



## توسعه راهگاه بستار یک موتور تزریق راهگاهی پرخوران با هدف بهبود احتراق و عملکرد موتور

امیرحسین پریور<sup>۱</sup>، حمیدرضا فجری<sup>۲\*</sup>، محسن محسنی راد<sup>۳</sup>، امیر مولایی<sup>۴</sup>، محمد نجات<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [A\\_parivar@ip-co.com](mailto:A_parivar@ip-co.com)

<sup>۲</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [H\\_fajri@ip-co.com](mailto:H_fajri@ip-co.com)

<sup>۳</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [M\\_mohsenirad@ip-co.com](mailto:M_mohsenirad@ip-co.com)

<sup>۴</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [A\\_molaei@ip-co.com](mailto:A_molaei@ip-co.com)

<sup>۵</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [M\\_nejat@ip-co.com](mailto:M_nejat@ip-co.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱ دی ۱۳۹۶

پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

حرکت گردبادی با محور افقی

راهگاه هوا

مدت احتراق

### چکیده

بهبود مشخصه های عمومی موتورهای احتراق داخلی یعنی عملکرد تمام بار، مصرف سوخت، آلایندگی و پایداری احتراق، همواره مورد توجه طراحان موتور بوده است. استفاده از پرخوران در کنار مزایای بهبود عملکرد موتور و امکان بهبود مصرف سوخت، تغییراتی در هندسه راهگاه های ورودی بستار را می طلبد و استخراج تمامی مزایای استفاده از پرخورانی، در گرو بهبود احتراق موتور و کاهش تمایل موتور به کوبش است. از جمله ابزارهای مهم در نیل به این هدف، هندسه راهگاه های ورودی موتور است که اساس تولید حرکت سیال داخل استوانه می باشد. در این مقاله توسعه راهگاه های یک موتور تزریق درگاهی پرخوران در کنار تغییر سایر متغیرهای موثر بر سامانه تبادل گاز موتور، مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است. این مقاله به نحوه انجام کار در سه مرحله ی آزمون میز جریان، شبیه سازی سه بعدی و نیز آزمون موتوری می پردازد. هدف تعریف شده در توسعه راهگاه ها، افزایش حرکت گردبادی با محور افقی در کنار حداقل افت ضریب جریان بوده است. نتایج حاصل از آزمون موتوری، حاکی از بهبود طول مدت احتراق نسبت به حالت پایه تا ۳۰٪ و نیز امکان بهبود عملکرد قابل توجه موتور را دارد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

امروزه پرخورانی و افزایش فشار متوسط موثر ترمزی در موتورهای احتراق داخلی و بویژه موتورهای SI، به منظور امکان سبک سازی نسبت دنده ها و لذا کاهش مصرف سوخت و نیز افزایش قابلیت رانندگی، مورد توجه ویژه محققان و طراحان این حوزه قرار گرفته است. افزایش فشار موثر متوسط ترمزی نیازمند بهبود سامانه تبادل گاز موتور در کنار بهبود احتراق آنست. بهبود یکی از این دو به تنهایی مزایای چندانی نخواهد داشت. بطور مثال افزایش مقدار فشار تقویت شده موتور بدون توجه به بهبود احتراق موتور، بدلیل افزایش تمایل به کوبش، بهبود گشتاور چندانی را در پی نخواهد داشت. در این پژوهش یکی از راه کارهای موثر جهت بهبود احتراق یعنی توسعه راهگاه های هوا مورد توجه قرار گرفته است. هدف از توسعه راهگاه هوا در این موتور، دستیابی به حرکت گردبادی با محور افقی بیشتر، در کنار کمترین افت ضریب جریان در راهگاه هواست. بدین نحو که با افزایش میزان حرکت گردبادی تولید شده در راهگاه هوا، میزان حرکت جریان داخل استوانه<sup>۱</sup> نیز تقویت شده و علاوه بر همگن سازی بیشتر در مخلوط سوخت و هوا، میزان انرژی جنبشی حاصل از اغتشاش نیز حین تراکم افزایش خواهد یافت و این مساله خود منجر به افزایش سرعت شعله و نرخ سوختن می شود. افزایش نرخ سوختن خود به تنهایی بهبود کار تولیدی را در پی خواهد داشت اما از مزایای عمده آن، کاهش تمایل موتور به کوبش و لذا امکان افزایش فشار هوای ورودی بدون نگرانی از محدودیت کوبش است.

در تحقیقات زیادی به بررسی رفتار جریان های گردابی درون استوانه و همچنین تاثیرات افزایش این متغیر بر روی عملکرد موتور پرداخته اند، این تحقیقات که بر روی موتورهای دیزل و بنزینی به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی انجام شده، نشان می دهد که بهبود عملکرد موتور از طریق افزایش جریان های گردابی امکان پذیر می باشد. Kurniawan و همکاران [۱] با استفاده از شبیه سازی سه بعدی به بررسی تغییر شکل تاج سمبه<sup>۲</sup> بر روی مقدار جریان های گردابی حول محور افقی<sup>۳</sup> و عمودی<sup>۴</sup> ایجاد شده، انرژی جنبشی اغتشاشی، ویسکوزیته اغتشاش پرداخته اند. این بررسی عددی بر روی یک موتور ۴ درجه بنزینی تزریق مستقیم انجام شده و طبق نتایج این شبیه سازی در طول مرحله ورود هوا، تغییر شکل تاج سمبه می تواند تاثیر بسزایی بر روی مقادیر جریان های گردابی درون استوانه گذاشته که در نهایت بیشترین تاثیر را بر روی همگن شدن سوخت و هوا خواهد گذاشت. Garth و همکاران [۲] نیز با استفاده از شبیه سازی سه بعدی به بررسی جریان های گردابی ایجاد شده در درون استوانه پرداخته اند، این شبیه

سازی بر روی دو موتور بنزینی و دیزلی انجام شده که متغیرهای جریان های گردابی با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج این شبیه سازی، جریان گردابی حول محور عمودی که مهمترین جریان گردابی درون موتور دیزل می باشد، بیشترین مقادیر خود را در گوشه های پایینی استوانه دارد. در موتور بنزینی مورد مطالعه، مقادیر جریان های گردابی حول محور افقی و عمودی مشاهده شده و بیان شده که می توان بر روی بهینه سازی پراکندگی جریان در طی مرحله بازشدن دریچه هوا تحقیقات بیشتری را انجام داد، در این تحقیق، همچنین روش های مختلف مشاهده جریان های درون استوانه با استفاده از نرم افزارهای پس پردازش بیان شده است.

Krishna و Mallikarjuna [۳] با استفاده از روش PIV<sup>۵</sup>، به بررسی جریان های اغتشاشی در درون استوانه موتور پرداخته اند، این بررسی بر روی یک موتور تک استوانه آزمایشگاهی در شرایط موتورگردانی انجام شده است، هدف از انجام این تحقیق، بررسی تاثیرات سرعت بر نوع و مقدار جریان های گردابی درون استوانه بوده و مطابق با نتایج این تحقیق، مقادیر جریان های گردابی در زوایای مختلف درجه میل لنگ دارای مقادیر متفاوتی بوده و انرژی جنبشی اغتشاشی در انتهای مرحله تراکم با افزایش سرعت افزایش یافته که می تواند تاثیراتی را بر روی رفتار احتراق بگذارد. Khalighi [۴] با استفاده از روش PTV<sup>۶</sup> به بررسی جریان های گردابی درون استوانه پرداخته است. این بررسی که بر روی یک موتور بنزینی تک استوانه با دو دریچه هوای ورودی انجام شده به بررسی نسبت تامل در سرعت های مختلف پرداخته است، مطابق کار قبلی Krishna، بیان شده که نسبت تامل با افزایش سرعت ثابت باقی مانده و این مقدار برای موتور مورد نظر ۲/۹ در سرعت های مختلف می باشد. این تحقیق بیان کرده که گردابه ایجاد شده در ابتدای باز شدن دریچه هوا با پایین آمدن سمبه بزرگتر شده تا در نقطه مرگ پایین، قطر این گردابه از قطر استوانه موتور نیز بیشتر می شود. جریان گردابی حول محور افقی ایجاد شده در درون محفظه استوانه، دارای دو ناحیه می باشد، اولین ناحیه نزدیک دیواره استوانه با سرعت زیاد و دومین ناحیه در وسط استوانه با سرعت کمتر ایجاد می شود. با افزایش سرعت موتور ناحیه وسط استوانه با سرعت گردابی کمتر کاهش یافته و پایداری جریان های گردابی افزایش می یابد. Urushihara و همکاران [۵] با استفاده از دو روش LIF<sup>۷</sup> و LDV<sup>۸</sup> به بررسی اثرات حرکات جریان های گردابی حول محور افقی و عمودی بر روی رفتار تبخیر سوخت و لایه بندی مخلوط در یک موتور رقیق سوز پرداخته اند. مطابق با نتایج این تحقیق که مقادیر جریان های گردابی را به طور همزمان محاسبه کرده است، بیان شده که مقادیر زیاد جریان گردابی

5 Particle Image Velocimetry

6 Particle Tracking Velocimetry

7 Laser-induced Fluorescence

8 Laser Doppler Velocimetry

1 Cylinder

2 Piston

3 Tumble

4 Swirl

و آزمون صحه گذاری آن در آزمایشگاه میز جریان مورد نظر بوده و لذا در این مقاله با جزئیات کامل به بررسی آن پرداخته شده است، در مرحله دوم، با بررسی راهگاه توسعه داده شده با شبیه سازی سه بعدی، به بررسی دقیق رفتار جریان درون استوانه و همچنین رفتار احتراقی راهگاه پایه و راهگاه جدید پرداخته شده است، هدف از این بخش بررسی دقیق راهگاه و همچنین مشاهده پدیده های مهم ناشی از تفاوت جریان و احتراق در هر دو راهگاه بوده که نتایج مربوط به آن در ادامه مقاله قابل مشاهده می باشد. در مرحله سوم با ساخت نمونه نهایی بستر با راهگاه جدید، آزمون تمام بار در اتاق آزمون انجام شده تا بتوان بستر نهایی را از نقطه نظر بهبود عملکرد احتراق و همچنین افزایش عملکرد و کاهش مصرف سوخت موتور صحه گذاری نمود.

## ۱- توسعه و ساخت نمونه اولیه راهگاه با جریان گردبادی

### با محور افقی زیاد

#### ۱-۱- روش انجام کار

کلیه تغییرات اعمال شده به جهت به دست آوردن یک هندسه قابل قبول برای تولید جریان گردبادی بیشتر در مرحله اول در آزمایشگاه میز جریان شرکت اپیکو مورد بررسی قرار گرفته تا با بدست آوردن نتایج قابل قبول از این مرحله و صحه گذاری آن، بررسی های بیشتری با استفاده از شبیه سازی و آزمون های موتوری انجام شود.

آزمایشگاه میز جریان با استفاده از یک دستگاه میز جریان قابلیت آزمون بر روی انواع بستار آبه صورت پایا را دارا می باشد، این دستگاه با به وجود آوردن اختلاف فشار در دو طرف ابتدای راهگاه ورودی و انتهای استوانه، امکان حرکت جریان هوا را در داخل راهگاه فراهم نموده و با استفاده از یک پره که در زیر بستر قرار می گیرد میزان چرخش حاصل از حرکت سیال اندازه گیری می شود.

شکل ۱ دستگاه میز جریان برای اندازه گیری حرکت گردبادی است. در این دستگاه قابلیت اندازه گیری حرکت های گردبادی در گشودگی های مختلف دریچه ی هوا وجود دارد. در روش اندازه گیری جریان های گردبادی، در هر گشودگی دریچه هوا با تنظیم یک اختلاف فشار در دو طرف راهگاه ورودی (که برای همه گشودگی ها ثابت می باشد) به صورت پایا از مقادیر چرخش پره که به عنوان میزان جریان های گردبادی مد نظر گرفته شده داده برداری می شود. در طراحی راهگاه جدید، با استفاده از یک جعبه جریان مربوط به راهگاه پایه و همچنین استفاده از ابزارآلات و مواد مختلف به تغییر در سطح راهگاه پرداخته شده است، استفاده از خمیر برای شکل دهی جدید و همچنین استفاده از فرزکاری سطح راهگاه برای ایجاد تغییرات مختلف، مهمترین اقدامات برای به دست آوردن هندسه بهینه می باشد، شکل ۲ جعبه جریان

حول محور عمودی در بعضی از مواقع به نفع لایه بندی مخلوط نمی باشد. این تحقیق بیان کرده مقدار های زیاد جریان های گردبادی حول محور افقی هم بر روی همگن کردن مخلوط و هم بر روی مقادیر اکسیدهای نیتروژن در موتورهای رقیق سوز اثرگذار است، همچنین بیان شده در موتورهای رقیق سوز، جریان گردبادی حول محور افقی اثرات زیادی را بر روی همگن کردن مخلوط درون استوانه در طی زمان جرقه دارد.

Jianwen و همکاران [۶] در تحقیق ارائه شده که به جهت توسعه موتور ۳/۵ لیتری فورد در راستای کاهش مصرف سوخت موتور انجام شده به دنبال بهبود عملکرد موتور از طریق بهینه سازی در سیستم پاشش سوخت، شکل تاج سمبه و طراحی راهگاه ورودی بوده اند. در این مقاله که به جهت توسعه موتور تزریق مستقیم پرخوران انجام شده بیان شده که توسعه راهگاه جدید برای موتورهای پرخوران دارای دو وجه متضاد می باشد، افزایش جریان گردبادی حول محور افقی تاثیرات زیادی را بر روی مسیر حرکت قطرات سوخت و همگن شدن سوخت و هوا در داخل محفظه احتراق خواهد داشت که در نتیجه بر روی نرخ سوختن سوخت، پایداری احتراق، انتقال حرارت بین مخلوط و دیواره استوانه و همچنین شدت کوبش می گذارد ولی از طرف دیگر باعث کاهش در میزان دبی هوای ورودی خواهد شد. در این تحقیق که بر روی ۱۶ نوع مختلف راهگاه ورودی انجام شده، با بهینه سازی نهایی بر روی راهگاه ورودی توانستند فاز احتراق بدون ایجاد کوبش را تا ۵ درجه پیش رسی کرده و همچنین در نهایت پایداری بهتر در احتراق و کاهش دمای گازهای خروجی نیز به دست آمده است. Zhan و Chen (۷) نیز با استفاده از شبیه سازی سه بعدی و آزمایشگاهی به بررسی اثرات افزایش جریان گردبادی حول محور افقی بر روی عملکرد موتور پرداخته اند. در این تحقیق بیان شده که اثرات افزایش جریان گردبادی حول محور افقی بر روی یک موتور بنزینی، تاثیرات زیادی را در بهبود میزان همگنی مخلوط سوخت و هوا و جریانات داخل استوانه می گذارد، تغییرات ایجاد شده بر روی راهگاه نهایی، علاوه بر افزایش انرژی جنبشی اغتشاشی در نزدیکی نقطه سکون بالا، مقدار شدت جریان گردبادی را در طول مدت مرحله مکش و تراکم تا بیش از ۲ برابر افزایش داده که در نهایت موجب افزایش نرخ آزادسازی انرژی و افزایش ماکزیمم فشار درون استوانه و کاهش مدت زمان احتراق شده است.

توسعه راهگاه های هوای موتور EF7 پرخوران ملی که با نام تجاری TC+ شناخته می شود، در سه مرحله مورد بررسی قرار گرفته است، در مرحله اول، بدست آوردن یک هندسه قابل قبول با استفاده از تغییراتی در راهگاه ورودی موتور پایه (Medium Tumble Port) و همچنین طراحی و ساخت نمونه اولیه از راهگاه جدید (High Tumble Port)

<sup>3</sup> Flow Box

<sup>1</sup> Flow-bench Laboratory

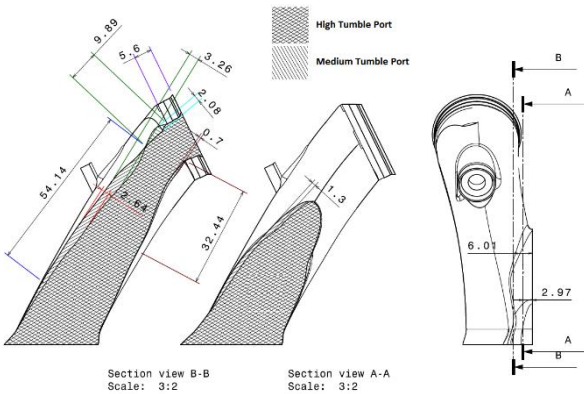
<sup>2</sup> Cylinder Head



شکل ۳: انجام تغییرات بر روی جعبه جریان راهگاه پایه به جهت به دست آوردن هندسه بهینه (با استفاده از خمیر)

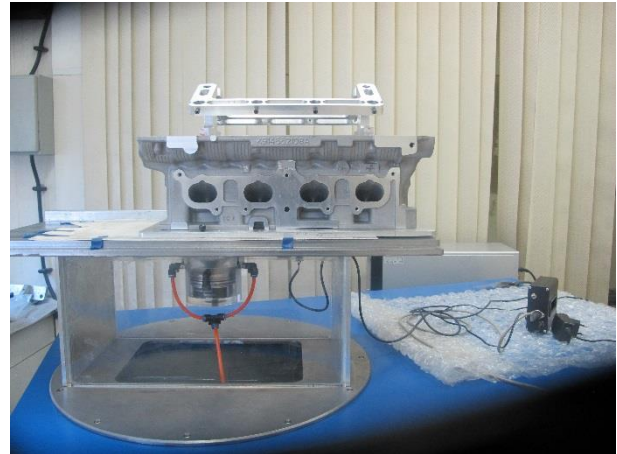
در قدم اول به جهت ساخت نمونه اولیه، طراحی و بهینه سازی راهگاه جدید از نقطه نظر ساخت و تولید بوده و بر همین اساس، بهینه سازی های مختلفی بر روی مدل نهایی این راهگاه با استفاده از نرم افزارهای طراحی سه بعدی انجام شد.

در بخش فرآیند های ماشین کاری در راهگاه جدید در بخش ساخت نمونه اولیه و همچنین بستار نهایی در قسمت تقاطع نشیمنگاه دریچه<sup>۱</sup> و راهگاه، ناحیه تقاطع راهنمای دریچه<sup>۲</sup> و راهگاه و میزان داخل شدن راهنما در راهگاه بهبودهایی در فرآیند ماشینکاری انجام شده است که در بخش ضمیمه می توان مباحث مربوط به آن را مشاهده نمود. در شکل های ۴ و ۵ می توان تفاوت مابین راهگاه پایه موتور EF7 پرخوران و همچنین راهگاه جدید را مشاهده نمود.

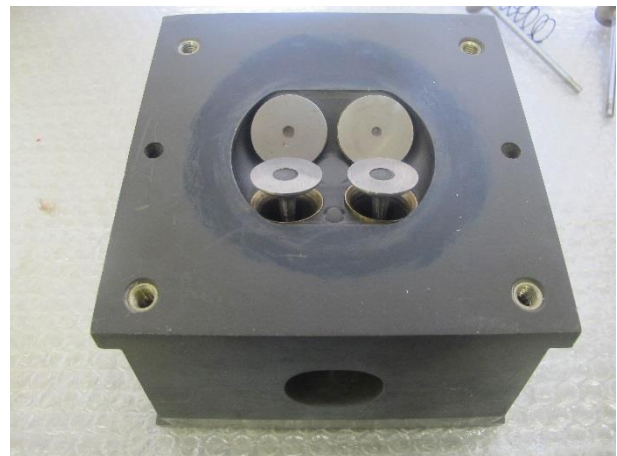


شکل ۴: مقایسه راهگاه پایه موتور با راهگاه جدید (قطاع عبوری از سمت راست راهگاه)

مربوط به راهگاه پایه موتور EF7 پرخوران را نشان می دهد، این جعبه با قابلیت جداسازی سطح بالا و پایین آن، امکان دسترسی آسان به کل راهگاه و به وجود آوردن هرگونه تغییر در سطح هندسه آن را فراهم می نماید.



شکل ۱: دستگاه اندازه گیری حرکت گردبادی



شکل ۲: جعبه جریان راهگاه پایه موتور EF7 پرخوران ملی

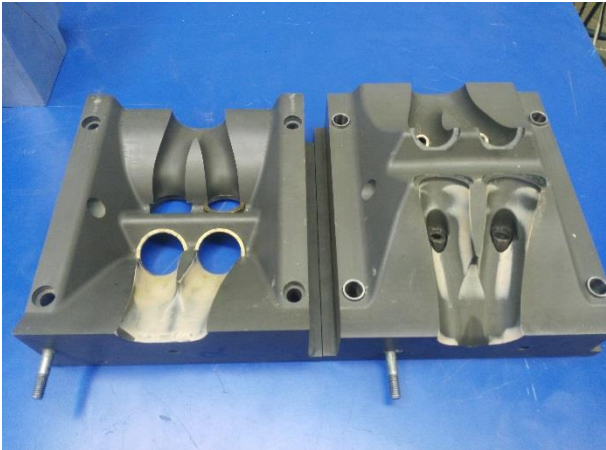
در توسعه راهگاه جدید، تغییرات متعددی در راهگاه پایه موتور ایجاد شده و در آزمایشگاه میز جریان مورد بررسی قرار گرفته است، نمونه ای از ایجاد تغییرات بر روی جعبه جریان مربوط به راهگاه پایه را می توان در شکل ۳ مشاهده نمود.

بعد از تغییرات متعددی که بر روی سطح راهگاه پایه موتور انجام شد و همچنین الگوبرداری از موتور های مختلف روز دنیا و در نهایت با بدست آوردن یک هندسه جدید همراه با اطمینان زیاد برای ایجاد جریان گردابی بیشتر، اقدام به ساخت نمونه اولیه از راهگاه جدید در قالب جعبه جریان شد.

<sup>2</sup> Valve Guide

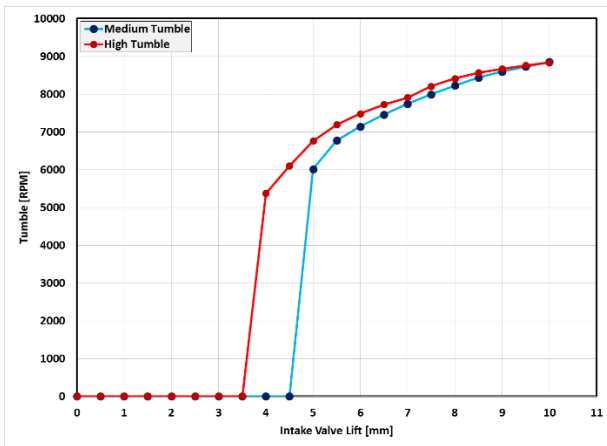
<sup>1</sup> Valve Seat

از چرخش پره و همچنین مقادیر محاسبه شده از میزان دبی عبوری از راهگاه ورودی، داده برداری تا ۲۵ ثانیه انجام می شود (در هر ثانیه ۱ داده ثبت شده و در انتها از ۲۵ داده، متوسط گیری می شود).



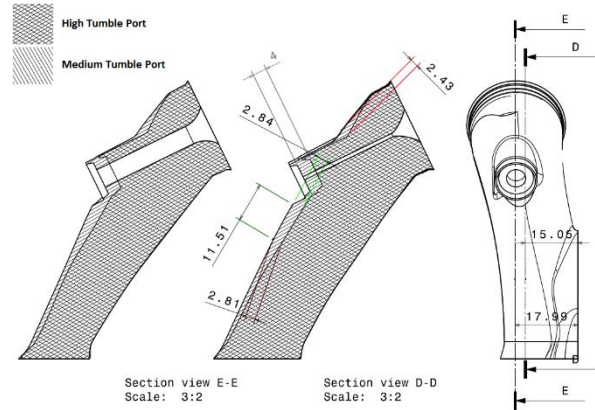
شکل ۷: جعبه جریان باز شده مربوط به راهگاه پایه موتور

نتایج حاصل از آزمون این دو جعبه جریان در شکل ۸ به نمایش درآمده است. مطابق با این آزمون، بهبود عملکرد راهگاه جدید در تولید جریان های گردابی قابل مشاهده می باشد.



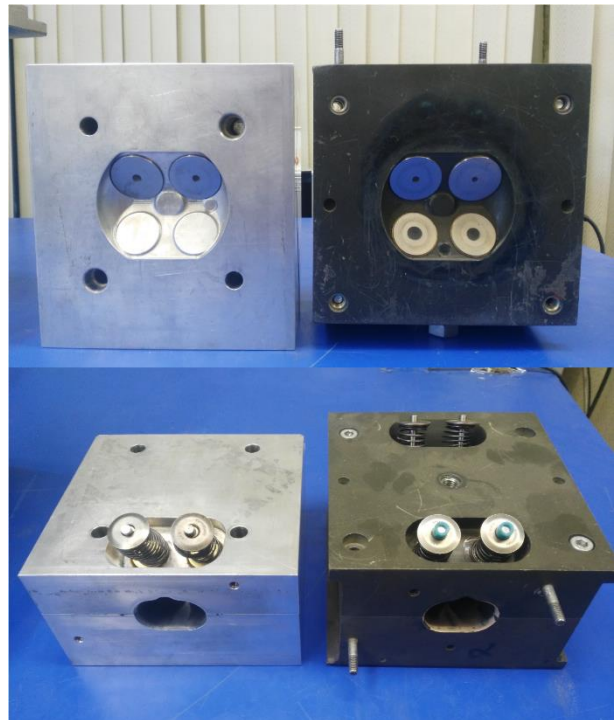
شکل ۸: مقایسه جریان های گردابی (دور بر دقیقه) بر حسب گشودگی های مختلف دریچه هوا در مقایسه هر دو راهگاه

راهگاه جدید از نقطه نظر افزایش بازه تولید جریان های گردابی به نسبت راهگاه پایه موتور دارای بهبود چشمگیر بوده و همانطور که در نتایج آزمون قابل مشاهده می باشد، راهگاه پایه تا گشودگی دریچه ی هوا به مقدار ۴/۵ میلی متر هیچگونه جریان گردابی تولید نکرده و از گشودگی ۵ میلی متری به مقدار ۶۰۰۰ دور بر دقیقه دارای جریان گردابی حول محور افقی استوانه می باشد. با بررسی نتایج مربوط به راهگاه جدید، می توان مشاهده نمود که این راهگاه قابلیت شروع جریان های گردابی را از گشودگی ۴ میلی متری با مقدار ۵۴۰۰ دور بر دقیقه دارا بوده که افزایش بازه تولید جریان های گردابی در راهگاه جدید،



شکل ۵: مقایسه راهگاه پایه موتور با راهگاه جدید (قطاع عبوری از میان دریچه هوا)

۱-۲- نتایج آزمایشگاهی آزمون میز جریان بعد از طراحی فرآیندهای ساخت و تولید راهگاه جدید و همچنین به جهت صحت گذاری بیشتر نتایج حاصل از بهینه سازی اولیه، یک عدد جعبه جریان با راهگاه جدید ساخته شده تا بتوان با راهگاه پایه موتور پرخوران از نقطه نظر میزان جریان های گردابی و همچنین میزان دبی عبوری مقایسه کرد. در شکل ۶ می توان جعبه جریان های مربوط به دو راهگاه پایه و جدید را مشاهده نمود، همچنین در شکل ۷ تصویر باز شده از جعبه جریان راهگاه پایه موتور به نمایش درآمده است.



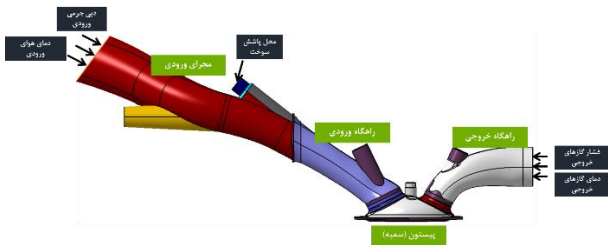
شکل ۶: جعبه جریان مربوط به هر دو راهگاه پایه (راست) و جدید (چپ)

آزمون میز جریان در گشودگی های مختلف دریچه ی هوا از ۱ تا ۱۰ میلی متر انجام شده و در هر گشودگی هوا بعد از پایا شدن نتایج حاصل

در قدم بعدی، بعد از صحنه گذاری نتایج از نمونه اولیه در آزمایشگاه میز جریان، شبیه سازی جریان و احتراق در نرم افزارهای سه بعدی بوده تا بتوان بین رفتار احتراقی و همچنین تغییرات در جریان های گردابی درون استوانه مقایسه ی دقیقی انجام داد و لذا در مرحله دوم هر دو راهگاه پایه و راهگاه جدید موتور EF7 پرخوران مورد شبیه سازی سه بعدی قرار گرفت که نتایج مربوط به آن در ادامه مقاله آورده شده است.

## ۲- شبیه سازی

شبیه سازی جریان و احتراق هر دو راهگاه پایه و جدید در نرم افزار کانونج<sup>(۸)</sup> انجام شده است. در قدم اول، مدل پایه راهگاه موتور پرخوران ملی<sup>۲</sup> از ابتدای مجرای ورودی تا انتهای راهگاه خروجی به صورت ۷۲۰ درجه مدل شده و کلیه شرایط مرزی آن مطابق با نتایج آزمون قرار داده شده است. شکل نهایی مدل شبیه سازی شده را می توان در شکل ۱۰ مشاهده نمود. این مدل شامل بخشی از مجرای ورودی<sup>۳</sup>، راهگاه ورودی<sup>۴</sup>، محفظه استوانه<sup>۵</sup>، دریچه های هوا و دود<sup>۶</sup> و راهگاه خروجی<sup>۷</sup> می باشد. مشخصات کامل موتور پرخوران ملی نیز در جدول شماره ۱ آورده شده است.



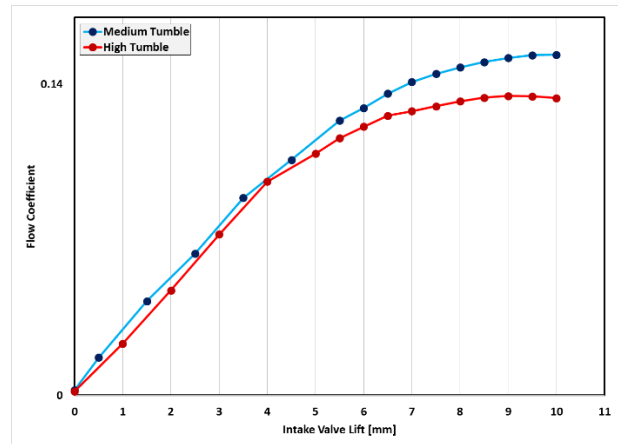
شکل ۱۰: مدل شبیه سازی شده محفظه احتراق به همراه راهگاه های ورودی و خروجی موتور EF7 پرخوران

جدول ۱: مشخصات کامل موتور EF7 پرخوران

حجم جابه جایی	۱/۶۴۹ لیتر
طول مسیر <sup>۸</sup>	۸۵ میلی متر
قطر استوانه	۷۸/۶ میلی متر
نسبت تراکم	۹/۳
تعداد استوانه ها	۴
تعداد دریچه ها بر استوانه	۴
نوع سوخت پاشی	درون راهگاهی
بیشینه گشتاور	۲۴۰ نیوتن متر از دور ۱۶۰۰ تا ۴۵۰۰ دور در دقیقه
بیشینه توان	۱۲۰ کیلووات در ۵۷۵۰ د.د.د

دلالت بر بهبود عملکرد این راهگاه از نقطه نظر میزان جریان های گردابی می باشد.

با مقایسه مقدار مطلق جریان های گردابی در هر گشودگی دریچه هوا نیز می توان مشاهده نمود که راهگاه جدید با افزایش مقدار مطلق جریان های گردابی تا گشودگی دریچه هوا ۸/۵ میلی متری، توانایی خود را در افزایش مقدار مطلق جریان های گردابی نیز نشان می دهد. نتایج مربوط به میزان دبی عبوری از دو راهگاه را می توان در شکل ۹ مشاهده نمود.



شکل ۹: مقایسه ضریب جریان هوای عبوری بر حسب گشودگی های مختلف دریچه هوا در مقایسه هر دو راهگاه

تغییرات در میزان دبی عبوری از راهگاه جدید نسبت به راهگاه پایه به دو دلیل اتفاق می افتد: اولین دلیل به واسطه تغییر در شکل راهگاه جدید می باشد، همانطور که از مقایسه دو راهگاه مشاهده شد کمینه مساحت درون راهگاه در راهگاه جدید نسبت به راهگاه پایه کاهش یافته است که این عامل یکی از عوامل بسیار تاثیر گذار در میزان دبی عبوری از راهگاه می باشد که تاثیرات خود را در گشودگی های بالاتر دریچه هوا بیشتر نشان داده است، به صورتی که می توان کاهش ۱۲ درصدی دبی هوای عبوری را در گشودگی ۱۰ میلی متری مشاهده نمود. دلیل دوم به واسطه مقاومت بیشتر در برابر ورود هوا به داخل استوانه به واسطه افزایش میزان جریان های گردابی می باشد. این افزایش می تواند تاثیرات منفی بر روی میزان دبی عبوری هوا بگذارد. این کاهش دبی هوای عبوری قابل چشم پوشی بوده به دلیل آنکه این راهگاه برای موتور پرخوران جدید است، امکان جبران مقدار دبی هوای ورودی با استفاده از توربوشارژر فراهم می باشد به همین دلیل از نقطه نظر کاهش میزان دبی ورودی به داخل استوانه نگرانی از جهت طراحی راهگاه جدید وجود ندارد.

5 Cylinder

6 Intake and Exhaust Valves

7 Exhaust Port

8 Stroke

1 Converge

2 EF7 Turbo-Charge

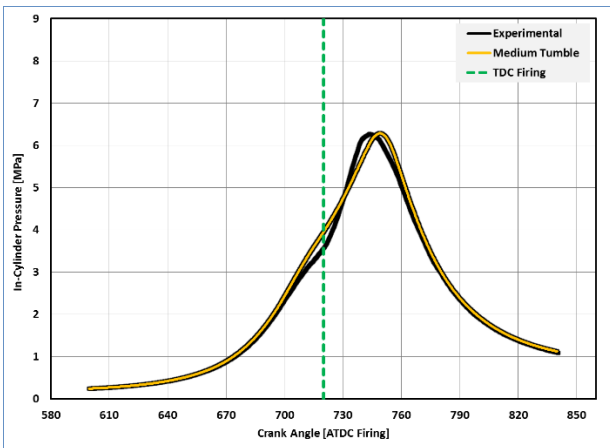
3 Intake Runner

4 Intake Port

جدول ۲: مشخصات عملکردی موتور در سرعت ۵۵۰۰ دور بر دقیقه تمام بار

سرعت	۵۵۰۰ دور بر دقیقه
بار موتور	تمام بار
کل سوخت مصرفی	۶۲ میلی گرم (حبس شده در یک استوانه از یک چرخه کامل)
نسبت هم ارزی سوخت به هوا	۰/۷۶
۱ میلی متر باز شدن دریچه هوا	۳۷۵ درجه بعد از نقطه سکون بالا (احتراق)
۱ میلی متر باز شدن دریچه دود	۱۵۶ درجه بعد از نقطه سکون بالا (احتراق)

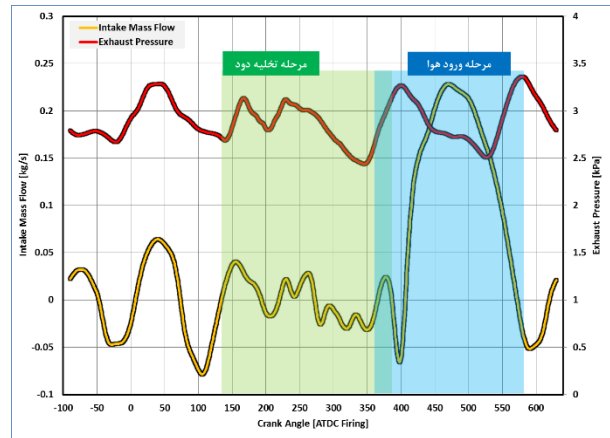
نتایج حاصل از شبیه سازی جریان و احتراق مدل پایه راهگاه موتور پرخوران ملی را می توان در شکل ۱۳ مشاهده نمود. مهمترین متغیری که برای صحنه گذاری مدل شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفته فشار درون استوانه می باشد، همانطور که در شکل ۱۳ به نمایش درآمده، تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه سازی شده و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود.



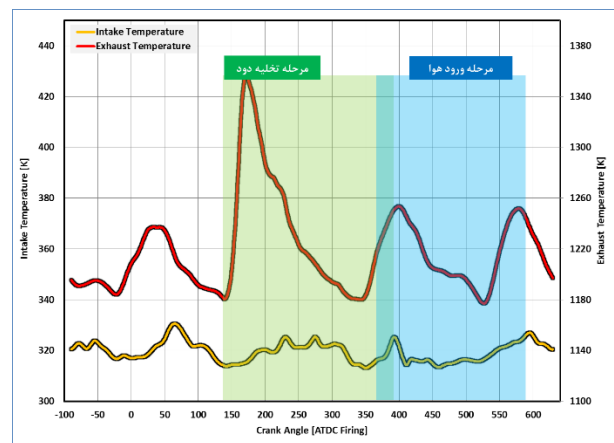
شکل ۱۳: مقایسه فشار درون استوانه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی سه بعدی راهگاه پایه

بعد از حصول اطمینان از قابل قبول بودن نتایج حاصل از شبیه سازی راهگاه پایه موتور پرخوران ملی، مدل راهگاه جدید بدون تغییر هیچ یک از شرایط مرزی و با در نظر گرفتن تمامی متغیرهای مورد استفاده در شبیه سازی مدل پایه، مورد شبیه سازی قرار گرفته که نتایج حاصل از فشار درون استوانه این راهگاه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی راهگاه پایه در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است.

جهت به دست آوردن دقیق کلیه شرایط مرزی ورودی برای این مدل از نرم افزار جی تی پاور<sup>۱</sup> بهره برداری شده است، نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون موتور EF7 پرخوران در نرم افزار جی تی پاور شبیه سازی شده و بعد از صحنه گذاری نتایج حاصل از شبیه سازی جی تی پاور با نتایج آزمایشگاهی، شرایط مرزی مورد نیاز برای شبیه سازی سه بعدی به دست آمده که در شکل های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۱: تغییرات دبی هوای ورودی و فشار دود خروجی حاصل از شبیه سازی جی تی پاور و ورودی به نرم افزار کانورج

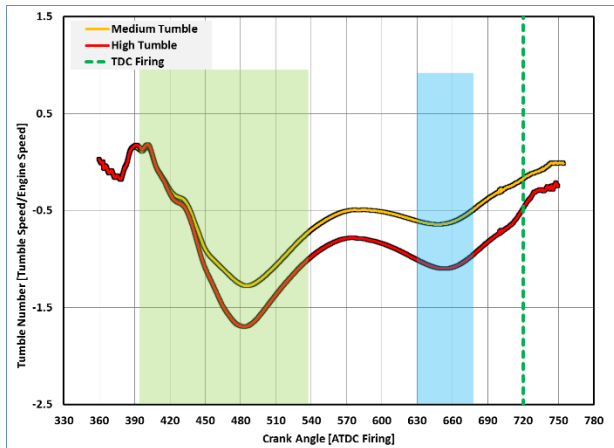


شکل ۱۲: تغییرات دمای هوای ورودی و دمای گازهای خروجی حاصل از شبیه سازی جی تی پاور و ورودی به نرم افزار کانورج

خلاصه ای از مدل های مورد استفاده در شبیه سازی سه بعدی در بخش ضمیمه ۱ مقاله قرار داده شده است. به دلیل بیشینه توان موتور پرخوران ملی در ۵۵۰۰ تمام بار، از داده های این نقطه کاری به جهت شبیه سازی استفاده شده که مشخصات آن در جدول شماره ۲ قرار داده شده است.

<sup>۱</sup> GT-Power

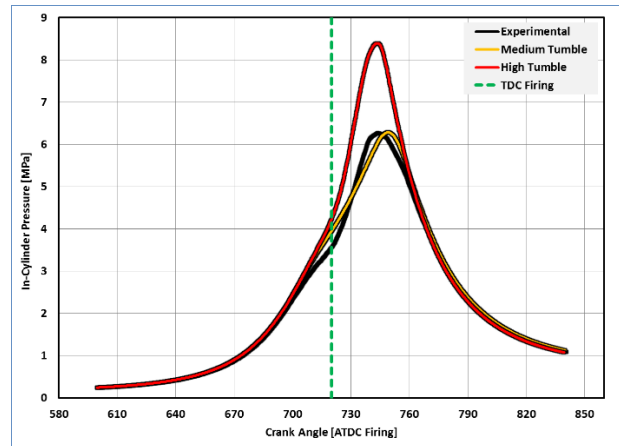
گردابی در محدوده زوایای ۴۰۰ تا ۵۴۰ درجه تاثیرات زیادی را در بهبود ترکیب سوخت و هوا خواهد داشت و همچنین این افزایش در زوایای ۶۳۰ تا ۶۸۰ درجه نیز در بهبود عملکرد احتراق و تبدیل جریان های گردابی بزرگ به جریان های کوچک اغتشاشی به صورت محسوس قابل مشاهده خواهد بود.



شکل ۱۵: مقایسه شدت جریان های گردابی در مقایسه با راهگاه پایه و راهگاه جدید

در ادامه منحنی های مربوط به جریان های گردابی درون استوانه در مقایسه با دو راهگاه حاضر را می توان در شکل های ۱۶ تا ۱۸ مشاهده نمود. این منحنی ها در سه زاویه میل لنگ ۲۰ و ۱۰ و ۰ درجه قبل از نقطه سکون بالا ترسیم شده است، این زوایا جزو مهمترین بخش احتراق بوده و تاخیر در احتراق نیز به علت زمان جرقه در همین زوایا اتفاق می افتد. در کلیه منحنی های ترسیم شده، دو قطاع که از روی هر دو دریچه هوای ورودی عبور می کند به جهت نمایش وضعیت در دو طرف استوانه موتور انتخاب شده است.

آنچه که از منحنی های دو راهگاه قابل مشاهده می باشد، در راهگاه جدید در زمان جرقه جریان های گردابی به صورت محسوس دارای حرکت گردابی مستحکم تر و شدیدتر بوده و در ۲۰ درجه بعد از آن (در نقطه سکون بالا) نیز این جریان گردابی در راهگاه جدید به حرکت خود ادامه می دهد که در راهگاه پایه، این جریان گردابی از بین رفته و صرفاً به یک سری جریان های معشوش در داخل محفظه که به سمت اطراف استوانه در حال حرکت است تبدیل می شود. تداوم این جریان های گردابی و همچنین شدت آن در کوتاه کردن مرحله تاخیر در اشتعال و همچنین مدت زمان احتراق تاثیر بسیار زیاد دارد.



شکل ۱۴: مقایسه فشار درون استوانه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی سه بعدی راهگاه پایه و راهگاه جدید

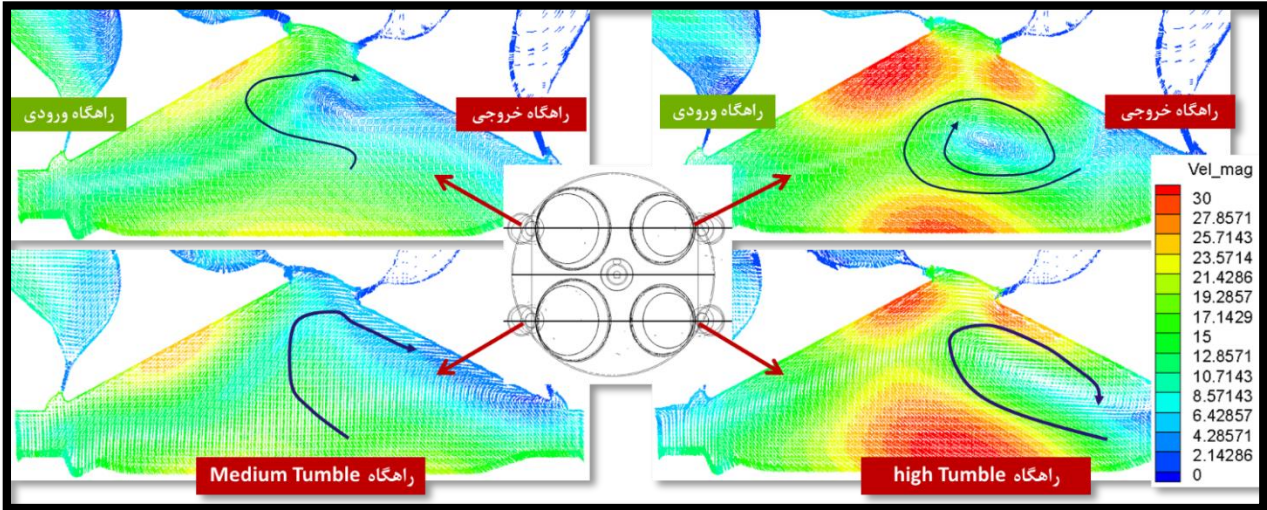
میزان جریان های گردابی ایجاد شده درون استوانه یکی از نتایج حائز اهمیت شبیه سازی سه بعدی می باشد. نتایج حاصل از این جریان های گردابی را می توان در شکل ۱۵ مشاهده نمود. روابط حاکم برای محاسبه این جریان های گردابی در بخش ضمیمه مقاله قرار داده شده است. شدت جریان های گردابی نشان داده شده در شکل ۱۵ به صورت بی بعد بوده و حاصل تقسیم میزان سرعت جریان های گردابی درون استوانه بر سرعت موتور می باشد، این معیار یکی از کاربردی ترین معیارها برای بیان میزان شدت جریان های گردابی درون استوانه می باشد. نمودار جریان های گردابی را می توان به دو بخش عمده تقسیم بندی نمود. بخش اول که مربوط به زوایای ۴۰۰ تا ۵۴۰ درجه بعد از نقطه سکون بالا (نقطه سکون بالا احتراق) می باشد بیشترین تاثیر را در مخلوط شدن سوخت و هوای ورودی به موتور دارد، به دلیل آنکه این زوایا در مرکز مرحله مکش قرار دارد و همچنین این زمان با زمان پاشش سوخت نیز همزمان می باشد، بهبود ترکیب سوخت و هوا را می توان با افزایش مقدار جریان های گردابی در این بخش انتظار داشت. بخش دوم که مربوط به زوایای ۶۳۰ تا ۶۸۰ درجه بعد از نقطه سکون بالا می باشد بیشتر تاثیر را در تبدیل جریان های گردابی زیاد به جریان های کوچک اغتشاشی دارد، میزان و شدت این جریان های کوچک اغتشاشی به طور مستقیم در فرآیند احتراق تاثیر گذار خواهد بود که در ادامه مقاله مشاهده می شود.

با مقایسه جریان های گردابی راهگاه پایه و راهگاه جدید در شکل ۱۵، افزایش شدت جریان های گردابی با استفاده از راهگاه جدید به صورت کاملاً محسوس قابل مشاهده می باشد. افزایش شدت جریان های

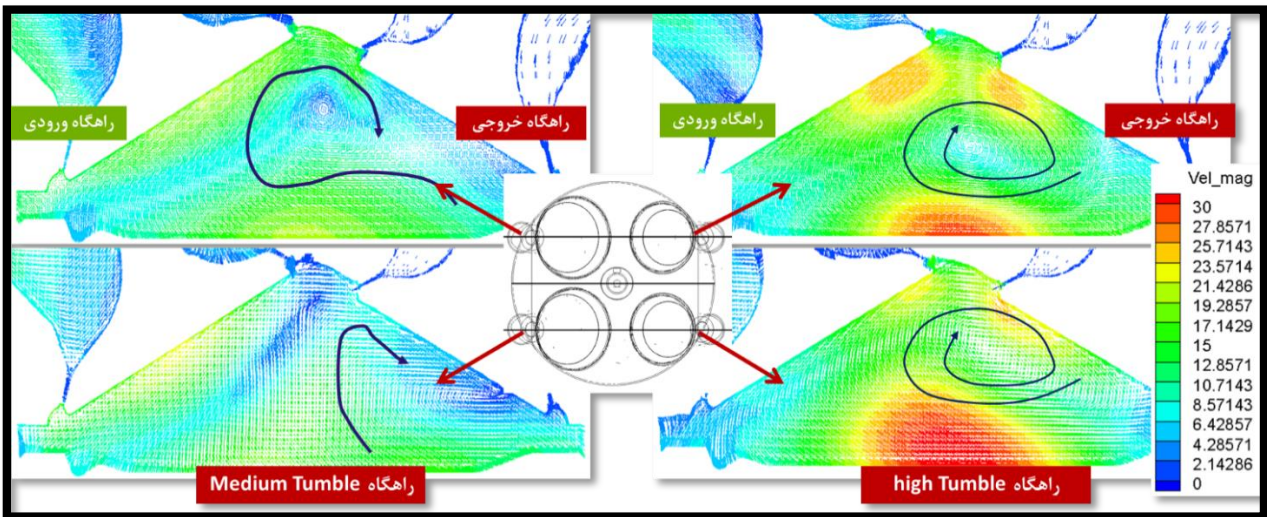
<sup>3</sup> Small Scale Turbulent Flow

<sup>1</sup> Top Dead Center

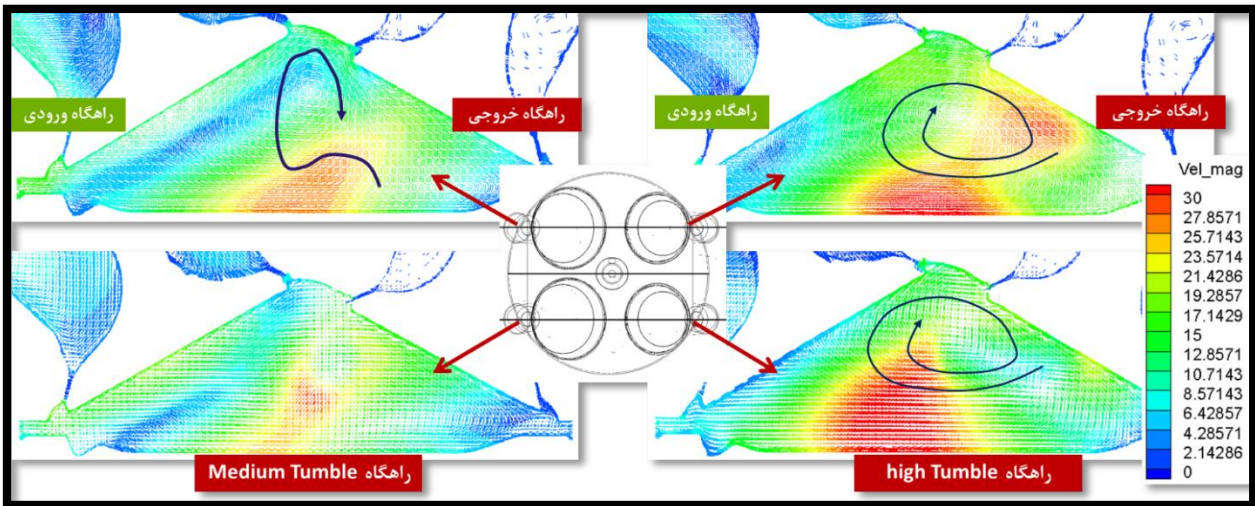
<sup>2</sup> Firing Top Dead Center



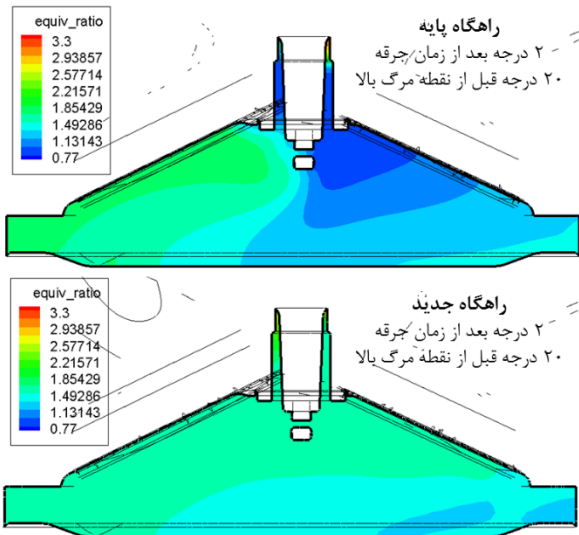
شکل ۱۶: مقایسه منحنی جریان های گردابی در دو مقطع درون استوانه در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید (۲۰ درجه قبل از نقطه سکون بالا)



شکل ۱۷: مقایسه منحنی جریان های گردابی در دو مقطع درون استوانه در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید (۱۰ درجه قبل از نقطه سکون بالا)

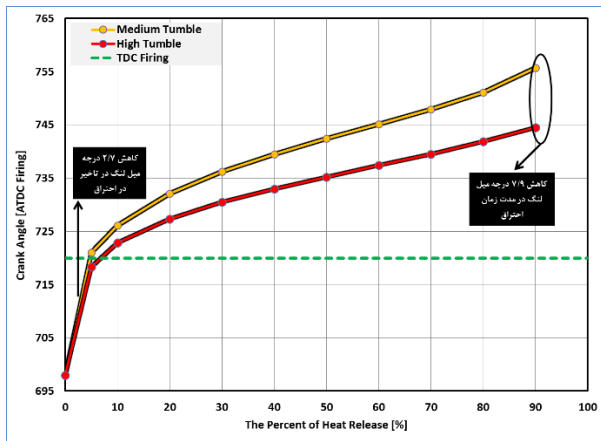


شکل ۱۸: مقایسه منحنی جریان های گردابی در دو مقطع درون استوانه در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید (نقطه سکون بالا)



شکل ۲۰: توزیع نسبت هم ارزی درون استوانه در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید

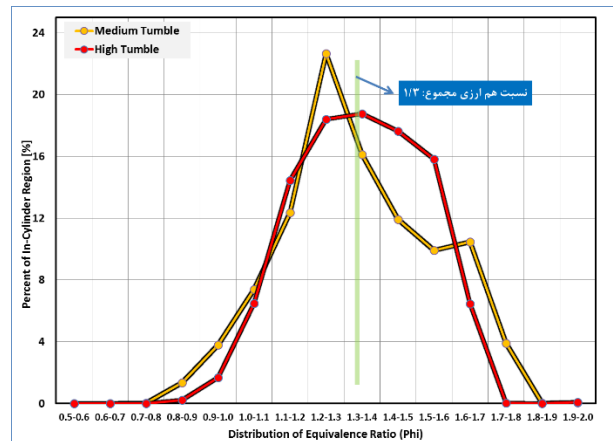
نتایج حاصل از آزادسازی انرژی درون استوانه را در فواصل زمانی مختلف در مقایسه دو راهگاه پایه و راهگاه جدید در شکل ۲۱ قابل مشاهده می باشد. طبق نتایج حاصل از شبیه سازی مقدار ۲/۷ درجه میل لنگ در تاخیر در احتراق و همچنین ۷/۹ درجه میل لنگ در مدت زمان احتراق، کاهش راهگاه جدید محسوس می باشد.



شکل ۲۱: درصد آزادسازی انرژی سوخت در مقایسه با زاویه میل لنگ

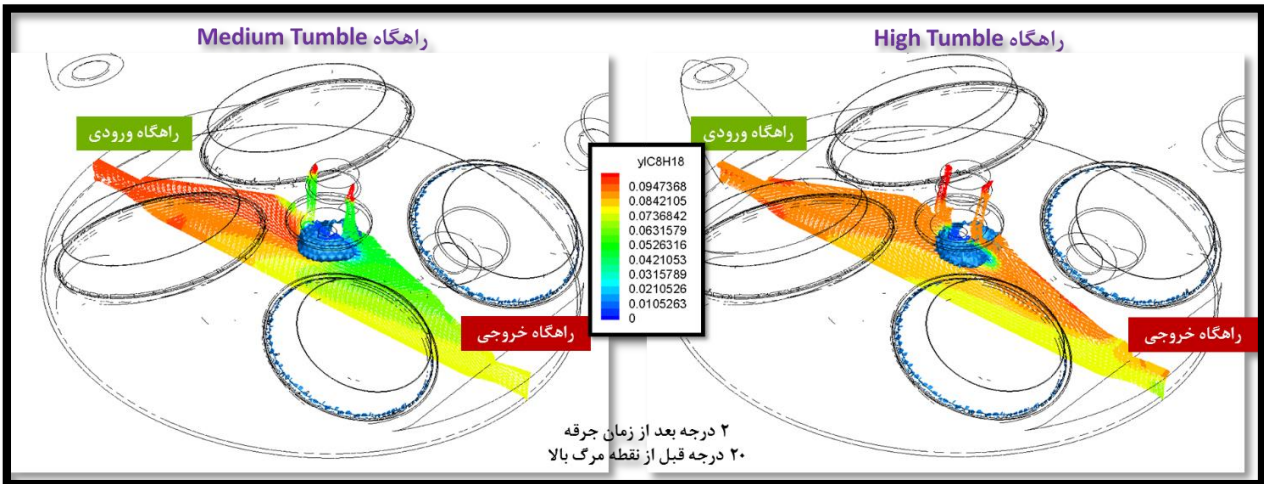
رفتار انتشار شعله در داخل محفظه احتراق که در واقع خروجی نهایی شبیه سازی سه بعدی می باشد می تواند به عنوان یک از مهمترین خروجی های حاصل از شبیه سازی که به بررسی دقیق رفتار احتراق می پردازد مورد اهمیت قرار گیرد. به همین دلیل منحنی های مربوط به نتایج حاصل از سوختن سوخت ایزواکتان که در واقع نشان دهنده انتشار شعله در داخل محفظه احتراق می باشد در شکل های ۲۲ تا ۲۶ به نمایش درآمده است.

ترکیب سوخت و هوا درون استوانه نزدیک به زمان جرقه از اهمیت خاصی در رفتار احتراق و همچنین کامل شدن فرآیند احتراق دارد، مقایسه دو راهگاه حاضر در نوع ترکیب شدن سوخت و هوا و همچنین تاثیر افزایش جریان های گردابی بر این متغیر دارای اهمیت بوده، به همین دلیل در شبیه سازی حاضر، به بررسی تاثیر افزایش جریان های گردابی در میزان ترکیب شدن سوخت و هوا پرداخته شده که نتایج حاصل از آن در شکل ۱۹ به نمایش درآمده است. نمودار ۱۹ پراکندگی نسبت هم ارزی های مختلف درون استوانه در مقایسه با میزان درصد حجم درون استوانه مربوط به هر پراکندگی را به نمایش درآورده است. نسبت هم ارزی بین ۰/۸ - ۰/۹ تا ۱/۷ - ۱/۸ در داخل محفظه استوانه یافت می شود. این پراکندگی در نسبت هم ارزی که در موتورهای احتراق داخلی رفتار رایج و متداولی می باشد تاثیرات زیادی در سرعت احتراق و همچنین تکمیل شدن کامل احتراق دارد، هرچقدر بتوان این مقدار را به حد میانگین نسبت هم ارزی نزدیک کرد قطعاً در رفتار نهایی احتراق بهبود حاصل می شود. خروجی شبیه سازی مدل با راهگاه جدید نشان می دهد که به دلیل افزایش جریان های گردابی که در شکل ۱۵ نیز توضیح داده شد، تاثیرات زیادی را در بهبود ترکیب سوخت و هوا دارد، از نقطه نظر پراکندگی نسبت هم ارزی، راهگاه جدید توانسته محدوده این پراکندگی را کمتر کرده و همچنین میزان درصد حجم درون استوانه در نسبت هم ارزی های بسیار بالا را نیز کمتر نموده است که خود این عامل در بهبود فرآیند احتراق در راهگاه جدید تاثیر گذار خواهد بود.

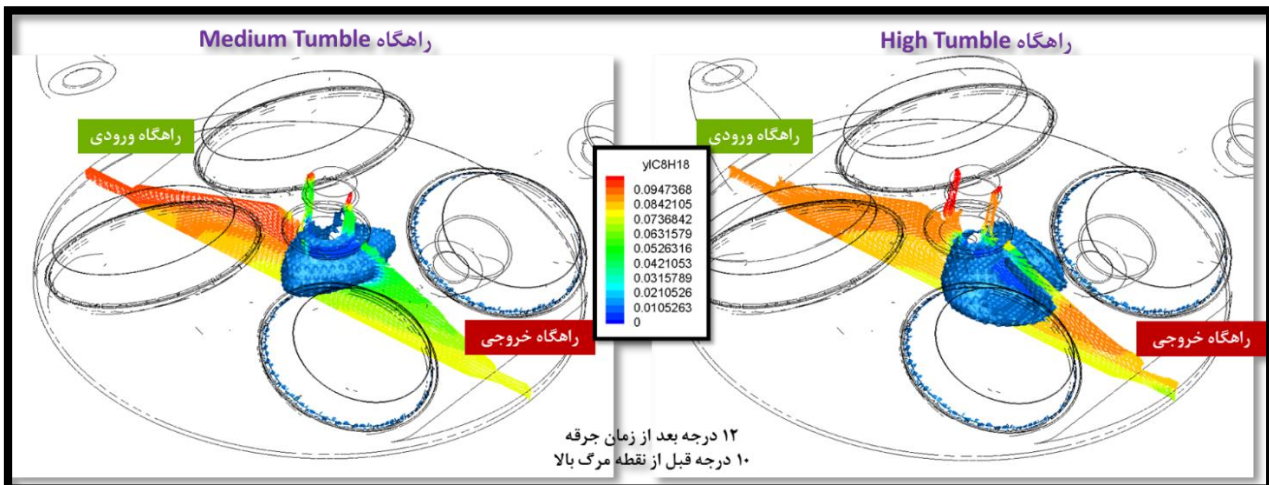


شکل ۱۹: توزیع نسبت هم ارزی درون استوانه در مقایسه با حجم مربوط به هر محدوده نسبت هم ارزی

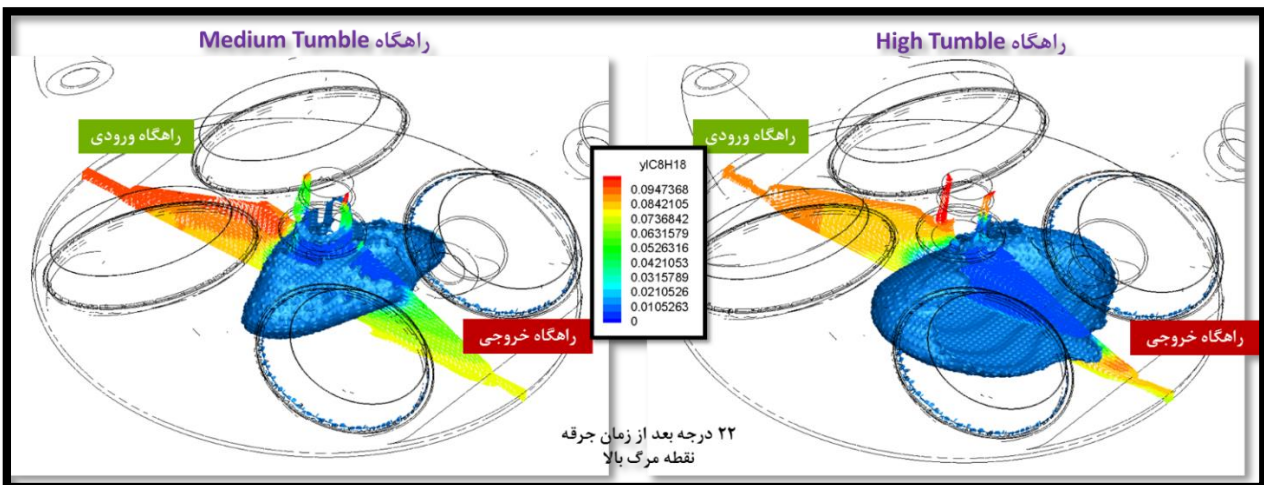
در منحنی های شکل ۲۰ می توان پراکندگی نسبت هم ارزی در مقایسه دو راهگاه را مشاهده نمود، مطابق با این منحنی ها، بهبود نسبت هم ارزی در راهگاه جدید قابل مشاهده است.



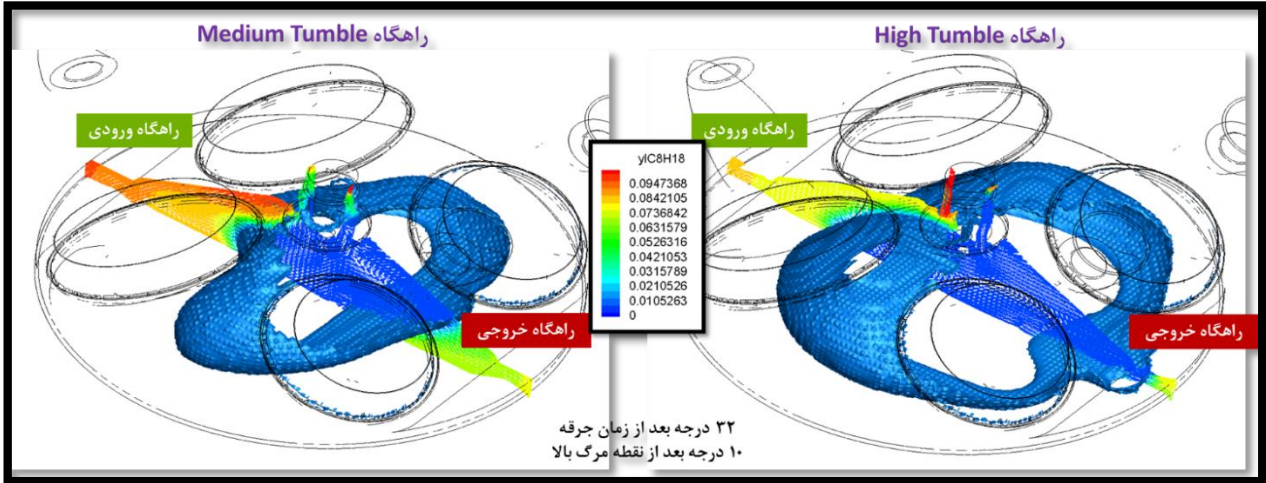
شکل ۲۲: مقایسه منحنی سوختن سوخت ایزواکتان در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید - (۲۰ درجه قبل از نقطه سکون بالا)



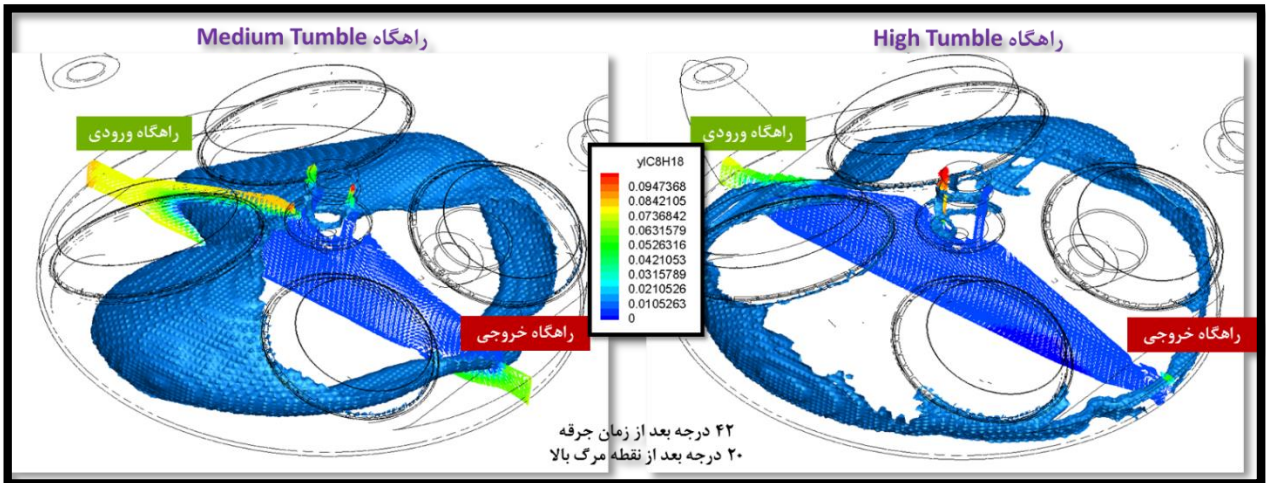
شکل ۲۳: مقایسه منحنی سوختن سوخت ایزواکتان در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید - (۱۰ درجه قبل از نقطه سکون بالا)



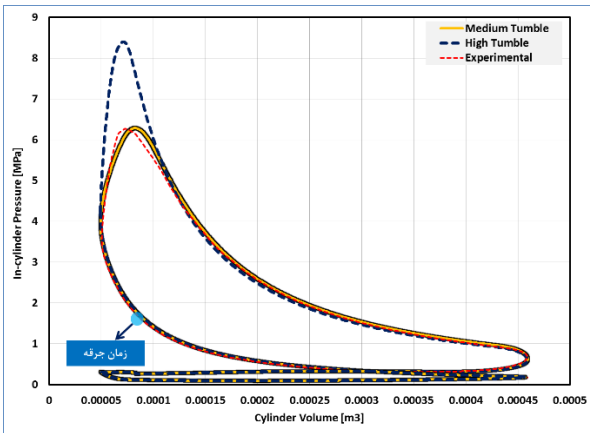
شکل ۲۴: مقایسه منحنی سوختن سوخت ایزواکتان در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید - (نقطه سکون بالا)



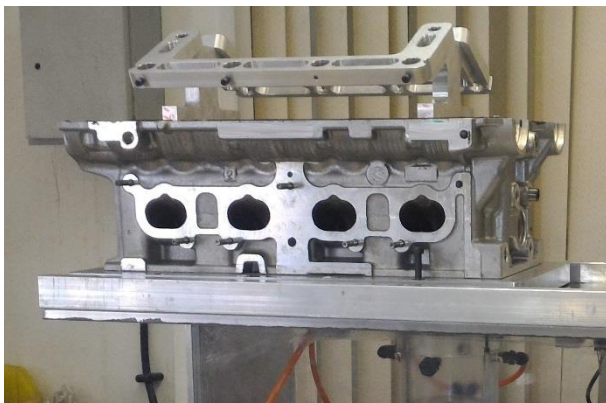
شکل ۲۵: مقایسه منحنی سوختن سوخت ایزواکتان در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید - (۱۰ درجه بعد از نقطه سکون بالا)



شکل ۲۶: مقایسه منحنی سوختن سوخت ایزواکتان در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید - (۲۰ درجه بعد از نقطه سکون بالا)



شکل ۲۸: نمودار فشار-حجم موتور در مقایسه راهگاه پایه و راهگاه جدید

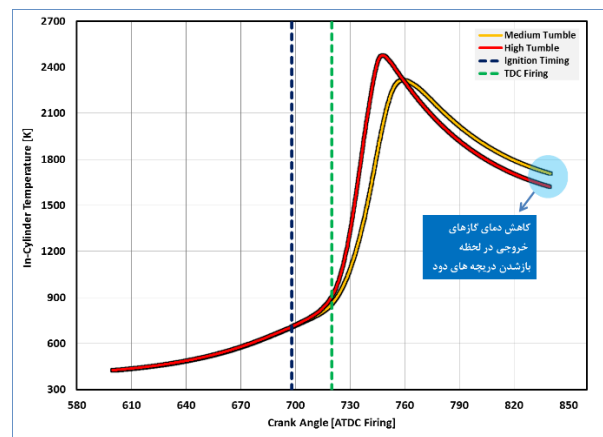


شکل ۲۹: بستار تولید شده با راهگاه جدید

### ۳- آزمون صحه گذاری در اتاق آزمون

به جهت صحه گذاری کلیه نتایج به دست آمده در بخش شبیه سازی و همچنین آزمون های صورت گرفته در آزمایشگاه میز جریان، بستار تولید شده با راهگاه جدید که در آزمایشگاه میز جریان مورد آزمون قرار گرفته بود بر روی موتور پرخوران نصب گردیده و در اتاق آزمون مورد بررسی آزمایشگاهی در شرایط واقعی قرار گرفت. در راستای آزمون های موتوری، یکی از موتورهای پرخوران ملی انتخاب شده و بعد از دمونتاز کردن موتور، بستار جدید بر روی موتور نصب گردید. به جهت مشاهده و محاسبه مشخصه های مربوط به احتراق که شامل میزان فشار درون استوانه، نرخ آزادسازی انرژی، مشاهده کوبش و موارد دیگر، حسگرهای فشار درون استوانه بر روی موتور نصب گردید تا بتوان نتایج مربوط به بستار جدید را با نتایج به دست آمده از آزمون های گذشته بر روی موتور پرخوران ملی با بستار پایه مقایسه نمود. در اتاق آزمون بعد از نصب موتور بر روی پایه های مربوطه، میزان دور موتور به وسیله لگام ترمز کنترل می شود و همچنین در تمامی مسیر

مدت زمان احتراق به صورت مستقیم بر روی توان و گشتاور خروجی موتور، میزان دمای گازهای خروجی و تمایل به کوبش تاثیر بسزایی دارد، با کاهش مدت زمان احتراق فرصت کافی برای به وجود آمدن کوبش در موتور کاهش پیدا کرده و لذا امکان به وجود آوردن گشتاور بالاتر در موتور فراهم می شود، از طرف دیگر با پیش افتادن بیشینه فشار درون استوانه و همچنین افزایش محسوس آن امکان افزایش فشار موثر متوسط اندیکاتوری درون استوانه نیز به وجود آمده که به صورت مستقیم بر روی گشتاور و توان خروجی تاثیرگذار می باشد. با کاهش مدت زمان احتراق، زمان انتهایی احتراق از زمان بازشدن دریچه های دود فاصله بیشتری گرفته که این عامل در کاهش دمای گازهای خروجی از موتور تاثیرگذار می باشد. کاهش دمای گازهای خروجی به صورت مستقیم بر روی کاهش میزان غنی سازی مورد نیاز مخلوط تاثیر گذاشته که در کاهش مصرف سوخت موتور در تمام بار و بارهای زیاد موثر خواهد بود. در شکل ۲۷ می توان دمای گازهای درون استوانه در مقایسه با دو راهگاه را مشاهده نمود.



شکل ۲۷: دمای گازهای درون استوانه در مقایسه با راهگاه پایه و راهگاه جدید

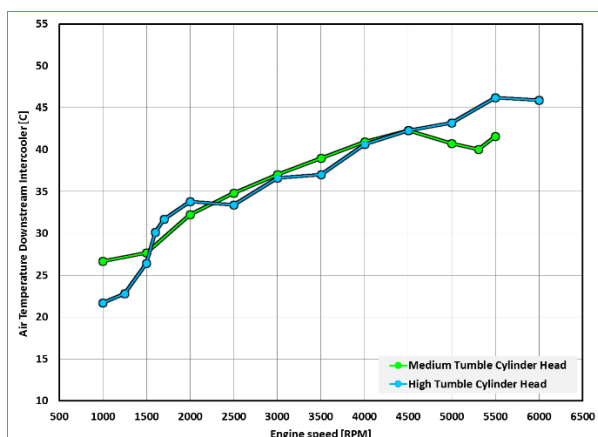
در شکل ۲۸ نیز فشار موثر متوسط اندیکاتوری خالص<sup>۱</sup> و ناخالص<sup>۲</sup> به نمایش درآمده است. طبق نتایج شبیه سازی، فشار موثر متوسط اندیکاتوری ناخالص به مقدار ۶/۸ درصد افزایش و فشار موثر متوسط اندیکاتوری خالص به مقدار ۶/۴ درصد افزایش یافته است. بعد از اطمینان از عملکرد بهتر راهگاه جدید نسبت به راهگاه پایه موتور پرخوران، در گام بعدی، بستار جدید با راهگاه جدید طراحی و ساخته شد که در شکل ۲۹ این بستار آمده است. بعد از ساخت بستار با راهگاه جدید، مراحل آماده سازی برای آزمون های موتوری انجام شده که در ادامه مقاله بررسی خواهد شد.

<sup>3</sup> P-V Diagram  
<sup>4</sup> Dynamometer

<sup>1</sup> Net IMEP  
<sup>2</sup> Gross IMEP

### ۳-۱- شرایط مرزی آزمون

آزمون های انجام شده در اتاق آزمون در فشار سطح تهران انجام شده است، در هر دو آزمون سعی شده است که دمای هوای ورودی به چندراهه ورودی یکسان باشد. نتایج مربوط به دمای بعد از خنک کن میانی برای هر دو آزمون را می توان در شکل ۳۱ مشاهده نمود.



شکل ۳۱: دمای بعد از خنک کن میانی (ورودی به چند راهه هوا) در مقایسه هر دو آزمون با بستارهای مختلف

دمای سیال خنک کاری نیز مطابق آنچه که ذکر شد در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد با استفاده از مبدل خارجی در تمامی آزمون ها تنظیم می شود.

با یکسان بودن دمای هوای ورودی به موتور، دمای سیال خنک کاری و دمای روغن در مسیر اصلی و همچنین انجام آزمون در فشار سطح تهران می توان شرایط مرزی را در هر دو آزمون مطابق با یکدیگر در نظر گرفت.

### ۳-۲- شرایط کاری موتور

با توجه به نتایجی که در ادامه مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت، به علت افزایش جریان های گردابی درون استوانه و کاهش مدت زمان احتراق، تغییراتی در شرایط کاری موتور از جمله مقدار نسبت هم ارزی هوا به سوخت و هم چنین زمان بندی جرقه در طول مدت زمان آزمون انجام شده است که به بررسی بیشتر آن پرداخته می شود.

در راهگاه پایه موتور، به علت طولانی بودن مدت زمان احتراق، دمای گازهای خروجی از استوانه نیز بالا بوده و به همین جهت نیاز به غنی سازی بیشتر مخلوط درون استوانه می باشد که با استفاده از راهگاه جدید و بهبود عملکرد احتراق، تغییرات در متغیرهای مورد بحث اجتناب ناپذیر بوده و لذا با توجه به نمودارهای پیش رو تغییراتی در این متغیرها انجام شده است.

ورودی و خروجی موتور، حسگرهای دما و فشار به جهت کنترل و همچنین مشاهده وضعیت کلی موتور نصب می گردد. مسیر هوای ورودی موتور مانند مسیر خودروبی بسته شده و همچنین مسیر خروجی موتور نیز تا حد امکان مشابه مسیر خودروبی بسته می شود تا بتوان میزان افت فشار مسیر خروجی را با مسیر واقعی خودروبی تنظیم نمود. آزمون انجام شده بر روی موتور پرخوران در شرایط تمام بار می باشد. شکل ۳۰ نصب موتور پرخوران را در اتاق آزمون نشان می دهد.



شکل ۳۰: نصب موتور ملی پرخوران در اتاق آزمون شرکت ایپکو

در اتاق آزمون با استفاده از سه نرم افزار داده برداری از شرایط آزمون صورت می گیرد. نرم افزار اول (پوما) که وظیفه داده برداری از کلیه حسگرهای موجود در اتاق آزمون و همچنین حسگرهای نصب شده بر روی موتور را دارا می باشد. به جهت ثبت اطلاعات مربوط به رایانه موتور اعم از زمان جرقه زنی، میزان نسبت هم ارزی هوا به سوخت، دریچه کنارگذر آتوربو، مدت زمان سوخت پاشی و غیره از نرم افزار اینکا<sup>۳</sup> که مربوط به رایانه موتور می باشد استفاده شده است. نرم افزار ایندیکام<sup>۴</sup> نیز وظیفه ثبت اطلاعات دریافتی از حسگرهای فشار درون استوانه را دارد که این اطلاعات را در هر چرخه کاری موتور و مربوط به هر استوانه را با توجه به زمان تنظیم شده ثبت می کند.

کلیه نتایج مربوط به آزمون با بستار جدید با نتایج مربوط به موتور پایه مقایسه می گردد. آزمون ذکر شده مربوط به استفاده از بستار پایه در موتور پرخوران می باشد. در آزمون با بستار جدید تا حد امکان کلیه شرایط اتاق آزمون و همچنین شرایط مرزی مربوط به آزمون همانطور که در ادامه مقاله مشاهده می گردد مطابق با آزمون با بستار پایه تنظیم شده است.

نتایج آزمایشگاهی در تمام بار و از دور ۱۰۰۰ تا ۵۵۰۰ برای موتور با بستار پایه و برای بستار با راهگاه جدید از دور ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه مورد آزمون قرار گرفته است.

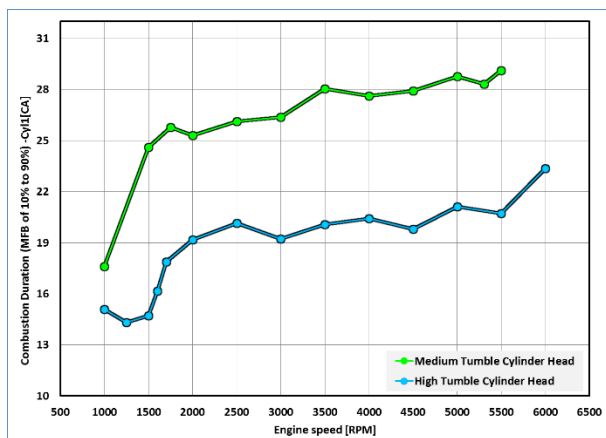
<sup>3</sup> Inca Software

<sup>4</sup> Indicom Software

<sup>1</sup> Puma Software

<sup>2</sup> Waste-gate Valve

در شرایط آزمایشگاهی، کلیه موتورهای مورد آزمون که در شرایط بررسی وضعیت احتراقی قرار می‌گیرند مجهز به حسگر فشار درون استوانه بوده که قابلیت داده برداری از فشار هر ۴ استوانه موتور را با دقت بالا دارد. با تحلیل فشار درون استوانه، میزان آزادسازی انرژی حاصل از سوخت در هر زاویه میل لنگ، نرخ آزادسازی حرارت، و همچنین کلیه متغیرهای عملکردی اندیکاتور موتور قابل استخراج می‌باشد. در شکل ۳۴ می‌توان نتایج مربوط به مدت زمان احتراق را در دوره‌های مختلف مشاهده نمود.

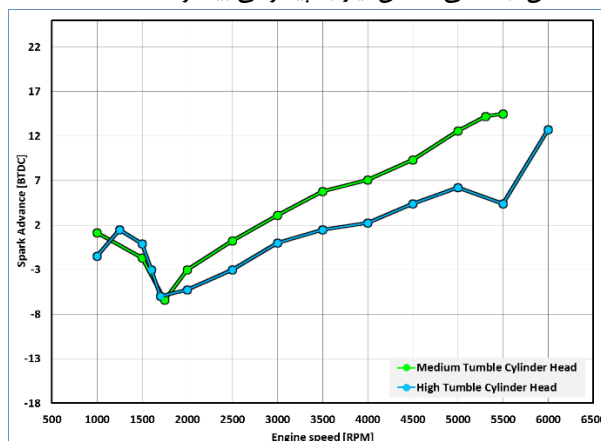


شکل ۳۴: مدت زمان احتراق در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

نتایج ارائه شده در شکل ۳۴ مربوط به متوسط استوانه های مختلف در هر دور می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده در آزمون با بستار جدید، قابلیت راهگام با جریان گردابی بیشتر در کاهش مدت زمان احتراق به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. این نتایج از کاهش ۲۷ درصدی (به طور متوسط) در مدت زمان احتراق حکایت دارد که در مقایسه با نتایج شبیه سازی که در ابتدای مقاله توضیح داده شده، نتایج قابل قبول شبیه سازی را تصدیق می‌نماید. کاهش مدت زمان احتراق و دور بودن از منطقه کوبش، می‌تواند به افزایش گشتاور ترمزی موتور کمک بسزایی نماید و مهمترین هدف هر دو آزمون موتور (راهگام پایه و راهگام جدید) نیز بیشینه گشتاور خروجی و دور بودن از منطقه کوبش بوده که با توجه به نتایج به دست آمده و قابلیت تغییر در زمان بندی جرعه، نتایج قابل قبولی در مقدار افزایش گشتاور موتور مشاهده شده که نتایج مربوط به آن را می‌توان در شکل ۳۵ مشاهده نمود.

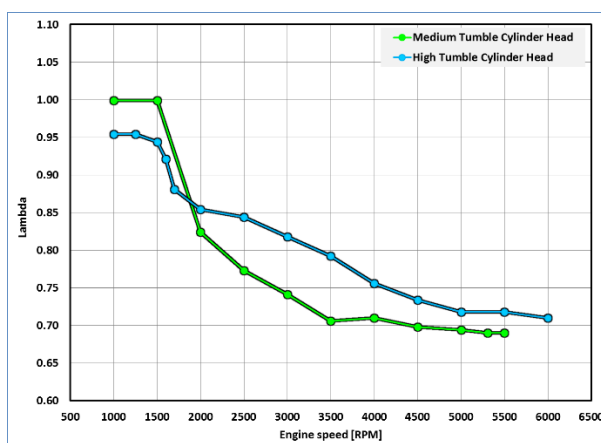
بیشینه گشتاور ترمزی موتور با راهگام پایه از ۲۰۲ نیوتن متر در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه تا ۲۰۴ نیوتن متر در دور ۴۵۰۰ دور بر دقیقه قابل دستیابی بوده است. افزایش این مقدار گشتاور در موتور با راهگام پایه نیاز به آوانس بیشتر جرعه داشته و لذا در منطقه کوبش ناشی از کوتاه

یکی از متغیرهای مهم در تعیین زمان بندی جرعه (شکل ۳۲)، مقدار کوبش در تمام بار موتور است، هرچقدر که بتوان مدت زمان احتراق را کوتاه تر نمود به علت پخش شدن سریعتر شعله در داخل محفظه احتراق، فرصت کافی برای به وجود آمدن کوبش از مخلوط درون استوانه گرفته می‌شود. لازم بذکر است کوتاهتر شدن تاخیر در احتراق و مدت آن، به معنی کاهش نیاز به پیشرسی بیشتر است.



شکل ۳۲: زمان بندی جرعه در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

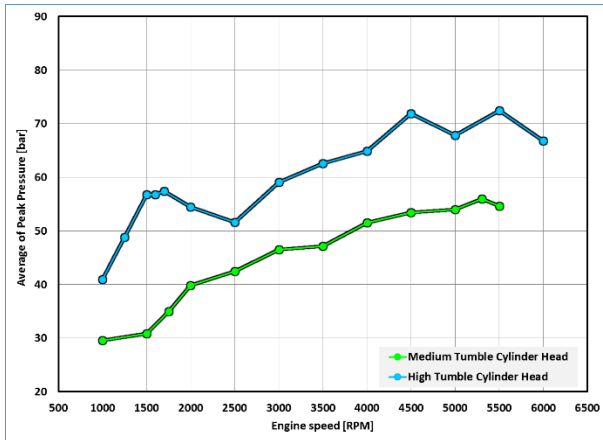
همانطور که ذکر شد، میزان غنی سازی مخلوط درون استوانه به علت کوتاه شدن مدت زمان احتراق، قطعاً کاهش پیدا کرده و لذا امکان غنی سازی کمتر در موتور فراهم می‌شود، غنی سازی کمتر همانطور که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت تأثیرات به سزایی در نتایج مصرف سوخت موتور در تمام بار نیز می‌گذارد. نتایج حاصل از میزان غنی سازی مخلوط (لامبدا) در شکل ۳۳ آورده شده است.



شکل ۳۳: نسبت هم ارزی هوا به سوخت با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

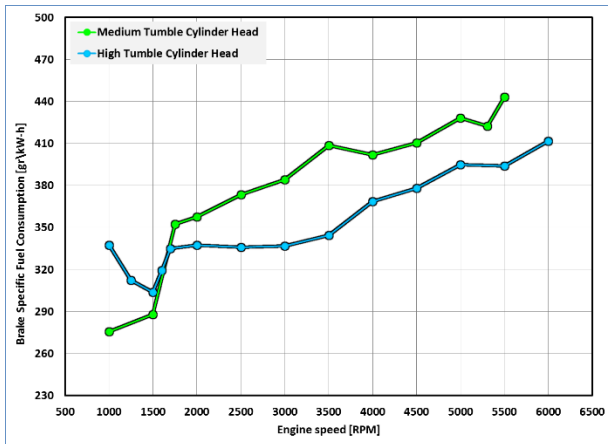
۳-۳- نتایج آزمایشگاهی اتاق آزمون

بیشینه فشار درون استوانه به طور متوسط به مقدار ۳۶ درصد در راهگاه جدید نسبت به راهگاه پایه موتور پرخوران افزایش پیدا کرده است که این افزایش به دلیل آوانس زمان بندی جرکه و همچنین کوتاه شدن مدت زمان احتراق می باشد.



شکل ۳۷: فشار درون استوانه در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

علاوه بر افزایش گشتاور موتور، به علت عدم غنی سازی زیاد مخلوط درون استوانه، قابلیت کاهش مصرف سوخت موتور با راهگاه جدید محسوس بوده و می توان افزایش گشتاور و کاهش مصرف سوخت موتور را به عنوان بهترین خروجی از طراحی راهگاه جدید بیان نمود. در شکل ۳۸ نتایج مصرف سوخت ویژه ترمزی آمده است.

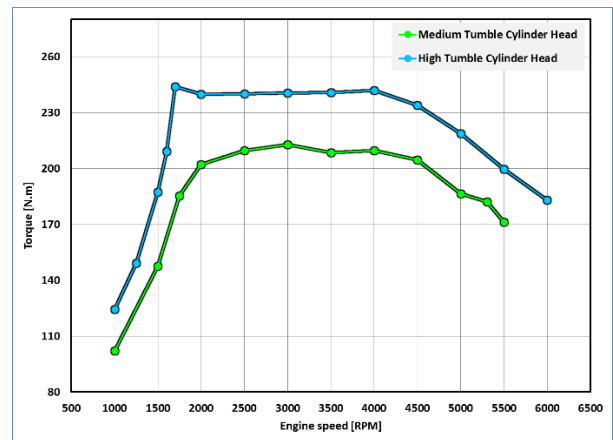


شکل ۳۸: مصرف سوخت ویژه ترمزی در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

### نتیجه گیری

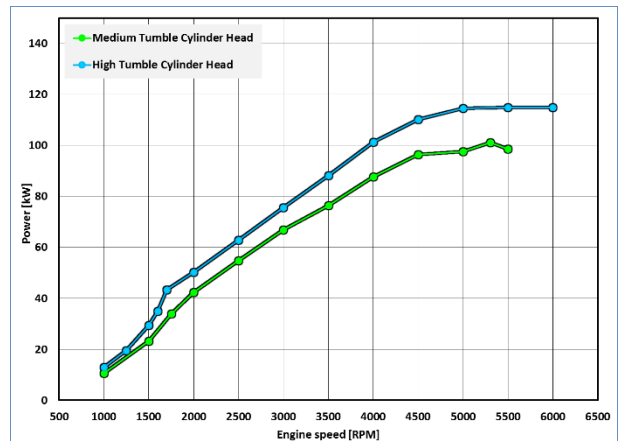
توسعه موتورهای احتراق داخلی از نقطه نظر بهبود عملکرد و همچنین کاهش مصرف سوخت دارای اهمیت بوده و لذا در این مقاله سعی بر آن شده تا با ارائه یک راهکار کارآمد در جهت بهبود عملکرد موتور EF7 پرخوران گام برداشته شود.

بودن مدت زمان احتراق قرار میگیرد. در آزمون موتور با راهگاه جدید قابلیت دستیابی به بیشینه گشتاور ۲۴۴ نیوتون متر در دور ۱۷۰۰ دور بر دقیقه تا ۲۳۳ نیوتون متر در دور ۴۵۰۰ فراهم شده است.



شکل ۳۵: گشتاور ترمزی در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

تاثیر افزایش گشتاور موتور در افزایش توان خروجی موتور در هر دور قابل مشاهده است این افزایش گشتاور به خصوص در دور های بیشتر به بیشینه توان خروجی از موتور کمک بسزایی می نماید. نتایج حاصل از توان خروجی موتور را می توان در شکل ۳۶ مشاهده نمود.



شکل ۳۶: توان ترمزی در مقایسه با دو بستار پایه و بستار جدید در آزمون های احتراقی اتاق آزمون

بیشینه گشتاور خروجی با راهگاه پایه ۱۰۱ کیووات در دور ۵۵۰۰ دور بر دقیقه می باشد که مقدار آن در راهگاه جدید تا ۱۱۵ کیلووات در سرعت های ۵۵۰۰ و ۶۰۰۰ دور بر دقیقه قابل دستیابی می باشد. در مقاله حاضر به جهت مشاهده وضعیت کلی موتور و حذف نوسانات موجود در هر استوانه ناشی از احتراق، نتایج ارائه شده حاصل متوسط گیری تمام استوانه های موتور است. مقدار بیشینه فشار درون استوانه در شکل ۳۷ قابل مشاهده می باشد. بر طبق نتایج به دست آمده، مقدار

دقیقه به مقادیر بیشینه گشتاور ۲۴۴ نیوتن متر در دور ۱۷۰۰ دور بر دقیقه تا ۲۳۳ نیوتن متر در دور ۴۵۰۰ ارتقا پیدا کرده است. مدت زمان احتراق نیز با استفاده از بستار جدید به طور متوسط ۲۷ درصد در دورهای مختلف کاهش یافته است. مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور با بستار جدید کاهش چشمگیری در دورهای مختلف به نسبت بستار پایه موتور داشته که تمامی نتایج حاکی از بهبود احتراق در موتور با بستار جدید می باشد.

ارتقای موتور ملی پرخوران با استفاده از تغییر در بستار موتور، یکی از بهترین راه ها در بهبود عملکرد و کاهش مصرف سوخت تمام بار بوده که این متغیر مهم و تاثیر گذار به صورت کامل در سه مرحله در مقاله حاضر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

### قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را آقای مهندس مهدی رجبعلی قائم مقام محترم شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو در طراحی و ساخت سازه میز جریان و همچنین از آقای مجید کرباسی فروشها معاونت محترم تحقیق و توسعه شرکت تحقیق، طراحی و موتور ایران خودرو را به جهت کمک های مشاوره ای فراوان در توسعه و طراحی راهگاه جدید را اعلام می دارند.

### ضمیمه ۱

در شبیه سازی جریان و احتراق موتور پرخوران ملی از نرم افزار کانورج که در شبیه سازی های سه بعدی از توانایی بررسی احتراق با استفاده از سازوکار های شیمیایی برخوردار می باشد استفاده شده است. به دلیل استفاده از سازوکار شیمیایی در این شبیه سازی، از سوخت ایزواکتان به جای سوخت بنزین استفاده شده است و در بسیاری از مقالات شبیه سازی احتراق، قابل قبول بودن استفاده از این سوخت به جای سوخت بنزین مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این شبیه سازی از سازوکار وانگ<sup>۲</sup> (۹) با ۲۹۶ واکنش و ۷۳ گونه شیمیایی استفاده شده است. از مدل اغتشاش RANS برای شبیه سازی اغتشاش در این مدل استفاده شده است. به جهت استفاده از سازوکار شیمیایی برای شبیه سازی احتراق از مدل SAGE که توسط سنکال<sup>۳</sup> (۱۰) توسعه داده شده استفاده شده است.

به جهت محاسبه جریان های گردابی درون استوانه از مفهوم نسبت جریان های گردابی حول محور عمودی استوانه<sup>۴</sup> استفاده شده است. نسبت جریان های گردابی بر طبق معادله ۱ از تقسیم سرعت زاویه ای جریان حول مرکز جرم درون استوانه بر سرعت زاویه ای موتور به دست می آید (راستای محاسبه جریان گردابی عمود بر راستای محور استوانه موتور می باشد).

افزایش جریان های گردابی درون استوانه در موتورهای احتراق داخلی به عنوان یکی از بهترین متغیرهای در دسترس به جهت بهبود عملکرد موتور مورد تحقیق و توسعه شرکت های بزرگ خودروسازی قرار گرفته و لذا در این مقاله نیز بهبود عملکرد موتور با استفاده از بهبود جریان های گردابی مورد بررسی قرار گرفته است.

بعد از بهینه سازی راهگاه پایه موتور و طراحی و بهینه سازی فرآیندهای ساخت و تولید راهگاه جدید، بررسی اثرات افزایش جریان گردابی در داخل استوانه حول محور افقی در سه مرحله در این مقاله انجام شده است که نتایج نهایی هر مرحله بیان می شود:

۱. مرحله ساخت نمونه اولیه و آزمایش میز جریان: ساخت نمونه اولیه از راهگاه با طراحی جدید، امکان آزمون بررسی جریان های گردابی با استفاده از آزمایشگاه میز جریان را فراهم آورد و لذا با استفاده از این آزمایشگاه، جریان های گردابی درون استوانه در گشودگی های مختلف دریچه هوا در مقایسه با راهگاه پایه موتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش میز جریان نشان داد که راهگاه جدید هم در توسعه محدوده جریان های گردابی درون استوانه و هم در افزایش مقدار مطلق جریان های گردابی درون استوانه توانایی لازم را دارا می باشد. راهگاه پایه موتور از گشودگی ۵ میلی متری به مقدار ۶۰۰۰ دور بر دقیقه دارای جریان گردابی بود ولی در راهگاه جدید با جریان گردابی بیشتر، از گشودگی ۴ میلی متری با مقدار ۵۴۰۰ دور بر دقیقه به تولید جریان گردابی پرداخت که اثرات مثبت این افزایش بر کاهش مدت زمان احتراق در آزمون های موتوری مشاهده شد.

۲. مرحله شبیه سازی: در این مرحله با استفاده از نرم افزار کانورج به بررسی جریان های درون استوانه و همچنین رفتار احتراق پرداخته شد، نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که بدون تغییر هیچ یک از متغیرهای عملکردی موتور (در داخل مدل شبیه سازی شده) و صرفاً با تغییر راهگاه ورودی، افزایش جریان های گردابی درون استوانه در تمامی سیکل ورود هوا و سیکل تراکم محسوس بوده که اثرات مثبتی را بر روی مدت زمان احتراق نشان می دهد، طبق نتایج حاصل از شبیه سازی استفاده از راهگاه جدید با جریان گردابی بیشتر باعث کاهش ۲/۷ درجه میل لنگ در تاخیر در احتراق و همچنین ۷/۹ درجه میل لنگ در مدت زمان احتراق می شود.

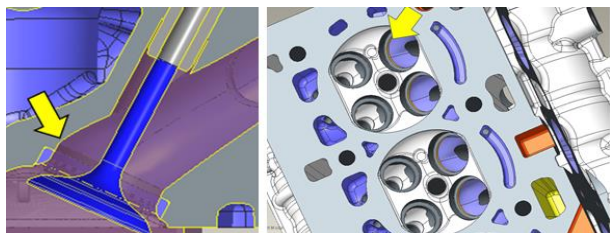
۳. مرحله آزمون های موتوری در اتاق آزمون: بعد از صحت گذاری که توسط شبیه سازی احتراق و آزمون های میز جریان بر روی راهگاه جدید انجام شد و بعد از ساخت بستار با راهگاه جدید، آزمون موتوری در اتاق آزمون انجام شده و نتایج آن با نتایج موتور ملی پرخوران با بستار پایه مقایسه شد. طبق نتایج آزمون های انجام شده با استفاده از بستار جدید، بیشینه گشتاور ترمزی موتور با راهگاه پایه از ۲۰۲ نیوتن متر در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه تا ۲۰۴ نیوتن متر در دور ۴۵۰۰ دور بر

<sup>3</sup> Senecal

<sup>4</sup> Tumble Ratio

<sup>1</sup> Mechanism

<sup>2</sup> Wang



شکل ۴۰: تصویر طرح ماشینکاری نشیمنگاه راهگاه جدید

### فهرست علائم

$I$	ممان اینرسی جرمی، $\text{kg.m}^2$
$L$	مومنتوم زاویه ای، $\text{kg.m}^2/\text{s}$
$v$	مولفه سرعت در راستای محور $y$ ، $\text{m}^2/\text{s}$
$w$	مولفه سرعت در راستای محور $z$ ، $\text{m}^2/\text{s}$
$y$	مختصات هندسی سلول در راستای محور $y$ ، $\text{m}$
$z$	مختصات هندسی سلول در راستای محور $z$ ، $\text{m}$

### علائم یونانی

$\omega$	سرعت زاویه ای، $\text{rad/s}$
----------	-------------------------------

### زیرنویس‌ها

$cm$	مرکز جرم
$n$	شماره سلول مورد محاسبه

### منابع:

- [1] Wendy HK, Kamaruzzaman S, Zulkifli MN, Azhari S. CFD investigation of fluid flow and turbulence field characteristics in a four-stroke automotive direct injection engine. 2008.
- [2] Garth C, Laramée RS, Tricoche X, Schneider J, Hagen H. Extraction and visualization of swirl and tumble motion from engine simulation data. *Topology-based Methods in Visualization*: Springer; 2007. p. 121-35.
- [3] Krishna BM, Mallikarjuna J. Effect of engine speed on in-cylinder tumble flows in a motored internal combustion engine—an experimental investigation using particle image velocimetry. *J Appl Fluid Mech*. 2011;4(1):1-14.
- [4] Khalighi B. Study of the intake tumble motion by flow visualization and particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*. 1991;10(4):230-6.
- [5] Urushihara T, Nakata T, Kakuhou A, Takagi Y. Effects of swirl and tumble motion on fuel vapor behavior and mixture stratification in lean burn engine. *JSAE review*. 1996;17(3):239-44.
- [6] Yi J, Wooldridge S, Coulson G, Hilditch J, Iyer CO, Moilanen P, et al. Development and optimization of the Ford 3.5 L V6 EcoBoost combustion system. *SAE International Journal of Engines*. 2009;2(2009-01-1494):1388-407.

$$TumbleRatio = \frac{\omega_x}{\omega_{crankshaft}} \quad (1)$$

سرعت زاویه ای جریان حول مرکز جرم از تقسیم مومنتوم زاویه ای بر ممان اینرسی جرمی محاسبه شده که در معادله ۲ به نمایش درآمده است.

$$\omega_x = \frac{L_x}{I_x} \quad (2)$$

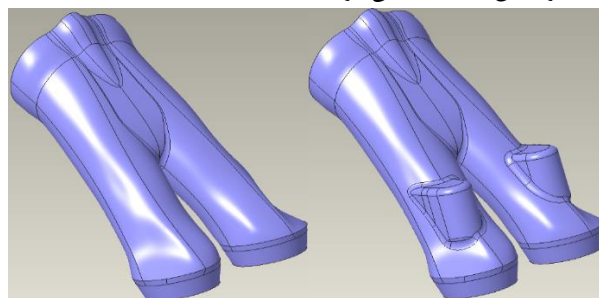
به دلیل محاسبه جریان های گردابی حول محور  $x$ ، محاسبه مومنتوم زاویه ای و ممان اینرسی جرمی در راستای محور  $x$  انجام می شود که روابط مربوط به این دو متغیر در معادلات ۳ و ۴ به نمایش درآمده است:

$$L_x = \sum_{n=1}^{numcells} m_n((y_n - y_{cm})w_n - (z_n - z_{cm})v_n) \quad (3)$$

$$I_x = \sum_{n=0}^{numcells} m_n((y_n - y_{cm})^2 - (z_n - z_{cm})^2) \quad (4)$$

ضمیمه ۲

برای ماشینکاری راحت تر و دقیق تر محل راهنمای دریچه های هوا معمولاً ناحیه تقاطع راهنما و راهگاه در ریخته گری طراحی می شود ولی در طرح راهگاه جدید با توجه به حجم زیاد اشغال شده این قسمت در صورت طراحی آن در ریخته گری و به موجب آن افزایش هوای محبوس شده در این ناحیه و ایجاد تلاطم در جریان هوای ورودی به محفظه احتراق، این طرح مورد پذیرش نبوده و در نهایت موقعیت راهنما در ماشینکاری ایجاد گردید. تصویر مربوط به طرح ماشینکاری شده در شکل ۳۹ به نمایش درآمده است.



شکل ۳۹: تصویر طرح ماشینکاری راهنمای دریچه های هوا در راهگاه جدید

با توجه به ریخته گری بودن راهگاه و تolerانس های باز آن و برای اتصال مناسب تر راهگاه به نشیمنگاه در جهت جلوگیری از اغتشاش جریان هوای ورودی معمولاً این ناحیه توسط الگوی مناسبی ماشینکاری می شود، در این قسمت نسبت به راهگاه پایه موتور پرخوران ملی، بهبود هایی در فرآیند ماشینکاری انجام شده است.

[7] Chen X, Zhan Z, editors. The Effect of Intake Port Shape on Gasoline Engine Combustion in Cylinder. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress; 2013: Springer.

[8] CONVERGE C. Software, (Version 2.1. 0), Convergent Science. Inc, Middleton, WI. 2013.

[9] Wang H, Yao M, Reitz RD. Development of a reduced primary reference fuel mechanism for internal combustion engine combustion simulations. Energy & Fuels. 2013;27(12):7843-53.

[10] Senecal P, Pomraning E, Richards K, Briggs T, Choi C, McDavid R, et al. Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using CFD and parallel detailed chemistry. SAE Technical Paper, 2003 0148-7191



## Port Development of a Port Injection Turbocharged Engine to Improve Combustion Quality & Performance Parameters

A. H. Parivar<sup>1</sup>, H. R. Fajri<sup>2\*</sup>, M. Mohsenirad<sup>3</sup>, A. Molaei<sup>4</sup>, M. Nejat<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, [A\\_parivar@ip-co.com](mailto:A_parivar@ip-co.com)

<sup>2</sup> Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, [H\\_fajri@ip-co.com](mailto:H_fajri@ip-co.com)

<sup>3</sup> Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, [M\\_mohsenirad@ip-co.com](mailto:M_mohsenirad@ip-co.com)

<sup>4</sup> Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, [A\\_molaei@ip-co.com](mailto:A_molaei@ip-co.com)

<sup>5</sup> Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, [M\\_nejat@ip-co.com](mailto:M_nejat@ip-co.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 22 December 2017

Accepted: 21 February 2018

#### Keywords:

Tumble Motion

Inlet Port

Combustion Duration

### ABSTRACT

Improvement of general specs of internal combustion engine, such as power curve improvement, fuel consumption, emission and combustion quality always has a purpose for engine designers. Turbocharging needs some changes in inlet port of cylinder head to achieve all of its advantages on better combustion quality and knock tendency reduction. So the geometry of engine inlet port is one the most important item to get this target. It produces the charge motion of in cylinder which is consisted of tumble and swirl motions. In this paper, port development of a turbo PFI engine beside of other affected gas exchange parameters is investigated. This paper explained the work method in three stages: flow bench test, 3D simulation and combustion test. The main target of port development for this case is tumble increment in parallel with minimum flow coefficient decrement. The results of engine test show 30% combustion duration reduction and significant power curve improvement.

