا ۹۰٪ که بیشترین مورد استفاده را در راندن موتور سیکلت در کلان شهرها دارد اتفاق می افتد.

۶- به منظور بهرمندی از مزایای محیط متخلخل در خارج از محفظه احتراق و پوشش معایب آن با طراحی بهینه این محیط می توان مقدار نشر آلاینده ها و مصرف سوخت ویژه را تا حد مطلوب کاهش داد و از افت گشتاور و توان خروجی از موتور جلوگیری کرد.

### فهرست علائم

$Q$	انتقال حرارت (kj)
$R$	ثابت گاز (kj/kg.k)
$V$	حجم استوانه ( $cm^3$ )
$T$	دما (k)
$W$	کار (kj)
$C_v$	گرمای ویژه در حجم ثابت (kj/kg.k)
$T$	گشتاور (Nm)
$N$	سرعت دورانی (rad/s)
$K$	عدد ثابت
$m^{\circ}_f$	شار جرمی سوخت (kg/s)
$P$	توان ترمزی (kw)

### علائم یونانی

$\eta$	بازده حرارتی (%)
--------	------------------

### زیر نویس ها

$V$	حجم
$f$	سوخت

### مراجع

- [1] Kummer, *Catalysts for automobile emission control*. Progress in Energy and Combustion Science, 6(2): p. 177-199, 1980.
- [2] Bone, A William, Surface Combustion, *Scientific American* 74, 103-105, 1912.
- [3] D. Scherenberg, Einrichtung Zur Kraftstoffaufbereitung Bei Fremdgezündeten Brennkraftmaschinen. *German Patent Application no. DE 2306362*, 1974.
- [4] H. Schladitz and E. Hutzenlaub, Verfahren Und Vorrichtung Zum Verdampfung Von Flüssigen



## Experimental study of porous medium effect on pollutant emissions and fuel consumption for motorcycles

V. Tangestani<sup>1</sup>, A. H. Meghdadi<sup>2,3\*</sup>, B. Mehmandoust<sup>4</sup>, A. Hasandokht<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran, [vahid.tangestani@iaukhsh.ac.ir](mailto:vahid.tangestani@iaukhsh.ac.ir)

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, [amir\\_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir](mailto:amir_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir)

<sup>3</sup> Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran, [mehmandoust@iaukhsh.ac.ir](mailto:mehmandoust@iaukhsh.ac.ir)

<sup>5</sup> Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran, [hasandokht@yahoo.com](mailto:hasandokht@yahoo.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 5 April 2016

Accepted: 5 July 2017

#### Keywords:

Internal combustion engine

Porous medium

Homogeneous combustion

Emissions

Fuel consumption

### ABSTRACT

Increased exhaust emissions and fuel consumption from internal combustion engines is a significant challenge in large cities. One of the most effective way to reduce pollutant emissions in combustion process, is providing the required conditions for homogeneous combustion. Using the porous medium for homogeneous combustion in internal combustion engines has important advantages such as decreasing air pollutions (HC, CO), decreasing the specific fuel consumption and increasing the specific fuel consumption. This paper presents the effect of using the porous medium in the intake manifold of a four-Stroke Honda motorcycle engine with direct fuel distribution. Emissions, specific fuel consumption, engine torque and output power were measured and compared by the performance of the conventional engine. The results show that using the porous medium reduces production (HC, CO) and specific fuel consumption up to 70% and 27% respectively.

