

بهبود طرح منیفلد هوای موتور ۴ سیلندر دیزلی تنفس طبیعی با استفاده از کوپل نرم افزارهای GT-Suite و Fluent

حسین اسلامی
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، ho.eslami@urmia.ac.ir
صمد جعفرمدار*
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، s.jafarmadar@urmia.ac.ir
نادر پور محمود
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، n.pormahmod@urmia.ac.ir

چکیده

منیفلد ورودی بخشی از سامانه ورودی هوا به موتور است که نقش مهمی در بهبود عملکرد از قبیل گشتاور بالا و مصرف سوخت کم و همچنین پایین نگه داشتن انتشار آلاینده ها دارد. در این تحقیق با تغییر الگوی مسیر هوا به بررسی عددی نقش آن در تنفس موتور پرداخته شده است. به همین منظور ابتدا طرح منیفلدها بصورت سه بعدی در نرم افزار SolidWorks مدل سازی شدند. همچنین دو منیفلد با هندسه های مختلف به صورت کوپل یک بعدی- سه بعدی در نرم افزارهای GT-SUITE و Ansys Fluent شبیه سازی شد. از سیال پایه هوا در این آنالیز استفاده گردید. با استفاده از روش پرینتر سه بعدی، منیفلد طراحی شده، تولید و سپس بصورت عملی آزمایش گردید. نتایج بدست آمده نشان دادند که میانگین سرعت در منیفلد بهینه شده بیشتر از منیفلد طرح موجود می باشد که این امر باعث افزایش دبی جرمی و دبی حجمی جریان خروجی می شود. همچنین، مقدار هوای مکشی برای پورت های چهار گانه در منیفلد طراحی شده توزیع یکنواخت تری پیدا کرده است. تست های عملکردی بر روی موتور، بهبود عملکردی از لحاظ افزایش توان با سوخت یکسان و کاهش آلاینده ها را با منیفلد جدید تأیید می کند.

واژه های کلیدی: منیفلد، موتورهای دیزلی، سوخت، مکش هوا، GT-SUITE، Ansys Fluent.

Improving the design of the air manifold of a naturally aspirated 4-cylinder diesel engine by coupling Fluent and GT-SUITE software

H. Esлами
S. Jafarmdar
N. Pourmahmoud

Doctoral student of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Urmia University, Iran
Doctoral Professor of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Urmia University, Iran
Doctoral Professor of Mechanical Engineering, Energy Conversion, Urmia University, Iran

Abstract

The intake manifold is a part of the air intake system to the engine, which plays an important role in improving performance such as high torque and low fuel consumption, as well as keeping emissions low. In this paper, by changing the pattern of the air path, its role in engine breathing has been investigated numerically. For this purpose, first, the design of the manifolds was modeled in 3D in SolidWorks software. Also, two manifolds with different geometries were simulated as a 1D-3D couple in GT-SUITE and Ansys Fluent software. Air base fluid was used in this analysis. Using the 3D printer method, the designed manifold was produced, and then practically tested. The obtained results showed that the average speed in the optimized manifold is higher than the existing manifold, which increases the mass flow rate and volume flow rate of the output flow. Also, the amount of intake air for the four ports in the designed manifold has found a more uniform distribution. Performance tests on the engine confirm the performance improvement in terms of increased power with the same fuel and reduced emissions with the new manifold.

Keywords: Manifold, diesel engines, fuel, air intake, GT-SUITE, Ansys Fluent.

۱- مقدمه

پلنیوم جهت افزایش حجم متناسب با حجم موتور، توجه به محدودیت های مونتاژی، طراحی مسیر مناسب جهت استفاده ی بهینه از موجهای فشاری در مکش و توزیع یکسان حجم هوای وارد شده بر هر سیلندر اشاره کرد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شامل موثرترین و کارآمدترین روش های تحلیل راه حل است که طراحان در سال های اخیر به طور گسترده از آنها استفاده کرده اند. بسیاری از مطالعات ذکر شده در ادامه از تجزیه و تحلیل CFD برای کارایی منیفلد، بدون نیاز به تلاش های رایج وقت گیر استفاده کردند:

عبیدی و حسن [۲] اثرات اعمال فرورفتگی های کروی در منیفلد ورودی موتور دیزل را برحسب انرژی جنبشی آشفستگی بررسی کردند. در طراحی از فرورفتگی های کروی با نسبت h/d برابر با 0.5 استفاده شد. پارامترهای عملیاتی نظیر سرعت و فشار، نیز در تجزیه و تحلیل جریان CFD مورد بررسی قرار گرفتند. بهبود قابل توجه $45/25\%$ و

بهبود احتراق و در نتیجه بهبود کارایی یک موتور احتراق داخلی ارتباط مستقیمی با بهبود سیستم تنفس موتور بویژه اجزای ورودی هوا دارد. منیفلد هوا یکی از اجزای مهمی است که عملکرد موتورهای دیزلی را تحت تأثیر قرار می دهد و باید طوری طراحی شود که برای بهبود کارایی موتور، مقدار هوای مساوی را به هر سیلندر برساند. راندمان جریان منیفلد ارتباط مستقیمی با قدرت موتور دارد [۱]. با افزایش میزان دبی هوای ورودی به موتور و یکنواخت سازی توزیع دبی هوا در هر یک از پورت های خروجی، بهبود قابل ملاحظه ای در پارامترهای عملکردی حاصل می شود. با کاهش اتلاف انرژی در مسیر هوای ورودی، افزایش میزان مکش هوا امکان پذیر است. جهت کاهش اتلافات انرژی و در نتیجه افزایش بازدهی حجمی موتور، موارد مهمی چون هموار نمودن مسیر پورت ورودی به سرسیلندر، بهبود شکل

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.jafarmadar@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۳/۰۲/۲۰

۴/۱۳۵٪ در انرژی جنبشی آشفتنی در مورد سطح فرورفته در مدل جدید مشاهده شد. آنها به این نتیجه رسیدند که این مدل می‌تواند مصرف سوخت را بهبود داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در موتورهای دیزلی کنترل کند.

گوچمن و سویهان [۳] تغییرات در درگاه ورودی هوا و لوله‌ها را برای کاهش تلفات فشار در منیفلد ورودی موتور دیزل تراکتور مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، درگاه ورودی هوا گسترش داده شد و تعداد سوپاپ‌ها از ۲ به ۴ افزایش یافت تا اطمینان حاصل شود که هوای بیشتری وارد موتور می‌شود و موتور کارآمدتر کار می‌کند. محققان به این نتیجه رسیدند که کاهش قابل توجهی در اختلاف فشار وجود دارد، توزیع فشار متعادل مشاهده شده و بهبودهایی در مقادیر انتشار گردابی و گازهای خروجی در سیلندر گزارش شده است. در مطالعه‌ی دیگر، شوکینگ گو و همکاران [4] با دیدگاه کاهش مقاومت منیفلد در مقابل جریان هوا، کاهش تلفات انرژی آن و بهبود یکنواختی جریان به بهینه‌سازی طرح منیفلد پرداختند. آنها همچنین از امکانات اسکن سه‌بعدی و مهندسی معکوس برای تهیه مدل هندسی استفاده نمودند. شیوه‌ی تحلیل آنها بصورت سه بعدی در محیط CFD انجام شد. زئو [۵] تجزیه و تحلیل میدان‌های جریان سه منیفلد ورودی طراحی‌شده مختلف را توسط آنالیز CFD با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی مورد مطالعه قرار داد. بنابراین، اثرات ساختارهای منیفلد بر یکنواختی هوای ورودی بررسی شد. سینگلا و همکاران [۶] هندسه‌های مختلفی را برای منیفلد یک موتور احتراق داخلی طراحی کردند و عملکرد آنها را با منیفلد موجود مقایسه نمودند. اثرات سرعت‌های خروجی و تغییرات فشار بر عملکرد منیفلد برای سرعت‌های ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آنها با اعمال تغییرات در منیفلد موجود روی دو مدل کار کردند. آنها تعیین کردند با منیفلد جدید، نرخ جریان در اولین خروجی ۱۶٪ و نرخ جریان سایر خروجی‌ها ۵ الی ۷٪ افزایش یافته است. تامارایکانان و همکاران [۷] بر اهمیت توزیع هوای همگن در سیلندرها برای بهبود عملکرد موتور تاکید کردند و تعیین نمودند که توزیع هوای غیرهمگن باعث کاهش راندمان حجمی و افزایش مصرف سوخت می‌شود. آنها اظهار داشتند که گردهاها زمانی رخ می‌دهند که هوا به سرعت وارد منیفلد ورودی می‌شود و مشخص کردند که عملکرد موتور را می‌توان با گسترش لوله‌ها با تغییرات ایجاد شده در منیفلد ورودی افزایش داد.

شالت و همکاران [۸] توزیع فشار در منیفلد ورودی موتور احتراق داخلی را با رویکرد فرکانس با استفاده از تحلیل دینامیکی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که هندسه منیفلد، دمای گاز و سرعت گاز تأثیر زیادی بر رفتار سیال در منیفلد دارند. در تحقیق دیگر، جریان گاز در منیفلد ورودی لوله‌ای مستقیم در یک موتور احتراق داخلی تک-سیلندر ابتدا مورد بررسی قرار گرفت و سپس یک مدل منیفلد ورودی مارپیچی به عنوان یک جایگزین توسط جمنی و همکاران [۹] توسعه یافت. منیفلد موجود از موتور خارج شد و منیفلد ورودی مارپیچی که طراحی و تولید شده بود، بر روی موتور مونتاژ شد. مقایسه بین وضعیت قبلی و منیفلد ورودی مارپیچی از نظر بازده حجمی انجام شد. آنها مشاهده کردند که منیفلد ورودی مارپیچی به طور مثبت بازده حجمی موتور را در فشارهای تزریق مختلف و بارهای مختلف افزایش می‌دهد.

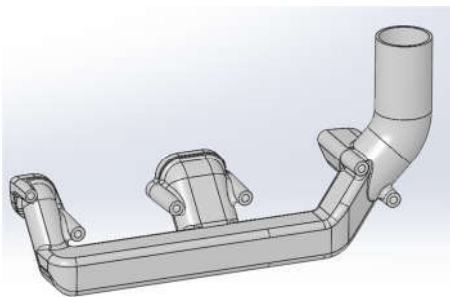
همانطور که در مطالعات بالا مربوط به موتورهای تک یا چهار سیلندر ذکر شد، منیفلد باید طوری طراحی شود که فضا و مکان موجود در موتور را در نظر بگیرد تا طراحی بهینه برای بازده حجمی پیدا شود. علاوه بر این، اخیراً به دلیل تغییرات آب و هوایی، مقررات آلودگی هوا برای موتورهای دیزلی بزرگ در قطارها و کشتی‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱]. بنابراین، طراحی منیفلد ورودی موتورهای دیزلی مورد استفاده در وسایل نقلیه نیز از نظر اثرات زیست‌محیطی و انتشار گاز بسته به راندمان احتراق موتور اهمیت پیدا کرده است. با توجه به مشکلات بررسی هندسه منیفلد ورودی یک موتور دیزلی به دلیل هزینه‌های بالای تولید و آنالیز تجربی این موتورها، لزوم استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزارهای موجود در این زمینه کاملاً مشهود است. بر این مبنای، در این پژوهش، یک طرح جدید از منیفلد برای موتور دیزلی تراکتور با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای GT-SUITE و Ansys Fluent مد نظر قرار گرفت. سپس، با استفاده از روش پرینتر سه‌بعدی، منیفلد طراحی شده، تولید و بصورت عملی آزمایش گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌سازی سه‌بعدی

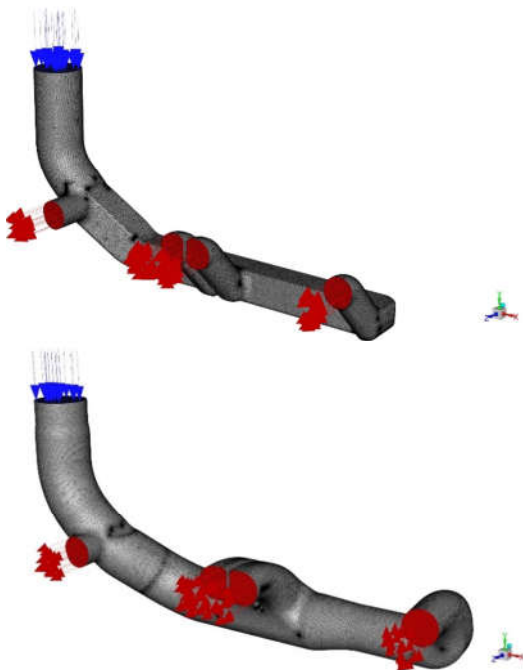
در اولین گام، مدل هندسی منیفلد موجود با دو هدف ایجاد مدل مقایسه‌ای با طرح جدید و کالیبره نمودن مدل GT-SUITE با نتایج تست تجربی در نرم افزار SolidWorks 2016 بصورت کامل مطابق شکل ۱ مدل‌سازی شد.

در طراحی منیفلد جدید، عمده‌ترین محدودیت‌ها به محدودیت‌های مونتاژی و جانمایی، ثابت نگه داشتن محل و مقطع ورودی منیفلد (خارج شده از فیلتر هوا) و لزوم ورود یک‌طرفه و نامتقارن هوا به منیفلد و ثابت نگه‌داشتن محل و مقطع مربوط به پورت‌های خروجی از منیفلد (وارد شده به سرسیلندر) مربوط می‌شد. محدودیت‌هایی نظیر قابلیت مونتاژ و تعمیرپذیری در اولویت‌های بعدی قرار داشتند.

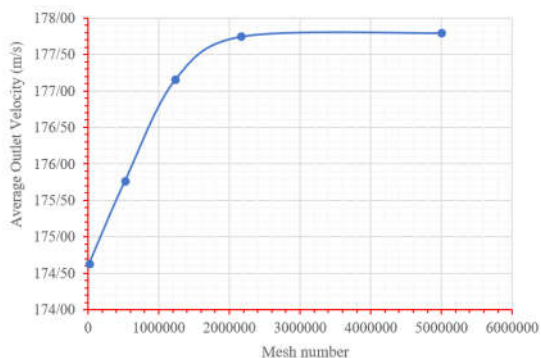


شکل ۱- مدل سه بعدی منیفلد موجود

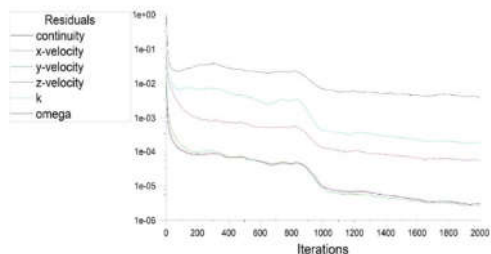
فرآیند طراحی در این تحقیق، با در نظر داشتن محدودیت‌های طراحی، طرح‌های مختلف ممکن، با تفاوت‌هایی در مسیر هوا تا هر یک از پورت‌ها، شکل و حجم پلنیوم و سطح مقطع ورودی در نرم‌افزار SolidWorks 2016 مدل‌سازی شد. با توجه به امکان شبیه‌سازی در محیط SolidWorks Flow Simulation 2016 با کمترین تنظیمات روی مدل ایجاد شده در SolidWorks، مدل قبلی منیفلد و مدل‌های تغییر



شکل ۳: شبکه‌بندی منیفلد موجود (بالا) و منیفلد بهینه شده (پایین)



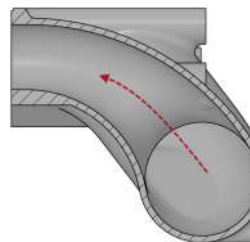
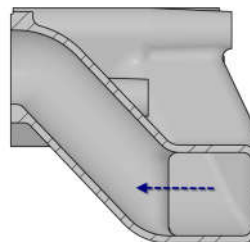
شکل ۴- نمودار استقلال از شبکه برحسب میانگین سرعت در پورت ۱



شکل ۵- نمودار باقی مانده نتایج حل

در ادامه، شبیه‌سازی‌ها در قالب دسته بندی زیر انجام شد:
 الف) شبیه‌سازی مشابه شرایط مرزی و شبیه‌سازی‌های انجام یافته در SolidWorks Flow Simulation و مقایسه نتایج آن‌ها
 ب) حل در حالت ناپایا که در ورودی فشار محیط اعمال شده است و

یافته در حالت جریان پایای آشفته مورد بررسی قرار گرفتند. شرط مرزی ورودی فشار محیط در نظر گرفته شد. مسأله با دو حالت شرط مرزی خروجی شبیه‌سازی شد. در حالت اول تمامی پورت‌ها باز در نظر گرفته شده و فشار خلأ متوسط در مرحله مکش موتور اعمال شد. در حالت دوم تنها یکی از پورت‌ها با فشار مکش متوسط موتور در نظر گرفته شده و باقی پورت‌ها مسدود فرض شد تا تأثیر موج‌های فشار برگشتی از پورت‌های مسدود برآورد شود. این عمل برای پورت‌های دیگر نیز تکرار شد. با مقایسه میزان دبی‌ها در حالت دوم برای هر یک از پورت‌ها، چگونگی توزیع هوا در حالت پایا ارزیابی شد. همچنین، با مقایسه میزان دبی هوای مکشی در هر یک از طرح‌ها، چند طرح برای بررسی‌های بیشتر برگزیده شد. در شکل ۲ تفاوت الگوی مسیر ورود به پورت‌های طرح جدید در مقایسه با طرح قبلی نشان داده شده است.



شکل ۲- تفاوت الگوی مسیر هوای پورت‌ها، طرح قبلی (تصویر بالا)، طرح جدید (تصویر پایین)

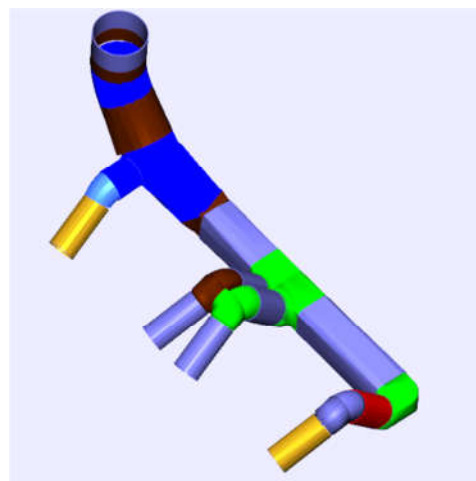
۲-۲- تحلیل‌های تکمیلی و انتخاب طرح برگزیده

با استخراج مسیر هوا در طرح‌های برگزیده، مش‌بندی آن‌ها در محیط نرم‌افزار ICEM انجام یافت. در شکل ۳ نمونه مش‌بندی انجام شده در نرم‌افزار Ansys Fluent و همچنین نمودار استقلال از مش در شکل ۴ و نمودار همگرایی در شکل ۵ نشان داده شده است.

اصلاح شکل هندسی در مسیر و زوایای پورت‌ها و همچنین بدنه منیفلد (پلنیوم) صورت گرفته است. لازم به ذکر است مسیر سیال در شکل ۲ به آرامی تغییر جهت می‌دهد که این عامل باعث افزایش نرخ جریان حجمی، سرعت متوسط خروجی و نرخ جریان جرمی نسبت به منیفلد طرح موجود می‌گردد.

در پورتهای خروجی داده‌های مربوط به فشار به صورت تابعی از زمان از نرم‌افزار GT-SUITE حاصل شده است. لازم به ذکر است مدل منیفلد قبلی در محیط GEM3D مطابق شکل ۶ به فرم Quasi-1D درآمده است. در این فرم مقاطع مختلف منیفلد با استفاده از اشکال هندسی منظم نظیر مکعب، استوانه و مخروط تقریب زده شده است. مدل موتور چهار سیلندر در GT-SUITE در بخش ورودی هوا جایگزین شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقطع خروجی منیفلد هوا به صورت چرخه‌ای در هر دور موتور برای هر یک از پورتهای استخراج شده و در FLUENT اعمال می‌شود.

ج) در فیزیک مسأله، جریان هوا در هریک از پورتهای در یک بازه‌ی زاویه‌ای مشخصی از هر دور موتور مسدود است و جرمی از آن خارج نمی‌شود ولی شبیه‌سازی حالت (ب) قادر به شبیه‌سازی دقیق این مسأله نیست. لذا شبیه‌سازی در این حالت با حالت (ب) به این شکل است که شرط مرزی در مرزهای خروجی به صورت دبی جرمی تابع زمان برای هر یک از پورتهای اعمال می‌شود. این داده‌ها از شبیه‌سازی GT_SUITE مشروح در بند (ب) استخراج می‌شود.

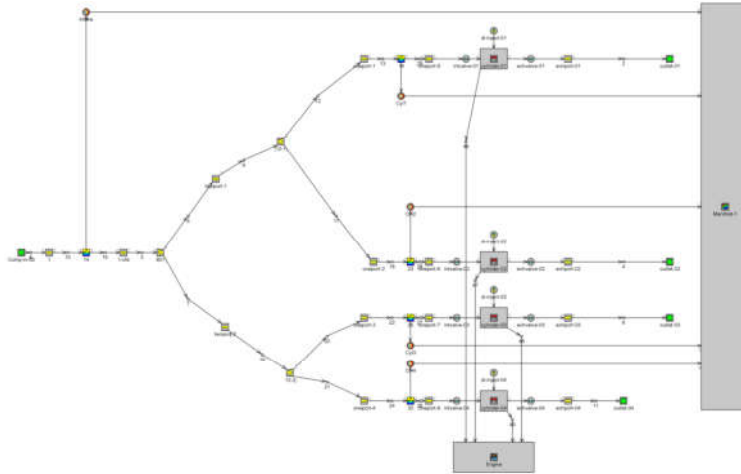


شکل ۶- مدل GEM3D

د) از امکان کوپل نرم‌افزارهای FLUENT و GT-SUITE مطابق شکل ۷ استفاده می‌شود. حل حالت ناپایا تا وصول به حالت عملکرد پایدار موتور در GT به نحوی صورت می‌گیرد که ابتدا شبیه‌سازی در تعداد مشخصی دور موتور به طور یک‌بعدی در GT انجام می‌شود تا حدس اولیه مناسب به دست آید سپس شبیه‌سازی در حالت کوپل به این

گونه انجام می‌شود که در پورت ورودی و پورتهای خروجی، داده‌های FLUENT مربوط به دبی جرمی را در هر لحظه از GT گرفته و پس از حل در هر لحظه زمانی، فشار را در مقاطع مذکور به عنوان شرط مرزی به نرم‌افزار GT می‌دهد.

مزیت حالت (د) نسبت به (ج) در این است که شبیه‌ترین حالت به شرایط کارکرد واقعی موتور بوده و تأثیرات واقعی مدل سه‌بعدی منیفلد در مکش هوا و عملکرد موتور را نشان می‌دهد. از سوی دیگر از آنجا که میزان دبی مکشی در فشار پورتهای مؤثر است فشار یا دبی استخراجی از مدل GT در حالات (ب) و (ج) از حالت واقعی انحراف دارد. برای حل حالت (د)، مدل سه‌بعدی، روش فشار مینا با طرح PISO در حالت ناپایا، با فعالسازی انتقال گونه‌ها برای مخلوط بخار O_2 و N_2 به کار رفته و مدل آشفتگی، $k-\omega$ استاندارد با تابع دیواره استاندارد و شرایط مرزی تابع UDF متناظر حاصل از GT انتخاب شدند تا با تنظیمات سطوح مشترک با نرم‌افزار GT مطابقت داشته باشد. دور موتور ۲۰۰۰ RPM و گام زمانی حل عددی ۰/۹ درجه میل لنگ در نظر گرفته شد. همچنین حل تا حاصل شدن جواب پایدار در GT ادامه یافت. مزیت حالت (د) نسبت به (ج) در این است که شبیه‌ترین حالت به شرایط کارکرد واقعی موتور بوده و تأثیرات واقعی مدل سه‌بعدی منیفلد در مکش هوا و عملکرد موتور را نشان می‌دهد. از سوی دیگر از آنجا که میزان دبی مکشی در فشار پورتهای مؤثر است فشار یا دبی استخراجی از مدل GT در حالات (ب) و (ج) از حالت واقعی انحراف دارد. برای حل حالت (د)، مدل سه‌بعدی، روش فشار مینا با طرح PISO در حالت ناپایا، با فعالسازی انتقال گونه‌ها برای مخلوط بخار O_2 و N_2 به کار رفته و مدل آشفتگی، $k-\omega$ استاندارد با تابع دیواره استاندارد و شرایط مرزی تابع UDF متناظر حاصل از GT انتخاب شدند تا با تنظیمات سطوح مشترک با نرم‌افزار GT مطابقت داشته باشد. دور موتور ۲۰۰۰ RPM و گام زمانی حل عددی ۰/۹ درجه میل لنگ در نظر گرفته شد. همچنین حل تا حاصل شدن جواب پایدار در GT ادامه یافت.



شکل ۷- مدل کوپل شده در GT

$$F_1 = \tanh(\varphi_1^4); \varphi_1 = \min \left[\max \left[\frac{0.09\omega y}{\sqrt{k}} \cdot \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \cdot \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} \cdot D_{\omega}^* \cdot y^2} \right]; D_{\omega}^+ \right] = \max \left[\frac{1}{2\rho \sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \cdot 10^{-10} \right] \quad (6)$$

جمله تولید ω و جملات اتلاف K& ω در معادلات (۷) و (۸) آمده است:

$$G_{\omega} = \frac{aa^*}{v_t} \cdot G_k; a_{\infty} = F_1 \cdot a_{\infty,1} + (1 - F_1) a_{\infty,2}; \left\{ \begin{array}{l} a_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,1} \cdot \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \\ a_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,2} \cdot \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega; Y_k = \rho \beta \omega^2; \beta_i = F_1 \cdot \beta_{i,1} + (1 - F_1) \cdot \beta_{i,2} \quad (8)$$

اصلاحیه انتشار متقابل بصورت معادله (۹) بیان شده است:

$$D_{\omega} = 2 \cdot (1 - F_1) \cdot \rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (9)$$

ثابت‌های مدل بصورت مقادیر رابطه (۱۰) در نظر گرفته شد [۱۰]:

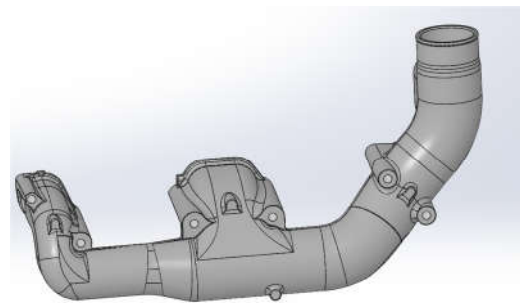
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{k,1} = 1.176 \\ \sigma_{\omega,1} = 2.0 \\ \sigma_{k,2} = 1.0 \\ \sigma_{\omega,2} = 1.168 \\ a_1 = 0.31 \\ a_{\infty} = 0.52 \\ \beta_{i,1} = 0.075 \\ \beta_{i,2} = 0.0828 \\ \beta_{\infty}^* = 0.09 \end{array} \right. \quad (10)$$

۳- نتایج

۳-۱- آنالیز حالتی که تمام پورت‌های خروجی باز می‌باشد

برای بررسی مزایای منیفولد بهینه شده، ابتدا فرض باز بودن تمام پورت‌های خروجی منیفولد مد نظر قرار گرفت. در شکل ۹ خطوط جریان برای هر دو منیفولد قابل مشاهده است. همانطور که در منیفولد طرح موجود (a) مشاهده می‌شود گردابه-

در نهایت منیفولد طرح جدید از بین طرح‌های اولیه مطابق شکل ۸ انتخاب گردید.



شکل ۸- مدل سه بعدی منیفولد جدید

۳-۲- معادلات حاکم

رابطه اصلاحی محاسبه لزجت آشفتگی در مدل K- ω Shear Stress Transport: SST بصورت معادله (۱) می‌باشد:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \cdot \frac{1}{\max \left[\frac{a_1^*}{a_1^*}; \frac{SF_2}{a_1^* \omega} \right]}; F_2 = \tanh(\varphi_2^2); \varphi_2 = \max \left[2 \cdot \frac{\sqrt{K}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (1)$$

معادله انتقالی K و ω به ترتیب در روابط (۲) و (۳) آورده شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega} \quad (3)$$

همچنین معادلات انتشار موثر و معادلات اعداد پراکتل در روابط (۴) و (۵) نشان داده شده است:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}; \Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (4)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}}; \sigma_{\omega} = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (5)$$

محاسبه معادله ترکیب وزنی در رابطه (۶) آورده شده است:

جدول ۱- دبی جرمی عبوری برحسب (Kg/s) در دو حالت

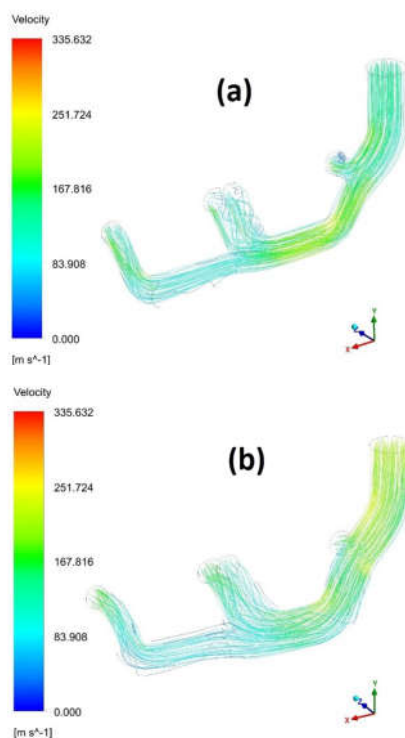
پورت	طرح منیفلد	طرح منیفلد	درصد اختلاف
	موجود	بهینه شده	
پورت خروجی ۱	۰/۱۵۷۸۷۲۸۱	۰/۱۹۴۷۸۵۹۱	۲۳/۵۷
پورت خروجی ۲	۰/۱۲۲۴۳۹۰۳	۰/۲۱۷۳۵۰۹۲	۷۷/۸۷
پورت خروجی ۳	۰/۱۳۰۳۴۲۹۵	۰/۲۳۸۶۲۲۳۶	۸۳/۰۸
پورت خروجی ۴	۰/۲۱۱۳۲۲۱۱	۰/۲۴۶۶۰۴۸۸	۱۶/۵۹
مجموع دبی جرمی عبوری	۰/۶۲۱۹۷۶۹	۰/۸۹۷۳۶۴۰۷	۴۴/۲۸

۲-۳- نتایج حالتی که پورت‌های خروجی به صورت یک به یک باز می‌باشند.

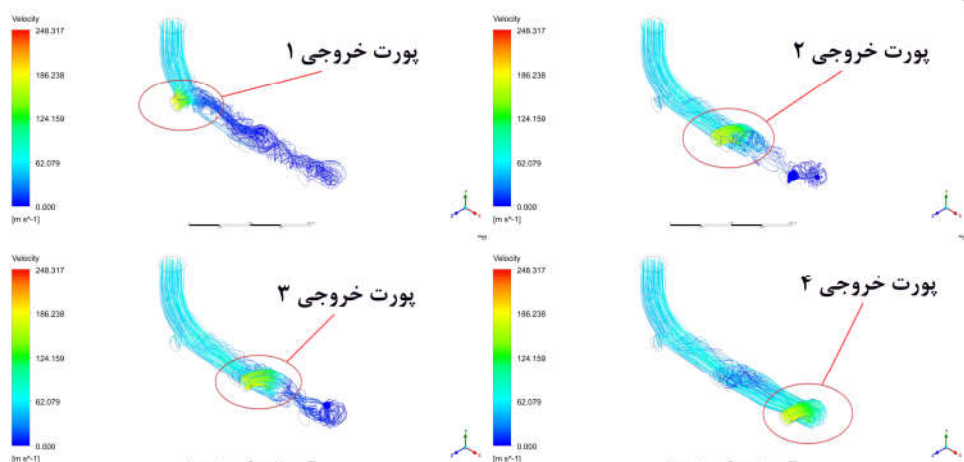
در عمل تمام پورت‌های خروجی باز نمی‌باشد و با حرکت میل لنگ برحسب زمان، پورت‌های خروجی منیفلد به ترتیب خاص باز و بسته می‌شوند این کار باعث به وجود آمدن موج‌های فشار برگشتی می‌شود. به منظور آنالیز دقیق‌تر این پدیده، فقط یکی از پورت‌های خروجی منیفلد باز گذاشته شد و آنالیز انجام گردید. شکل ۱۰ می‌توان خطوط جریان سرعت را نشان می‌دهد. با بررسی شکل ۱۰ می‌توان استدلال کرد که برخلاف حالت قبل، در حالتی که فقط یکی از پورت‌های منیفلد باز می‌شود، گردابه‌ها و موج‌های فشار برگشتی پدیدار می‌شوند. همچنین بیشترین میزان جریان گردابی ایجاد شده در حالی رخ می‌دهد که پورت خروجی شماره ۱ باز باشد. از طرف دیگر، در پورت‌های خروجی یکسان، میزان جریان گردابی ایجاد شده در منیفلد بهینه‌شده کمتر از منیفلد طرح موجود می‌باشد. همچنین، کمترین میزان جریان‌های گردابی ایجاد شده در هر دو منیفلد در حالتی رخ می‌دهد که پورت ۴ باز می‌باشد. در شکل ۱۱ کانتور فشار در چهار پورت منیفلد بهینه‌شده نشان داده شده است.

هایی در پورت‌های خروجی شکل گرفته‌اند که باعث اتلاف انرژی جنبشی سیال و در نتیجه کاهش سرعت میانگین سیال در خروجی‌ها و در نتیجه کاهش دبی جرمی عبوری سیال می‌شود. از طرفی دیگر، در منیفلد بهبودیافته (b) با ایجاد مسیر روان‌تر جهت عبور راحت سیال، کاهش بسیار زیاد گردابه‌ها و در نتیجه کاهش اتلاف انرژی جنبشی و همچنین، افزایش دبی عبوری جریان از پورت‌های خروجی می‌گردد.

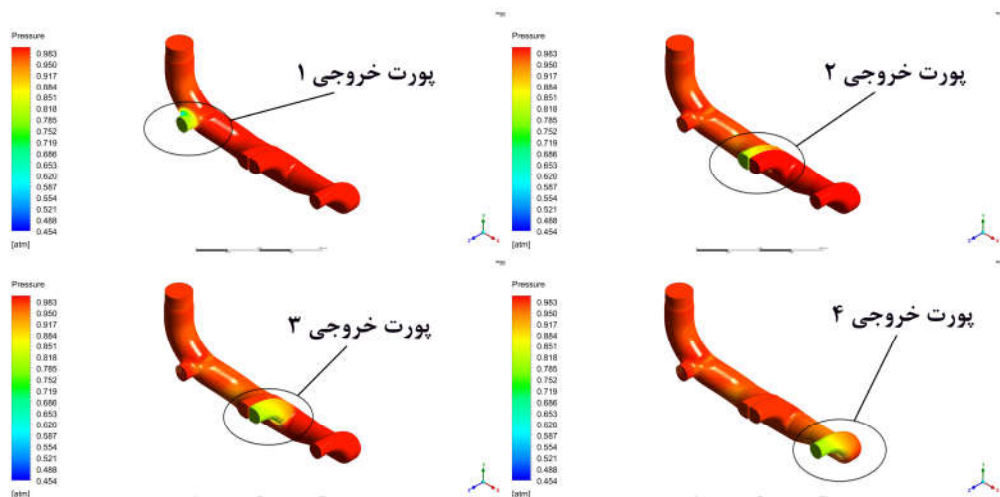
در جدول ۱ مقایسه‌ای به منظور بررسی عملکرد هر دو منیفلد آورده شده است. با بررسی جدول ۱ مشاهده می‌گردد که دبی جرمی عبوری در منیفلد بهینه‌شده ۴۴/۲۸ درصد بیشتر از طرح موجود است.



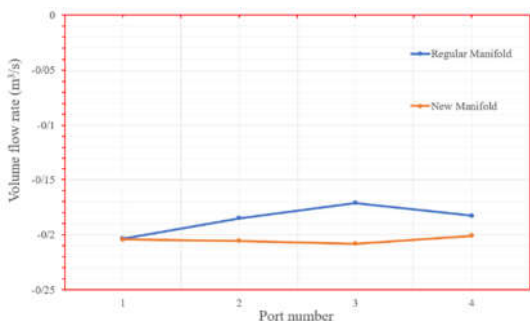
شکل ۹- خطوط جریان سرعت منیفلد موجود (a) و منیفلد جدید (b)



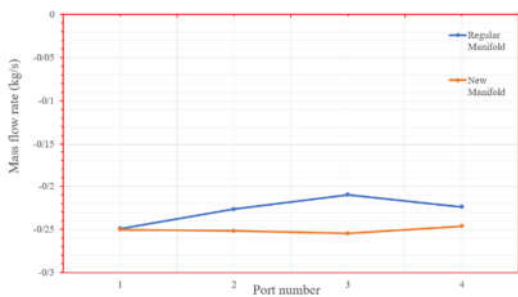
شکل ۱۰- خطوط جریان سرعت در منیفلد بهبود یافته در حالت باز بودن یک به یک پورت‌ها



شکل ۱۱- فشار در پورت‌های چهارگانه در منیفلد بهبود یافته در حالت باز بودن یک به یک پورت‌ها



شکل ۱۳- دبی حجمی سیال در پورت‌های خروجی منیفلد

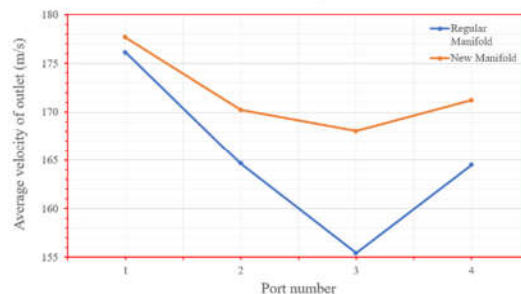


شکل ۱۴- دبی جرمی سیال در پورت‌های خروجی منیفلد

۳-۳- نتایج مربوط به کوپل با Ansys Fluent با GT-SUITE

حل حالت ناپایا پس از کالیبره نمودن نتایج تست عملی و مدل کوپل شده منیفلد موجود انجام شد. پس از درج ضرایب کالیبره در GT_SUITE، منیفلد طرح جدید در حالت کوپل، شبیه‌سازی و اجرا شد و نتایج مد نظر استخراج گردید. شکل ۱۵ مقدار هوای مکشی هر یک از پورت‌ها را در منیفلد طرح قبلی و شکل ۱۶ همان پارامترها را

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان استدلال کرد که میانگین سرعت در منیفلد بهبود یافته بیشتر از منیفلد طرح موجود می‌باشد که این امر باعث افزایش دبی جرمی و دبی حجمی جریان خروجی می‌شود. همچنین، مقادیر سرعت پورت‌های چهارگانه در منیفلد جدید نسبت به منیفلد موجود، به یکدیگر نزدیکتر می‌باشند که دلیل آن شکل هندسی منعطف در منیفلد بهبود یافته می‌باشد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌گردد که مقادیر دبی حجمی و دبی جرمی در پورت‌های منیفلد بهبود یافته بیشتر از منیفلد طرح موجود می‌باشد (علامت منفی به علت خروج جریان از حجم کنترل می‌باشد). همچنین، مقادیر دبی جرمی و دبی حجمی پورت‌های مختلف در منیفلد بهینه‌شده، بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند. این موضوع در ایجاد احتراق کامل و یکنواخت و منظم در داخل سیلندرها موتور و در نهایت افزایش توان خروجی نقش اساسی دارد.

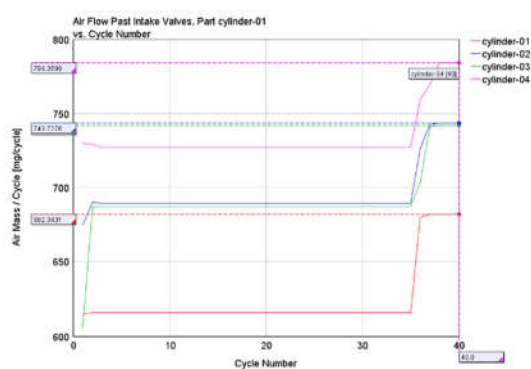


شکل ۱۲- میانگین سرعت خروجی در پورت‌های خروجی

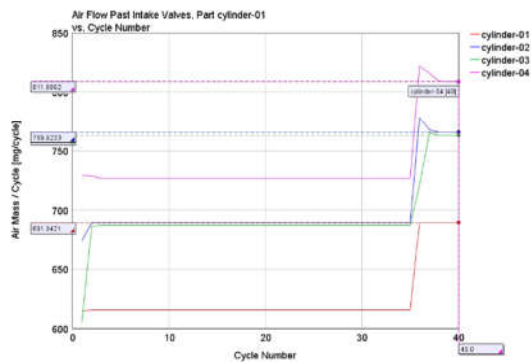
در منیفلد طرح جدید نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲، تأثیر هندسه انعطاف‌پذیر منیفلد بهینه‌شده بر دبی جرمی منیفلد کاملاً مشخص است.

جدول ۲- دبی جرمی عبوری بر حسب (mg/cycle)

درصد اختلاف	طرح منیفلد بهینه شده	منیفلد طرح موجود	پورت
۳/۶	۸۱۲	۷۸۴	پورت خروجی ۱
۳/۸	۷۷۰	۷۴۲	پورت خروجی ۲
۳/۱۲	۷۶۸	۷۴۴	پورت خروجی ۳
۱/۵	۶۹۲	۶۸۲	پورت خروجی ۴
۳/۱۰	۳۰۴۲	۲۹۵۲	مجموع دبی جرمی عبوری



شکل ۱۵- مقدار هوای مکشی برای سیکل‌های عملکردی در هر یک از پورت‌ها برای طرح قبلی منیفلد با شبیه‌سازی کوپل شده (حالت د)



شکل ۱۶- مقدار هوای مکشی برای سیکل‌های عملکردی در هر یک از پورت‌ها برای طرح جدید منیفلد با شبیه‌سازی کوپل شده (حالت د)

مطابق نتایج مندرج در جدول ۲ ملاحظه می‌شود مقدار هوای مکشی برای پورت‌های چهارگانه از ۱ تا ۴ در منیفلد جدید، به ترتیب ۳/۶، ۳/۸، ۳/۱۲ و ۱/۵ درصد بیشتر از مقادیر متناظر در منیفلد طرح

قبلی می‌باشد و در کل ۳ درصد افزایش دبی جرمی هوای ورودی به موتور مشاهده می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی‌ها به صورت ناپایا و از طریق کوپل نرم‌افزارهای FLUENT و GT-SUITE، طرح نهایی برگزیده شده و پرینت سه‌بعدی آن از جنس پلاستیک ABS تهیه شد. دلیل استفاده پرینت سه‌بعدی به جای روشهای دیگر، سرعت در آماده‌سازی و دقت در ساخت می‌باشد که امکان بررسی عملکرد را به دور از خطاهای ناشی از روش‌های دیگر ساخت فراهم می‌آورد.

قطعه تولید شده بر روی موتور و محصول نهایی (تراکتور) مطابق شکل ۱۷ مونتاژ گردید و تست‌های عملکردی در دورها و بارهای مختلف انجام شد و نتایج حاصل با نتایج موتور با منیفلد قبلی مقایسه شد. نتایج تست، تطابق خوبی با شبیه‌سازی‌های بند (۲-۲) حالت د که به کوپل دو نرم‌افزار مربوط می‌شود، نشان می‌دهد. در بررسی چگونگی توزیع هوا در پورت‌های خروجی تنها نتایج حالت د با نتایج تست‌های روی موتور تطابق دارد و حل در حالت پایا یا ناپایا در حالات ب و ج تأثیر واقعی موج‌های فشاری را نشان نمی‌دهد و این مسأله، اهمیت شبیه‌سازی در حالت کوپل را نمایان می‌سازد. تست-های عملکردی بر روی موتور بهبود عملکردی از لحاظ افزایش توان با سوخت یکسان و کاهش آلاینده‌ها به میزان حدود ۵ درصد را با منیفلد جدید تأیید می‌کند.

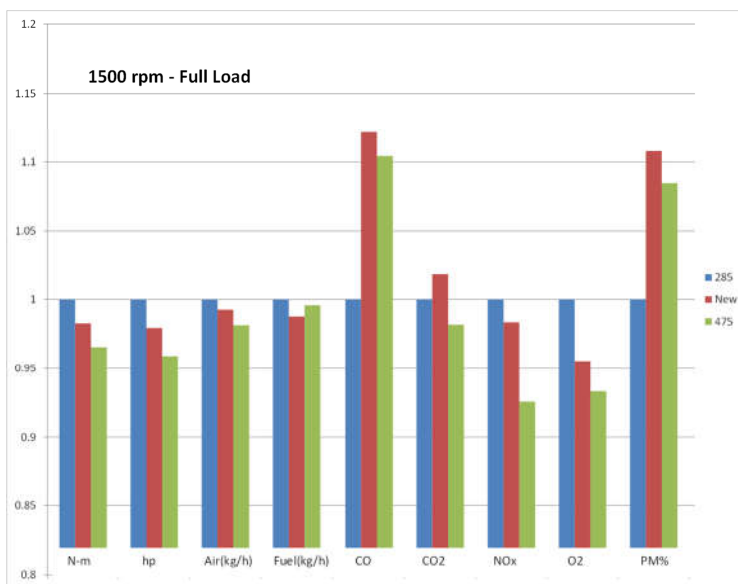
در شکل ۱۸ نتایج تست مربوط به منیفلد مطلوب (موتور ۲۸۵) که امکان نصب آن در محصول فراهم نیست به عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته شده و نسبت مقادیر منیفلد قبلی و طرح جدید به مقدار مینا بررسی گردید. در دور گشتاور یعنی 1500 RPM، مشاهده شد که گشتاور، توان و مکش هوا در منیفلد جدید نسبت به منیفلد قبلی بهبود یافته و به مقدار منیفلد مطلوب نزدیک شده است. همچنین، مصرف سوخت با منیفلد جدید کاهش یافته و به مقدار مطلوب نزدیک شده است.

با توجه به شکل ۱۹ در دور توان یعنی 2000 RPM، ملاحظه می‌شود با افزایش دور موتور، تغییرات صورت گرفته در طرح جدید منیفلد، بهبود بیشتری نشان می‌دهند. گشتاور با منیفلد مطلوب برابری می‌کند، مقدار توان حتی از مقدار حاصل از منیفلد مطلوب نیز فراتر رفته، مکش هوا نیز به مقدار مکش در منیفلد مطلوب رسیده، مصرف سوخت بهتر از منیفلد مطلوب است و ملاحظه می‌شود میزان دوده بهبود چشمگیری یافته است.

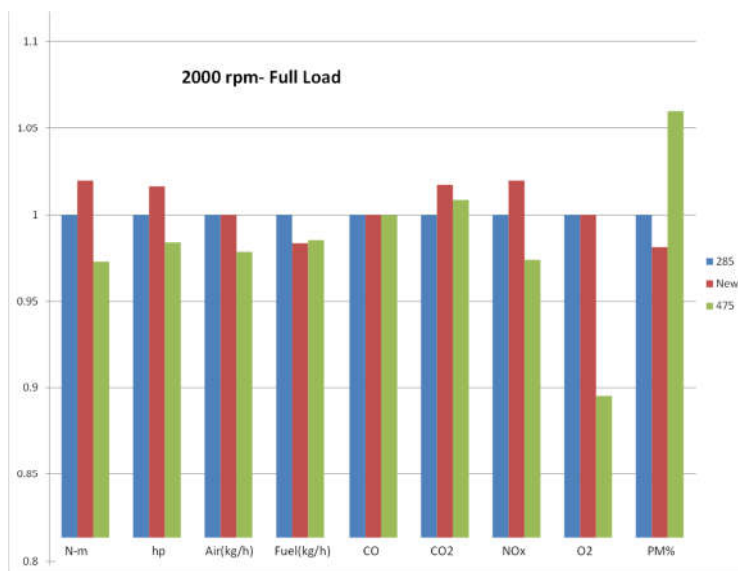
از مقایسه پارامتر دبی جرمی هوا در دور توان مشخص می‌شود موتور با منیفلد جدید ۳/۲ درصد مکش بیشتری نسبت به موتور با طرح قبلی منیفلد دارد و این با نتایج حاصل از کوپل که کل دبی جرمی را ۳ درصد افزایش پیش‌بینی کرده بود، همخوانی دقیقی دارد و تنها ۰/۲ درصد اختلاف وجود دارد.



شکل ۱۷- مونتاژ منیفولد پرینت شده بر روی موتور در سلول تست (راست)
مونتاژ منیفولد پرینت شده بر روی محصول نهایی، تراکتور ۴۷۵ (سمت چپ)



شکل ۱۸- نتایج حاصل از تست موتور برای پارامترهای عملکردی در دور گشتاور (1500 RPM) با طرح قبلی منیفولد (۴۷۵)، طرح جدید (new) و منیفولد محصول با عملکرد مطلوب (موتور ۲۸۵)



شکل ۱۹- نتایج حاصل از تست موتور برای پارامترهای عملکردی در دور توان (2000 RPM) با طرح قبلی منیفولد (۴۷۵)، طرح جدید (new) و منیفولد محصول با عملکرد مطلوب (موتور ۲۸۵)

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، نتایج بدست آمده نشان دادند در حالی که تمام خروجی‌ها باز باشند، در منیفلد طرح موجود گردابه‌هایی در پورت‌های خروجی ایجاد می‌گردند که سبب اتلاف انرژی جنبشی سیال، کاهش سرعت میانگین سیال در خروجی‌ها و کاهش دبی جرمی عبوری سیال می‌شود. اما در منیفلد بهینه‌شده با تغییر هندسه ایجاد شده، مسیر سیال روان‌تر شده و به کاهش گردابه‌ها، کاهش اتلاف انرژی جنبشی و همچنین افزایش دبی عبوری جریان از پورت‌های خروجی منجر شده است. اما در حالی که فقط یکی از پورت‌های منیفلد باز می‌شود، گردابه‌ها و موج‌های فشار برگشتی پدیدار می‌شوند. همچنین، بیشترین میزان جریان گردابی و موج‌های فشار ایجاد شده در حالتی رخ می‌دهد که پورت خروجی شماره یک باز باشد و کمترین میزان جریان‌های گردابی و موج‌های فشار ایجاد شده در هر دو منیفلد در حالتی رخ می‌دهد که پورت چهارم باز است. از طرف دیگر میانگین سرعت در منیفلد بهینه‌شده (جدید) بیشتر از منیفلد طرح موجود می‌باشد که این امر باعث افزایش دبی جرمی و دبی حجمی جریان خروجی می‌شود. بنابراین، تأثیر هندسه انعطاف‌پذیر منیفلد بهینه‌شده بر دبی جرمی منیفلد کاملاً مشخص است. همچنین، مقدار هوای مکشی برای پورت‌های چهارگانه در منیفلد قبلی نسبت به منیفلد طراحی‌شده افزایش پیدا کرده است. تست‌های عملکردی بر روی موتور بهبود عملکردی از لحاظ افزایش توان با سوخت یکسان و کاهش آلاینده‌ها را با منیفلد جدید تأیید می‌کند. در منیفلد طراحی‌شده، مکش هوا نیز به مقدار مکش در منیفلد مطلوب رسیده، مصرف سوخت بهتر از منیفلد مطلوب است و ملاحظه می‌شود میزان دوده بهبود چشمگیری یافته است. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان عنوان کرد، روش‌های قبلی تحلیل از قبیل حل پایا یا ناپایا و انواع شرایط مرزی ممکن، یک مقایسه‌ی کیفی از طرح‌ها در اختیار طراح قرار می‌دهد و این شبیه‌سازی به روش کوپل است که با شبیه‌سازی دقیق شرایط موتور، نتایج کمی قابل اعتماد در اختیار طراح قرار می‌دهد. در این پژوهش، طرح جدید با تأیید تست‌های عملکردی، نهایی شده و با تهیه نقشه‌ی ساخت جهت تولید انبوه از جنس آلومینیوم به مراحل تولید ارجاع داده شد.

۵- سپاسگزاری

از همکاری و همدلی مجموعه‌ی ارزشمند مرکز تحقیق و توسعه شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز کمال تشکر را داریم.

۶- مراجع

- engineering. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018.
- [5] Xu J. *Flow analysis of engine intake manifold based on computational fluid dynamics*. Journal of Physics, Conference Series, 2017; IOP Publishing.
- [6] Singla S, S Sharma, D Gangacharyulu. *Study of design improvement of intake manifold of internal combustion engine*. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 2015; 3: 234-242.
- [7] Thamaraiakanan R. et al. *Design and Analysis of an Intake Manifold in an IC Engine*. Applied Mechanics and Materials, 2015; 766: 1021-1027.
- [8] Chalet D, et al. *A frequency modelling of the pressure waves in the inlet manifold of internal combustion engine*. Applied energy, 2011; 88(9): 2988-2994.
- [9] Jemni MA, G Kantchev, MS Abid. *Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations*. Energy, 2011; 36(5): 2701-2715
- [10] ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2022
Charles G Speziale, Ronald M C So, *Turbulence Modeling and Simulation*, 2016; Taylor & Francis Group LLC.

- [1] Apaydin S, N Doner. *Simulation-based investigations of geometrical design effects on the efficiency of the intake manifold of a six-cylinder diesel engine*. Advances in Engineering Software, 2022; 173: 103269.
- [2] Abidi SH, M Hasan. *Variation of turbulent kinetic energy due to dimples in intake manifold for diesel engine*. Case Studies in Thermal Engineering, 2021; 27: 01299.
- [3] Gocmen K, HS Soyhan. *An intake manifold geometry for enhancement of pressure drop in a diesel engine*. Fuel, 2020; 261: 116193.
- [4] Shuqing Guo1, Shuo Huang1, Mingshan Chi. *Optimized design of engine intake manifold based on 3D scanner of reverse*