



طراحی، بهینه‌سازی و ساخت چندراهه خارج کننده برای یک موتور برون نصب اشتعال جرقه‌ای

حسین نصری^۱، علی جلالی^{۲*} و علی هدایتی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷ تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷ تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی تأثیر استفاده از چندراهه‌های خارج کننده به عنوان جایگزین چندراهه‌های سنتی در یک موتور برون نصب اشتعال جرقه‌ای با هدف افزایش توان حداکثر موتور می‌پردازد. برای بررسی تأثیر چندراهه خروج بر عملکرد موتور و انتخاب طرح برتر، مدل هندسی چندراهه خروج پیشنهادی در یک فرآیند شبیه‌سازی عددی بررسی شده و پس از بهینه‌سازی ابعادی ساخته شده و بر روی موتور نصب گردید. پس از نصب چندراهه خروج طراحی شده روی موتور، موتور با چندراهه خروج پایه و موتور با چندراهه خروج طراحی شده در اتاق آزمون مورد بررسی آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. پس از آزمایش موتور مشاهده شد که چندراهه خروج طراحی شده موجب افزایش توان حداکثر موتور تا ۱۵ درصد می‌شود.

کلمات کلیدی: موتور برون نصب؛ چندراهه خارج کننده؛ طراحی و ساخت؛ بهبود توان.

Design, Optimization and Manufacture of Exhaust Manifold for a Outboard Spark Ignition Engine

H. Nasri¹, A. Jalali^{2,*}, A. Hedayati³

¹ Msc, Departement of Mechanical Engineering., Payame Noor University (PNU), P.O.BOX 19395-3697, Tehran, Iran.

² Asst. Prof, Departement of Mechanical Engineering., Payame Noor University (PNU), P.O.BOX 19395-3697, Tehran, Iran.

³ Msc, Energy Conversion, Ferdowsi University of Mashhad., Mashhad, Iran.

Abstract

The present study investigates the effect of using exhaust smoke extractors as an alternative to traditional manifolds in a spark ignition engine designed to maximize engine power. To investigate the effect of the extractors on the engine performance and selection of superior design, the proposed geometric model of proposed manifolds in a numerical simulation process has been investigated and after optimization has been constructed and installed on the engine. At the next step, the engine was experimentally tested in the test cell. Results were compared with the base engine. It was observed that the designed exhaust extractors would increase the maximum engine power up to 15%.

Keywords: Outboard Engine; Extractor Manifold; Design and Construction; Improvement Power.

۱- مقدمه

سیستم تخلیه^۱ خودروها تأثیر زیادی در عملکرد موتور دارد. همان‌گونه که سیستم مکش^۲ وظیفه دارد هوا و سوخت ورودی را در کمترین زمان و بهترین عملکرد ممکنه به سیلندرها برساند، گازهای تولیدشده توسط احتراق مخلوط هوا و سوخت نیز باید به‌سرعت تخلیه شود تا شرایط و پتانسیل لازم برای ورود مخلوط شارژ هوا و سوخت جدید به محفظه سیلندرها فراهم گردد. فراهم نمودن یک مسیر بدون محدودیت برای خروج محصولات احتراق و دستیابی به طول تنظیم‌شده جهت بهینه نمودن پتانسیل امواج اسکونجینگ^۳ می‌تواند به‌طور توان کلی موتور و زمان واکنش درپچه گاز را بهبود بخشد. عملکرد اولیه یک سیستم تخلیه فراهم نمودن ابزاری جهت تخلیه محصولات احتراق از محفظه است. هدف این است که یک حجم فضای خالی در بالاسر پیستون ایجاد شود که این حجم خالی سپس توسط مخلوط هوا و سوخت تازه پر شده و آماده اشتعال گردد. انتظار می‌رود هر سیستم تخلیه این عملکرد خود را به بهترین و مؤثرترین روش ممکن اجرا نموده، حداقل محدودیت ممکنه را برای جریان سیال ایجاد نموده و شرایط مناسبی را برای بهبود پتانسیل القایی و تولید توان فراهم نماید. این شرایط عبارت است از حداقل نمودن محدودیت‌ها در برابر جریان، به حداقل رساندن فشار برگشتی، کاهش آلودگی‌های شارژ و استفاده از امواج دینامیکی در سرتاسر طول چندراهه. کاربردهای ویژه عملکردهای ویژه‌ای از سیستم تخلیه طلب می‌کند و متناسب با آن انواع متفاوتی از چندراهه‌های تخلیه مناسب برای اهداف گوناگون وجود دارند. در یک تقسیم‌بندی کلی سیستم‌های تخلیه خروجی به دو دسته کلی تقسیم می‌گردند که عبارت است از سیستم‌های تخلیه با چندراهه ریخته‌گری‌شده و سیستم‌های خارج‌کننده^۴ برای مقاصد عملکردی خاص. خارج‌کننده‌ها که به آنها هدرز^۵ هم می‌گویند، به لوله‌های جداگانه برای هر پورت گاز خروجی اطلاقی می‌گردد و نوعاً با لوله‌های با طول زیاد مشخص

می‌گردند. بستگی به ساختار یک دستگاه خارج کننده ممکن است شامل لوله‌های اولیه و ثانویه و یا فقط لوله‌های اولیه باشد. لوله‌های اولیه از پورت‌های خروجی تخلیه شروع می‌شوند و در یک جمع کننده که در نهایت به یک لوله که قبل از صدا خفه کن قرار دارد متصل می‌شوند یا ممکن است لوله‌های اولیه به یک جمع کننده چندتایی متصل شده و سپس با لوله‌های ثانویه (دوتایی) جریان می‌یابند تا به یک لوله ختم شوند. در ادامه برخی از مطالعات انجام‌شده در زمینه چندراهه خروج و موتورهای اشتعال جرقه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در سال ۲۰۰۴ گالیندو و همکاران [۱] به طراحی یک چندراهه خروج برای بهبود عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی توربوشارژ در حالت گذرا پرداختند. آنها یک چندراهه خروج دو جداره با شکاف هوایی و یک چندراهه خروج پالسی را ابتدا مدل‌سازی و سپس ساختند و در سرعت ثابت و بارهای گذرا مورد آزمایش قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که چندراهه خروج طراحی‌شده راندمان حجمی را در زمان‌های متغیر نسبت به حالت مرجع، افزایش می‌دهند. بهبود راندمان حجمی در چندراهه خروج پالسی بیشتر از مقدار مشابه آن در چندراهه خروج دو جداره است. در سال ۲۰۱۰ تیلور و همکاران [۲] به بررسی تأثیر چندراهه خروج آب خنک و باز خورانی گازهای خروجی^۶ در حالت تمام بار برای کوچک‌سازی یک موتور تزریق مستقیم دیزل، پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها کاهش واضح منطقه سوخت‌گیری بالا و در نتیجه کاهش ۶.۱ درصدی مصرف سوخت را در اثر استفاده از نسبت هوا به سوخت رقیق نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۰ مندس و تومیوس [۳] به بررسی ساختاری چندراهه خروج با تمرکز برای کاهش جرم یک موتور دیزل پرداختند. هدف آن‌ها کاهش جرم موتور از ۲۹۰ کیلوگرم به ۲۶۰ کیلوگرم بود و برای دستیابی به این مهم قطعات زیادی را مجدداً طراحی نمودند. البته شکل و جنس مواد و اندازه مجاری در طراحی آن‌ها تغییر نمی‌کند. آن‌ها با تغییر جزئی چندراهه خروج، آنالیزهای HCF^۷ و فرکانس طبیعی گازهای خروجی را برای پیشگیری از آسیب‌دیدگی قطعاتی نظیر

^۱ Exhaust System^۲ Intake System^۳ Scavenging^۴ Extractor^۵ Headers^۶ Exhaust Gas Recirculation (EGR)^۷ High Cycle Fatigue

اشتعال جرقه ای برای کاهش آلودگی منتشر شده از موتور پرداختند. آنها با تجزیه و تحلیل فشار و سرعت برگشتی گازهای خروجی ۵ نمونه چندراهه خروج برای کاهش انتشار آلاینده ها پیشنهاد دادند. در سال ۲۰۱۹ ساهو و تیا [۹] به تحلیل همزمان المان محدود-دینامیک سیالات محاسباتی چندراهه خروج برای کاهش تنش یک موتور تزریق مستقیم دیزل پرداختند. نتایج مطالعات آنها کاهش ۱۳ درصدی تنش و حذف نقاط تمرکز تنش در چندراهه مورد بررسی را نشان می دهد.

بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی و کنترل انتشار آلاینده‌های تولیدی این موتورها از مهم‌ترین اهداف مهندسان توسعه‌دهنده موتور است. با توجه به لزوم اهمیت موتور احتراق داخلی در صنایع دریایی، بهبود عملکرد این موتورها را می‌توان از اهداف اصلی تولیدکنندگان شناورهای دریایی محسوب نمود. هدف پژوهش پیش رو افزایش توان حداکثر موتور برون نصب با تغییر چندراهه خروج ریخته‌گری شده به یک چندراهه استخراجی که اصطلاحاً به آن هدرز گفته می‌شود، است. در موتورهای برون نصب با توان‌های بیش از ۱۰۰ اسب بخار با توجه به کاربری شناور پروانه خاصی برای موتور طراحی می‌شود. هدف مهندسان توسعه‌دهنده موتور در شناورهای تندرو دستیابی به سرعت حداکثر بیشتر است. برای رسیدن به این هدف باید توان موتور تا سرعت‌های بالای عملکردی موتور بیشتر از توان جذب‌شده توسط پروانه باشد. با توجه به اینکه پروانه‌هایی که روی موتور شناورهای تندرو نصب می‌شود در سرعت‌های متوسط به پایین قابلیت جذب توان محدودی دارد، افزایش توان موتور در این محدوده عملکردی نتیجه‌ای در بهبود عملکرد شناور نخواهد داشت. به همین دلیل طراحی و بهینه‌سازی موتور برای دستیابی به توان حداکثر بالاتر انجام شده است.

در ابتدا دو هندسه اولیه از هدرز با تبعیت از هدرزهای مورد استفاده در موتورهای احتراق داخلی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی هدرز، طراحی می‌شود. پس از آن هندسه هدرزهای طراحی‌شده در یک نرم‌افزار ابعادی شبیه‌ساز موتور احتراق داخلی، شبیه‌سازی شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس هدرزی که محدودیت‌های طراحی در طرح آن لحاظ شده باشد، ساخته‌شده و روی موتور نصب می‌گردد. در پایان توان و گشتاور خروجی موتور

توربوشارژ انجام دادند و مشاهده نمودند حداکثر دمای عملکردی چندراهه خروج تغییر یافته برابر ۶۸۷ درجه سانتی‌گراد است که مقدار متناظر آن برای شروع تغییر شکل‌های کوچک، کمتر است (۸۳۵ درجه سانتی‌گراد). آن‌ها در نهایت توانستند جرم چندراهه خروج را از ۳.۳۵ کیلوگرم به ۲.۹۸۹ کیلوگرم تغییر دهند. در سال ۲۰۱۳ دنگ و همکاران [۴] به تجزیه و تحلیل لرزش ناشی از سیالات در یک چندراهه خروجی یکپارچه پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که تحریک مکانیکی موتور نقش اصلی را در پاسخ دینامیکی چندراهه خروج بازی می‌کند. ضمن اینکه لرزش ناشی از سیال فقط بر پاسخ‌های چندراهه تخلیه در فرکانس‌های پایین اثرات کمی دارد، درحالی‌که می‌تواند در فرکانس‌های بالا نادیده گرفته شود. در سال ۲۰۱۵ اروگلو و همکاران [۵] به بررسی مدت زمان تحلیل هم‌زمان CFD-FE چندراهه خروج پرداختند. آن‌ها با تحلیل حرارتی-مکانیکی ساختاری چندراهه خروج ترک‌های ساختگی را در آزمون خستگی حرارتی به‌خوبی پیش‌بینی نمودند. از آنجایی که کشش‌های غیر الاستیک، تعیین‌کننده جایی است که ترک در طی آزمایش آغاز شده است، آن‌ها پیش‌بینی خستگی حرارتی را بر اساس نتایج هر دو نوع پلاستیک و خزش انجام دادند و مشاهده نمودند استفاده از این روش هزینه‌ها را کاهش و سرعت انجام طراحی را کاهش خواهد داد. در سال ۲۰۱۶ نور و همکاران [۶] به بررسی تأثیر پاشش آب در چندراهه خروج بر احتراق و انتشار آلاینده در یک موتور اشتعال تراکمی پرداختند. با پاشش آب در چندراهه خروج هنگام همپوشانی سوپاپ‌ها، محصولات احتراق دوباره به سیلندر بر می‌گردد و با هوا و سوخت مخلوط شده و در احتراق شرکت می‌کنند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که تزریق آب موجب افزایش فشار و گرمای آشکار آزادشده در سیلندر می‌شود. از طرف دیگر پاشش آب موجب کاهش انتشار NO_x می‌شود اما انتشار دوده را افزایش خواهد داد. آنها در مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر پاشش اتانول در چندراهه خروج بر احتراق و انتشار آلاینده‌های یک موتور تزریق مستقیم پرداختند و مشاهده نمودند که فشار مؤثر متوسط اندیکاتوری و انرژی آزاد شده در هر سیکل به ترتیب ۸.۲ و ۱۴.۲ درصد افزایش یافتند [۷]. در سال ۲۰۱۸ ونکاتسن و همکاران [۸] به طراحی و آنالیز چندراهه ورود یک موتور

شبکه‌بندی شطرنجی می‌گویند. معادلات بقاء که در نرم‌افزار جی‌تی‌پاور حل می‌شوند، عبارت است از:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{boundaries}} \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{d(m_e)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{\text{boundaries}} (\dot{m} H) - hA_s(T_{\text{fluid}} - T_{\text{wall}}) \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho HV)}{dt} = \sum_{\text{boundaries}} (\dot{m} H) + V \frac{dp}{dt} - hA_s(T_{\text{fluid}} - T_{\text{wall}}) \quad (3)$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum_{\text{boundaries}} (\dot{m} u)}{dx} - \frac{4C_f \frac{\rho u |u|}{2} \frac{dx A}{D} - C_p \left(\frac{1}{2} \rho u |u| \right) A}{dx} \quad (4)$$

معادلات (۱) تا (۴) به ترتیب معادله بقای جرم، بقای انرژی (صریح)، بقای آنتالپی (ضمنی) و بقای مومنوم است. معادلات حاکم بر جریان سیال با انتگرال‌گیری نسبت به زمان و مکان حل می‌شوند. این انتگرال‌گیری را می‌توان هم در قالب روش‌های صریح و هم در قالب روش‌های ضمنی انجام داد. در پژوهش حاضر برای حل میدان جریان سیال از روش صریح استفاده شده است. در این روش مقادیر فشار، دما و سایر متغیرها در هر سلول و در هر زمان جدید برحسب مقادیر معلوم سلول‌های همسایه محاسبه می‌شود. در نتیجه حل معادلات به شکل مستقیم صورت می‌گیرد و نیازی به انجام تکرار نیست. برای اطمینان از پایداری روش حل باید به محدودیت‌هایی که عدد کورانت ایجاد می‌کند، توجه نمود. وجود همین محدودیت‌های گام زمانی باعث می‌شود که هزینه‌های زمانی روش صریح افزایش یابد. باید توجه نمود که هر چند این روش زمان زیادی نسبت به روش ضمنی صرف می‌کند اما نوسانات فشار جریان هوای ورودی به این موتور و نیز سامانه‌های مربوط به تزریق سوخت را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌نماید. البته در شبیه‌سازی موتور (مثلاً در شبیه‌سازی سیستم‌های خنک کاری) همیشه نوسانات مقادیر فشار وجود خواهد داشت.

نرم افزار جی‌تی‌پاور برای شبیه‌سازی مدار قدرت موتور بسیار ساده عمل می‌کند البته به دلیل نیاز به اطلاعات

برون نصبی که از هدرز استفاده می‌کند، در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با موتوری که از چندراهه خروج پایه استفاده می‌کند، مقایسه می‌شود. در بخش بعدی جریان سیال در چندراهه‌های خروج به خصوص چندراهه خروج مورد استفاده در پژوهش حاضر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- شبیه سازی عددی نمونه‌ها و انتخاب طرح برتر

۲-۱- شبیه سازی عددی موتور پایه

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی عملکرد موتور به کمک نرم‌افزار جی‌تی‌پاور^۱ که کاربرد وسیعی در مطالعات مربوط به موتورهای احتراق داخلی دارد، انجام شده است [۱۰-۱۲].

در هر مسئله جریان سیال، معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی حل می‌گردد. در نرم‌افزار جی‌تی‌پاور تمامی این معادلات به صورت یک بعدی حل می‌شوند. به این معنا که تمامی کمیت‌ها در جریان به صورت میانگین در نظر گرفته می‌شوند. دبی جرمی، چگالی و انرژی داخلی مجموعه متغیرهایی هستند که در هر گام محاسبه می‌شوند. در روش‌های عددی کل سیستم به حجم‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شود. علاوه بر کل سیستم، در صورت نیاز گسسته سازی در سایر زیرسیستم‌ها انجام می‌پذیرد. بر خلاف لوله‌ها که به حجم‌های کوچک‌تری در راستای طولشان تقسیم می‌گردند، هر کدام از تقسیم‌کننده‌های جریان نیز به صورت مستقل در نظر گرفته می‌شوند. در کل دامنه حل، هر کدام از حجم‌ها به وسیله مرزهایی به یکدیگر متصل می‌شوند. متغیرهای جریان، در راستای هر کدام از حجم‌ها به شکل یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و مقادیرهای متناظر در مرکز سلول ذخیره می‌گردد. همان‌گونه که در بالا نیز بیان شد متغیرهای مقداری جریان نیز چگالی و انرژی داخلی مجموع هستند. متغیرهای اولیه، فشار، دما، آنتالپی مجموع و غلظت‌ها متغیرهای ثانویه هستند. در مرز هر سلول متغیرهای برداری نیز حساب می‌شوند. متغیرهای برداری اولیه شامل شار جرمی و متغیرهای برداری ثانویه شامل سرعت، شار کسرهای جرمی و غیره هستند. به این نحوه گسسته سازی روش

¹ GT Power

طراح بخواهد برای موتوری که به منظور دیگری طراحی و ساخته شده است و اکنون از آن برای کاربری دیگری استفاده می‌گردد، قطعه جدیدی طراحی نماید با محدودیت‌های زیادی مواجه می‌گردد. بنابراین دو طرح بالا به عنوان طرح‌های قابل قبول پیشنهاد می‌گردد ویژگی این طرح‌ها عبارت است از:

۱. از نظر جانمایی در محل پیش‌بینی شده قابل نصب است.
۲. از نظر افزایش توان پیش‌بینی می‌گردد قابلیت افزایش توان را داشته باشد.
۳. قابلیت ساخته شدن را دارا باشد.
۴. دو طرح نشان داده شده در شکل ۴ طرح‌های مناسبی هستند. اما باید یک طرح را انتخاب و آن را بهینه‌سازی نمود. مهم‌ترین نتایج حاصل شده پس از بررسی دو طرح عبارت است از:
 ۱. طرح A دارای ساختاری مناسب‌تری است. طول لوله‌ها کوتاه و انحنای کمتری دارند و احتمالاً راندمان بهتری نیز داشته باشد. تنها مشکل این است که برای ساخت آن نیاز به ساخت قالب‌های فرم دهی است که برای ساخت نمونه توجیه اقتصادی ندارد.
 ۲. توان ترمزی دو طرح در سرعت‌های مختلف تقریباً یکسان است اما طرح A توان خروجی حداکثر بالاتری دارد (شکل ۶).
 ۳. با توجه به نتایج حاضر می‌توان نتیجه گرفت که هدرز A برای ساخت و نصب در موتور مورد بررسی نسبت به هدرز B برتری دارد. شکل ۷ موتور برون نصب مورد بررسی را به همراه هدرز A نشان می‌دهد.
 ۴. طرح B دارای خمیدگی و انحنای بیشتری است و طول لوله‌های مرتبط آن نیز بزرگ‌تر است و فضای نسبتاً بیشتری را اشغال می‌نماید. از ویژگی‌های آن به دلیل استفاده از لوله و زانوهای آماده هزینه و فرآیند ساخت آن مناسب است.

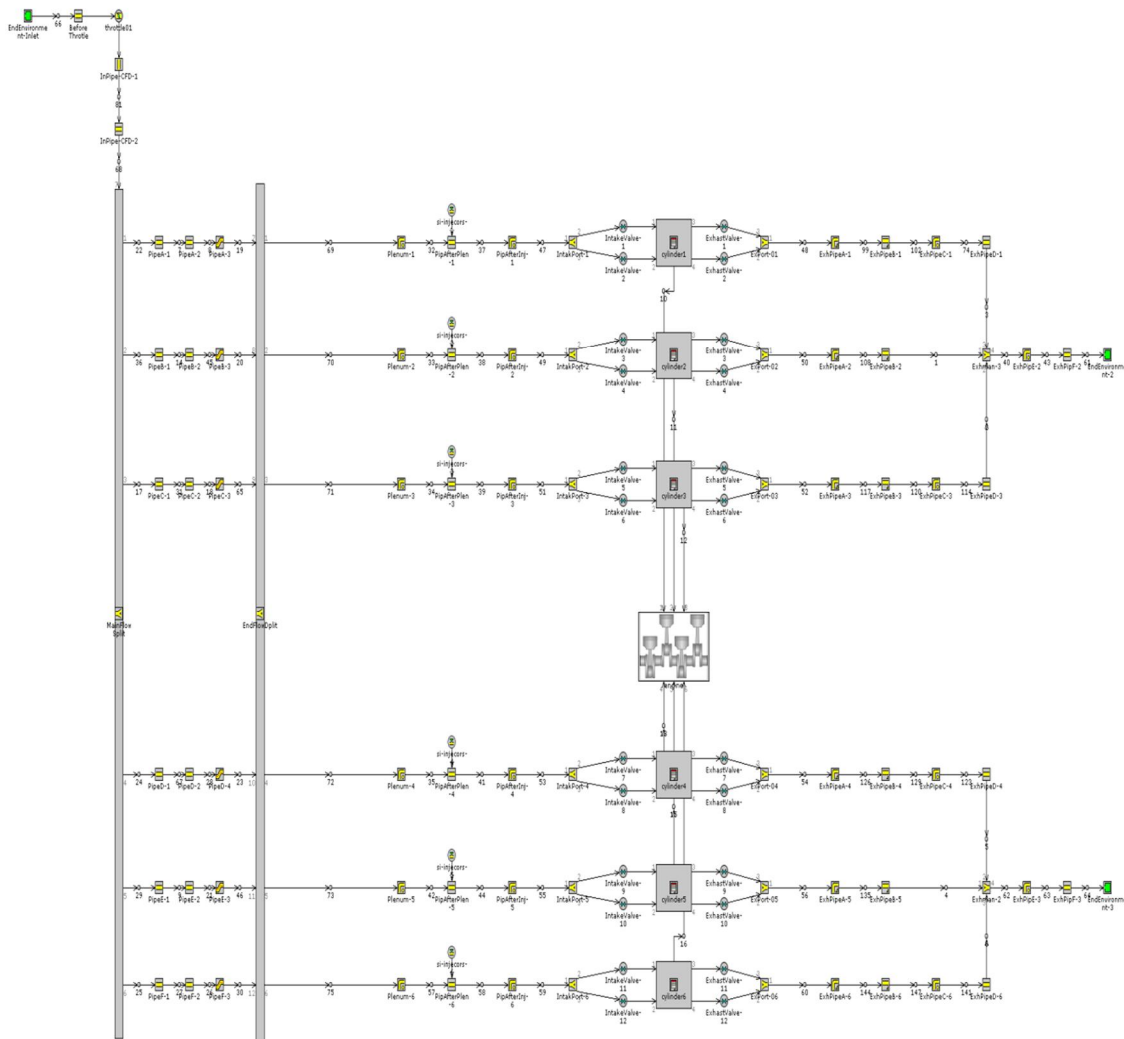
ورودی بسیار برای شبیه‌سازی، فرآیند شبیه‌سازی با دشواری‌های خاصی مواجه خواهد شد. قبل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری موتور نیاز است که مشخصات موتور مورد بحث در پژوهش حاضر بررسی شود. مشخصات این موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. پس از اندازه‌گیری‌های هندسی از ابعاد اجزای درگیر در فرآیند شبیه‌سازی و همچنین اندازه‌گیری متغیرهای عملکردی موتور نظیر زمان‌بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌های موتور، جرعه شمع، دمای هوای ورودی به موتور، نسبت هم‌ارزی و غیره مدار ابعادی سامانه تولید توان موتور در نرم‌افزار جی‌تی‌پاور برای موتور پایه به صورت شکل ۱ خواهد شد. برای بررسی صحت حل عددی انجام شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور با نتایج آزمایشگاهی موتور مقایسه می‌شود. برای اندازه‌گیری گشتاور ترمزی موتور پایه از دینامومتر الکتریکی و برای اندازه‌گیری گشتاور ترمزی موتور برون نصب از دینامومتر هیدرولیکی استفاده شده است. خطای اندازه‌گیری گشتاور ترمزی این ادوات ۱ نیوتن بر متر است. برای اندازه‌گیری سرعت موتور نیز از سنسور سرعت با خطای اندازه‌گیری ۱۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. با توجه به شکل ۲ شبیه‌سازی عددی با میانگین خطا ۶ درصد توان ترمزی موتور پایه را پیش‌بینی نموده است. بخشی از خطای ایجاد شده در حل عددی ناشی از حل ابعادی جریان توسط نرم‌افزار است. از عوامل دیگری که موجب بروز خطا در حل عددی شده است می‌توان به خطای مدل‌های عددی، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی اشاره نمود.

۲-۲- شبیه‌سازی عددی هدرز و انتخاب طرح برتر

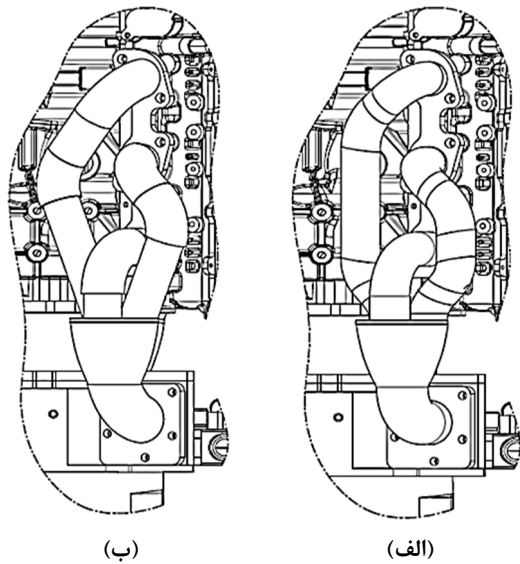
هندسه هدرزهای طراحی شده برای شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی ابعادی موتوری که از هدرز استفاده می‌کند تنها لازم است که مدار ابعادی از هندسه هدرزها را جایگزین چندراهه خروج موتور پایه نمود. با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه جانمایی، مواد اولیه قابل دسترسی، فرآیند ساخت، هزینه‌های ساخت، افزایش توان و سایر عوامل این نتیجه حاصل می‌شود که طرح‌های زیادی جهت بررسی وجود ندارد. اصولاً هنگامی که

جدول ۱- مشخصات کلی موتور احتراق داخلی

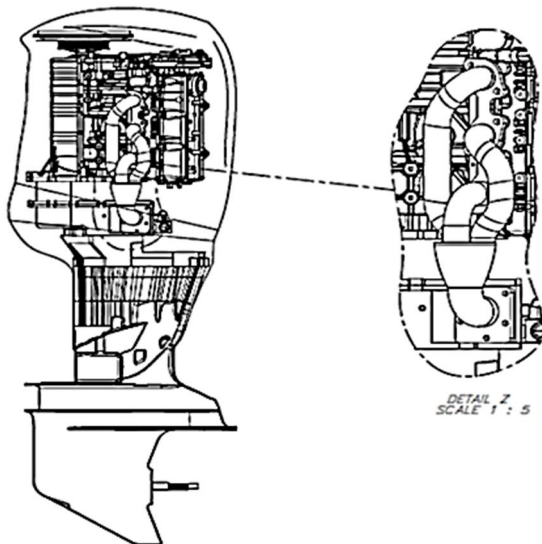
عنوان	توضیحات
تعداد سیلندر	۶
حجم موتور	۳ لیتر
ساختار	خورجینی
نسبت تراکم	۱۰
تعداد سوپاپ در هر سیلندر	۲×۲



شکل ۱- مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان در موتور پایه

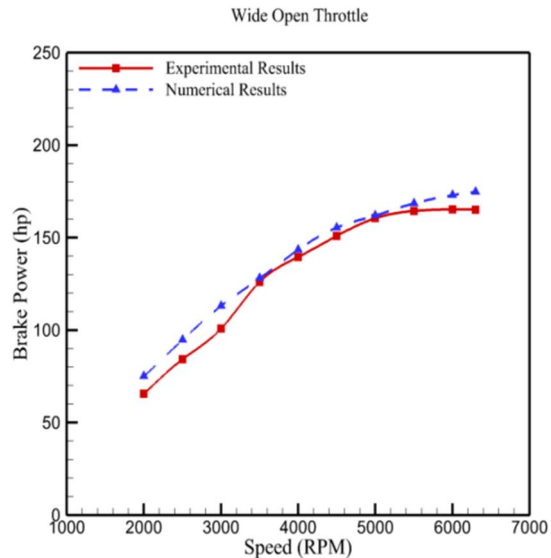


شکل ۳- هدرز (الف) طرح A و (ب) طرح B

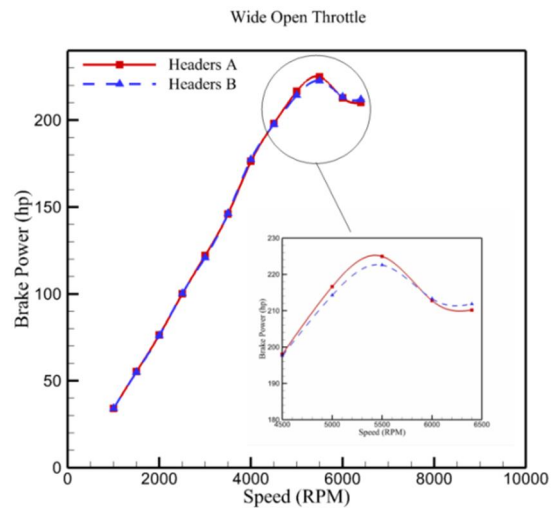


شکل ۵- هندسه موتور برون نصب پس از نصب هدرز A

تنظیم می‌کند و دوباره اجرا می‌شود. این فرایند تا زمانی که مقدار مطلوب یا هدف یافت شده یا تا زمانی که حداکثر تعداد تکرارهای مشخص شده توسط کاربر اجرا شود تکرار شود. خلاصه‌ای از نتایج تکرار را می‌توان به صورت نمودار با جدول مشاهده نمود. محدوده بهینه‌سازی ابعادی هدرز در جدول ۲ مشاهده می‌گردد. مقادیری که به ازای آن توان ترمزی به حداکثر مقدار خود می‌رسد نیز در جدول ۳ مشخص شده



شکل ۲- مقایسه تغییرات توان ترمزی موتور پایه در سرعت‌های مختلف در آزمون موتور و شبیه‌سازی عددی



شکل ۴- تغییرات توان ترمزی در موتور با هدرزهای طراحی شده

۳- بهینه‌سازی ابعادی طرح برتر

در این قسمت نرم‌افزار جی‌تی‌پاور کاربر می‌تواند یک متغیر RLT (متغیر وابسته) را با تغییر یک یا چند پارامتر (متغیر مستقل) بهینه‌سازی کند. بهینه‌سازی می‌تواند برای هر یک از مقدار هدف مشخص شده توسط کاربر یا برای بهینه (حداکثر یا حداقل) منحصر به فرد را حل کند. بهینه‌سازی با اجرای شبیه‌سازی کار می‌کند و سپس یک یا چند پارامتر را دوباره

است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی چندراهه خروج پایه و هدرز برتر مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- راندمان حجمی

چندراهه خروج با تأثیر مستقیم بر فرآیند تخلیه، در عملکرد موتور به ویژه تغییر راندمان حجمی بسیار تأثیرگذار است. به‌طور کلی فرآیند تخلیه به دو روش کلی در موتور انجام می‌گردد که عبارت است از تخلیه آبی گازهای حاصل از احتراق با فشار داخل سیلندر و تخلیه گازهای حاصل از احتراق با حرکت پیستون. با توجه به کاهش مقاومت جریان هنگام عبور از هدرز، فرآیند تخلیه در موتور پس از نصب هدرز در هر دو حالت ذکر شده بهبود می‌یابد. با کاهش مقاومت جریان هنگام خروج از سیلندر، انرژی کمتری صرف تخلیه جریان از گازهای حاصل از احتراق می‌شود؛ بنابراین تلفات پمپی موتور کاهش می‌یابد. از طرف دیگر بهینه شدن فرآیند تخلیه موتور با کمک به خروج گازهای حاصل از احتراق موجب بهبود تنفس موتور می‌شود. ضمن اینکه به دلیل باز بودن هم‌زمان سوپاپ ورود و خروج در انتهای زمان تخلیه، مومنتوم حاصل از خروج جریان از سیلندر موجب افزایش تمایل جریان برای ورود به سیلندر خواهد شد. افزایش تمایل جریان برای ورود به سیلندر موجب افزایش دبی جرمی سیال ورودی به سیلندر و در نتیجه افزایش راندمان حجمی موتور می‌شود. از طرف دیگر به دلیل رابطه مستقیم راندمان حجمی با توان و گشتاور می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش راندمان حجمی توان و گشتاور موتور هم افزایش خواهد یافت. البته با بهبود فرآیند تخلیه موتور

گازهای باقی‌مانده سیلندر کاهش یافته و حداکثر دمای احتراق افزایش می‌یابد. افزایش دمای حداکثر احتراق نیز موجب افزایش دمای گازهای باقیمانده سیلندر و افزایش انتشار آلاینده NO_x و کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که پس از نصب هدرز به دلیل کاهش مقاومت جریان در خروجی سیلندر، صدای ناشی از خروج جریان از موتور افزایش خواهد یافت. شکل ۶ تغییرات راندمان حجمی سیلندر را در سرعت‌های مختلف عملکرد موتور در هدرز نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ تا سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه راندمان حجمی موتور روند صعودی دارد و بعد از این سرعت راندمان حجمی موتور افت می‌کند. دلیل افت راندمان حجمی در سرعت‌های بالاتر از ۵۰۰۰ دور بر دقیقه را می‌توان در تأثیر منفی افزایش دمای گازهای باقیمانده بر دمای گازهای داخل سیلندر دانست. ضمن اینکه بیشینه راندمان حجمی موتور نزدیک به ۱۱۰ درصد است. با توجه به اینکه تغییرات گشتاور و توان ترمزی رابطه مستقیم با راندمان حجمی موتور دارد و با توجه به روند صعودی راندمان حجمی تا سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه می‌توان نتیجه گرفت که هدرز طراحی‌شده موجب ایجاد یک روند صعودی در توان و گشتاور تا سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه شود. با توجه به شیوه کاربری موتور در شناور و عملکرد مورد انتظار آن که محدودیت سرعت موتور که بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ دور بر دقیقه متغیر است، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی انجام‌شده برای هدرز عملکرد موتور در این سرعت‌ها را بهینه خواهد کرد.

جدول ۲- محدوده تغییر ابعاد هدرز جهت بهینه‌سازی ابعادی

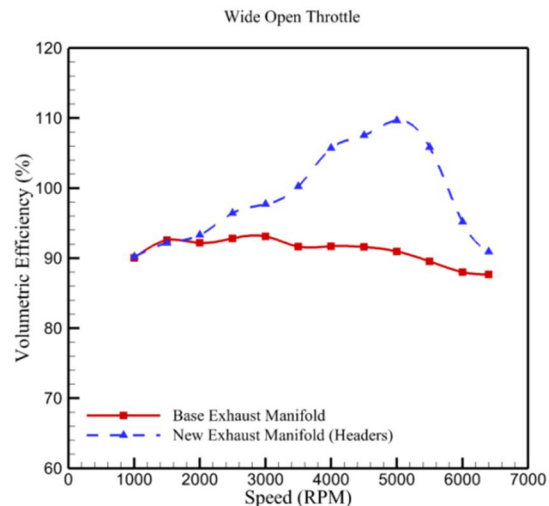
حجم محفظه آرامش اصلی و فرعی (mm^3)	قطر لوله‌های ارتباطی به سیلندر (mm)	طول لوله‌ی انتهایی (mm)	قطر لوله خروجی هدرز (mm)
۳۵۰۰۰۰-۴۵۰۰۰۰	۳۵-۴۵	۵۰-۱۰۰	۴۵-۵۵

جدول ۳- مقادیر بهینه‌سازی و سرعت موتور در شرایط حداکثر توان ترمزی

حداکثر توان ترمزی (hp)	سرعت موتور (rpm)	حجم محفظه آرامش اصلی و فرعی (mm^3)	قطر لوله‌های ارتباطی به سیلندر (mm)	طول لوله‌ی انتهایی (mm)	قطر لوله خروجی هدرز (mm)
۲۲۵/۴۲	۵۴۰۰	۳۷۵۰۰۰	۴۳	۷۵	۵۴

دلیل افزایش فشار حداکثر احتراق، فشار سیلندر در انتهای زمان تخلیه کمی بیشتر از موتور با چندراهه پایه خواهد شد. به همین دلیل در شروع فرآیند مکش دبی جرمی موتور با هدرز کمتر از دبی جرمی ورودی به سیلندر با چندراهه پایه است. در ادامه فرآیند مکش به دلیل مومنتومی که هنگام خروج محصولات احتراق در زمان همپوشانی سوپاپ‌ها ایجاد می‌شود، دبی جرمی جریان وارد شده به سیلندر موتوری که از هدرز بهره می‌برد بیشتر خواهد شد. از طرفی دیگر با توجه به شکل ۷ مقدار جریان برگشتی در موتوری که از هدرز بهره می‌برد از مقدار آن در موتوری که از چندراهه خروج پایه بهره می‌برد بیشتر است. برگشت جریان در سیلندر به دلیل افزایش فشار داخل سیلندر نسبت به فشار هوای محیط است. وقتی فشار داخل سیلندر از فشار هوای محیط بیشتر شود، جهت جریان وارد شده به سیلندر معکوس شده و جریان از سیلندر به سمت راهگاه ورود خواهد رفت. در موتوری که از هدرز بهره می‌برد در ابتدای فرآیند مکش فشار داخل سیلندر نسبت به موتور پایه بیشتر است اما در ادامه فرآیند مکش به دلیل وجود جرم کمتر در موتور با هدرز با حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ پایین فشار سیلندر در این موتور به شدت افت می‌کند. در ادامه فرآیند مکش جریان با دبی جرمی زیاد وارد سیلندر می‌شود و تا انتهای فرآیند مکش مقدار دبی ورودی رو به کاهش می‌رود اما به دلیل تمایل بالای جریان برای ورود به سیلندر، روند کاهشی ایجاد شده در دبی جرمی موتوری که از هدرز بهره می‌برد در زمان دیرتری ایجاد شده و شدت آن نیز کمتر است.

شکل ۸ تغییرات دمای هوای ورودی به سیلندر را در زمان مکش در سرعت‌های مختلف حرکت موتور نشان می‌دهد. دمای جریان وارد شده به سیلندر در مقدار جرم موجود در شروع زمان تراکم بسیار مؤثر است. هر چه دمای جریان وارد شده به سیلندر کمتر شود جرم هوای موجود در انتهای زمان تراکم بیشتر شده و راندمان حجمی افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش دمای هوای ورودی به سیلندر، چگالی هوای موجود در سیلندر افزایش یافته و جرم بیشتری از هوا در انتهای زمان مکش سیلندر باقی می‌ماند. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در بیشتر زوایای گردش میل‌لنگ در زمان مکش دمای هوای وارد شده به موتوری که از هدرز بهره می‌برد کمتر از دمای هوای وارد شده به موتوری



شکل ۶- تغییرات راندمان حجمی در سرعت‌های مختلف حرکت موتور

شکل ۷ تغییرات دبی جرمی هوای ورودی به موتور را در هدرز نشان می‌دهد. تغییرات دبی ورودی جریان هوا به سیلندر موجب تغییرات راندمان حجمی می‌شود. به همین دلیل به تحلیل چگونگی تغییرات دبی جرمی جریان ورودی به سیلندر پرداخته خواهد شد. در فرآیند مکش فشار داخل سیلندر متغیر است. هنگام مکش سیلندر در سرعت‌های پایین عملکرد موتور فشار داخل سیلندر ابتدا کاهش می‌یابد و در نتیجه جریان از چندراهه به سمت سیلندر حرکت می‌کند. با توجه به اینکه اختلاف فشار بین سیلندر و چندراهه در سرعت‌های پایین بسیار ناچیز است، خیلی سریع فشار سیلندر به فشار چندراهه نزدیک شده و حرکت جریان به سمت سیلندر معکوس شده و جریان از سیلندر خارج می‌شود. فرآیند ورود و خروج جریان از سیلندر و مجموعه مکش موتور تا انتهای زمان مکش تکرار شده و جریان ورودی به این مجموعه حالت نوسانی پیدا می‌کند. وجود هدرز در موتور به دلیل بهبود فرآیند تخلیه و همچنین بهبود فرآیند مکش در تغییر دبی جریان ورودی به سیلندر بسیار مؤثر است. با توجه به شکل ۷ در زمان شروع مکش در بیشتر سرعت‌های بررسی شده، دبی جرمی ورودی به سیلندر با چندراهه خروج پایه از دبی جرمی جریان وارد شده به سیلندر با چندراهه تازه طراحی شده (هدرز) بیشتر است؛ اما در ادامه فرآیند مکش موتوری که از هدرز بهره می‌برد دبی جرمی بیشتری وارد سیلندر می‌کند. پس از نصب هدرز به

خواهد شد؛ به همین دلیل پس از کاهش آبی فشار سیلندر دوباره فشار آن افزایش یافته و فشار داخل سیلندر حالت نوسانی خواهد داشت.

۳-۳- بررسی توان و گشتاور ترمزی

توان و گشتاور ترمزی از پارامترهای مهم عملکردی موتور محسوب می‌شود. در این بخش به مقایسه توان و گشتاور موتور با هدرز و موتور با چندراهه خروج پایه پرداخته می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات توان و گشتاور موتور با چندراهه خروج پایه و موتور با چندراهه خروج شده (هدرز) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در سرعت‌های پایین عملکرد موتور استفاده از هدرز چندان مؤثر نیست اما پس از آن هدرز توان و گشتاور خروجی موتور را به شدت افزایش داده است. در بخش‌های قابل مشاهده شد که استفاده از هدرز موجب افزایش دبی جرمی جریان ورودی به سیلندر و کاهش دمای آن می‌شود. از طرف دیگر دبی جرمی جریان خروجی از سیلندر با استفاده از هدرز افزایش می‌یابد ضمن اینکه تلفات پمپی موتور نیز در موتوری که از هدرز استفاده می‌کند نسبت به موتور با چندراهه خروج پایه کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل راندمان حجمی بالاتر و تلفات پمپی کمتر موتور با هدرز نسبت به موتور با چندراهه خروج پایه، توان و گشتاور ترمزی موتور با هدرز بیشتر از توان و گشتاور ترمزی موتور با چندراهه خروج پایه در سرعت‌های مختلف است. با توجه به هدف پژوهش پیش رو که افزایش توان حداکثر موتور است مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی عددی توان موتور با هدرز را ۲۹ درصد بیشتر از موتور با چندراهه خروج پایه پیش‌بینی کرده است.

۶- بررسی تجربی توان موتور در اتاق آزمون

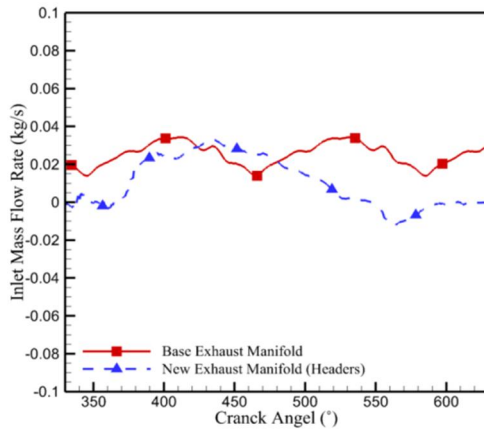
پس از شبیه‌سازی عددی موتور و رضایت‌بخش بودن نتایج استفاده از هدرز در شبیه‌سازی عددی، هدرز برای افزایش توان حداکثر موتور ساخته شد. پس از ساخت و نصب هدرز روی موتور (شکل ۱۱)، برای اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش موتور با هدرز مورد آزمایش، نتایج آزمون موتور با هدرز و موتور با چندراهه پایه با هم مقایسه شد. در صورت افزایش توان قابل ملاحظه موتور با هدرز و عدم مختل شدن عملکرد

است که از چندراهه خروج پایه بهره‌مند است. کاهش دمای هوای موجود در سیلندر در موتوری که از هدرز بهره می‌برد به دلیل کم شدن جرم گازهای باقیمانده داخل سیلندر است. در موتوری که از هدرز بهره می‌برد به دلیل بهبود فرایند تخلیه گازهای محترق شده، جرم کمتری از گازهای محترق شده در سیلندر باقی مانده و در نتیجه دمای گازهای داخل سیلندر را کمتر افزایش می‌دهند. لازم به ذکر است که بخشی از گازهای باقیمانده داخل سیلندر در شروع زمان مکش به سمت راهگاه ورود جریان یافته و دمای هوای ورودی به سیلندر را افزایش خواهند داد.

۳-۲- بررسی فرآیند تخلیه

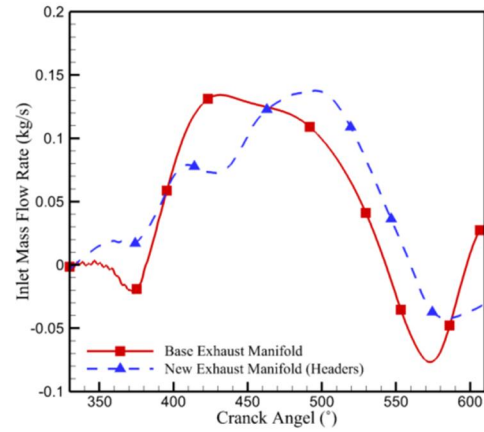
بررسی فشار داخل سیلندر در زمان تخلیه در بررسی عملکرد سامانه تخلیه موتور بسیار مفید است. شکل ۹ تغییرات فشار داخل سیلندر را در زمان تخلیه موتور در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود موتور با هدرز فشار داخل سیلندر کمتری نسبت به موتوری که از چندراهه خروج پایه بهره می‌برد، دارد. به طور کلی استفاده از هدرز موجب کاهش مقاومت در برابر خروج جریان و افزایش تخلیه گازهای باقیمانده سیلندر می‌شود اما دمای گازهای باقیمانده را نیز افزایش خواهد داد. به دلیل مقاومت کمتر در مسیر جریان موتوری که در آن از هدرز استفاده شده است، محصولات احتراق با مقاومت کمتری در هنگام خروج از سیلندر مواجه می‌شوند. به همین دلیل پس از باز شدن سوپاپ خروج فشار داخل سیلندر به سرعت کاهش یافته و حتی به دلیل مومنتوم جریان خروجی از سیلندر، فشار آن از فشار هوای محیط کمتر می‌شود. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که تلفات پمپی موتوری که از هدرز بهره می‌برد نسبت به موتور با چندراهه خروج پایه کمتر است. هر چه سرعت موتور بیشتر می‌شود تأثیر مقاومت کمتر مسیر جریان در هدرز نمایان‌تر می‌شود به همین دلیل می‌توان گفت که با وجود هدرز موتور در سرعت‌های بالا تخلیه بسیار مناسب‌تری نسبت به موتوری که از هدرز استفاده نمی‌کند، خواهد داشت. در سرعت‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ به دلیل اختلاف فشار کمتر جریان داخل سیلندر نسبت به محیط، مومنتوم جریان هنگام خروج از سیلندر کمتر از حالت‌های مشابه در سرعت‌های بالا است. ضمن اینکه فرآیند تخلیه در زمان طولانی‌تری انجام

1000 RPM



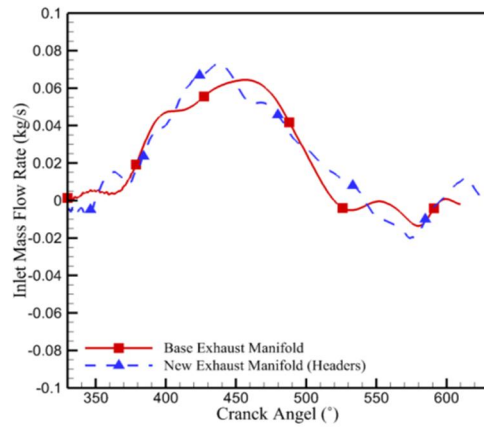
(الف)

4000 RPM



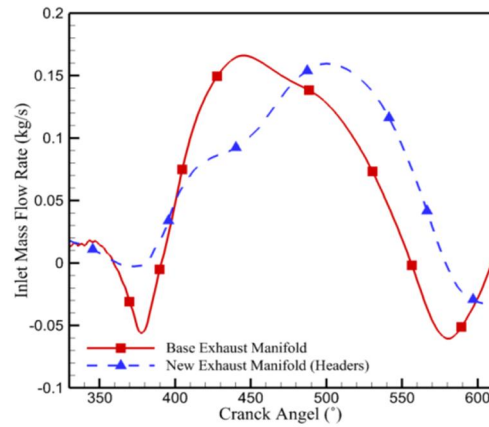
(د)

2000 RPM



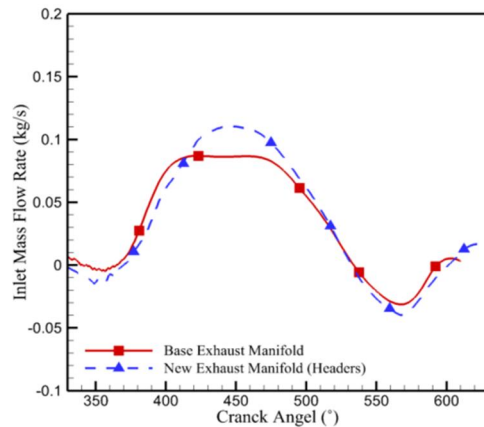
(ب)

5000 RPM



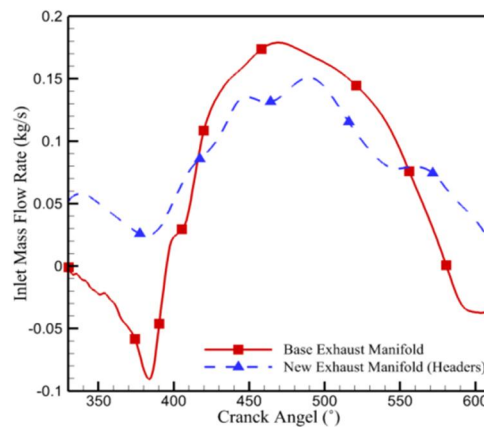
(ه)

3000 RPM



(ج)

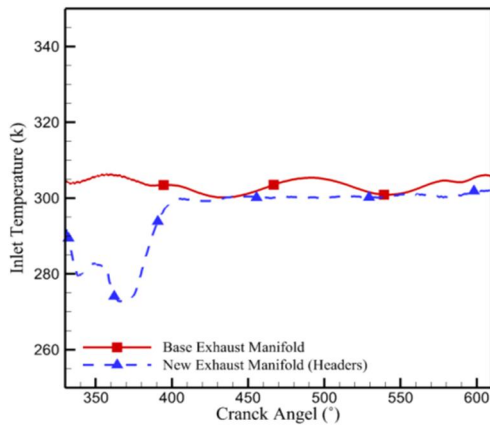
64000 RPM



(ی)

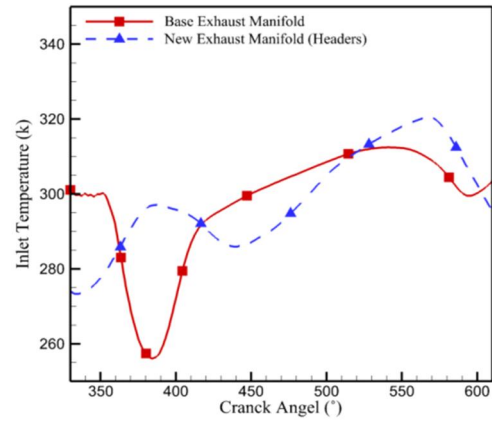
شکل ۷- مقایسه تغییرات دبی جرمی هوای ورودی به موتور در سرعت‌های (الف) ۱۰۰۰، (ب) ۲۰۰۰، (ج) ۳۰۰۰، (د) ۴۰۰۰، (ه) ۵۰۰۰ و (ی) ۶۴۰۰ دور بر دقیقه در موتور با چندراهه خروج پایه و هدرز در شبیه‌سازی عددی

1000 RPM



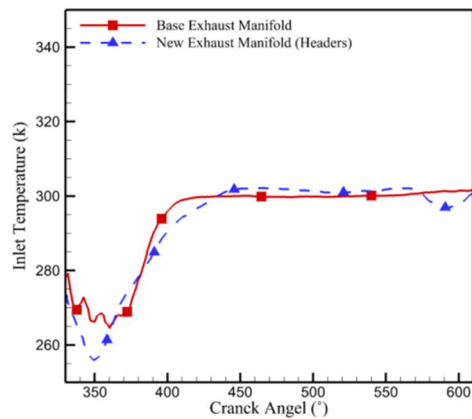
(الف)

4000 RPM



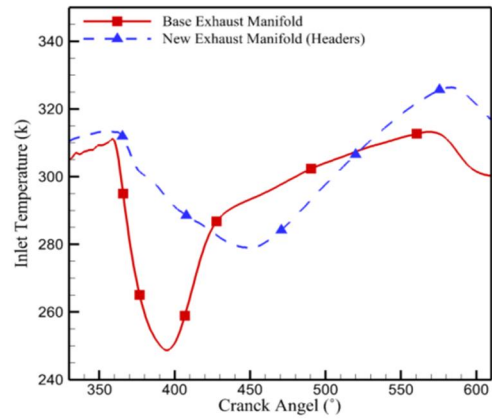
(د)

2000 RPM



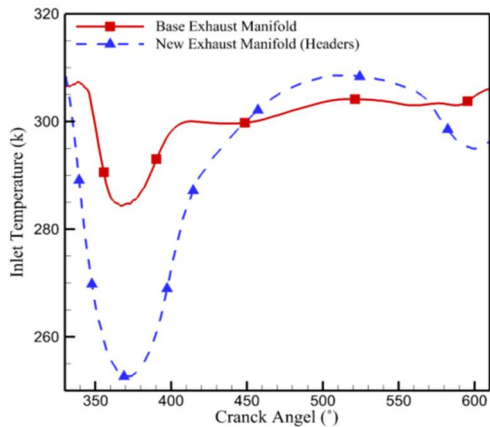
(ب)

5000 RPM



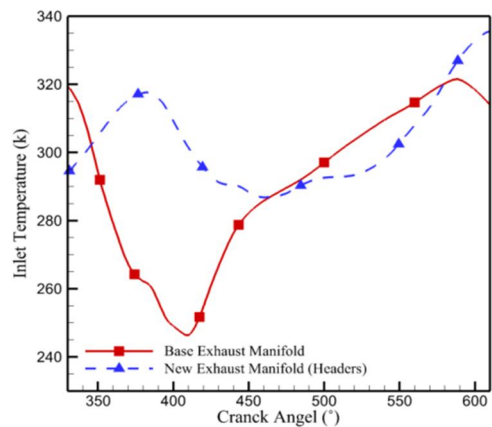
(ه)

3000 RPM



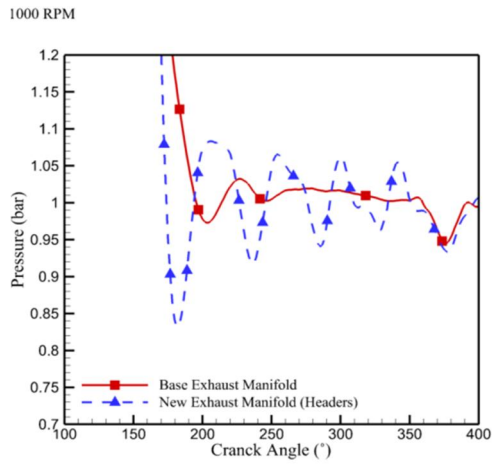
(ج)

6400 RPM

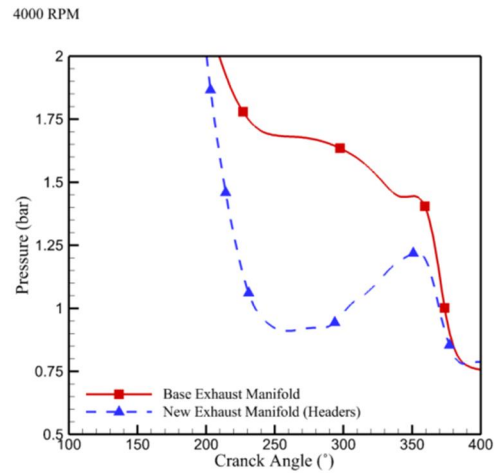


(ی)

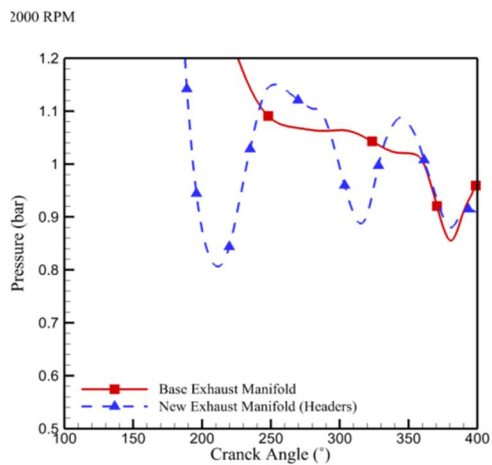
شکل ۸- مقایسه تغییرات دمای هوای ورودی به موتور در سرعت‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۲۰۰۰، ج) ۳۰۰۰، د) ۴۰۰۰، ه) ۵۰۰۰ و ی) ۶۴۰۰ دور بر دقیقه در موتور با چندراهه خروج پایه و هدرز در شبیه‌سازی عددی



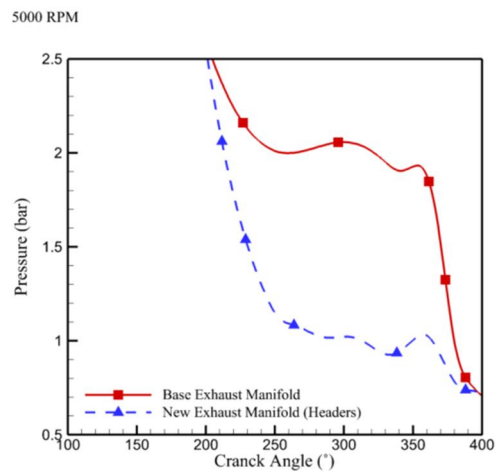
(الف)



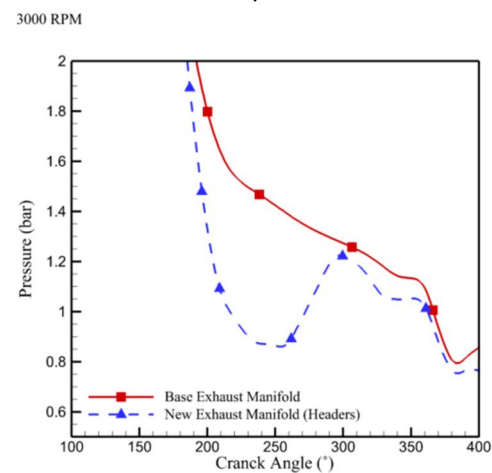
(د)



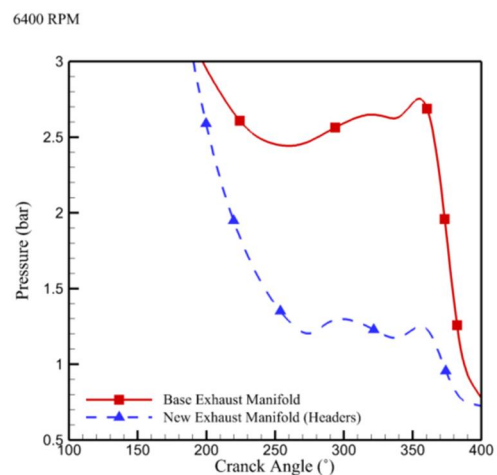
(ب)



(ه)

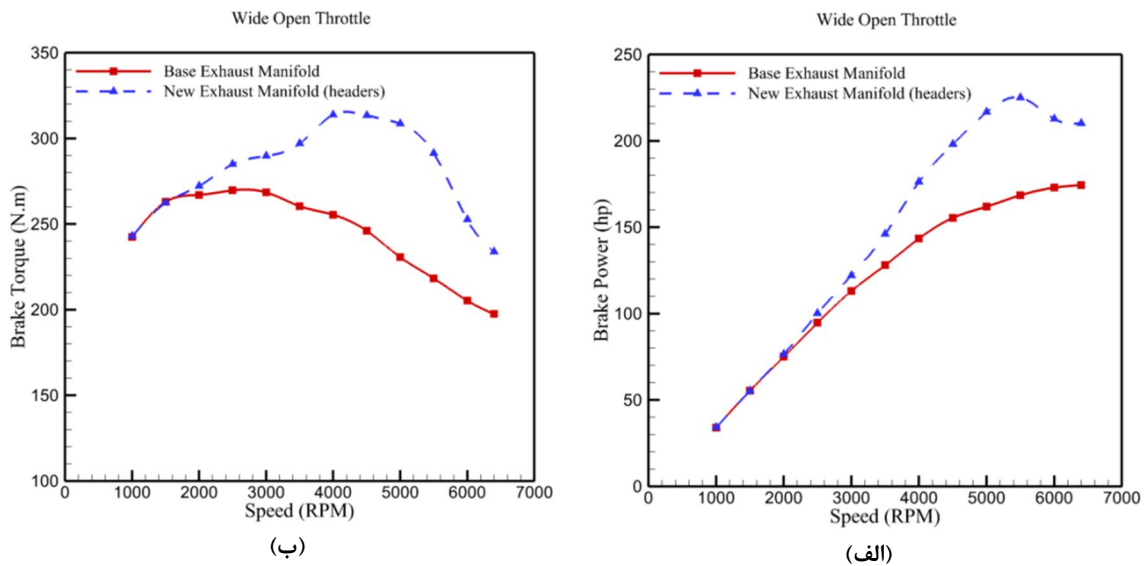


(ج)



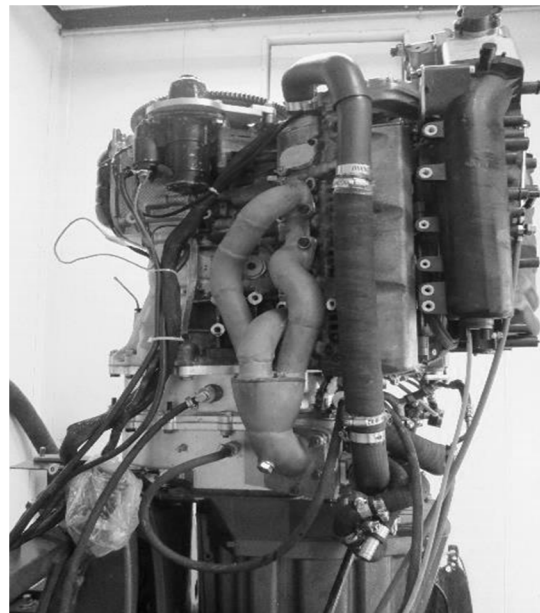
(ی)

شکل ۹- مقایسه تغییرات فشار داخل سیلندر در زمان تخلیه در سرعت‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۲۰۰۰، ج) ۳۰۰۰، د) ۴۰۰۰، ه) ۵۰۰۰ و ی) ۶۴۰۰ دور بر دقیقه در موتور با چندراهه خروج پایه و هدرز در شبیه‌سازی عددی



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات الف) توان ترمزی و ب) گشتاور ترمزی در سرعت‌های مختلف حرکت موتور در موتور با چندراهه خروج پایه و هدرز در شبیه‌سازی عددی

بوده است، ارضا شده است اما می‌توان با اصلاح طراحی هدرز در سرعت‌های دیگر هم توان موتور را بهبود بخشید. شکل ۱۲ نتایج آزمایشگاهی توان ترمزی موتور پایه و موتوری که از هدرز استفاده می‌کند را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، توان ترمزی حداکثر موتور با هدرز ۱۵ درصد بیشتر از توان ترمزی حداکثر موتور پایه است اما در سرعت‌های متوسط به پایین عملکرد موتور، هدرز نتوانسته توان موتور را افزایش دهد. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی دستیابی به توان حداکثر بیشتر موتور را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که هدف پژوهش پیش رو که افزایش توان حداکثر موتور است، ارضا شده است اما امکان بهبود توان هدرز در سرعت‌های دیگر عملکرد موتور نیز وجود دارد که با توجه به کاربرد موتور نیز تأثیری بر تغییر سرعت و شتاب شناور ندارد؛ زیرا توان بیش از حد موتور در سرعت‌های متوسط به پایین توسط پروانه شناور جذب نشده و تنها موجب ایجاد لغزش و تلفات اصطکاکی خواهد شد. دلیل افزایش توان حداکثر موتور پس از نصب هدرز را می‌توان در افزایش راندمان حجمی موتور در سرعت‌های بالا دانست. هنگام استفاده از هدرز به دلیل تخلیه بهتر گازهای خروجی موتور جرم بیشتری از هوا وارد سیلندر شده و در نتیجه در صورت ثابت فرض نمودن نسبت هم ارزی



شکل ۱۱- هدرز نصب شده روی موتور در اتاق آزمون

صحیح موتور در سرعت‌های مختلف، می‌توان طراحی انجام شده را مورد قبول دانست. در صورتی که هدرز توان حداکثر موتور را افزایش دهد اما در سرعت‌های دیگر توان و گشتاور موتور کاهش یابد، هدف پژوهش پیش رو که دستیابی به توان حداکثر بالاتر در مقایسه با موتور با چندراهه خروج پایه

سیلندر موجب کاهش دمای مخلوط در فرآیند مکش و در نتیجه افزایش راندمان حجمی موتور خواهد شد.

۳. در موتوری که از هدرز بهره می برد به دلیل افزایش راندمان حجمی موتور، دمای حداکثر احتراق افزایش یافته و مقدار NO_x منتشر شده از موتور افزایش خواهد یافت. به منظور کاهش مقدار NO_x منتشر شده از موتور نیاز است تا بخشی از گازهای محترق شده به سیلندر برگشته و با کاهش بخش کمی از توان موتور، مقدار NO_x منتشر شده از آن کاهش یابد.

۴. استفاده از هدرز در سرعت‌های متوسط به بالای عملکرد موتور می‌تواند موجب بهبود توان و گشتاور ترمزی موتور شود.

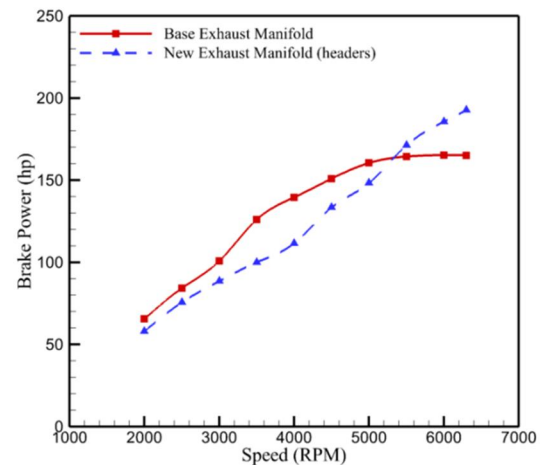
۵. در موتوری که از هدرز استفاده می‌کند به دلیل گرمای بالای هدرز، خنک کاری اطراف جداره‌های هدرز ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل در موتورهای برون نصبی که از هدرز بهره می‌برند فرآیند تزریق آب درون هدرز و یا خنک کاری دیواره هدرز با آب رایج است.

۷- مراجع

- [1] Galindo J, Luján JM, Serrano JR, Dolz V, Guilain S (2004) Design of an exhaust manifold to improve transient performance of a high-speed turbocharged diesel engine. *Exp Therm Fluid Sci* 28(8): 863-875.
- [2] Taylor J, Fraser N, Wieske P (2010) Water cooled exhaust manifold and full load EGR technology applied to a downsized direct injection spark ignition engine. *SAE Int J Engines* 3(2010-01-0356): 225-240.
- [3] Mendes AS, Tomoyose R (2013) Exhaust manifold structural analysis focusing mass reduction for vehicular diesel engine application. *SAE Technical Paper* 0148-7191.
- [4] Deng B, Liu J, Feng R, Zhang D (2013) The fluid induced vibration analysis on an integrated exhaust manifold. *SAE Technical Paper*.
- [5] Eroglu S, Duman I, Guzel AH, Yilmaz R (2016) Durability analysis of heavy duty engine exhaust manifold using CFD-FE coupling. *SAE Technical Paper*.
- [6] Nour M, Abdel-Rahman AK, Bady M (2016) Effect of water injection into exhaust manifold on diesel engine combustion and emissions. *Energy Procedia* 100: 178-187.

سوخت بیشتری در سیلندر تزریق می‌شود. مخلوط آماده شده در این حالت موجب بهبود احتراق سوخت و هوای موجود در سیلندر و افزایش فشار حداکثر احتراق می‌شود. در ادامه فرآیند تخلیه مخلوط با سرعت بیشتری انجام شده و پس از فرآیند تخلیه سیکل کامل موتور به اتمام رسیده و این چرخه باز هم تکرار می‌شود.

Wide Open Throttle
Experimental Test



شکل ۱۲- مقایسه توان ترمزی موتور با چندراهه خروج پایه و موتور با هدرز در سرعت‌های مختلف حرکت موتور

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش پیش رو تأثیر چندراهه خروج بر عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مختلفی بدست آمد که برخی از مهم‌ترین آنها عبارت است از:

۱. تغییر چندراهه خروج دبی جرمی جریان وارد شده بر سیلندر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییر دبی جریان وارد شده به سیلندر بر تغییر راندمان حجمی سیلندر تأثیر می‌گذارد. البته نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین عملکرد موتور هدرز تأثیر چشم‌گیری بر جریان ورودی به سیلندر نخواهد داشت.
۲. استفاده از هدرز موجب تسریع در تخلیه گازهای محترق شده از سیلندر و در نتیجه کاهش گازهای باقیمانده در آن می‌شود. کاهش گازهای باقیمانده

- [10] Boretti A (2013) Water injection in directly injected turbocharged spark ignition engines. *Appl Therm Eng* 52(1): 62-68.
- [11] Bozza F, De Bellis V, Teodosio L (2016) Potentials of cooled EGR and water injection for knock resistance and fuel consumption improvements of gasoline engines. *Appl Energy* 169: 112-125.
- [12] Da Silva Trindade WR, Dos Santos RG (2018) 1D modeling of SI engine using n-butanol as fuel: Adjust of fuel properties and comparison between measurements and simulation. *Energy Convers Manage* 157: 224-238.
- [7] Nour M, Kosaka H, Bady M, Sato S, Abdel-Rahman AK (2017) Combustion and emission characteristics of DI diesel engine fuelled by ethanol injected into the exhaust manifold. *Fuel Process Technol* 164: 33-50.
- [8] Venkatesan SP, Ganesan S, Devaraj R, Hemanandh, J (2018) Design and analysis of exhaust manifold of the spark ignition engine for emission reduction. *Int J Ambient Energy* 1-6.
- [9] Sahoo DK, Thiya R (2019) Coupled CFD-FE analysis for the exhaust manifold to reduce stress of a direct injection-diesel engine. *Int J Ambient Energy* 40(4): 361-366.