



بررسی تجربی و عملی تاثیر فرورفتگی های سطحی در پورت ورودی و منیفولد هوا بر عملکرد موتورهای بنزینی

محمد حسین احمدی^{۱*}، علیرضا رستمزاده خسروشاهی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران، ایمیل ahmadiperformance@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران، ایمیل arkhosroshahi@iau.ac.ir

چکیده:

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر به کارگیری فرورفتگی های کروی کوچک (توپ گلفی) بر سطح و ویژگی های جریان هوا در پورت ورودی موتور TU5J4S است. در این راستا، دو مدل هندسی شامل پورت فابریک و اصلاح شده با الگوی فرورفتگی با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و CFD و آزمون های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از الگوی فرورفتگی موجب افزایش سرعت متوسط جریان تا 400 m/s با فشار کل به صورت تقریبی 245 kPa می شود. همچنین، این تغییر باعث کاهش دما و بهبود بازده حجمی تا ۱۰٪ شده و افزایش توان و گشتاور در همه دورها به خصوص دورهای بالا ثبت شده است. همچنین توزیع یکنواخت تر جریان و کاهش نواحی جدایش، از دیگر اثرات مثبت این تغییر هندسی است. یافته ها نشان می دهد که بهینه سازی سطوح داخلی منیفولد می تواند رویکردی کارآمد برای ارتقای عملکرد و تلاطم بهتر هوا و سوخت ارائه نموده و در نهایت باعث کاهش مصرف سوخت در موتورهای بنزینی شود.

کلمات کلیدی: پورت ورودی، فرورفتگی سطحی، جریان هوا، منیفولد ورودی، دبی ورودی CFM^۲ مخلوط سوخت هوا، گراف داینومتر

^۱ Computation fluid dynamics

^۲ Cubic feet per minute



۱- مقدمه

موتورهای احتراق داخلی بنزینی به عنوان قلب تپنده خودروهای سبک، همواره نیازمند بهبودهای مداوم در زمینه بازده و کاهش آلاینده‌گی هستند. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد این موتورها، طراحی بهینه مانیفولد ورودی و پورت‌های ورودی هوا است که جریان هوا را به سیلندرها هدایت می‌کند. بازده حجمی و کیفیت احتراق و مخلوط سوخت و هوا تا حد زیادی به نحوه توزیع و رفتار جریان هوای ورودی بستگی دارد؛ از این رو، هرگونه تغییری که بتواند پارامترهای جریان را بهبود بخشد، اهمیت بسزایی دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، نحوه ورود هوا به سیلندر است. در سال‌های اخیر، استفاده از ساختارهای سطحی مبتنی بر فرورفتگی‌های کروی کوچک شبیه توپ گلف به عنوان راهکاری نوین مطرح شده است که سالانه میلیون‌ها دلار برای بهبود و توسعه این طراحی هزینه می‌شود. این فرورفتگی‌ها، با ایجاد گردابه‌ها و آشفتگی^۳ کنترل‌شده می‌توانند جریان هوا را بهبود داده و افت فشار را به صورت چشمگیری کاهش دهد. فناوری مذکور، که الهام گرفته از طراحی آیرودینامیکی توپ‌های گلف است، پتانسیل افزایش اختلاط سوخت و هوا را به همراه دارد که مستقیماً در کارایی موتور بنزینی تأثیرگذار است.

در طی آزمایش‌های انجام شده توسط رانگارجان که پورت ورودی سرسیلندر در موتور G16B به صورت صیقلی اصلاح شده بود، نتایج نشان داد که توان موتور $4/8$ درصد افزایش یافت [1]. نتایج پژوهش‌های انجام شده اولاف و همکاران نشان داد که فرورفتگی‌های سطحی باعث کاهش درگ و کاهش مقاومت جریان هوا در نزدیکی دیواره می‌شود. آن‌ها نتیجه گرفتند فرورفتگی‌های سطحی باعث تحریک متناوب عرضی جریان هوا در نزدیکی دیواره‌ها می‌شود [2]. در مورد مانیفولد ورودی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد هرچه قدر اندازه رانر بلندتر باشد، گشتاور در دورهای میانی محسوس‌تر می‌شود و هرچه قدر از اندازه رانر کم شود، بیشینه گشتاور به دورهای بالایی منتقل شده و کشش موتور در سرعت‌های بالاتر پایدارتر می‌شود [3]. آزمایش‌های عملی انجام شده در یک موتور سیکلت 110cc انژکتوری نشان داد که افزایش و کاهش طول رانر مانیفولد و زاویه خم آن در توان و گشتاور موتور تأثیر قابل توجهی می‌گذارد [4]. تحقیقات مولدووانو و همکارش بوضوح نشان داد که در یک لوله 200mm با سطح توپ گلفی زمانی که هوا به مرکز لوله میرسد 39.5 درصد بیشتر از سرعت ورود آن از ابتدای لوله است و جریان هوا بصورت جریان مستقیم درمی‌آید [5]. گاتری و همکاران، بصورت کلی اکثر فرورفتگی‌های سطحی را از نظر اندازه و شکل را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند، با ایجاد فرورفتگی بر روی سطح لوله مورد نظر به صورت محاسبه شده میتوان عدد رینولتز را افزایش و نیروی پسای وارد شده را کاهش دهد، آنها نتیجه گرفتند افزایش نیروی پسا باعث می‌شود جریان هوا مقاومت بیشتری در برابر حرکت ایجاد کرد [6]. آنالیزهای دیگری نیز نشان می‌دهد توزیع جریان هوای متلاطم کنترل شده باعث افزایش راندمان حجمی و صرفه جویی در مصرف سوخت شده و در کل، توزیع فشار و عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد [7]. مطالعات انجام شده عبیدی و همکاران بر روی موتور دیزل با پورت‌های صاف، زبر و فرورفتگی‌های سطحی در همان ابعاد و شرایط مرزی نشان داد، در فرورفتگی‌های توپ گلفی افزایش قابل توجه انرژی جنبشی و آشفتگی متوسط وزنی

³ Turbulence



سطحی میشود که ممکن است ناشی از پدیده بازچسبندگی^۴ جریان باشد. همچنین، با بالا رفتن سرعت هوا، انرژی جنبشی نیز افزایش می یابد[۸].

مقاله حاضر، با ترکیب روش های شبیه سازی و آزمایش های تجربی، به بررسی جامع اثرات تغییرات سطح پورت ورودی هوا و منیفولد با فرورفتگی های کروی می پردازد. این رویکرد، امکان اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی و درک دقیق تر از تأثیرات فیزیکی تغییرات را فراهم می آورد. هدف اصلی پژوهش، ارائه راهکارهای عملی و علمی برای بهبود عملکرد و افزایش بازده حجمی در موتورهای احتراق داخلی است که می تواند در نهایت منجر به کاهش مصرف سوخت و آلاینده های به همراه توان و گشتاور زیاد شود.

۲- موارد و روش ها

برای تست توان و گشتاور موتور از یک دینامومتر^۵ تک رول تک محور مجهز به سنسورها، عملگرها و سیستم هایی با خطای ۱٪ و برای برنامه ریزی کامپیتر موتور از دستگاه TNM5000A نسل پنجم با نرم افزار WINOLS استفاده شد. در راستای آماده سازی موتور برای آزمایش در مسیر ورودی هوا، برخی لوازم و قطعات نیز به منظور افزایش دوام و بهبود عملکرد تقویت تعویض گردید، که شامل میل سوپاپ هوا و دود با پروفایل ۷۰۴ کت کمز^۶ که شامل لیفت سوپاپ ۸،۷ میلی متر و دیورشن^۷ هوا و دود به ترتیب ۲۵۹ و ۲۵۲ است. برای افزایش مقدار دبی هوای ورودی، کمپرس موتور بیشتر و نسبت تراکم به ۱۲،۱ تغییر یافت. این تغییرات، برای نشان دادن تاثیر مقدار دبی هوای ورودی لازم بود زیرا موتور از لحاظ کمپرس دینامیکی و استاتیکی و طراحی دچار ضعف بود که با اعمال عوامل ذکر شده تا حدودی جبران میشد. همچنین، برای انجام آزمایشها، سیستم جرقه زنی و پاشش سوخت در برنامه ECU تغییر یافت تا هماهنگی لازم با جریان ورودی اصلاح شده فراهم شود. سپس اصلاحات پورت و منیفولد هوا انجام شد. در بخش روانکاری، از روغن با گرانیوی و افزودنی های مناسب شرایط آزمایشی استفاده شد تا پایداری عملکرد در طول تست تضمین گردد.

برای پرداخت سطح پورت و افزایش سائز و اصلاح راه ورود هوا از دستگاه فرز انگشتی با دنباله ها و اندازه های متفاوت مناسب مرحله انتخاب شد. همچنین، برای ایجاد فرورفتگی های پورت از قطر ۱/۲ میلی متر با بدنه ۳/۱ میلی متر استفاده شد که از نوع مینیاتوری هستند. برای اندازه گیری انواع قسمت های پورت از پرگار اندازه گیری بهره برده شد. مطابق شکل (۱) برای اصلاح پورت، ابتدا اندازه آن کمی بزرگتر شد تا شعاع انحنای ورودی^۸ هوا صاف تر شود و هوا به صورت مستقیم به پشت سوپاپ برسد. سپس دوراهی هوا که اندازه ضخیم و از کانال های آب فاصله زیادی دارد، خشن کاری زیادی شد تا مانند تیغه شود. سپس اندازه پورت به صورت مخروطی شکل که همانند شیپور است پرداخت داده شد. البته عامل قبلی برای پورت مچینگ^۹ که وابسته به اندازه منیفولد هوا است باید تنظیم شود که مانند شکل (۱) دچار انحراف در مسیر هوا نشود. ورودی پورت که

⁴ Reattachment

⁵ Dynamometer

⁶ Cat cams

⁷ Duration

⁸ Short side radius

⁹ Port Matching

ابتدای سرسیلندر است از قطر بزرگ به قطر کوچک که به اندازه سیت سوپاپ وابسته است اصلاح گردید. در مرحله آخر که دیواره پورت به صورت زبر اصلاح گردید، فرورفتگی های توپ گلفی ایجاد میشود.



شکل ۱- سمت راست: انحراف مسیر هوا در مدل مچ نشده اندازه های پورت سر سیلندر و منیفولد، سمت چپ: دستگاه ها استفاده شده برای اصلاح پورت و منیفولد پورت مچ شده.

قبل از آزمایشات تجربی، تغییرات اعمال شده شامل، عمق گودال ها، زاویه شعاعی پورت، ابعاد پورت ورودی و نحوه ورود هوا از منیفولد به پورت سرسیلندر در نرم افزارهای CAD طراحی و اجرا شد. سپس با استفاده از برنامه های شبیه سازی مانند GT-power و دینامیک سیالات محاسباتی CFD برای آنالیز مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، به منظور بررسی ویژگی های جریان هوا در پورت ورودی و ارزیابی تأثیر اصلاح سطح به روش توپ گلفی و مقایسه آن با نمونه فابریک و صیقلی مورد تحلیل قرار گرفت. این شبیه سازی با هدف مقایسه الگوهای جریان پیش و پس از اعمال بافت توپ گلفی بر سطح پورت و تحلیل پارامترهایی نظیر سرعت، فشار، شدت آشفته گی، دما و چگالی انجام گرفت.

برای تضمین تکرارپذیری و صحت نتایج آزمایش، شرایط مرزی جریان هوا بصورت استاندارد و کنترل شده تعریف شدند. دمای محیط آزمایش برابر با ۲۹۷K در نظر گرفته شد تا مطابق با شرایط اتاق و استانداردهای آزمایشگاهی باشد و اثر تغییرات دمایی ناخواسته بر چگالی و ویسکوزیته هوا به حداقل برسد. فشار اتمسفری نیز به عنوان فشار مرجع 100kpa فرض شد تا شرایط واقعی برای مقایسه آزمایش ها فراهم گردد. رطوبت نسبی محیط در حدود ۵۰ درصد ثابت نگه داشته شد تا تأثیر رطوبت بر چگالی و خواص ترمودینامیکی هوا کنترل شود. در عین حال ارتفاع حدود 1350m از سطح دریا به عنوان ویژگی محیطی آزمایش گزارش شد تا اثرات محیطی احتمالی و اختلاف فشار استاتیک با شرایط سطح دریا در تحلیل داده ها مدنظر قرار گیرد. این ترکیب از شرایط ایده آل آزمایشگاهی و پارامترهای واقعی محیطی، امکان بررسی دقیق جریان هوا در پورت ورودی و مقایسه نتایج با شبیه سازی ها و داده های مرجع را فراهم می کند.



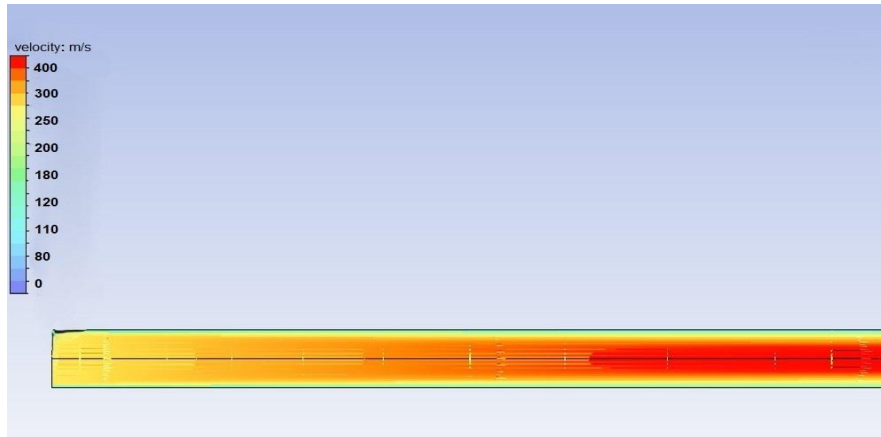
۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه سازی و تحلیل عددی

شبیه سازی عددی CFD در حوزه موتورهای احتراق داخلی یکی از ابزارهای کلیدی است که به پژوهشگر این امکان را می دهد تا پدیده های پیچیده جریان و انتقال جرم را بدون صرف هزینه های سنگین و زمان بر مربوط به کارهای تجربی بررسی کنند. در این پژوهش، قبل از انجام آزمایشهای تجربی، شبیه سازی انجام شد تا علاوه بر درک عمیق تر از نحوه حرکت جریان در پورت ورودی سرسیلندر، امکان مقایسه مستقیم بین شرایط سطح صاف و سطح زبر نیز فراهم شود. همچنین سعی شد، مراحل و مواد آزمایش تا حد امکان به واقعیت نزدیک تر باشد. هدف اصلی از این بخش، ارزیابی کمی و کیفی اثر زبری دیواره ها بر سرعت جریان، حجم هوای ورودی، توزیع فشار، الگوهای آشفته گی، چگالی، دما و در نهایت راندمان حجمی موتور است. چنین رویکردی، به ما اجازه می دهد که قبل از انجام تستهای تجربی، با نگاه جامع تر به رفتار واقعی سیال در شرایط عملیاتی موتور پردازیم و آن را قبل از تست بررسی کنیم.

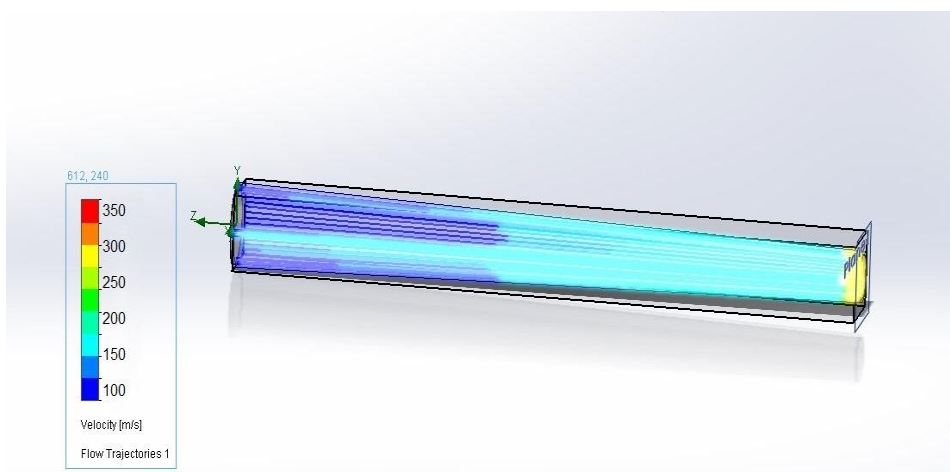
در جریان سیال داخل پورت ورودی سرسیلندر، زبری و ناهمواری سطح نقش دوگانه ای ایفا می کند. از دیدگاه ضریب اصطکاک کمتر، انتظار می رود که سطح صاف و صیقلی بهترین شرایط برای عبور هوا باشد، اما در عمل، وجود زبری عملکرد اختلاط را افزایش می دهد. زمانی که سیال مایع باشد، مانند خودروهای کاربراتور قدیمی مهندسان و تیونرهای موتور مسابقه دریافته بودند که سطح پورت هرچقدر صیقلی تر باشد، جریان بنزین بهتری به سمت محفظه احتراق پیش می رود. ولی بعداً با پیشرفت تکنولوژی و شبیه سازی نرم افزارها نشان داده شد که هوا در سطح زبر و ناهموار دچار آشفته گی کنترل شده می شود و باعث افزایش سرعت سیال در کانال و کاهش دمای سیال می شود. این ریزآشفته گی ها، مانند یک بالشتک انرژی عمل کرده و باعث می شوند ذرات هوا از سطح جدا نشوند و مسیر پورت را با چسبندگی بیشتر با دیواره طی کنند. در نتیجه، سرعت متوسط جریان حفظ و حتی بیشتر می شود و نواحی با فشار پایین و گردابه های بزرگ که در سطح صیقلی ایجاد می شوند، کمتر شکل می گیرند. این عامل در مناطقی که دچار خمیدگی پورت هستند، بسیار اهمیت دارد زیرا فشار موضعی تمایل به افت شدید دارد. حضور لایه مرزی متلاطم اختلاف فشار را کاهش داده و مانع از تشکیل ناحیه سکون می شود. از دیدگاه ترمودینامیکی، هرچند تلاطم ناشی از زبری اندکی افت فشار کلی به همراه دارد، اما این کاهش در برابر افزایش چگالی جرمی جریان ورودی به سیلندر ناچیز است. در نهایت، هوای بیشتری با توزیع سرعت یکنواخت و کیفیت اختلاط بهتر با سوخت وارد محفظه احتراق می شود که به افزایش راندمان حجمی و احتراق کامل تر و بدن ناک منجر خواهد شد.

با بهره گیری از برنامه های CFX_CFO، در ابتدا یک شبیه سازی ساده بر درون پایپ که سیال با سرعت 300m/s با فشار کل 100kPa ، دمای محیط 297K وارد می شود، انجام شد. دور فرضی 6500rpm و طول 400mm با قطر 40mm با دو نمونه سطح انتخاب شد. نمونه اول بصورت کاملاً صیقلی بوده و حداکثر سرعت خروجی در این نمونه به 338m/s با فشار کل 200000pa رسید. در نمونه دیگر، از فرورفتگی های توپ گلفی استفاده شد، که در انتهای لوله سیال با سرعت 400m/s با فشار کل 250000pa گزارش شد. در نمونه اول دما و چگالی به ترتیب 333.15K و 1.57kg/m^3 و نمونه دوم 323.12K و 2.2kg/m^3 مطابق شکل (۲) بدست آمد.



شکل ۲- پروفیل سرعت جریان در پورت با سطح فرورفتگی

در آنالیز دیگری با طراحی لوله به صورت مخروطی رانر بلند و سطح زیر خشن کاری شده شکل از سطح مقطع بزرگ به سطح مقطع کوچک به طرف پشت سوپاپ که با در نظر گرفتن قانون برنولی انتظار میرفت که سرعت سیال در خروجی افزایش یابد. در این مورد، از ورودی بیضی شکل با قطر بزرگ 45mm و قطر کوچک 35mm و قطر دایروی در انتها 29mm رسم شد که اندازه ها نزدیک نمونه آزمایش شده است با ورودی 100m/s و خروجی 280m/s تا 300m/s مطابق شکل (3) مشاهده شد.



شکل ۳- پروفیل سرعت جریان در پورت مخروطی (شیپور) مورد استفاده در تراتل ها خودرو های مسابقه.

۳-۲- رابطه پروفایل میل سوپاپ با پورت ورودی

آزمایش ها و آنالیز های انجام شده نشان میدهد با افزایش لیفت میل سوپاپ و بدون اصلاح پورت، عملکرد موتور به شدت کاهش می یابد. دلیل این امر این است که با افزایش فول لیفت میل سوپاپ در حجم متغیر، دبی ورودی به محفظه احتراق بصورت لحظه ای افزایش میابد. در جدول (۱) نتایج شبیه سازی با لیفت 13mm و قطر ورودی پورت در مدل مخروطی 50mm و دمای تقریبی 293.7K ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه لیفت در دو حالت پورت ساده و مخروطی

قطر سوپاپ	سرعت خروجی	سرعت ورودی	دبی جریان	فشار کل	چگالی	
(mm)	(m/s)	(m/s)	(kg/s)	(Pa)	(kg/m ³)	
۴۰	۵۲	۴۰	2.38e_08	100000	1.21	پورت ساده
۴۰	۸۱	۴۰	5.12e_07	۱۰۷۰۰۰	1.23	پورت مخروطی

برعکس این آزمایش نیز با قطر 44mm و ورودی 50mm با لیفت ۱۰ انجام شد. با افزایش قطر سوپاپ، کاهش شدید سرعت سیال و توربولانس خیلی ضعیف گزارش شد. این آزمایش نشان میدهد که با افزایش لیفت باید به میزان مناسب پورت ورودی اصلاح و با پروفایل میل سوپاپ همخوانی داشته باشد.

۳-۳- تحلیل و مقایسه ماهیت جریان در پورت توپ گلفی

در یک پورت صیقلی، جریان ورودی هوا به دلیل خاصیت چسبندگی^{۱۰} تمایل دارد در نزدیکی دیواره ها سرعت کمتری نسبت به مرکز جریان داشته باشد. این پدیده باعث ضخیم شدن لایه مرزی^{۱۱} و در نهایت کاهش سطح مؤثر عبور جریان می شود. در مقابل، در پورت با سطح توپ گلفی، فرورفتگی های منظم سبب ایجاد گردابه های ریز موضعی می شوند که لایه مرزی را نازک تر کرده و مانع از جدا شدن جریان^{۱۲} می شود.

¹⁰ Viscosity

¹¹ Boundary Layer

¹² Flow Separation

در طی آزمایش انجام شده در موتور های چهار سیلندر تقریباً مشابه با TU5، سرعت های گزارش شده در پورت های ورودی صیقلی و توپ گلفی به ترتیب 300m/s و 420m/s است. سطح زبر ایجاد شده در این نوع، نه تنها باعث افزایش سرعت می شود، بلکه با کنترل جریان هوا در لایه مرزی ایجاد تلاطم، باعث اختلاط بهتر هوا با سوخت میشود که به همراه اصلاح ورودی های هوا، دبی بیشتر نیز وارد محفظه احتراق میشود. شایان ذکر است، در صورتی که دبی و سرعت ورودی بیشتر باشد، عملکرد موتور بهتر میشود؛ ولی چنانچه دبی کم و سرعت زیاد باشد، عملکرد موتور کاهش می یابد زیرا، زمان پر شدن سیلندر را زیاد میکند. برعکس، در دبی زیاد و سرعت کم، هوای کمی وارد محفظه میشود در نتیجه آلایندهی زیاد، محدودیت در توان و گشتاور موتور و ناک های شدید را تجربه کند. پس هدف تعادل حجم جریان و سرعت جریان است.

با توجه به اصول بنیادی قانون گاز ایده آل، مطابق رابطه ۱، چگالی هوا در فشار ثابت با افزایش دما چگالی کاهش میابد.

$$\frac{P}{R \cdot T} = \rho \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی، p فشار، $R = 287 \text{ (J/kg.k)}$ ثابت گاز و T دما بر حسب کلوین است.

و طبق رابطه ۲، سرعت صوت نیز با افزایش دما سرعت نیز افزایش میابد.

$$\sqrt{R \cdot T \cdot \gamma} = c \quad (2)$$

که در آن $\gamma = 1.4$ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه هوا، T دما بر حسب کلوین، R ضریب ثابت گاز است.

با توجه به روابط فوق، در ابتدای پورت سر سیلندر و انتهای منیفولد های فلزی با کاهش چگالی، کاهش دبی ورودی اتفاق می افتد. این مورد در سطح صیقلی و در تراکم های بیشتر باعث خود احتراقی و ناک میشود. ولی مطابق جدول (2) در پورت زبر و فروفتگی سطحی ناهموار باعث شکست لایه مرزی گرم و کمک به حفظ سرعت بالا و دبی ورودی حتی در دمای های بالا میشود. ضمناً مطالعات و آزمایشات انجام شده نشان میدهد با افزایش چگالی، سرعت و سطح مقطع پورت البته به صورت محاسبه شده، عدد رینولدز نیز افزایش میابد.

جدول ۲- مقایسه پارامتر های اساسی در انواع پورتهای

سرعت (m/s)	CFM	قطر (mm)	
۸۵	۱۲۰	۳۰	فابریک
۹۴	۱۳۸	۳۱	صیقل
۱۱۰	۱۵۰	۳۳	گلفی
۸۰	۱۶۵	۳۵	سایز بزرگ

در برخی از مطالعات پیشین، عمق گودال‌های توپ‌گلفی روی سطح پورت ورودی بصورت تقریبی ۲ الی ۴ میلیمتر بهترین عملکرد را دارند. با این حال، این اعداد صرفاً نتیجه مدل‌سازی عددی هستند و در عمل و اندازه‌گیری واقعی تایید نشده‌اند. به علاوه، چنین فرضیات ساده‌سازی شده می‌تواند اثر واقعی فرورفتگی‌ها بر جریان هوا، چسبندگی و تشکیل لایه مرزی را نادیده گرفته و نتیجه‌گیری‌های مبتنی بر آن را از نظر کمی و کیفی غیر دقیق کند. درحالی که عمق و فاصله‌های هر فرورفتگی بسته به سطح مقطع پورت و طول رانر و حجم موتور و عوامل دیگر بستگی دارد، طبق محاسبات انجام شده، بهترین عملکرد با قطر دایره ای ۰/۵ الی ۰/۹ میلیمتر برای این موتور با شرایط در نظر گرفته شده گزارش شد.

۳-۴- بررسی تست توان و گشتاور موتور در حالت عملی

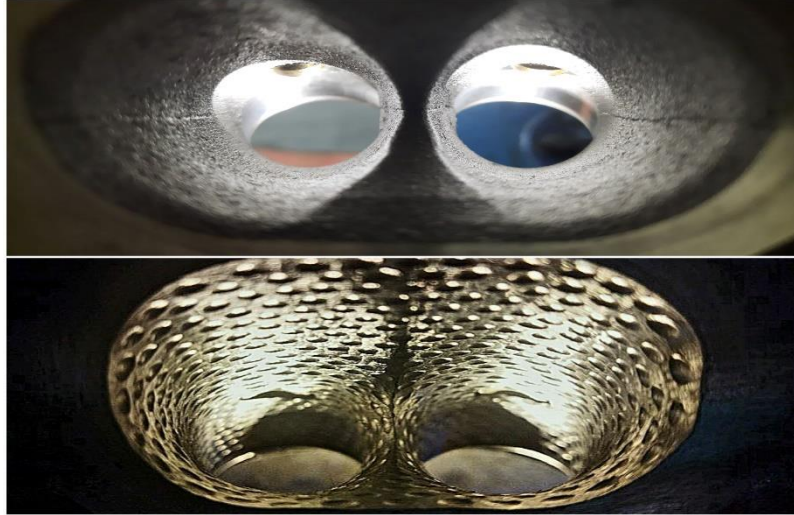
برای بررسی اثر پورت توپ‌گلفی، آزمایش‌ها تنها به اصلاح سطح ورودی محدود نشد، چراکه در چنین موتوری نمی‌توان بدون تغییر برخی اجزای جانبی به نتایج قابل اتکا رسید. این ترکیب امکان مقایسه‌ی دقیق میان پورت صیقلی و پورت توپ‌گلفی را فراهم کرد و شرایط نزدیک‌تری به واقعیت عملکرد موتور ایجاد نمود. شکل (۴) به‌منظور سنجش دقیق اثر اصلاحات انجام‌شده بر روی پورت ورودی سرسیلندر، آزمایش داینو پیش و پس از تغییرات مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه این نمودارها دید روشنی از میزان بهبود عملکرد موتور ارائه می‌دهد و نقش کلیدی در اعتبارسنجی نتایج تحقیق ایفا می‌کند. شکل (۵) نمودار اولیه پیش از اصلاح پورت و شکل (۶)، نمودار پس از اعمال اصلاحات می‌باشد. مطابق نتایج بدست آمده، افزایش محسوسی در مقادیر توان و گشتاور در بازه‌های مختلف دور موتور مشاهده می‌شود. این بهبود به‌ویژه در دوره‌های میانی و بالاتر چشمگیرتر بوده و نشان‌دهنده افزایش راندمان حجمی موتور است. راندمان حجمی این موتور به صورت فابریک به دلیل طراحی قدیمی آن بین ۷۵ الی ۸۰ درصد از طرف شرکت سازنده گزارش شده، که با شبیه‌سازی‌های انجام شده بعد از اصلاح پورت و منیفولد، راندمان حجمی به ۹۰ درصد افزایش یافته که این عدد برای یک موتور تنفس طبیعی قابل قبول است و نزدیک موتور پرخوران قرار می‌گیرد. با رسیدن قدرت به 163hp باعث می‌شود موتور افزایش توان ۲۳/۵٪ قبل از ریمپ حالت اصلاح نشده داشته باشد. بررسی دقیق‌تر نمودارها بیانگر آن است که اصلاح جریان ورودی و کاهش تلاطم‌های نامطلوب در جریان، توان موتور را در سرعت‌های بالاتر پایدارتر ساخته و گشتاور موتور را به دور‌های بالایی انتقال می‌دهد. به طوری که بیشینه گشتاور قبل از تغییرات ریمپ در دور موتور 4500rpm و بعد اصلاح به دور 5400rpm انتقال می‌یابد. جابجایی قله گشتاور از دور پایین به بالا باعث می‌شود موتور در دور‌های بالا کشش بیشتر و پیک^{۱۳} توان بیشتری بدهد و بر خلاف دیگر خودروهای تقویت شده، مصرف سوخت افزایش نمی‌یابد و شتاب خودرو در دور‌های پایین کاهش نمی‌یابد. با مخلوط شدن هوا و سوخت بهتر در هر دور موتور، آلاینده‌گی نیز به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد که این امر مؤید پیش‌بینی‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده است.

¹³ Peak power

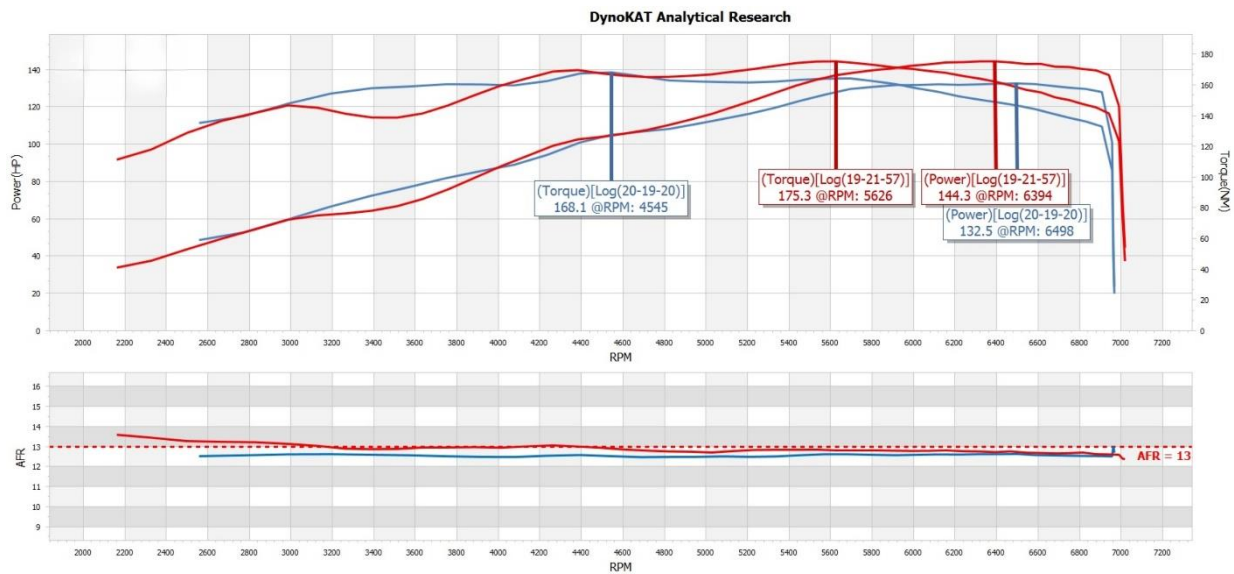


نهمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری در مهندسی مکانیک و هوافضا

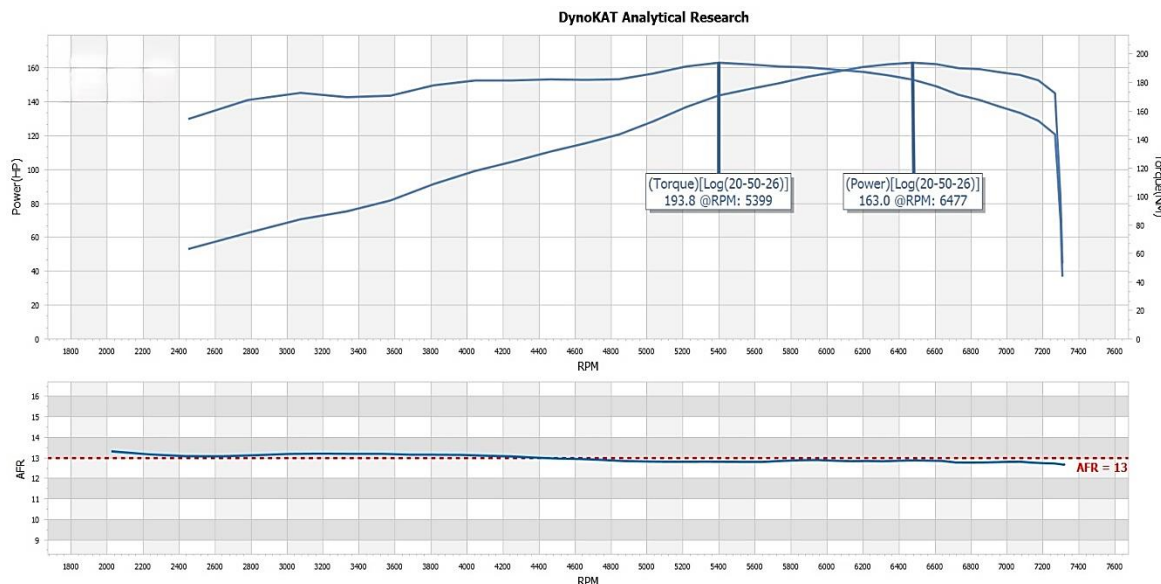
9th International Conference on Technology Development in Mechanical and Aerospace Engineering



شکل ۴- شکل پورت ورودی، بالا قبل از اصلاح و پایین، پورت اصلاح شده توپ گلفی.



شکل ۵- نمودار توان، گشتاور و نسبت هوا به سوخت برای موتور قبل از اصلاح پورت و منیفولد جریان هوا. (گراف قرمز بعد از ریمپ و گراف آبی قبل از ریمپ)



شکل ۶- نمودار توان، گشتاور و نسبت هوا به سوخت برای موتور بعد از اصلاح پورت و منیفولد و جریان هوا ورودی.

با تحلیل نمودارهای های نشان داده شده میتوان نتیجه گرفت که اصلاح جریان هوای ورودی انتگرال بازتر و یکنواخت تر را به ارمغان میآورد که ناک را به شدت کاهش میدهد. نتایج اندازه گیری توسط دینامومتر نشان می‌دهد که اصلاحات پورت توانسته است عملکرد کلی موتور را بهبود بخشد و زمینه‌ی توسعه‌های بیشتر در پروژه‌های آتی را فراهم نماید.

۴- نتیجه گیری و بحث

اصلاح هندسه پورت ورودی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به الگوی جریان هوا دارد. زمانی که سطح مقطع و مسیر عبور هوا بهینه‌سازی می‌شود، سرعت بیشتر و یکنواخت‌تری در طول پورت ایجاد شده و جریان به‌جای تلاطم‌های موضعی، رفتاری سازمان‌یافته و تحت کنترل پیدا می‌کند و هوا کمتر به صورت جریان آرام^{۱۴} حرکت میکند. این تغییر سبب می‌شود پر شدن سیلندر در بازه‌ی زمانی محدود باز بودن سوپاپ‌ها کامل‌تر انجام گیرد و راندمان حجمی موتور به شکل قابل توجهی افزایش یابد. پورت ورودی هرچند به‌صورت مستقل قابل بررسی است، اما عملکرد آن به‌شدت تحت‌تأثیر طراحی منیفولد قرار دارد. زمانی که اصلاحات پورت همسو با طراحی و هندسه منیفولد صورت گیرد، جریان ورودی از لحظه‌ی ورود به منیفولد تا داخل محفظه احتراق با کمترین افت فشار عبور می‌کند که این طراحی منیفولد باید به صورت محاسبه شده پیش رود. این هماهنگی ساختاری،

¹⁴ Laminar flow



نه تنها توان لحظه‌ای موتور را افزایش می‌دهد، بلکه پایداری عملکرد در شرایط بارهای مختلف را نیز تضمین می‌کند، که این عمر چالش موتورهای تنفس طبیعی در خصوص دورهای بالا است.

بیان این نکته ضروری است که بهبود جریان ورودی تنها به افزایش دبی هوا محدود نمی‌شود، بلکه کیفیت اختلاط سوخت و هوا را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. جریان یکنواخت‌تر و سرعت‌های بالاتر در نزدیکی سوپاپ ورودی باعث شکل‌گیری مخلوط همگن‌تری در محفظه احتراق شده که به احتراق کامل‌تر منجر می‌شود که اطراف سوپاپ جریان هوای متفاوتی نسبت به جاهای دیگر پورت نشان می‌دهد، دلیل این امر تنگ شدن سطح ورودی هواست. این اثرات کوچک و جزئی در نتایج داینو به شکل گشتاور پایداری و پاسخ‌گویی سریع‌تر موتور نمایان می‌شوند. با این حال، این فرآیند خالی از محدودیت نیست؛ دقت بالایی ماشین‌کاری، نیاز به تجهیزات تخصصی و به صرفه نبودن اقتصادی و احتمال بروز ناپایداری جریان در صورت طراحی نامناسب از جمله معایب آن محسوب می‌شوند. علاوه بر این، در برخی شرایط، تمرکز بیش از حد بر افزایش جریان ممکن است به کاهش سرعت محلی هوا و در نتیجه افت کیفیت اختلاط سوخت و هوا بیانجامد. همچنین، می‌تواند باعث تلاطم و مخلوط بیش از اندازه سوخت و هوا شود که باعث افزایش طول شعله^{۱۵} شود که این امر باعث آلودگی هوا، افزایش مصرف سوخت، کاهش توان موتور و عمر مفید آن می‌شود. بنابراین، دستیابی به بیشینه مزایا مستلزم رویکردی متوازن میان طراحی، شبیه‌سازی و آزمون عملی است.

تحقیق حاضر نشان داد که اصلاح هندسه پورت و منیفولد ورودی می‌تواند به‌طور مستقیم کیفیت جریان هوا و فرآیند پر شدن سیلندر را تحت تأثیر قرار دهد. داده‌های داینو پیش و پس از اصلاحات به وضوح بیانگر افزایش توان و گشتاور در محدوده‌های مختلف دور موتور بوده و صحت تحلیل‌های تئوری و شبیه‌سازی‌های CFD را تأیید می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که بهبود مسیر جریان هوا، فراتر از یک تغییر مکانیکی ساده بوده و موجب ارتقای بنیادین راندمان حجمی موتور شده است.

بررسی دقیق‌تر نمودارهای داینو نشان می‌دهد که افزایش توان عمدتاً در دورهای میانی و بالای موتور محسوس‌تر بوده است؛ جایی که محدودیت جریان ورودی در طراحی اولیه بیشترین نقش بازدارنده را ایفا می‌کرد. اصلاحات انجام‌شده با کاهش افت فشار و هموار کردن مسیر عبور هوا توانسته‌اند این گلوگاه را برطرف کرده و شرایطی پایداری برای تنفس موتور فراهم آورند. افزون بر ارتقای مستقیم عملکرد، اصلاحات پورت و منیفولد اثرات غیرمستقیم مهمی نیز به همراه داشته‌اند. کیفیت بالاتر جریان در نزدیکی سوپاپ ورودی منجر به اختلاط یکنواخت‌تر سوخت و هوا شده و در نتیجه احتراق کامل‌تر، کاهش ناک و بهبود بازده حرارتی موتور را به دنبال داشته است.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح پورت و منیفولد نه تنها یک راهکار عملی برای افزایش توان موتورهای تنفس طبیعی محسوب می‌شود، بلکه بستر مناسبی برای توسعه‌های آتی در زمینه بهینه‌سازی میل سوپاپ، استراتژی‌های تزریق سوخت و حتی کنترل‌های الکترونیکی فراهم می‌کند.

¹⁵ Ignition lag



۵_ قدرتانی

از حمایت مجموعه‌های Ali ap tuning و Carino Dayno Auto Tuning در انجام این پژوهش قدرتانی می‌گردد.

۶- مراجع

1. Kishore Rangarajan, (2018), Performance improvement of racing engine using simulation study and experimental validation, International journal of pure and applied mathematics, 118, 19_25.
2. Van Campenhout, O. W. G., Van Nesselrooij, M. Veldhuis. L. L. M., Van Oudheusden, B. W. & Schrijer. F. F. J, (2018), An experimental investigation into the flow mechanics of dimpled surfaces in turbulent boundary layers, In AIAA aerospace sciences meeting (210059 ed.). Article AIAA 2018-2062 American, Institute of aeronautics and astronautics Inc. (AIAA). <https://doi.org/10.2514/6.2018-2062>.
3. Jagadishsingh Bayas. Anita Wankar Prof. N.P. Jadhav, (2016), A review paper on effect of intake manifold geometry on performance of ic engine, vol2, 2395-4396.
4. Baimy Alexander. Nanang Ruhyat, (2025), Experimental analysis of the effects of intake manifold length and angle variations on torque and power in 110 cc fuel injected motorcycles, G-Tech : Jurnal teknologi terapan vol 9, 1513-1523.
5. D Moldovanu. A Csato1. N Bagameri, (2019), Flow studies on increasing the efficiency of the inlet manifold, IOP conference series: Materials science and engineering, vol 568, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/568/1/012050>
6. Gattere, F. Chiarini, A, Quadrio,(2022), M. Dimples for skin-friction drag reduction: status and perspectives, 7, 240, <https://doi.org/10.3390/fluids7070240>.
7. Purvin Makwana. Imran Molvi. Nirav Gandhi,(2024), Design, Development & performance analysis of an intake manifold by creating turbulence with dimples, Pages 670-678, DOI: 10.62441/nano-ntp.v20i4.44.
8. Shahim Haider Abidi, M.M. Hasan, (2021), Variation of turbulent kinetic energy due to dimples in intake manifold for diesel engine, Case studies in thermal engineering, Volume 27, 101299, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101299>.