

Original Research

The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine

Sayad Nasiri^{1*}, Hossein Rahimi Asiabaraki², Ehsan Razaghi³

¹Faculty Member, Center for Engineering Skills, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

²Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Shahid Beheshti, Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Alborz, Iran.

³B. Sc., Department of Mechanical Engineering, Sapco Center of Applied Science and Technology, University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.19.2020

Revised: 01.17.2021

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Swirl flow

Combustion efficiency

Multi-size valve

Inlet port

Flow coefficient

***Corresponding Author:**

Sayad Nasiri

Email: nasiri@sharif.edu

ABSTRACT

Antioxidants One of the methods to increase the combustion efficiency in an internal combustion engine is to create swirl flow. In EF7 engine, there are two inlet valves per cylinder so small amount of swirl flow may be created. Most of the conventional methods for generating vortex current, even used in new engines, require major design and modifications of cylinder head, and their costs are significant. In this study, a new low-cost method was developed to create vortex flow. The goal of the changes is to develop inlet flow difference between the two inlet valves led to develop swirl flow in the cylinder in order to increase the combustion efficiency provided that the flow coefficient doesn't face a loss. First, the swirl flow in an EF7 engine was measured at steady state and then the intended changes was implemented on the two ends of the cylinder head. After that, all valves sits' angle were fabricated in accordance with corresponding standards. Then, this method was experimentally evaluated using the flow bench test so that in addition to measure the accuracy of swirl flow, the swirl flow coefficient can be compared with other methods such as flow control valve. The results show that there is a minor reduction in flow coefficient for low valve lifts, but it can be gained an acceptable amount of swirl flow for high valve lifts with minor costs and changes for cylinder head in comparison with other designs.

تأثیر سیستم سوپاپ چند اندازه‌ای بر موتور EF7 پایه گازسوز به منظور بهبود جریان گردابه

صیاد نصیری^{۱*}، حسین رحیمی آسیابریکی^۲، احسان رزاقی^۳

- ۱- عضو هیئت علمی، مرکز آموزش مهارت‌های مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۳- کارشناسی، دپارتمان مهندسی مکانیک، مرکز آموزش علمی - کاربردی ساپکو، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از راه‌های افزایش راندمان احتراق، ایجاد جریان گردابه در موتور است. در موتور EF7 به دلیل استفاده از دو سوپاپ ورودی به‌ازای هر سیلندر، جریان گردابه‌ای ناچیزی در سیلندر وجود دارد. بیشتر روش‌های موجود برای ایجاد جریان گردابه که در موتورهای جدید نیز استفاده می‌شوند، به طراحی و تغییرات اساسی در سرسیلندر احتیاج دارند و هزینه‌های آن نیز چشمگیر است. در این مقاله، روشی جدید و کم‌هزینه به‌منظور تولید جریان گردابه در سیلندر ارائه شده است. هدف از این تغییرات، ایجاد اختلاف جریان بین دو سوپاپ ورودی در سیلندر و تولید جریان گردابه و در نهایت افزایش راندمان احتراق است، با این شرط که ضریب جریان افت نداشته باشد. ابتدا جریان گردابه داخل موتور EF7 استاندارد، درون آزمایشگاه در شرایط پایا اندازه‌گیری و تغییرات بر دو ناحیه سرسیلندر اعمال شد. سپس تمامی زوایای نشیمن‌گاه سوپاپ به‌صورت استاندارد ساخته شد. پس از آن با استفاده از آزمون میز جریان، عملکرد این روش مورد بررسی قرار گرفت تا علاوه بر صحت ایجاد جریان گردابه، بتوان میزان ضریب جریان گردابه را نسبت به روش‌های دیگری همچون دریچه کنترل جریان مقایسه کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش جزئی ضریب جریان در گشودگی‌های کم سوپاپ، می‌توان به جریان گردابه قابل‌قبولی در گشودگی‌های بالای سوپاپ با هزینه کم و تغییرات کم در سرسیلندر نسبت به طرح‌های دیگر دست یافت.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

جریان گردابه
راندمان احتراق
سوپاپ چند اندازه‌ای
راهگاه ورودی
ضریب جریان

*نویسنده مسئول: صیاد نصیری

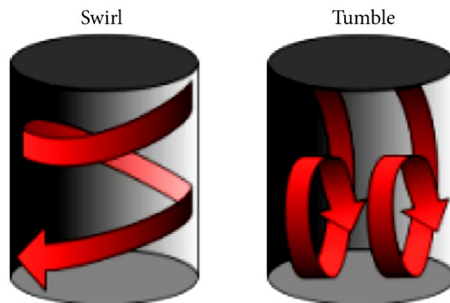
پست الکترونیکی:

nasiri@sharif.edu

مقدمه

امروزه استانداردهای سخت‌گیرانه محیط‌زیست و افزایش قیمت سوخت، بیشتر محققان را بر آن داشته که موتورهای با راندمان احتراق^۱ بالا و آلایندگی کم، طراحی کنند. طراحان به دنبال افزایش گشتاور در سرعت‌های کم موتور به‌وسیله بهینه‌سازی پارامترهایی همچون زمان‌بندی سوپاپ^۲، نسبت تراکم^۳ و چندراهه‌های متغیر^۴ هستند [۱]. زیرا گشتاور بالا در سرعت کم موتور، عاملی است که اکثر خودروهای شهری به آن نیاز دارند.

گشتاور در سرعت‌های کم موتور، تابع میزان هوا و سوخت واردشده به سیلندر است؛ بنابراین هدف از به‌کارگیری سیستم‌های جدید سوپاپ، همانند زمان‌بندی متغیر سوپاپ^۵، افزایش راندمان حجمی^۶ به‌منظور افزایش گشتاور در سرعت‌های کم موتور است. اما یکی از اهداف پژوهشگران، افزایش گشتاور از طریق بهبود راندمان احتراق می‌باشد. مهم‌ترین عامل کنترل فرایند احتراق در موتورهای احتراق داخلی، نحوه حرکت سیال ورودی به داخل سیلندر است [۲]؛ زیرا باعث بهتر سوخته شدن مخلوط سوخت و هوا می‌شود. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که علاوه بر آشفته‌گی معمول، جریان گردابه^۷ و غلتش^۸ نیز در ورود سوخت و هوا به موتور اتفاق می‌افتد. شکل ۱ جریان گردابه و جریان غلتش در داخل یک سیلندر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. جریان گردابه و غلتش درون سیلندر [۳]

در موتورهای چهار سوپاپ معمولی که دارای سیستم جریان گردابه اجباری نیستند، جریان گردابه بسیار ناچیز است اما غلتش به مقدار خوبی وجود دارد. غلتش، معمولاً در گشودگی‌های بالایی سوپاپ که حجم هوای ورودی به سیلندر زیاد است به‌خوبی اتفاق می‌افتد اما زمانی که مقدار هوای ورودی به موتور کم باشد مثلاً هنگام گشودگی کم سوپاپ یا در بارهای جزئی و سرعت‌های کم موتور، این جریان به‌خوبی شکل نمی‌گیرد و نمی‌تواند مؤثر واقع شود [۴]. به‌طوری که لی و همکارانش در مطالعه یک سرسیلندر چهار سوپاپ مجهز به دریچه کنترل گردابه^۹ به این نتیجه دست یافتند که به هنگام باز بودن دریچه، غلتش جریان به‌خوبی وجود دارد، اما این جریان در انتهای کورس تراکم از بین می‌رود. در عوض

¹ Combustion efficiency

² Valve timing

³ Compression ratio

⁴ Variable manifolds

⁵ Variable valve timing (VVT)

⁶ Volumetric efficiency

⁷ Swirl flow

⁸ Tumble flow

⁹ Swirl control valve (SCV)

هنگامی که دریچه بسته است جریان گردابه به مقدار زیادی تا انتهای کورس تراکم وجود دارد و سرعت جریان در سیلندر نزدیک به دو برابر می‌شود [۵].

یکی دیگر از مزایای جریان گردابه، بهبود جریان گاز داخل سیلندر و اختلاط سوخت و هوا در بارهای کم موتور است که باعث افزایش چشمگیر پایداری احتراق در موتورهای احتراق جرقه‌ای می‌شود [۶]. همچنین عبدالله و همکارانش نیز در تحقیق تجربی خود به این نتیجه رسیدند که جریان گردابه باعث افزایش گشتاور، بهبود مصرف سوخت ویژه ترمزی^۱، افزایش سرعت احتراق و کاهش دو درصدی آلاینده CO₂ می‌شود [۷].

چانگ و همکارانش در مطالعه تأثیر جریان‌های داخل سیلندر بر راندمان موتور ۱۵۰ سی‌سی به این نتیجه رسیدند که با استفاده از یک دریچه کنترل جریان، می‌توان جریان گردابه خوبی در موتور به وجود آورد که در بارهای جزئی مصرف سوخت را ۱۲ درصد بهبود می‌بخشد [۸].

پژوهش تجربی لی و همکارانش نشان داد، غلثش و گردابه، هر دو باعث افزایش تبخیر سوخت و اختلاط بهتر می‌شوند و نتایج در عملکرد بهتر استارت سرد، نمود پیدا می‌کند. همچنین به علت افزایش سرعت انتشار شعله می‌توان زمان بندی جرقه را به تأخیر انداخت که با این عمل زمان بیشتری برای تبخیر سوخت و اختلاط سوخت و هوا وجود دارد [۹].

ناگیاما و همکارانش در بررسی جریان گردابه بر احتراق و آلاینده‌گی به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان گردابه، سرعت احتراق افزایش می‌یابد و قابلیت رانندگی و مصرف سوخت را بهبود می‌بخشد [۱۰]. همچنین کاپلان در تحقیق خود بیان کرد که جریان گردابه، غلثش و جریان شعاعی رو به مرکز^۲ باعث افزایش شدت آشفستگی در انتهای مرحله تراکم می‌شوند که این امر منجر به افزایش سرعت شعله آشفته و نرخ احتراق می‌شود [۱۱].

پلک رابک نیز در کتاب خود به این موضوع اشاره کرده که جریان گردابه، باعث افزایش آشفستگی و همگن‌تر شدن آن در تمامی سیلندر می‌شود. از طرفی، آشفستگی زیاد در انتهای مرحله تراکم برای احتراق بسیار مطلوب است؛ زیرا از خوداشتعالی و کوبش^۳ جلوگیری می‌کند [۱۲].

بنابراین می‌توان این نتیجه کلی را گرفت که با افزایش جریان گردابه در یک موتور گازسوز یا بنزینی، سرعت احتراق افزایش می‌یابد و راندمان موتور بهبود می‌یابد و جریان گردابه در سرعت‌های کم موتور، به‌طور مؤثری باعث بهبود احتراق، کاهش آلاینده‌گی و افزایش فشار مؤثر متوسط ترمزی^۴ می‌شود [۱۳]. از طرفی باید به این نکته توجه داشت که افزایش بیش‌از حد جریان گردابه نه‌تنها باعث بهبود احتراق و کاهش آلاینده‌گی نمی‌شود بلکه باعث افت راندمان حجمی در اثر کاهش انرژی جنبشی جریان سیال می‌گردد [۱۴].

همچنین به دلیل استفاده موتور EF7 به عنوان موتور پایه گازسوز، باید این نکته را در نظر گرفت که سرعت احتراق گاز طبیعی، کمتر از بنزین می‌باشد که این مسئله باعث کاهش راندمان موتور به دلیل افزایش انتقال حرارت به دیواره محفظه احتراق که ناشی از افزایش مدت زمان احتراق است، می‌شود که با ارائه راه‌کار جدید برای افزایش جریان گردابه، میزان اختلاط سوخت و هوا، بهبود و سرعت انتشار شعله، افزایش می‌یابد و در نتیجه، میزان انتقال حرارت به سیلندر، کاهش و راندمان حرارتی موتور، افزایش پیدا می‌کند.

بنابراین تمامی تحقیقات و مطالعات، نشان از تأثیرات مثبت جریان گردابه در موتور به خصوص در بارهای جزئی دارد.

¹ Brake-specific fuel consumption (BSFC)

² Squish

³ Knock

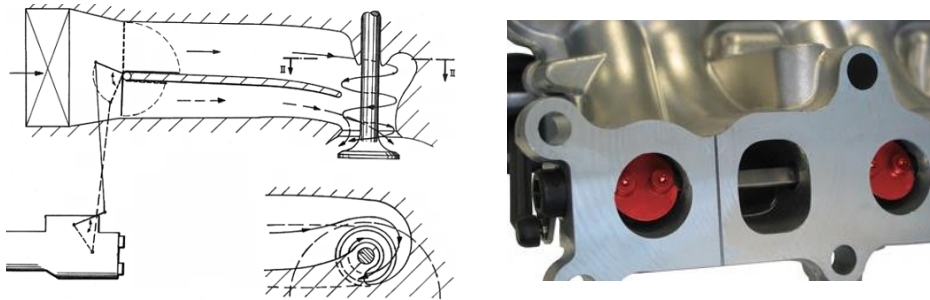
⁴ Brake mean effective pressure (BMEP)

چندین روش برای به وجود آوردن جریان گردابه در موتور استفاده می‌شود که دو روش زیر بیشترین مورد استفاده را دارند: روش اول، تخلیه جریان به صورت مماسی به سمت دیواره سیلندر و روش دوم، ایجاد جریان گردابه و چرخش جریان حول محور سوپاپ، قبل از ورود به سیلندر است. این دو روش در شکل ۲ قابل رؤیت هستند.



شکل ۲. روش‌های اساسی برای به وجود آوردن جریان گردابه [۱۵]

استفاده از راه‌گانه‌های مارپیچی برای ایجاد جریان گردابه و چرخش جریان حول محور سوپاپ، بیشتر در موتورهای دیزلی رایج است و در موتورهای بنزینی برای ایجاد این جریان، از دریچه کنترل جریان گردابه همانند شکل ۳ استفاده می‌شود [۱۴].



شکل ۳. دریچه کنترل جریان گردابه در چندراهه ورودی

علاوه بر دریچه کنترل جریان گردابه، یکی از روش‌های افزایش میزان گردابه، توجه به طراحی میل سوپاپ است؛ چنان‌که طراحی میل سوپاپ به گونه‌ای باشد که سوپاپ هرچه سریع‌تر به مقدار ماکزیمم گشودگی خود برسد، جریان گردابه قوی‌تری درون محفظه سیلندر ایجاد خواهد شد [۱۶].

پی‌پی‌تن و همکارانش در بررسی و مقایسه استفاده از دریچه کنترل جریان گردابه و اختلاف گشودگی سوپاپ برای تولید جریان گردابه به این نتیجه رسیدند که هر دو روش مؤثر هستند اما مکانیزم اختلاف گشودگی سوپاپ که مقدار سطح اطراف سوپاپ را کنترل می‌کند، مقدار نابالانسی بیشتری در جریان به وجود می‌آورد که تأثیر بیشتری دارد و دارای محدوده کارکرد بیشتری نسبت به دریچه کنترل جریان گردابه است [۱۷].

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که هدف از به‌کارگیری سیستم‌هایی مثل دریچه کنترل جریان گردابه یا اختلاف گشودگی سوپاپ توسط پژوهشگران، ایجاد نابالانسی در جریان هوای عبوری از راه‌گانه‌های ورودی^۱ سرسیلندر است. در پژوهش حاضر، دستیابی به روشی برای ایجاد جریان گردابه در موتور EF7 مدنظر می‌باشد اما ایجاد این روش در موتور

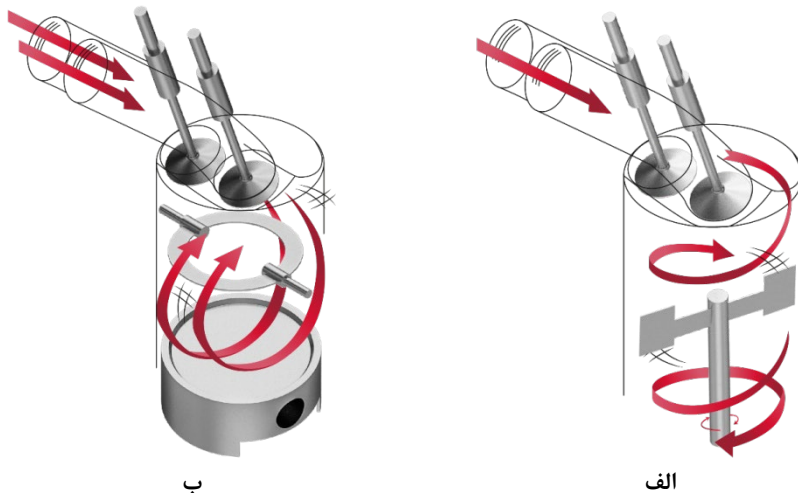
¹ Inlet ports

باید بدون تغییرات اساسی در میل بادامک و استفاده از دریچه کنترل جریان باشد؛ زیرا هزینه تمام‌شده این تغییرات بر موتور، چشمگیر است.

در این پژوهش، برای ایجاد نابالانسی در جریان هوا از طریق تغییر قطر سوپاپ‌های ورودی و شکل راه‌گاه‌های ورودی سرسیلندر به ایجاد جریان گردابه در موتور پرداخته شده است که نسبت به سیستم‌های دیگر مثل سیستم متغیر سوپاپ و دریچه کنترل جریان گردابه، هزینه کمتری دارد. در تحقیق حاضر، این روش به صورت تجربی با استفاده از آزمون میز جریان، بررسی شد تا علاوه بر صحت ایجاد جریان گردابه، بتوان میزان ضریب جریان گردابه را نسبت به روش‌های دیگری همچون دریچه کنترل جریان مقایسه کرد.

روش انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری و بررسی جریان هوای ورودی به موتور، از آزمون میز جریان استفاده شد که به کمک آن می‌توان میزان جریان گردابه و غلشش را با استفاده از سرسیلندر و سوپاپ مشابه اندازه‌گیری کرد. در مراکز تحقیقاتی، عموماً از دو روش برای اندازه‌گیری جریان گردابه یا غلشش استفاده می‌شود: روش اول، اندازه‌گیری سرعت دورانی جریان گردابه با استفاده از چرخ پره‌دار و روش دوم، اندازه‌گیری گشتاور اعمالی جریان گردابه با استفاده از یک هندسه لانه زنبوری می‌باشد [۳]. در این پژوهش، اندازه‌گیری جریان گردابه، بر مبنای سرعت چرخ پره‌دار^۱ که شماتیک آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود صورت پذیرفت.



شکل ۴. شماتیک میز جریان و چرخ پره‌دار جهت الف: اندازه‌گیری گردابه، ب: اندازه‌گیری غلشش

شدت جریان گردابه با مقدار گشودگی سوپاپ تغییر می‌کند؛ بنابراین از یک سازوکار ویژه همانند شکل ۵ جهت تنظیم مقدار بلند شدن سوپاپ استفاده می‌شود.

¹ Paddle wheel



شکل ۵. تنظیم گشودگی سوپاپ با فید مخصوص و ساعت اندازه گیر

به دلیل تolerانس‌ها و خطاها در فرایند ساخت و تولید، قبل از ایجاد تغییرات روی سرسیلندر مقدار دبی جریان، غلظت و جریان گردابه هر یک از سیلندرها اندازه‌گیری شد؛ زیرا مقادیر مذکور در هر یک از سیلندرها متفاوت است و برای به حداقل رساندن خطای آزمایش، مقادیر داده‌ها به صورت دقیق ثبت گردید. جدول ۱ مشخصات موتور تحت آزمایش را نشان می‌دهد.

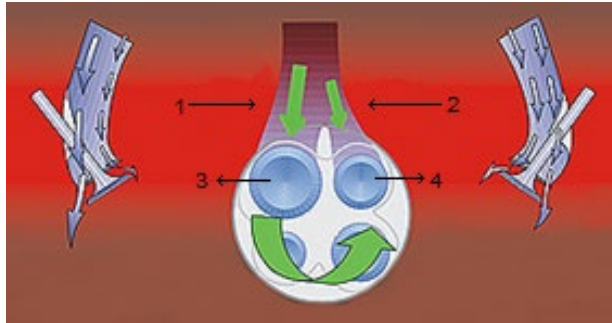
جدول ۱. مشخصات موتور تحت آزمایش

ردیف	موضوع	مقدار	واحد
۱	حجم موتور	۱۶۴۸	سی‌سی
۲	قطر سیلندر	۷۸/۶	میلی‌متر
۳	کورس پیستون	۸۵	میلی‌متر
۴	مدت مکش هوا	۱۹۸/۷	درجه
۵	حجم محفظه احتراق	۳۶/۲	سی‌سی
۶	نسبت تراکم	۱۱/۲:۱	
۷	قطر سوپاپ ورودی	۳۱/۳	میلی‌متر

پیش از ایجاد تغییرات، میزان مقادیر مجاز و فواصل ایمن سرسیلندر در نظر گرفته شد. بر مبنای سطح مؤثر سوپاپ‌های ورودی، یکی از دو سوپاپ ورودی ۱ میلی‌متر بزرگ‌تر و دیگری ۱ میلی‌متر کوچک‌تر طراحی شدند. دلیل انتخاب این مقدار اختلاف در اندازه دو سوپاپ، محدودیت در ابعاد محفظه احتراق و جای‌گذاری نشیمن‌گاه سوپاپ جدید می‌باشد. در این روش، با ثابت نگه‌داشتن سطح مؤثر سوپاپ‌های ورودی، اختلاف اندازه در سوپاپ نیز به وجود آمد. سپس سوپاپ‌های جدید با رعایت تolerانس‌های ساخت ساخته شدند. با توجه به تغییرات صورت گرفته روی سوپاپ، نشیمن‌گاه سوپاپ نیز طراحی و ساخته شد و به صورت انطباقی در سرسیلندر، جای‌گذاری گردید و طی فرایند تراش هم‌مرکز، سوپاپ‌ها با نشیمن‌گاه خود آب‌بندی شدند. شایان ذکر است که در طراحی سوپاپ و نشیمن‌گاه ورودی، هیچ‌یک از زوایای

¹ Concentric turning

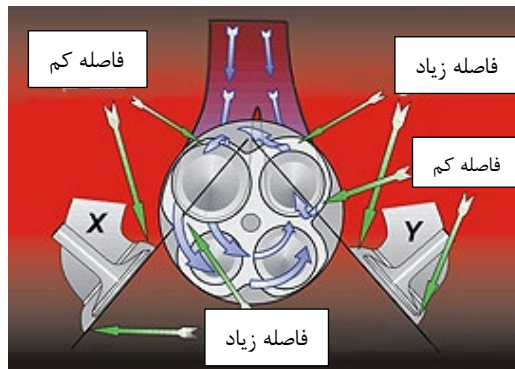
ساخت قبلی تغییر نکردند و تراش سه زاویه نشیمن‌گاه^۱ نیز در ساخت رعایت گردید. در گذرگاه ورودی با ابزار آلات ویژه، انحنا با شعاع بیشتر در سمت دیواره‌ی بلند سوپاپ بزرگ‌تر و انحنا با شعاع کوچک‌تر در سمت دیواره سوپاپ کوچک‌تر ایجاد گردید. شکل ۶ نحوه تغییرات قطر سوپاپ و انحنا‌ی راه‌گاه ورودی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. تغییرات انحنا در راه‌گاه ورودی (۱-۲) و تغییرات قطر سوپاپ (۳-۴)

به علت آنکه برای سوپاپ کوچک‌تر، از نشیمن‌گاه کوچک‌تری استفاده شد، لبه نشیمن‌گاه در راه‌گاه ورودی به صورت یک پله ظاهر گردید که وجود این پله باعث ایجاد آشفتگی در جریان هوا می‌شود و با اصول سیالاتی طراحی موتور، تضاد دارد. به همین دلیل، برای اینکه وجود این پله، نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار ندهد، خمیر سیلیکون و چسب رزین به صورت قالب ثابت در راه‌گاه ورودی جایگذاری گردید و سپس طبق انحنا‌ی طراحی قبلی، تغییرات روی مواد قالب‌گیری شده در راه‌گاه دوباره اعمال شد.

هندسه محفظه احتراق نیز بر تولید جریان گردابه تأثیر دارد و باید که محفظه احتراق نیز متناسب با تغییرات سوپاپ هماهنگ گردد. طبق شکل ۷ در طرفی از سوپاپ که جریان برای ایجاد گردابه نیاز به تقویت دارد، دیواره محفظه احتراق از لبه سوپاپ فاصله‌دار طراحی گردید و در سمت سوپاپ کوچک‌تر که جریان با حرکت گردابه تناقض دارد دیواره محفظه احتراق، فاصله کمی دارد.



شکل ۷. ایجاد تغییرات در محفظه احتراق و لبه سوپاپ

¹ Three angle seat cut

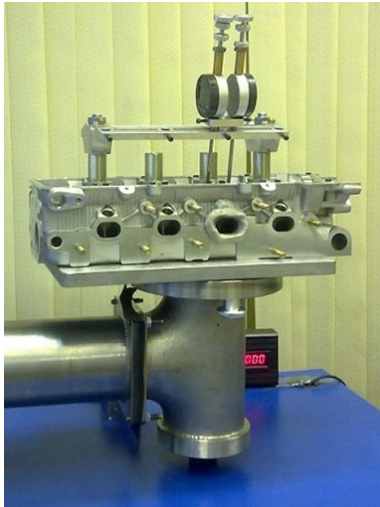
(در شکل بالا در مناطقی از محفظه احتراق که نیاز به تقویت جریان برای ایجاد جریان گردابه بوده، فاصله بین لبه سوپاپ و دیواره محفظه افزایش یافته است)
 شکل ۸ نمای نهایی از کار انجام شده در سرسیلندر را نشان می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات انجام شده در سرسیلندر جدید

اندازه‌گیری گردابه و ضریب جریان

تعیین طبیعت جریان گردابه در یک موتور واقعی در حال کار، بسیار مشکل است؛ بنابراین اغلب برای تعیین گردابه، از آزمایش‌های جریان پایدار^۱ درون دستگاه چرخش‌سنج، استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده هوا به‌صورت یکنواخت از سوپاپی که روی سرسیلندر قرار گرفته است، به درون محفظه‌ای که معادل با محفظه سیلندر است عبور داده می‌شود و در انتهای این محفظه سیلندر، توربین سبکی قرار دارد که می‌تواند به‌آسانی حول محور سیلندر دوران کند [۱۸].



شکل ۹. نصب سرسیلندر روی میز جریان و آزمایش جریان

^۱ Steady flow

در دستگاه‌های چرخش‌سنج برای اندازه‌گیری، یک ضریب گردابه^۱ تعریف می‌شود که اساساً مقایسه‌ای بین ممنتوم زاویه‌ای جریان با ممنتوم محوری‌اش می‌باشد. بر این اساس، ضریب گردابه در چرخش‌سنج توربینی، به صورت رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$C_S = \frac{B \omega_p}{V_0} \quad (1)$$

در این رابطه B قطر سیلندر، V_0 سرعت محوری و ω_p سرعت زاویه‌ای توربین است که سرعت زاویه‌ای از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\omega_p = 2\pi N_p \quad (2)$$

در رابطه فوق N_p ، سرعت دورانی توربین است. همچنین سرعت محوری در رابطه ۱ می‌تواند از رابطه ۳ به طور تقریبی و با خطای قابل قبول در شرایط پایدار با استفاده از رابطه افت فشار در جریان‌های تراکم‌ناپذیر محاسبه شود.

$$V_0 = \left[\frac{2(P_0 - P_C)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3)$$

اگر رابطه موجود برای جریان‌های تراکم‌پذیر استفاده شود، با فرض ایزنتروپیک بودن جریان هوا در شرایط گاز ایده‌آل رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$V_0 = \left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma - 1)} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

که P_C فشار درون سیلندر و P_0 و V_0 به ترتیب فشار و سرعت در بالادست جریان (قبل از سوپاپ ورودی) است که با توجه به فشار داخل سیلندر و نسبت گرماهای ویژه (γ) محاسبه می‌شود [۱۵]. برای به دست آوردن نسبت گردابه^۲ که در زمان مکش اتفاق می‌افتد از رابطه ۵ استفاده می‌گردد.

$$R_S = \pi \eta_v B L \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} (A_v C_f) C_S \, d\theta}{\left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} (A_v C_f) \, d\theta \right]^2} \quad (5)$$

که در آن B قطر سیلندر، L کورس موتور و θ_1 و θ_2 زمان‌بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورودی هستند. برای دستیابی به هدف موردنیاز در پژوهش، به اندازه‌گیری ضریب جریان برای مقایسه نتایج و کارایی سیستم احتیاج داریم. ضریب جریان، به حداقل سطح جریان در راه‌گاه یا سطح داخلی نشیمن‌گاه سوپاپ مربوط می‌شود و به صورت نسبت نرخ جریان واقعی به نرخ جریان تئوری، تعریف می‌گردد [۱۵]. ضریب جریان با افزایش گشودگی سوپاپ افزایش می‌یابد که این ضریب با هندسه راه‌گاه محدود می‌شود و زمانی که فاصله لبه نشیمن‌گاه و سوپاپ زیاد باشد، محدودیت

¹ Swirl coefficient

² Swirl ratio

جریان به گلویی سطح راه‌گاہ وابسته می‌شود. به دلیل اینکه درصد زیادی از شارژ هوای ورودی در گشودگی‌های زیاد سوپاپ، اتفاق می‌افتد، تأثیر ضریب جریان بر راندمان حجمی موتور، بسیار مهم است [۱۹]. استفاده از ضریب جریان، به تنهایی نمی‌تواند اختلاف ظرفیت جریان در گشودگی‌های کم سوپاپ را به آسانی نشان دهد؛ زیرا مقدار ضریب جریان در گشودگی‌های کم سوپاپ، بسیار کوچک است. برای محاسبه ضریب جریان از روابط ۶ و ۷ استفاده می‌شود.

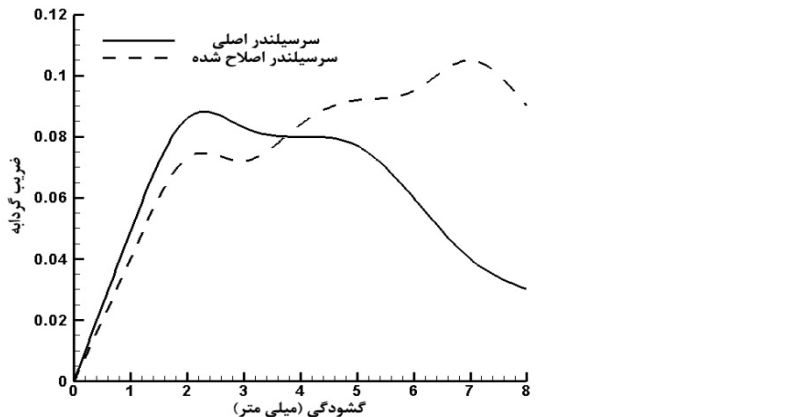
$$C_f = \frac{\dot{m}}{\rho V_0 A_v} \quad (۶)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad A_v = \frac{\pi D^2}{4} \quad (۷)$$

نتایج و بحث

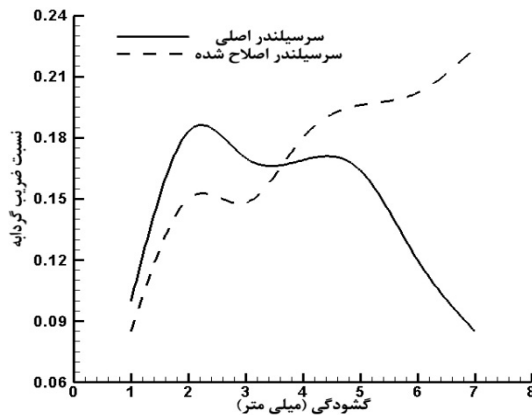
در این پژوهش، هدف افزایش جریان گردابه می‌باشد اما دستیابی به این هدف، زمانی موردقبول است که راندمان حجمی موتور در سیستم سوپاپ جدید، کاهش پیدا نکند. محققان برای رسیدن به اهداف خود در دستیابی به راندمان احتراق و کاهش مصرف سوخت، ناچار به استفاده از سیستم‌هایی برای تولید جریان گردابه در سیلندر هستند، حتی اگر ایجاد جریان گردابه باعث کاهش ضریب جریان در سرسیلندر شود. نتایج به دست آمده از آزمون میز جریان به شرح زیر است:

با اندازه‌گیری مقدار چرخش توربین و محاسبه ضریب گردابه می‌توان سیستم سوپاپ معمولی و سیستم سوپاپ جدید را در شکل ۱۰ مقایسه کرد.



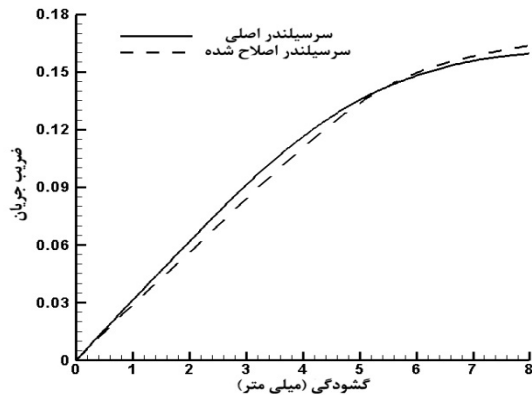
شکل ۱۰. مقایسه ضریب جریان گردابه در سیلندر

شکل ۱۱ اطلاعات لازم برای مقایسه نسبت جریان گردابه در آزمایش را برحسب رابطه ۵ نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱. مقایسه نسبت جریان گردابه در دو حالت اصلی و اصلاح شده

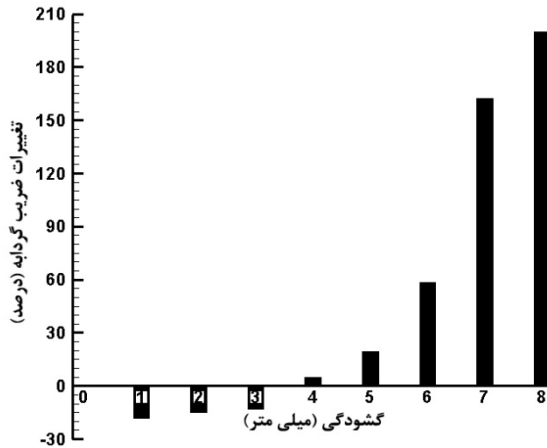
مقایسه نتایج حاصل از ضریب جریان در سرسیلندر استاندارد و سرسیلندر با سیستم جدید سوپاپ را می توان در شکل ۱۲ بررسی کرد.



شکل ۱۲. مقایسه ضریب جریان در دو سرسیلندر اصلی و اصلاح شده

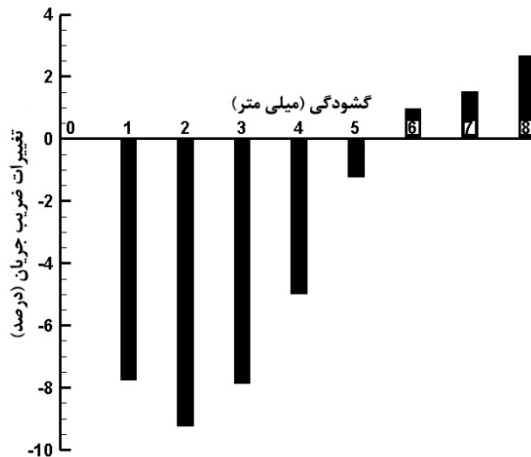
استخراج مقادیر ضریب جریان حاصل از آزمایش نشان می دهد که مقدار جریان گردابه برای سرسیلندر اصلی در گشودگی ۲ میلی متر به حداکثر مقدار خود می رسد و در گشودگی های بالاتر، روند نزولی دارد که این روند نزولی در گشودگی های ۵ الی ۷ میلی متر بیشتر نمود پیدا می کند. اما پس از اعمال تغییرات در سرسیلندر و اندازه گیری پارامترهای مختلف سیستم سوپاپ جدید، نتایج به این صورت حاصل می شود که مقدار ضریب جریان گردابه، در گشودگی ۱ میلی متر نزدیک به ۱۸ درصد نسبت به سرسیلندر اصلی کاهش می یابد که در گشودگی های ۲ الی ۳ میلی متر این مقدار به ۱۳ تا ۱۵ درصد کاهش می رسد. در گشودگی ۴ میلی متر که در سرسیلندر اصلی جریان گردابه شروع به افت شدید می کند، سرسیلندر جدید، روند افزایشی جریان گردابه را به وجود می آورد؛ به طوری که با بررسی درصد تغییرات جریان

گردابه بر حسب گشودگی که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود می‌توان دریافت که در گشودگی‌های ۵ الی ۷ میلی‌متر، بین ۲۰ تا ۱۶۰ درصد تغییر ضرب جریان وجود دارد و در گشودگی ۸ میلی‌متر این مقدار به ۲۰۰ درصد افزایش می‌رسد.



شکل ۱۳. درصد تغییرات ضرب جریان بر حسب گشودگی

در مورد ضرب جریان نیز همان‌طور که گفته شد این ضرب در گشودگی‌های کم سوپاپ، به‌طور خاص، تابع طراحی لبه سوپاپ و نشیمن‌گاه آن است. بررسی سرسیلندر اصلی نسبت به سرسیلندر جدید با توجه به شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در گشودگی‌های ۱ الی ۵ میلی‌متر ضرب جریان بین ۱/۴ تا ۹/۲ درصد کاهش و در گشودگی‌های ۵ الی ۸ میلی‌متر به مقدار ۱/۳۶ تا ۲/۵ درصد افزایش یافته است. اگرچه با سیستم جدید سوپاپ، ضرب جریان در گشودگی‌های کم کاهش داشته ولی از آنجاکه بیشترین حجم مخلوط ورودی به سیلندر در گشودگی‌های بالای سوپاپ اتفاق می‌افتد [۱۹]، ضرب جریان نیز در گشودگی‌های بالای سوپاپ افزایش داشته است و این افزایش ضرب جریان، با توسعه راه‌گاه ورودی حاصل شده است؛ زیرا ضرب جریان در گشودگی‌های بالای سوپاپ، محدود به ابعاد و گلوبی داخلی راه‌گاه می‌شود.



شکل ۱۴. درصد تغییرات ضرب جریان بر حسب گشودگی

شایان ذکر است که سرعت توربین در این سیستم به حدود ۶۵۰ دور بر دقیقه می‌رسد و در مقایسه با راه‌گاه موتورهایی که دارای یک سوپاپ ورودی یا دریچه کنترل جریان گردابه هستند و مقدار چرخش توربین به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد کمتر است. در این پژوهش، هدف، دستیابی به جریان گردابه با کمترین میزان تغییرات و هزینه است؛ به‌نحوی که فقط با تغییر قطر سوپاپ و زوایای راه‌گاه ورودی می‌توان به مقدار جریان گردابه خوبی دست‌یافت.

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، ایجاد اختلاف جریان بین دو سوپاپ ورودی در سیلندر و تولید جریان گردابه و در نهایت افزایش راندمان احتراق بود. نتایج نشان می‌دهند که با ایجاد اختلاف اندازه در سوپاپ‌های ورودی می‌توان در جریان ورودی به سیلندر نابالانسی ایجاد کرد که وجود این نابالانسی، باعث تولید جریان گردابه در سیلندر می‌شود. پس از اعمال تغییرات روی سرسیلندر، جریان گردابه در سیلندر تا گشودگی ۴ میلی‌متری سوپاپ، کاهش، و از گشودگی ۴ میلی‌متر به بعد، جریان گردابه تا ۲۰۰ درصد افزایش یافت. همچنین در سرسیلندر اصلاح‌شده تا گشودگی ۵ میلی‌متر، کاهش ضریب جریان مشاهده شد اما در گشودگی ۵ الی ۸ میلی‌متر، ضریب جریان، افزایش یافت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با هزینه کم و تغییرات ناچیز نسبت به سیستم‌های دیگر برای تولید جریان گردابه می‌توان با این سیستم به جریان گردابه قابل‌قبولی دست‌یافت.

فهرست علائم

A_v	سطح مقطع سوپاپ ورودی (mm^2)
B	قطر سیلندر (mm)
C_f	ضریب جریان
C_s	ضریب جریان گردابه
D_v	قطر سوپاپ ورودی (mm)
L	کورس موتور (mm)
m	دبی جرمی (kgs^{-1})
N_p	سرعت دورانی توربین (RPM)
P_0	فشار بالادست جریان (Pa)
P_c	فشار درون سیلندر (Pa)
R_s	نسبت جریان گردابه
V_0	سرعت بالادست جریان (ms^{-1})

علائم یونانی

γ	نسبت گرماهای ویژه
η	راندمان
θ	زمان‌بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورودی
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ω	سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از مدیریت و پرسنل محترم مرکز تحقیقات موتور ایران‌خودرو که کمال همکاری را در فراهم آوردن امکانات برای اجرای آزمایش‌ها با نویسندگان داشتند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

Reference

- Rahimi. H. (2014). "Investigation of Geometry and Material Properties Effects on the Performance of Intake Manifold", M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran. (In Persian)
- Heywood. J. B. (1987). "Fluid Motion within the Cylinder of Internal Combustion Engines – The 1986 Freeman Scholar Lecture", *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 109(1), 3-35.
- Mohammadebrahim. A. (2016). "Investigation of the in-cylinder swirl flow measurement methods and comparison between them in a cylinder head", *The Journal of Engine Research*, 42(spring 2016), 51-58.
- Mohammadebrahim. A., Shafiei. B., & Kazemzadeh Hannani. S. (2012). "Numerical simulation of in-cylinder tumble flow field measurements and comparison to experimental results", *The Journal of Engine Research*, 26(spring 2012), 11-19.
- Li. Y., Liu. S., Shi. S., & Xu. Z. (2000). "Effect of the Swirl Control Valve on the In-Cylinder Air Motion in a Four-Valve SI Engine", *SAE Transactions, Section 4: JOURNAL OF FUELS AND LUBRICANTS*, 109(4), 2223-2232.
- Zhang. K., Chang. Y., Xie. Z., Sun. T., & Chen. F. (2018). "Effect of intake swirl on combustion performance in an unthrottled spark ignition engine", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(5), 1269-1279.
- Abdalla. A. N., Bakar. R. A., Tao. H., Ramasamy. D., Kadirgama. K., Fooj. B., Tarlochan. F., & Sivaraos. S. (2020). "Effect of swirl at intake manifold on engine performance using ethanol fuel blend", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(1), 73-88.
- Chang. H. T., Huang. C. W., Lin. K. H., & Hu. W. C. (2013, October 8-10). "Effects of Intake System with Swirl and Tumble Valve on the Combustion in a Small Four Stroke Engine", *19th Small Engine Technology Conference (SETC)*, Taipei, Taiwan.
- Lee. S., Tong. K., Quay. B. D., Zello. J. V., & Santavicca. D. A. (2000). "Effects of Swirl and Tumble on Mixture Preparation During Cold Start of a Gasoline Direct-Injection Engine", *SAE Transactions, Section 3: JOURNAL OF ENGINES*, 109(3), 1783-1796.
- Nagayama. I., Araki. Y., & Iioka. Y. (1977). "Effects of Swirl and Squish on S.I. Engine Combustion and Emission", *SAE Transactions*, 86(2), 990-999.
- Kaplan. M. (2019). "Influence of swirl, tumble and squish flows on combustion characteristics and emissions in internal combustion engine-review", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(2), 83-102.
- Pulkrabek. W. W. (1997). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion engine*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Han. B. H., Suh. J. W., & Kim. W. T. (1991, October 28 - November 1). "Effects of In - Cylinder Swirl on Part Load Performance and Combustion Characteristics in a S.I. Engine", *International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Seoul, South Korea.
- Ramesh Kumar. C., Nagarajan. G. (2012). "Investigation of flow during intake stroke of a single cylinder internal combustion engine", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(2), 180-186.
- Heywood. J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Second Edition, McGraw Hill, New York.
- Kang. K. Y., Reitz. R. D. (1999). "The Effect of Intake Valve Alignment on Swirl Generation in a DI Diesel engine", *Experimental thermal and fluid science*, 20(2), 94-103.
- Pipitone. E., Mancuso. U. (2005). "An experimental investigation of two different methods for swirl induction in a multivalve engine", *International Journal of Engine Research*, 6(2), 159-170.
- Ghazikhani. M., Borjian. S. (2004). "Investigation of Swirl Flow on Reducing Soot Formation in Diesel Engines Cylinder by Using Swirl Meter Unit", *International Journal of Industrial*

- Engineering & Production Research (IJIE) (International Journal of Engineering Science)*, 15(3), 143-155. (In Persian)
19. Xu. H. (2001, March 5-8). "Some Critical Technical Issues on the Steady Flow Testing of Cylinder Heads", *SAE 2001 World Congress*, Detroit, Michigan.