

# تحلیل گرمایی مکانیکی چندراهه دود موتور پرخوران به روش تعامل دو طرفه سیال و جامد

مرتضی نادری حق<sup>۱</sup>، آرشن محمدی<sup>۲\*</sup>، غلامحسین پایگانه<sup>۳</sup>

mechanickaraj@yahoo.com  
amohammadi@sru.ac.ir  
g.payganeh@sru.ac.ir

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  
<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  
<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

## چکیده

امروزه کارخانه های خودرو سازی به منظور افزایش گشتاور و توان با در نظر گرفتن مصرف سوخت، به سمت تولید موتورهای پرخوران رفته اند. با توجه به افزایش دمای گازهای خروجی در موتورهای تقویت شده شناسایی نقاط بحرانی چندراهه دود در شرایط بحرانی کارکرد موتور (حداکثر دور و بار کامل)، جهت پیش گیری از شکست چندراهه دود بسیار مهم است. در این پژوهش تحلیل ترمومکانیکی، خستگی و تخمین عمر چندراهه دود در بحرانی ترین حالت کارکرد موتور با استفاده از تعامل دو طرفه محیط سیال و پوسته جامد، انجام شده است. در تعامل دو طرفه در هر گام زمانی ابتدا تحلیل جریانی چندراهه در نرم افزار فلونت انجام می شود، سپس دما، ضرایب انتقال حرارت جابجایی و فشار از محیط سیال روی سطح داخلی پوسته چندراهه نگاشت می شود. در محیط جامد پیش بار پیچ ها، بسترهای الاستیک برای در نظر گرفتن اثر سرسیلندر و پرخوران در نظر گرفته شده و تحلیل ترمومکانیکی با نرم افزار انسیس انجام می شود، سپس با محاسبه کرنش و تغییر شکل چندراهه، شبکه جدید برای تحلیل در گام زمانی بعدی به نرم افزار فلونت وارد می شود و این چرخه با توجه به تعداد گام زمانی تا انتهای سیکل ادامه می یابد. نتایج شبیه سازی حرارتی جریان و محیط جامد با داده های آزمون تجربی دما، صحت گذاری شده است. در نهایت کانتورهای دما و ضریب انتقال حرارت، دما در پوسته جامد، کرنش، تنش نرمال، فون میزز و تنش های تناوبی رسم شده و نقاط بحرانی تخمین زده شده است.

**کلیدواژه‌ها:** موتور پرخوران، چند راهه دود، خستگی ترمومکانیکی پرچرخه

## Thermo-mechanical high-cycle fatigue analysis of exhaust manifold of turbocharged engine with two-way coupling FSI

Morteza Naderi Hagh<sup>1</sup>, Arash mohammadi<sup>2\*</sup>, Gholam Hossein Payganeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc mechanical engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University

<sup>2\*</sup> Assistance professor, Shahid Rajaei Teacher Training University

<sup>3</sup> Associate Assistance professor, Shahid Rajaei Teacher Training University

mechanickaraj@yahoo.com

amohammadi@sru.ac.ir

g.payganeh@sru.ac.ir

### Abstract

Nowadays, car manufactures in order to increasing torque and power with consider to fuel consumption, have swept to production of turbocharged engines. With consider to exhaust gas-temperature rises in boosted engines, recognition of critical locations of exhaust manifold in the worse condition of engine (full load and maximum speed), to prevent fracture of exhaust manifold is very important. In this research thermomechanical analysis, fatigue and life-span estimation in the most critical case of engine performance with using two-way coupling of fluid and solid has been carried out. In two-way coupling in every time step first, flow analysis of manifold is carried out in FLUENT software, then, temperature, convective heat transfer coefficient and pressure of fluid are mapped to inner shell of exhaust manifold. In solid preload of bolts, elastic foundation based for effect of cylinder head and turbocharger were considered and thermomechanical analysis was carried out with ANSYS software. Then with computing strain and changing geometry, new mesh for analysis in next time step was entered into FLUENT software and this cycle with consider to time step until end of cycle was carried out. Results of thermal simulation in fluid and solid was validated with experimental data. Finally, temperature, heat transfer coefficient, solid temperature, strain, normal stresses, Von Misses stress and dynamic stress plot and life-span of exhaust manifold have been estimated.

**Keywords:** Turbocharged engine, exhaust manifold, mechanical high-cycle fatigue

محدود بیشتر استفاده می شود. در این میان روش برهم کنش سازه و سیال<sup>۳</sup> به علت و نزدیکی نتایج آن با واقعیت از اهمیت زیادی برخوردار است. از آنجا که چندراهه دود قطعه ای است که در معرض گازهای خروجی با فشار و دمای بالایی قرار دارد، لذا روش برهم کنش سازه و سیال جواب گوی حل معادلات حاکم بر آن می باشد. روش برهم کنش سازه و سیال یک مساله چند وجهی است که در آن جریان سیال منجر به تغییر شکل ساختار جامد و از سوی دیگر تغییر فرم جامد منجر به عوض شدن هندسه سیال می شود. چندراهه دود به علت قرار گرفتن در معرض گرادیان گذرای دماهای بالای احتراق، تنش های حرارتی متناوبی در سطوح داخلی و خارجی آن به وجود می آید. افزایش دمای پوسته داخلی چندراهه دود که در معرض گازهای حاصل از احتراق قرار دارند و تماس پوسته بیرونی با دمای محیط و هندسه چندراهه و بارهای مکانیکی ناشی از اتصالات و جرم آن موجب به وجود آمدن تنش هایی در سطوح داخلی و خارجی چندراهه دود می شود که به تنش های حرارتی معروف است. در این زمینه پژوهش هایی توسط محققین انجام شده است که به آن اشاره می شود.

هزیم و همکاران [۲] از یک روش المان محدود غیرخطی گذرا برای شبیه سازی تغییر شکل و بر آورد عمر خستگی حرارتی برای چندراهه چدنی استفاده کردند. آنها نشان دادند که تغییر شکل خزشی، مهمترین جزء تغییر شکل چند راهه و شروع ترک می باشد. سونگ یانگ پارک و همکاران [۳] بر روی توسعه مقاومت گرمایی آلیاژ چدن هایی که در ساخت چندراهه استفاده می شد، تحقیق کردند. تحقیقات دقیق در این مقاله بر روی بهینه سازی ترکیب Si-Mo برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی برای استفاده در یک چندراهه دود موتور متمرکز شده بود. دلپرت و رسو در پژوهشی که [۴] انجام دادند از روش مبتنی بر شبیه سازی غیرخطی استفاده کردند. در این پژوهش تمامی قطعات از جمله چند راهه خروجی، بستار، پرخوران، واشر بین بستار و چندراهه، تمامی بست ها و پیچ ها شبیه سازی شد. هدف، تحلیل حرارتی و ارزیابی توزیع دما در چندراهه خروجی است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد ترک هایی که به صورت تجربی به وجود آمده در همان مکان هایی هستند که توسط شبیه سازی پیش بینی شده بودند. ها و همکاران [۵] روشی برای آزمون خستگی خمشی در درجه حرارت بالا بر روی فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر حرارت ارائه دادند. آنها سه نوع فولاد را تحت شرایط مختلط آزمایش و مقایسه کردند. دانگ و همکاران [۶] از روش برهم کنش سازه و سیال استفاده کردند و با استفاده از نرم افزار انسیس و شبیه سازی CFD<sup>۴</sup> به تحلیل موضوع پرداختند. موتور پایه مورد بحث یک موتور چهارسیلندر چهار زمانه دیزل با دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه بود و موتور، تحت تاثیر بارهای مختلف و تنش حرارتی گذرا قرار گرفت و با توجه به تست دوام، عمر آن محاسبه شد. هاواکازدال زیتین و

بسیاری از اجزا موتور احتراق داخلی تحت خستگی در دماهای بالا قرار دارند. خستگی دما بالا به طور عمده به محدوده دمایی ۳۰ تا ۴۰ درصد دمای ذوب اطلاق می شود. قطعاتی که در دمای بالا کار می کنند، به علت عملیات روشن و خاموش شدن موتور در معرض گرادیان گذرای دما قرار می گیرند و در طول چرخه، تنش های تناوبی به واسطه تغییرات دما به وجود می آید و هر دو آسیب خستگی و خزش اتفاق می افتد. چندراهه دود نمونه برجسته ای از قطعاتی است در معرض خستگی و خزش می باشد [۱]. گرم کردن غیر یکنواخت و متناوب قسمت های یک قطعه می تواند تولید تنش حرارتی کند و منجر به شکست گردد که به آن خستگی حرارتی<sup>۱</sup> می گویند. تغییر متناوب بارهای مکانیکی (یا کرنش) و دما متداول هستند شکستی را ایجاد می کنند که عموماً به خستگی ترمومکانیکی<sup>۲</sup> تعبیر می شود. که هر دو مورد با خستگی هم دما که در آن در طول بارگذاری متناوب دما ثابت باقی می ماند، تفاوت دارد. چندراهه دود موتور های احتراق داخلی جز دسته بندی خستگی ترمومکانیکی در دمای بالا قرار می گیرد [۲]. چند راهه دود از جنس چدن Si-Mo (مولیبدن-سیلیسیم) در معرض دمای گاز بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد قرار دارند. از آن جایی که آلیاژ چندراهه دود موتور پرخوران گران قیمت و از نظر ایمنی مهم اند، علاقه زیادی برای شناخت رفتار خستگی در دمای بالا وجود دارد. به طور معمول بیشترین دمایی که در سیکل های حرارتی بدست می آید برای ارزیابی رفتار خستگی چند راهه دود مورد استفاده قرار می گیرد [۳]. افزایش تقاضا برای کاهش وزن خودروها و افزایش توان موتور باعث افزایش استفاده از فولادهای پیشرفته و چدن Si-Mo در صنایع خودروسازی شده است که این فلزات مقاوم در برابر حرارت و ضد زنگ هستند. به ویژه چندراهه دود و سیستم خروجی گازهای اگزوز که تحت لرزش بسامد بالا و همچنین در معرض گازهای خروجی از درجه حرارت بالا قرار دارند؛ نیاز به مقاومت در برابر خستگی در درجه حرارت بالا دارند [۴]. کارخانه های خودرو سازی به منظور افزایش توان و گشتاور با در نظر گرفتن مصرف سوخت و رو به تولید موتورهای توربو شارژ کرده اند، که در میان خودروسازهای داخلی شرکت ایران خودرو موتور EF7-TC را به بازار عرضه کرده است. استفاده از سیستم پرخوران موجب افزایش دمای حاصل از احتراق شده و این دما به صورت مستقیم عمر چندراهه دود را تحت تاثیر قرار می دهد.

روش های مختلفی در شناسایی نقاط بحرانی در چندراهه دود به کار گرفته شده است. روش های رایانه ای متکی بر حل المان محدود، روش های آزمایشگاهی و بررسی ساختار میکروسکوپی و متالورژیکی از جمله این روش ها هستند. امروزه با توجه به دقت بالای نرم افزارهای رایانه ای و به منظور کاهش هزینه های تحقیق، از نرم افزار های المان

<sup>3</sup> Fluid Structure Interaction

<sup>4</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>1</sup> Thermal fatigue

<sup>2</sup> Thermomechanical fatigue

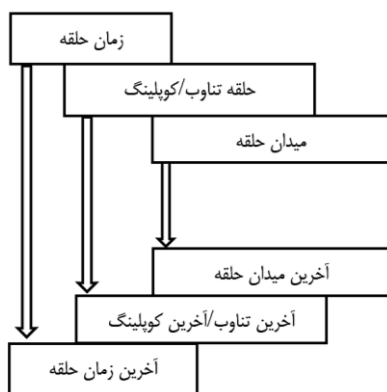
همکاران [۷] با در نظر گرفتن یک نوع چند راهه دود، عوامل موثر بر ترک های بوجود آمده بر ریزساختار آهن داکتیل SiMo را از دیدگاه متالورژی بررسی کردند و بر روی چندین های آلیاژی سیلیکون-مولیبدن بحث کردند. دلپرت و همکاران [۸] به بررسی یک چند راهه دود با استفاده از روش المان محدود، برای تعیین نقاط بحرانی تنش پرداختند. آنها از نرم افزار آباکوس استفاده کردند. شبیه سازی در چهار سیکل تکرار شده است و در نهایت عمر چندراهه توسط شبیه سازی تخمین زده شد و عمر آن با چندین معیار خستگی مقایسه شد. لی و همکاران [۹] به شبیه سازی چند راهه دود یک موتور چهارسیلندر از جنس استنلس-استیل SUS441 که توسط نرم افزار آباکوس و محاسبات CFD بر اساس تعامل جامد-سیال انجام شده بود، پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ماکزیمم تنش و کرنش در نتیجه ی کارکردن در حالت تمام بار یا تغییر نسبتا سریع دما به وجود می آید که موجب تجاوز مقدار تنش از محدوده تنش تسلیم شده و خزش حرارتی اتفاق می افتد. یانگ یون-لونگ [۱۰] بیشتر تمرکز خود را بر روی آلیاژ سیلیکون و مولیبدن در چند راهه چدنی معطوف ساختند. هدف اصلی آنها مطالعه رفتار خستگی حرارتی و عوامل ایجاد ترک در چدن Si-Mo NCI با ترکیب سیلیکون در حدود ۴٫۵٪ تا ۵٪، به منظور یافتن مقدار مناسب برای چند راهه دود بود. سیزمایکا و همکارانش [۱۱] به بررسی سه نوع چدن پر کاربرد در چند راهه دود و پرخورانه های مورد استفاده در صنایع خودرو سازی پرداختند. چدن های SG-SiMo (چدن فریتی کرووی) SG-SiMoNi (چدن فریتی گرافیتی فشرده) D5S (چدن آستنیت کرووی) بیشترین کاربرد را دارند. محاسبات ترمومکانیکی و خستگی ترمومکانیکی روی فلانچ پرخوران نشان داد که بحرانی ترین منطقه بر روی پوسته داخلی چند راهه قرار دارد. اکستروم و جانسون [۱۲] خواص فیزیکی و مکانیکی هفت ماده که در ساخت چند راهه دود موتور های دیزل سنگین کاربرد دارند را مورد آزمایش قرار دادند. دو نوع چدن Si-Mo 51 و Ni resist D5S، چهارنوع فولاد ریخته گری شده آستنیتی HF-A3N-HK30-HKNb و فولاد ریخته گری فریتی مورد مطالعه قرار گرفت. ماتیبیز و همکاران [۱۳] نیز به بررسی میکروسکوپی چدن Si-Mo تحت تست کشش با نسبت کرنش کاملا معکوس در دماهای ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد و تحت بسامد ۱۵۰HZ پرداخته اند. طبق نتایج بدست آمده، استحکام خستگی با افزایش دما شروع به کاهش می کند. گابلون و پلنو طی تحقیقی که در شرکت فیات انجام دادند [۱۴] از نمونه هایی با ابعاد ۱۶mm عرض و ۱٫۴۵mm ضخامت استفاده کرده و با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون شکست بر اساس تعداد سیکل و دامنه کرنش، منحنی مانسون برای فولاد ضد زنگ مورد استفاده در چندراهه دود خودرو را رسم نمودند. نتایج حاصل از آزمون نشان می دهد که با دامنه کرنش [۰٫۲٪] و [۰٫۹٪] طول عمر مواد بدست آمده در ۸۰۰°C بالاتر از مواد در ۶۰۰°C می باشد. در حالی که خارج از این محدوده طول عمر در ۶۰۰°C نسبت به ۸۰۰°C بالاتر

است. سیزا و همکاران [۱۵] خستگی حرارتی کم چرخه و خستگی پر چرخه ناشی از ارتعاشات را بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحلیل حرارتی نشان می دهد که حداکثر دما در قسمت همریختگاه و دور از محفظه پرخوران و فلنچ های متصل به بستر می باشد. یان و همکاران [۱۶] بر روی ترک ناشی از خستگی حرارتی یک چند راهه دود کار کردند. ایشان از آنالیز ترک خستگی و ترکیب CFD-FEM استفاده کردند. در شبیه سازی CFD جریان داخلی چند راهه و آنالیز حرارتی با نرم افزار آباکوس جهت شبیه سازی چندراهه دود به صورت المان محدود شبیه-سازی شد و توزیع تنش حرارتی چند راهه تحت بار کامل و حالت دور آرام بدست آمد. مینگ چن و همکاران [۱۷] با استفاده از روش شبیه سازی خود را بر روی یک موتور ۱٫۵ لیتری پرخوران دارای چند راهه چدنی با جنس D5S انجام دادند. نتایج نشان داد که تغییر شکل پلاستیک علت اصلی ترک خوردگی چند راهه، اعوجاج فلنچ چندراهه و نشت گازها می شود و مکان های شکست پیش بینی شده و ناحیه نشت گاز، با تست دوام موتور مطابقت دارد. صالح نژاد و همکاران [۱۸] مکان های به وجود آمدن ترک را با توجه به تحلیل اجزاء محدود تنش های حرارتی در چندراهه دود موتور ۴ سیلندر بنزینی پرخوران ملی را با در نظر گرفتن شرایط دمایی و در نظر گرفتن تغییرات خواص کشسان ماده، بررسی کردند. نتایج نشان داد که بجز نواحی اطراف پیچ ها که در آن تمرکز تنش وجود دارد، بیشترین مقدار تنش عمودی در محل همریختگاه چندراهه جایی که مجاری های دود به هم می رسند، قرار دارد. کاسترو و همکاران [۱۹] چند راهه دود یک موتور ۸ سیلندر مربوط به فورد که مورد استفاده در خودروهای سواری و وانت های باری بود را مورد بررسی قرار دادند. شکست چند راهه دود در سه مرحله تعیین مشخصات مواد، فراکتوگرافی و مدل المان محدود ارزیابی شده است. آنها نشان دادند که ناحیه های شکستگی دارای کرنش پلاستیک و انرژی کرنشی بالایی بوده اند. صالح نژاد [۲۰] از روش اجزای محدود برای تعیین توزیع تنش روی چند راهه دود موتور پرخوران ملی بنزینی به جهت سنجش میزان مقاومت و استحکام آن استفاده کردند و با استفاده از آزمون دمایی در اتاق آزمون موتور، نتیجه مدل اجزای محدود صحت گذاری شده و با استفاده از المان محدود، توزیع تنش روی چندراهه دود بدست آمد. لیو زن و همکاران [۲۱] دو نرم افزار star-ccm+ و نرم افزار آباکوس را به صورت تعاملی به کار بردند و از این روش جهت حل میدان دما برای منیفلد یک موتور با سوخت پایه بنزین استفاده کردند. در این شبیه سازی موتور در حالت های دور آرام و دور حداکثر با بار کامل بوده و عمر خستگی چندراهه دود را با ارزیابی کرنش پلاستیک، تخمین زدند. سروان و همکاران [۲۲] بر روی چندراهه دود یک موتور دیزل پوشش داده شده با سرامیک تحقیق کرده اند. نتیجه نشان داد که با پوشش سطح عملکرد بهبود یافته و دمای سطح، انتشار مونوکسید کربن و ناکس کاهش می یابد و سختی در چند راهه پوشش داده شده افزایش یافته است. یویی لیو و همکاران

گام زمانی تقسیم می شود که در هر گام زمانی مساله به صورت تکراری در حلگر انسیس و فلوئنت حل می شوند.

۲- حلقه تناوبی<sup>۶</sup> در حلگرهای انسیس و فلوئنت نیروها و جابجایی ها با یک الگوریتم تکراری محاسبه می شوند. تکرار های این حلقه زمانی متوقف می شود که مقادیر نیروها و جابجایی ها به مقدار هدف همگرا شوند.

۳- حلقه داخلی: این حلقه برای همگرایی میدان های مختلف در حلگرهای انسیس و فلوئنت استفاده می شود. این حلقه در فلوئنت به نام حلقه ضرایب<sup>۷</sup> و در انسیس به نام تکرارهای تعادلی<sup>۸</sup> موسوم می باشند. در شکل ۲ سطوح مختلف تکرارها در نرم افزار نشان داده شده است. تکرارهای این حلقه زمانی متوقف می شود که مقادیر پارامترهای میدان ها به معیار همگرایی برسد یا تعداد تکرارها به مقدار بیشینه خود برسد.



شکل ۲. شماتیک حلقه های تکرار در نرم افزار

### چارچوب و مدل پژوهش

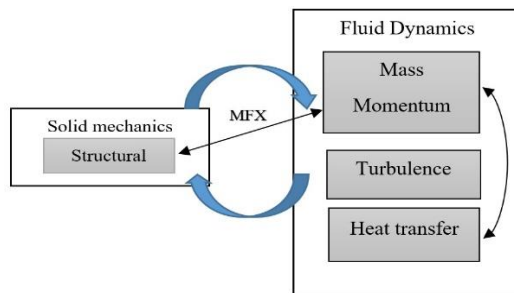
در شبیه سازی حاضر از روش FSI به صورت تعامل دوطرفه استفاده شده است به طوری که اثرات متغیرهای دما، ضریب انتقال حرارت جابجایی و فشار و جریان ناشی از سیال گذرنده بر توزیع دما و تغییر شکل جسم جامد اثر می گذارد. در پژوهش حاضر موتور در بیشترین سرعت و حالت بار کامل در نظر گرفته شده است. به طوری که متغیرهای اصلی دما و دبی جرمی جریان در بالاترین حد خود قرار گرفته است و تمامی محاسبات نرم افزاری در ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ می باشد. شکل ۳، چارچوب نظری تحقیق حاضر را نشان می دهد. در ابتدا هندسه در نرم افزار فلوئنت تحلیل جریانی می شود و فشار و دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی به عنوان شرایط مرزی به مدل المان محدود وارد می شود. سپس تغییر شکل ساختاری در انسیس محاسبه شده و هندسه تغییر یافته وارد نرم افزار فلوئنت می شود و این شروع حلقه دوم است.

[۲۳] جهت تحلیل خستگی ترمومکانیکی یک موتور ۴ سیلندر پرخوران دیزل از روش تعامل المان محدود و دینامیک سیالاتی محاسباتی جهت شناسایی نقاط بحرانی و به وجود آمدن ترک استفاده کردند. نتایج با استفاده از کرنش پلاستیک معادل نشان داد که ترک ها در مکان هایی با تغییر شکل پلاستیک بیشتر اتفاق می افتد و علت این خرابی خستگی حرارتی-مکانیکی می باشد.

هدف این پژوهش استفاده از روش برهم کنش سازه و سیال در نرم افزار انسیس- فلوئنت به صورت تعامل دوطرفه سیال و سازه جهت شناسایی نقاط بحرانی چندراهه دود موتور EF7-TC می باشد. تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جریانی از تحلیل فلوئنت<sup>۲</sup> و تکیه گاه ها در محل اتصال چندراهه با بستر و ورودی پرخوران، به صورت بستر الاستیک لحاظ شده است.

### تعامل سازه و سیال دو طرفه<sup>۳</sup>

به منظور تحلیل همزمان با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل در هر دو سیستم انسیس و فلوئنت نیاز است تا حل به صورت تکرار شونده<sup>۴</sup> انجام شود که نیاز به یک الگوریتم تکراری دارد. زمانی که کوپلینگ بین دو حلگر انجام می گیرد پارامترهای جریان تاثیر گزار بر سازه و تغییر شکل اثر گذار در تحلیل جریان، بین دو جامد و سیال منتقل شوند. در شکل (۱) ارتباط تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و المان محدود نشان داده شده است.



شکل ۱. تعامل بین جامد و سیال (انسیس و فلوئنت)

یک شبیه سازی تعامل سازه و سیال گذرای دوطرفه دارای سه مرحله تکرار می باشد:

۱- حلقه گذرا<sup>۵</sup> (مربوط به زمان): برای شبیه سازی مسائل وابسته به زمان در یک بازه زمانی مشخص، ابتدا دامنه زمانی به تعداد مناسبی

<sup>5</sup> Transient Loop

<sup>6</sup> Stagger Loop

<sup>7</sup> Coefficient Loops

<sup>8</sup> Equilibrium Iterations

<sup>1</sup> Two-Way fluid structure interaction

<sup>2</sup> Fluid Flow

<sup>3</sup> Two-way coupling FSI

<sup>4</sup> Iterative

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \quad (3)$$

$$= \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma : \nabla u$$

معادله انرژی تلاطم  $\kappa$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon$$

معادله انرژی تلاطم  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

### معادلات تحلیل ترمومکانیکی

در تحلیل حرارتی، قانون حاکم بر سیستم، اصل بقای انرژی یا همان قانون اول ترمودینامیک است. با فرض حالت پایا، ماده همگن و همچنین عدم حضور منبع گرما، معادله ساده شده در فضای سه بعدی به فرم معادله (۶) می‌آید. [۳۰]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

که در آن  $T$  دما است. با داشتن شرط مرزی دما و انتقال حرارت جابجایی روی سطح داخلی و بیرونی چندراهه دود، حل معادله (۶) توزیع دمای مجموعه موتور را به دست می‌دهد. در تحلیل ترمومکانیکی، با فرض همگن بودن مواد سازنده قطعات، رابطه حاکم بر مسأله، قانون تعمیم یافته هوک است که فرم تانسوری آن در معادله (۷) نشان داده شده است. [۳۰]

$$\varepsilon = C \sigma \quad (7)$$

که در آن  $\varepsilon$  و  $\sigma$  به ترتیب تانسورهای کرنش و تنش بوده و  $C$  وارون ماتریس سختی مجموعه است که تحت عنوان ماتریس نرمی نیز شناخته می‌شود.

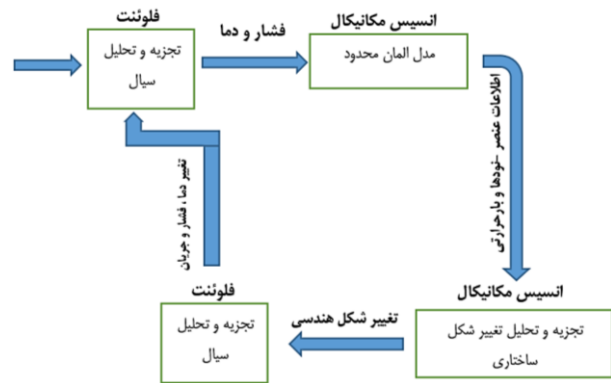
در حضور بارگذاری حرارتی، به دلیل وجود قیده‌های جابجایی و گرادیان دما که باعث رفتار انبساطی و انقباضی در چندراهه می‌شود و سیستم در معرض کرنش حرارتی قرار می‌گیرد با برقراری اصل برهم نهی در تحلیل‌های خطی، کرنش مجموع را می‌توان حاصل ترکیب قانون تعمیم یافته هوک و انبساط حرارتی مطابق رابطه (۸) می‌شود: [۳۰]

$$\varepsilon = C \sigma + \varepsilon_T \quad (8)$$

که در آن:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$



شکل ۳. چارچوب تحقیق حاضر

تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جریانی از تحلیل فلونت و تکیه گاه‌ها در محل اتصال چندراهه با بستر و ورودی پرخوران، به صورت بستر الاستیک لحاظ شده است. مشخصات فنی موتور ملی پرخوران در جدول آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی موتور پرخوران ملی

نوع موتور	EF7 TC
حجم موتور (cc)	۱۶۵۰
حداکثر توان موتور (hp)	۱۴۸ اسب بخار در ۵۵۰۰ دور بر دقیقه
حداکثر گشتاور (Nm)	۲۱۵ نیوتن متر در (۴۸۰۰-۲۲۰۰) دور بر دقیقه
نسبت تراکم	۹٫۶:۱
تعداد سوپاپ	۱۶
نوع سوخت سازگار	بنزین بدون سرب اکتان ۹۵
سیستم انژکتوری	پاشش الکترونیکی چند نقطه ای
استاندارد حد آلودگی	یورو ۴

### معادلات حاکم بر مدلسازی

#### معادلات جریان

معادلات حاکم جریان تراکم پذیر همان معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و معادله  $K-\varepsilon$  برای مدلسازی جریان متلاطم و رابطه گاز ایده آل می‌باشد.

معادله پیوستگی:

معادله مومنتم:

معادله انرژی:

در معادله (۱۵) به جای  $E\alpha_{ij}$  از نماد  $\beta_{ij}$  که معرف به تانسور گرما-کشسان است استفاده می کنیم. با جایگذاری و مجموع گیری این عبارت در معادله، تنش در نهایت بصورت معادلات (۱۶) می شود: [۱۸]

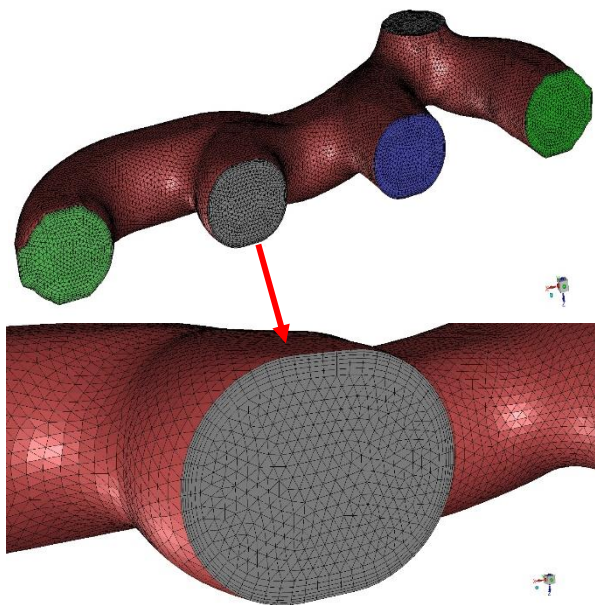
$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot e_{kl} - \beta_{ij}(T_2 - T_1) \quad (16)$$

### شبکه بندی دینامیک سیالات محاسباتی

برای شبکه بندی دامنه دینامیک سیالات محاسباتی از شبکه بندی انسیس استفاده شده است. به منظور محاسبات جریان در نزدیکی سطح داخلی چند راهه دود از ۶ لایه مرزی با نسبت افزایش ۱,۲ استفاده شده است. به دلیل تعامل سیال و سازه و تاثیر مستقیم سرعت بالای جریان گاز نزدیک سطح روی شرایط مرز سیال و جامد، در این قسمت از لایه های مرزی استفاده شده است. در شکل (۴) شبکه بندی دینامیک سیالات محاسباتی چندراهه دود نشان داده شده است. تعداد کل شبکه های دامنه سیال ۸۷۸۹۹۰ سلول می باشد که استقلال از شبکه آن بررسی شده است.

### شرایط مرزی دینامیک سیالات محاسباتی

شرایط مرزی برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی در ورودی و خروجی چند راهه دود از نتایج شبیه سازی تبادل گاز و عملکرد یک بعدی از نرم افزار جی تی پاور بدست می آید.



شکل ۴. شبکه بندی دینامیک سیالات محاسباتی چند راهه دود

به علت حجم زیاد مدل، قسمتی از مدار عملکرد موتور EF7-TC در شکل (۵) آورده شده است. از نتایج خروجی های مدار عملکرد یک بعدی دما و فشار برای مرزهای ورودی و خروجی چند راهه دود استفاده شده است.

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (9)$$

با حل مجموعه معادلات فوق، توزیع تانسور کرنش محاسبه می شود. با کمک معادلات تنش-کرنش و همچنین کرنش-جابجایی توزیع تنش و جابجایی مجموعه نیز مشخص شده و وضعیت سیستم به طور کامل معین می گردد.

برای تعمیم قانون هوک در حالت سه بعدی، طبیعی ترین راه این است که فرض شود، هر مولفه تنش از تمام مولفه های کرنش و هر مولفه کرنش متأثر از تمام مولفه های تنش است. این مفهوم به صورت روابط تانسوری رابطه های (۱۰) و (۱۱) قابل بیان است: [۲۷]

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot e_{kl} \quad (10)$$

$$e_{ij} = C_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (11)$$

بطوری که  $\sigma_{ij}$  مولفه های تنش و  $D_{ijkl}$  و  $C_{ijkl}$  به ترتیب تانسور سختی و تانسور نرمی یا انعطاف پذیری ماده و  $e_{ij}$  مولفه های کرنش نامیده می شود. با توجه به تانسور بالا می توان بصورت رابطه (۱۲) نوشت: [۲۷]

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 2e_{xy} \\ 2e_{yz} \\ 2e_{zx} \end{pmatrix} \quad (12)$$

که تانسورهای  $C_{ij}$  در معادله (۱۲) ضرایب سختی ماده می باشند، بطوری که بدون در نظر گرفتن تغییرات دمایی و در دمای ثابت محیط می باشند. اما چنانچه تغییرات درجه حرارت غیر یکنواختی در داخل یک ماده ایزوتروپیک و یا ارتوتروپیک تصور شود و یا حتی در صورت یکنواخت بودن درجه حرارت، قیودی در مقابل تغییر شکل ماده وجود داشته باشد، در آن ایجاد تنش می شود که به آن تنش حرارتی گویند. چنانچه ماده غیر ایزوتروپیکی تحت اثر میدان حرارتی قرار گیرد، اعم از اینکه تغییر درجه حرارت جسم یکنواخت و یا غیریکنواخت باشد در آن ماده تنش حرارتی به وجود می آید اگر مولفه های کرنش الاستیک با  $\varepsilon_{ij}^E$  نشان داده شوند، کرنش کل با در نظر داشتن اصل برهم نهی مطابق رابطه (۱۳) نوشته می شود:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^E + \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (13)$$

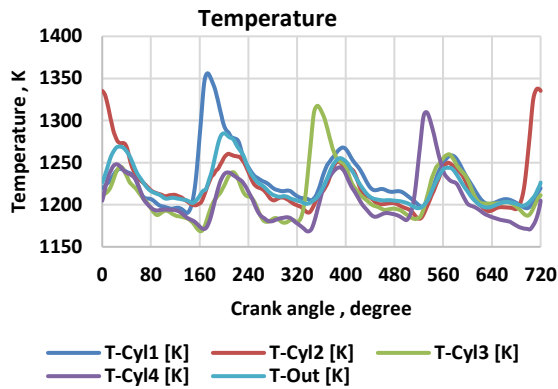
قسمت دوم معادله بیانگر کرنش حرارتی بوده و می توان  $\alpha$  را به صورت تانسور  $\alpha_{ij}$  که بیانگر تانسور ضریب انبساط حرارتی می باشد نمایش داد:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} \Delta T \delta_{ij} \quad (14)$$

و معادله تنش آن به صورت رابطه (۱۵) می شود:

$$\sigma_{ij}^T = -E \alpha_{ij} \Delta T \quad (15)$$

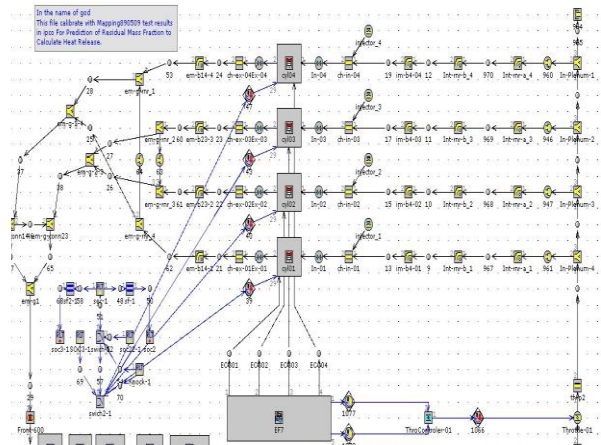




شکل ۷. دمای ورودی و خروجی چند راهه دود بر حسب زاویه میل لنگ

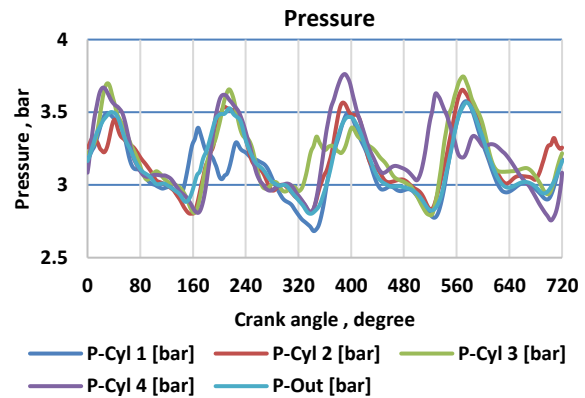
### شبکه بندی المان محدود پوسته جامد

برای شبکه بندی پوسته جامد از محیط مش بندی نرم افزار انسیس استفاده شده به طوری که چند راهه با  $55 \times 273$  المان چهار وجهی، بستر با  $497910$  المان چهار وجهی و قسمتی که چند راهه با فلنج پرخوران در تماس هست از المان های مربعی با تعداد  $2651$  استفاده شده است. شکل ۸ شبکه بندی پوسته چند راهه دود را جهت تحلیل المان محدود نشان می دهد. به منظور اعمال اثرات کشسان سرسیلندر و پرخوران، بستر کشسان برای پرخوران و سرسیلندر مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است. با توجه به هندسه چندراهه و با توجه به استفاده از روش تعامل دوطرفه که در این پژوهش انجام شده است؛ چندراهه با المان هایی با تعداد  $55 \times 219$  و به صورت المان های چهار وجهی<sup>۱</sup> و بستر نیز جهت انطباق بهتر نتایج تبدیلی از حل قسمت انتقال حرارت پایا به همین صورت شبکه بندی شده است. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود به طور قابل ملاحظه ای به شبکه بندی جسم مرتبط می شود. به طوری که با افزایش تعداد المان ها خطای حاصل از حل المان محدود در حل بعدی انباشته شده (خطای حاصل از گرد کردن) و خطای محاسباتی را بالا می برد. همچنین کاهش تعداد المان ها نیز موجب کاهش دقت محاسبات نرم افزاری می شود. به همین دلیل از تکنیک استقلال مش در این پژوهش استفاده شده است. بطوری که در تحلیل حرارتی دمای قسمتی از چند راهه با اندازه های مختلفی از شبکه بندی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت در شبکه بندی هایی که نتیجه تغییرات چندانی در محل مذکور نداشت استفاده شد. همچنین در سطوح تماس نیز برای همگرایی بهتر تکنیک انطباق گره به گره اعمال شده است. سطوح تماس به صورت اصطکاکی بین چند راهه و بستر و گلوگاه پرخوران تعریف شده است.



شکل ۵. قسمتی از مدار عملکرد یک بعدی موتور EF7-TC

در شکل ۶ فشار ورودی (p-cyl 1, p-cyl 2, p-cyl 3, p-cyl 4) و فشار خروجی چند راهه دود (p-out) بر حسب زاویه میل لنگ آورده شده است. زمان بیشینه فشار برای هر ورودی چند راهه قبل از زمان بیشینه باز شدن سوپاپ دود می باشد. مقدار فشار در هر ورودی با باز شدن سوپاپ دود مربوط به آن افزایش می یابد. بعد از باز شدن سوپاپ دود برای هر سیلندر، فشار در چند راهه به شدت بالا رفته و به بیشینه فشار حدود  $3.73$  می رسد. فشار خروجی چند راهه بصورت نوسانی است و در حدود  $3.34$  بار می باشد.

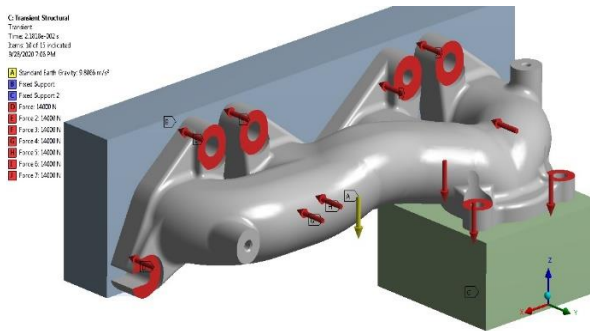


شکل ۶. فشار ورودی و خروجی چند راهه دود بر حسب زاویه میل لنگ

در شکل ۷ دمای ورودی (t-cyl 1, t-cyl 2, t-cyl 3, t-cyl 4) و دمای خروجی چند راهه دود (t-out) بر حسب زاویه لنگ آورده شده است. بیشینه دمای ورودی چندراهه در حدود  $1350$  کلوین می باشد و دمای خرجی چند راهه بصورت نوسانی است در بیشینه ترین حالت در زاویه میل لنگ  $200$  درجه و با مقدار  $1284$  کلوین می باشد.

<sup>۱</sup> tetrahedron

گرفته شده است. به دلیل اینکه هدف از پژوهش مطالعه چندراهه می باشد هیچ یک از قطعات دیگر در شبیه سازی دخالت ندارند. انتهای چندراهه، قسمتی که با ورودی پرخوران اتصال دارد نیز به صورت ثابت با ۳ پیچ و با پیش بار پیچ ۷٫۵ کیلو نیوتن تعریف شده است. همچنین اثرات وزن چندراهه نیز در نظر گرفته شده است که شتاب گرانشی معادل با ۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه نیز به آن اعمال گردیده است. شکل (۹) بارهای مکانیکی را نشان می دهد که بر سطوح چندراهه در قسمت تحلیل المان محدود اعمال می شود. سطوح داخلی چندراهه به صورت تماسی با سیال گذرنده در آن تعریف شد که با اجرای تعامل این سطوح با سطوح سیال تعریف شده در قسمت فلوننت در تعامل دوطرفه خواهند بود. خواص مکانیکی مواد چندراهه در جدول ۴ آمده است [۱۸].



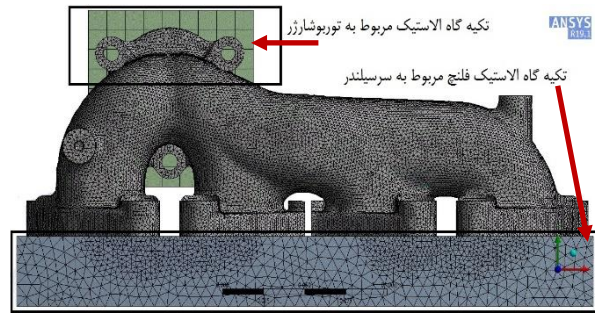
شکل ۹. بارهای مکانیکی و حرارتی روی سطح چند راهه

جدول ۴. مشخصات مکانیکی چند راهه DS5 [۱۸]

استحکام نهایی کششی MPa	استحکام کششی MPa	مدول برشی Pa	مدول بالک Pa	ضریب پواسون ون	مدول یانگ GPa	چگالی g/cm <sup>3</sup>	دما °C
۲۰۲	۱۳۹	4.538	9.83	0.29	97	7.45	۷۰۰
۱۵۳	۱۱۷	e10	e10	0.29	95.5	7.45	۷۵۰

خواص مکانیکی مذکور در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد می باشند که در شبیه سازی به مدل اعمال شده است. با توجه به خواص اعمال شده و محاسبات نرم افزار، وزن و حجم چندراهه به ترتیب برابر ۳٫۴۷ کیلوگرم و ۴۶۵۹۰۰ دسی مترمکعب بدست آمده است. همان طور که از شکل (۸) مشخص است در قسمت هایی که چندراهه با بستار در تماس است برای همگرایی بهتر، شبکه بندی ها در این مناطق بر یکدیگر منطبق شده اند و از المان های ریزتری جهت تحلیل استفاده شده است. همچنین سطوح تماسی به صورت اصطکاکی در نظر گرفته شده است.

### محیط تعامل



شکل ۸. شبکه بندی پوسته جامد جهت تحلیل المان محدود

### شرایط مرزی، خواص مواد و برای تحلیل ترمومکانیکال

از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی فشار، دما و ضریب انتقال حرارت روی سطح داخلی چندراهه در هر گام زمانی به دست می آیند. برای شرط مرزی حرارتی سطح خارجی چندراهه که با هوای محیط در تماس ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت ثابت در  $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  [۱۱] و دمای محیط  $37 \text{ °C}$  در نظر گرفته شده است. دمای بستار ۱۵۰ درجه سانتیگراد تعریف شده است. [۱۸] دمای محیط اطراف چندراهه ۳۷ درجه سانتیگراد و کل زمان شبیه سازی با توجه با حالت پایا متغیرها ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ در نظر گرفته شده است.

جنس چندراهه دود از نوع چدن DS5 می باشد و ضریب هدایت حرارتی برای چندراهه با توجه به تغییرات دما طبق جدول ۲ تعریف شده است [۱۸]. همچنین ضریب انبساط حرارتی به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شده است [۱۸].

جدول ۲. ضریب هدایت حرارتی چند راهه DS5 [۱۸]

دما °C	ضریب هدایت حرارتی W/m.k
۲۰	۱۴٫۶
۱۰۰	۱۶٫۷
۸۰۰	۲۵
۱۰۰۰	۲۸

جدول ۳. مشخصات ضریب انبساط حرارتی DS5 بر حسب دما [۱۸]

دما (°C)	ضریب انبساط حرارتی (1/°C)
۷۰۰	$1.65 \times 10^{-6}$
۷۵۰	$1.68 \times 10^{-6}$

در این پژوهش فلنج های مربوط به چندراهه به صورت پایه ثابت<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است که نیروی اعمالی هر یک از ۸ پیچ بر فلنج (مطابق شکل ۹) برابر ۱۴٫۵ کیلو نیوتن طبق استاندارد شرکت سازنده در نظر

<sup>۱</sup>fixed support

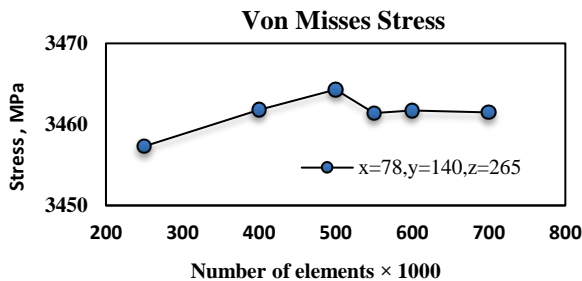


جدول ۵. مشخصات رایانه مورد استفاده جهت شبیه سازی

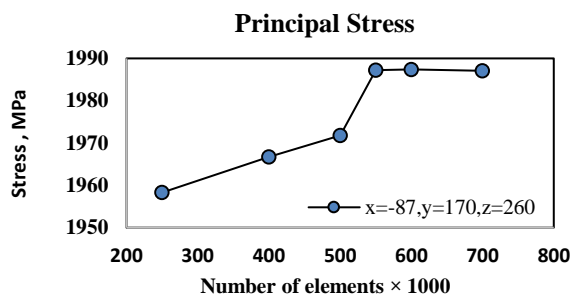
ردیف	تعداد پردازنده	حجم حافظه (گیگابایت)	مدل پردازنده	توان پردازشی پایه (کیگا فلوپس)
۱	۴۸	۱۰۰	Intel xeon E5-2690 V3 @2.6-3.5 GHz	۹۹۸ (تا ۱۰۴۲)

### بررسی استقلال از شبکه در تحلیل المان محدود

همان طور که از نمودار شکل های ۱۲-الف و ب مشاهده می شود، نتایج تنش فون میزز و معیار حداکثر تنش اصلی بر حسب تعداد شبکه ۲۵۰ تا ۷۰۰ هزار برای پوسته جامد نشان داده شده است. در نمودار ۱۲ الف و ب مشاهده می شود که با افزایش تعداد شبکه به بیش از ۵۷۰ هزار مقدار تنش تغییر چندانی نمی کند. بنابراین تعداد شبکه مناسب در نقطه میان ۵۷۰ هزار المان در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۲ الف. تغییرات تنش فون میزز نسبت به تعداد شبکه



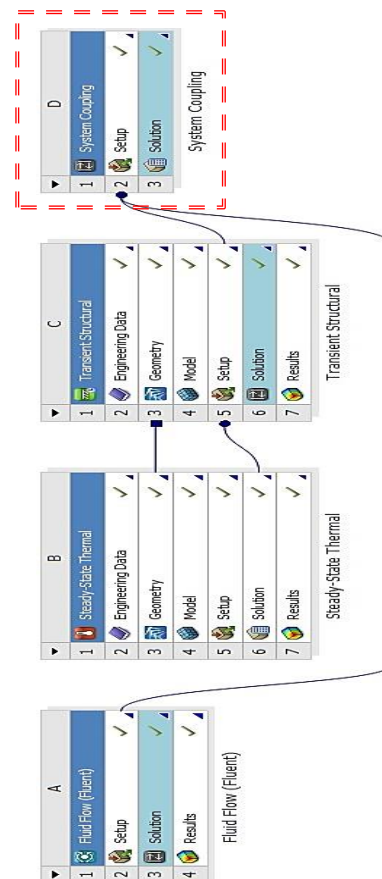
شکل ۱۲ ب. تغییرات حداثر تنش اصلی نسبت به افزایش تعداد شبکه

### بحث روی نتایج تعامل دو طرفه

#### نتایج فلوننت (حل گذرای جریان)

جریان گازهای ورودی چندراهه دود بصورت مخلوطی از گازهای تراکم پذیر اکسیژن، نیروژن، دی اکسید کربن و بخار آب می باشد که از تحلیل یک بعدی عملکرد موتور از نرم افزار جی تی پاور بدست آمده است. ابتدا به منظور صحت گذاری نتایج فلوننت دمایی گازهای رانهای ۱ تا ۴ چندراهه دود با نتایج تست آزمایشگاه مقایسه شده است. شکل

بعد از شبکه بندی سیال و پوسته جامد و تعریف شرایط مرزی و دیگر متغیرها در محیطهای نرم افزار، تعامل کردن دینامیک سیالات محاسباتی و المان محدود انجام می شود. شماتیک مراحل تعامل به صورت شکل ۱۱ می باشد. در قسمت تعامل، محیطهای در نظر گرفته شده به صورت تعامل دو طرفه حل خواهند شد. در این قسمت نواحی مرزی که سیال و سازه با هم در تماس هستند انتخاب شده و در معرض تعامل قرار می گیرند. در صد خطای همگرایی سازه و سیال ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. ابتدا تحلیل جریان گازهای داغ خروجی موتور در چند راهه دود در نرم افزار فلوننت انجام می شود. سپس به منظور تحلیل المان محدود ابتدا حل حرارتی پوسته چندراهه در انسیس بصورت پایا<sup>۱</sup> انجام شده و نتایج خروجی حرارتی برای تحلیل المان محدود گذار<sup>۲</sup> فرستاده می شود. در نهایت نتایج تحلیل جریان و خروجی المان محدود گذرا<sup>۳</sup> به قسمت تعامل<sup>۳</sup> فرستاده می شود که در آن اثرات جریان روی تغییر شکل چندراهه دود اعمال می شود و سپس تحلیل به گام دوم وارد می شود و تکرار می شود تا به گام زمانی نهایی برسیم. کل زمان شبیه سازی توسط رایانه، با مشخصات جدول ۵، نزدیک به ۴۹ ساعت به طول انجامید.

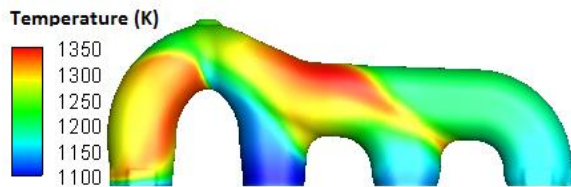


شکل ۱۱. مراحل شبیه سازی تعامل دو طرفه

<sup>3</sup> system coupling

<sup>1</sup> steady-state thermal

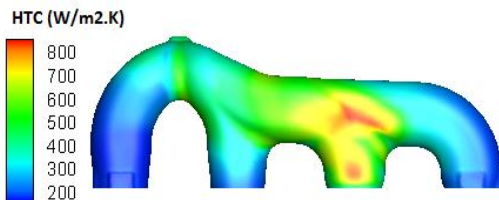
<sup>2</sup> transient-structural



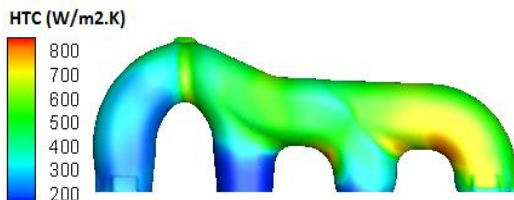
زاویه لنگ ۵۳۵ درجه

شکل ۱۴. توزیع دمای گازهای خروجی روی سطح داخلی چند راهه دود در زمان بیشینه بازشدگی سوپاپ دود

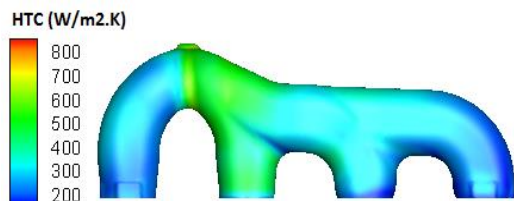
در شکل ۱۵ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان‌هایی که دریچه دود بیشترین جابجایی را دارد (مطابق شکل ۷ زاویه ۱۷۶، ۷۱۸، ۳۵۶، ۵۳۵ درجه) نشان داده شده است. ضریب انتقال حرارت تابعی از رینولدز جریان (سرعت گاز) است. بنابراین در هر مجرای که جریان گاز خروجی در آن لحظه وجود دارد، ضریب انتقال حرارت در آن بالا می‌رود. مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت  $800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  در ورودی هر مجرا و در لحظه بیشینه دبی جرمی آن می‌باشد. مقدار کمینه آن  $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  می‌باشد و در ورودی‌هایی است که دریچه دود در آن لحظه بسته است و یا در حال بسته شدن می‌باشد و کمترین جریان گاز خروجی وجود دارد.



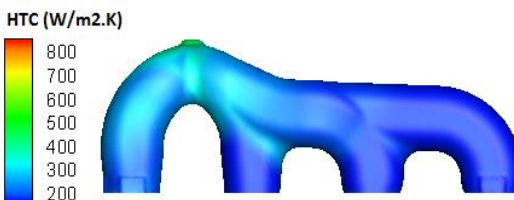
زاویه لنگ ۷۱۸ درجه



زاویه لنگ ۱۷۶ درجه



زاویه لنگ ۳۵۶ درجه

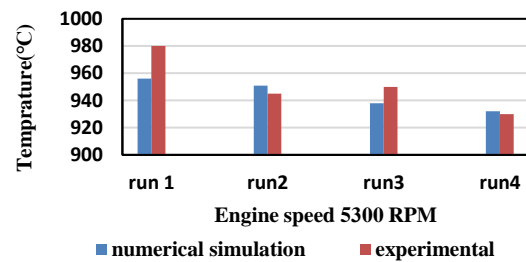


زاویه لنگ ۵۳۵ درجه

شکل ۱۵. توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی روی سطح داخلی چند راهه دود در زمان بیشینه بازشدگی سوپاپ دود

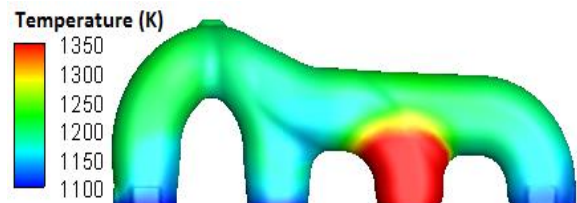
۱۳ نتایج حاصل از آزمون دمایی [۲۰] و شبیه‌سازی را مقایسه می‌کند. طبق شکل ۱۳ به ترتیب، خطا برای رانر یک برابر ۲٫۵٪، برای رانر دو ۰٫۰۶٪، برای رانر سه ۱٫۲۷٪ و برای رانر چهار ۰٫۰۲٪ می‌باشد.

Average of exhaust gas temperature

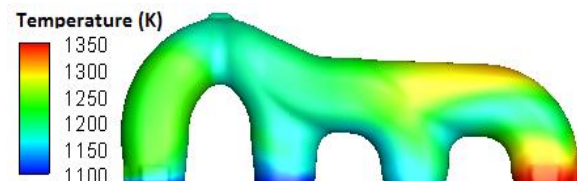


شکل ۱۳. مقایسه عددی و تجربی دمای گازهای رانرهای ۱ تا ۴ [۲۰]

شرایط مرزی برای تحلیل ترمومکانیکی توزیع فشار، ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای گاز روی سطح داخلی چندراهه دود می‌باشد. بنابراین لازم است ابتدا تحلیل جریان چندراهه دود بصورت گذرا در نرم افزار فلوئنت انجام شود. در شکل ۱۴ کانتور دمای گذرا در زمان‌هایی که دریچه دود بیشینه جابجایی را دارد (مطابق شکل ۷ زاویه ۱۷۶، ۷۱۸، ۳۵۶، ۵۳۵ درجه) دیده می‌شود. همانطور که در هر چهار شکل دیده می‌شود با ورود گازهای داغ به چندراهه دمای رانر مربوط به آن افزایش می‌یابد. در دهانه ورودی چندراهه دود بیشترین دما حدود 1350 K دیده می‌شود. میانگین سطحی دما 1260 K می‌باشد.



زاویه لنگ ۷۱۸ درجه

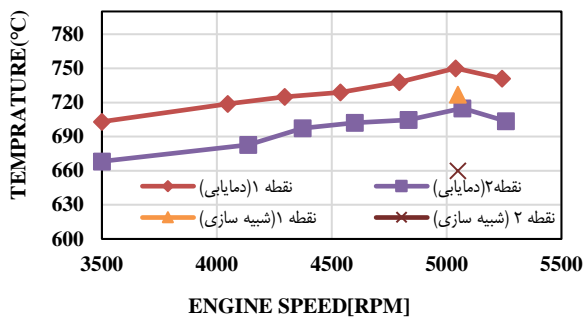


زاویه لنگ ۱۷۶ درجه



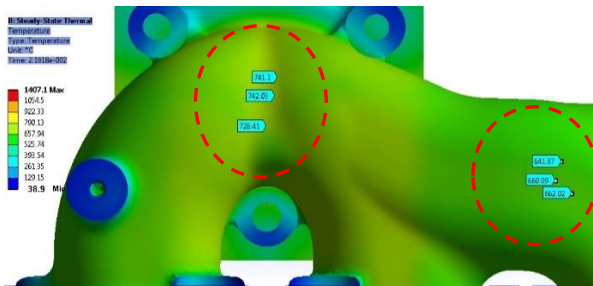
زاویه لنگ ۳۵۶ درجه

### Coparision between experimental and numerical analysis



شکل ۱۷. نمودار مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و دمایابی تجربی [۱۸]

در شکل ۱۸ توزیع دمای پایا در چندراهه دود نشان داده شده است. دمای نقاطی که در اطراف نقاط ۱ و ۲ در شکل ۱۶ وجود دارد نشان داده شده است.



شکل ۱۸. نتایج توزیع دما در پوسته چند راهه

### نتایج المان محدود مکانیکال بعد از سیکل کامل

شکل ۱۹ تغییر شکل چندراهه بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۱۹ مشخص است بیشترین تغییرات ابعادی در نزدیکی اولین ورودی چندراهه می باشد. به نظر می رسد علت این تغییر شکل بیشتر، ناشی از فاصله ی بیشتر این خروجی نسبت به قیدهای حرکتی تکیه گاه فلنچ پرخوران می باشد که در انقباض و انبساط هایی که در زمان گرم و سرد شدن چندراهه است؛ اتفاق می افتد.

شکل ۲۰ حداکثر تنش اصلی بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ را نشان می‌دهد. همان طور که پیش بینی می شد حداکثر تنش های اصلی به غیر از نواحی اطراف پیچ ها در قسمتی از بدنه و محل همریختگاه جایی که خروجی ها به یکدیگر می رسند، اتفاق می افتد. این مکان ها در شکل توسط علامت مشخص شده اند. به طوری که بیشینه تنش در نواحی همریختگاه برابر ۷۸ مگاپاسکال و بیشینه تنش اصلی به مقدار ۲۸۰ مگاپاسکال در ناحیه اطراف پیچ فلنچ پرخوران اتفاق می افتد. شکل ۲۱ الف و ب معیار تنش فون میز از ۷۲۰ درجه میل لنگ نشان داده شده است. بیشترین تنش فون میز نیز در همان نواحی اتفاق

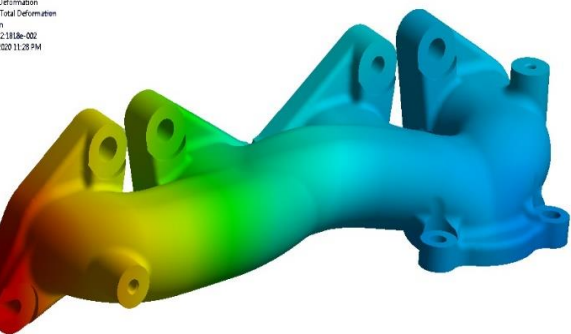
### نتایج تحلیل المان محدود حرارتی بعد از سیکل کامل

به منظور اعتبارسنجی نتایج حل عددی، مقادیر دما در محل سنسورهای آزمون تجربی با نتایج عددی مقایسه شده اند. در شکل ۱۶ دو مکان که در آن حسگر دما کار گذاشته شده (نقطه شماره ۱ و ۲) دیده می شود. در شکل ۱۷ دما در نقاطی که مطابق شکل ۱۶ در آن حسگر دما کار گذاشته شده در بار کامل و دوره های بین ۳۵۰۰ تا ۵۳۰۰ دود بر دقیقه آورده شده است. از آنجایی که شبیه سازی در دور ۵۳۰۰ دور در دقیقه انجام شده، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تنها در این دور انجام شده است.



شکل ۱۶. نقاط علامت گذاری جهت دمایابی [۱۸]

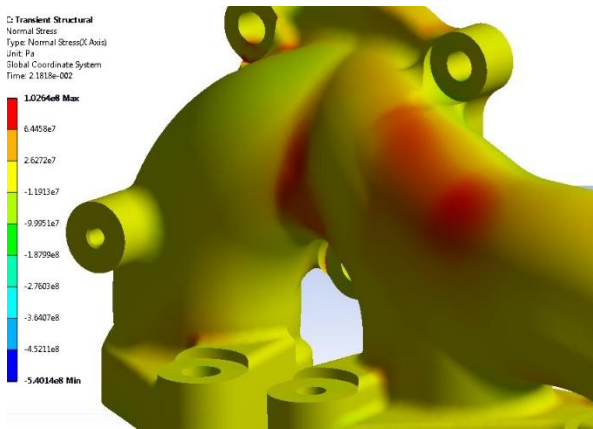
همان طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است دمای نقطه ۱ نزدیک به ۷۲۷ درجه سانتیگراد و دمای نقطه ۲ نزدیک به ۶۶۲ درجه سانتیگراد



شکل ۱۹. تغییر شکل چندراهه دود بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ

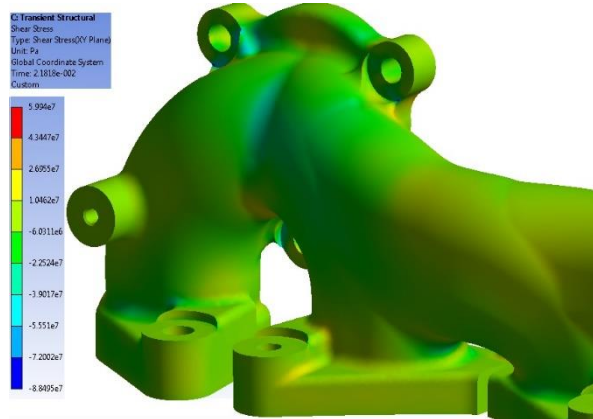
بدست آمده است. به طوری که در آزمون دمایابی، دمای این نقاط به ترتیب ۷۳۵ و ۶۸۵ درجه سانتیگراد ثبت شده است. به این ترتیب میان نتایج دمایابی با نتایج عددی سازگاری خوبی دیده می شود. (خطایی نزدیک به ۳,۵ درصد). مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمون واقعی بیانگر آن است که حل عددی به کار گرفته شده از دقت قابل قبولی برخوردار است و خطای محاسبات زیر ۴ درصد می باشد.





شکل ۲۲. توزیع تنش نرمال در چندراهه دود

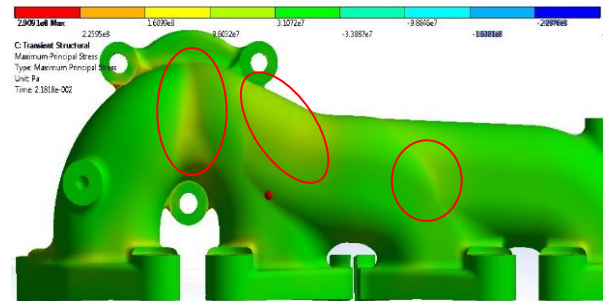
یکی دیگر از معیارهای شکست یا خرابی که معمولاً در طراحی‌ها لحاظ می‌شود معیار ماکزیموم تنش برشی و یا ترسکا می‌باشد. شکل ۲۳ توزیع تنش ترسکا به صورت طیف رنگی را در بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل لنگ نشان می‌دهد.



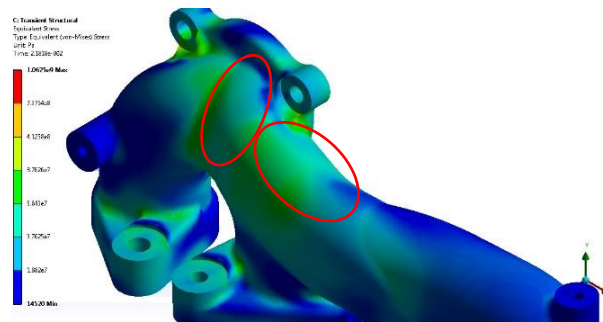
شکل ۲۳. توزیع تنش ترسکا در چندراهه دود

شکل ۲۴ تنش‌های تناوبی را بعد از ۷۲۰ درجه میل لنگ نشان داده است. همانطور که از شکل ۲۴ الف و ب مشاهده می‌شود تنش‌های تناوبی به وجود آمده در نواحی به غیر از نواحی پیچ‌ها؛ محل‌های شروع شکستگی می‌باشند که به علت تمرکز تنش در سطوحی که تغییر شکل یافته‌اند و یا به عبارتی تیز شده‌اند می‌باشد.

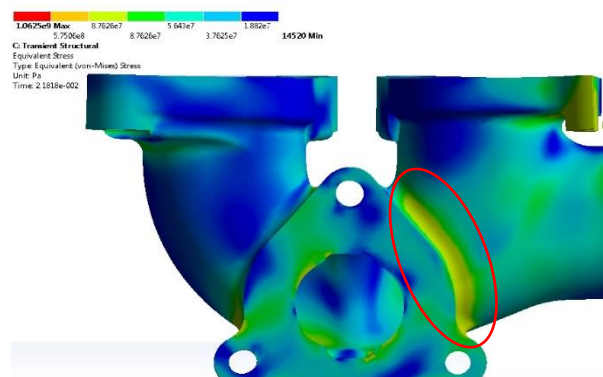
می‌افتد که حداکثر تنش‌های عمودی رخ داد. و به این ترتیب تنش فون میز در محل هم‌ریختگاه در بیشترین مقدار برابر ۸۲,۴ مگاپاسکال و اطراف گلوگاه فلنچ پرخوران در بیشترین مقدار برابر ۱۲۴ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۲۱ ب محل‌های آن علامت گذاری شده است.



شکل ۲۰. توزیع حداکثر تنش‌های اصلی در چندراهه دود



شکل ۲۱. الف. توزیع حداکثر تنش فون میز در چندراهه دود

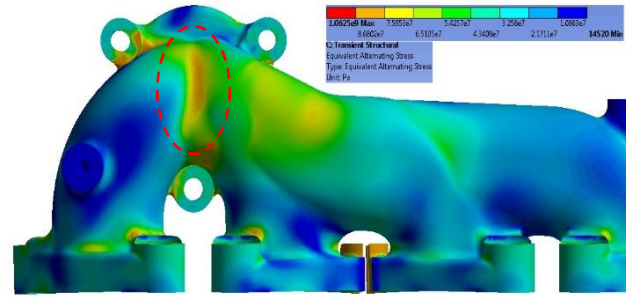


شکل ۲۱. ب. توزیع حداکثر تنش فون میز در چند راهه دود

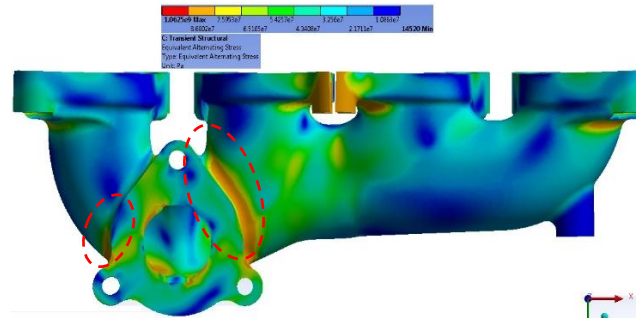
شکل ۲۲ نیز توزیع تنش نرمال را بعد از ۷۲۰ درجه میل لنگ را نشان می‌دهد. تنش نرمال در محل پیچ‌ها دارای مقادیر پایینی هستند و همان‌طور که از شکل ۲۲ مشخص است بیشترین تنش نرمال مربوط به محل هم‌ریختگاه و قسمت بالای چندراهه می‌باشد که در شکل مشخص شده است.

در این منطقه بوده و هندسه فلنچ پرخوران از عوامل تمرکز تنش در این منطقه می باشد.

۳- به علت قرار گرفتن چندراهه در گرادیان دمایی مختلف، و وجود قید های حرکتی و محدودیت درجه آزادی چندراهه و اجزاء پرخوران و سرسیلندر، تنش های تناوبی حرارتی در آن به وجود آمده و همین عامل موجب به وجود آمدن تنش های پسماند کششی در سطح منیفلد شده و موجب جوانه زدن ترک و واماندگی چندراهه خواهد شد.



شکل ۲۴ الف. تنش های تناوبی به وجود آمده در چندراهه (نمای روبه رو)



شکل ۲۴ ب. تنش های تناوبی به وجود آمده در چندراهه (نمای پشت)

### فهرست علائم

ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p$
شار حرارتی	$\dot{q}$
دمای سیال	$T$
دمای دیواره	$T_w$
ضریب انتقال حرارت جابجایی	$h_c$
ضریب رسانایی	$k$
مولفه سرعت سیال در جهت $i$	$u_i$
تنش برشی در سیال	$\sigma_{ij}$
انرژی داخلی سیال	$e$
ضریب لزجت سیال	$\mu$
تانسور کرنش	$\epsilon$
تانسور تنش	$\sigma$
ماتریس نرمی	$C$

### منابع

- [1] Stephens, r., & other. (2001) Metal fatigue in engineering. new York: Willy interscience.
- [2] Hazime, R., Dropps, S., & Anderson, D. (2003). Transient Non-linear FEA and TMF Life Estimates of Cast Exhaust Manifolds. SAE, 10.
- [3] Sung Hwan,p., Jong Moon, k., Hak Jin,.k.(2005) Development of a Heat Resistant Cast Iron Alloy for Engine Exhaust Manifold.SAE, 9
- [4] di Torino, P., & Dipartimento di, M. (2005). Exhaust Manifold Thermo-Structural Simulation Methodology. SAE International, 11
- [5] Ha, T., Tae Jeong, H., & Jin Sungb, H.(2007).High temperature bending fatigue behavior of stainless steels for automotive exhaust.MaterialsProcessing Technology, 3.
- [6] Dong, F., Fan, Q., Guo, C., Jiang, S., & Cai, Y. (2009). Simulation on Thermal-Stress-Fatigue of an Engine Exhaust Manifold. SAE international,6.
- [7] Kazdal Zeytin, H., Kubilay, C., Aydin, H.,Ebrinc, A., & Aydemir, B. (2009). Effect of Microstructure on

### نتیجه گیری

در این پژوهش استفاده از روش برهم کنش سازه و سیال در نرم افزار انسیس - فلونت به صورت تعامل دوطرفه سیال و سازه جهت شناسایی نقاط بحرانی شروع خستگی چندراهه دود موتور EF7-TC استفاده شده است. تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. اعتبار سنجی با استفاده از آزمون دمایی چندراهه دود انجام شد و نتایج کانتورهای دینامیک سیالات محاسباتی (دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی) و المان محدود (تنشهای اصلی، تنش فون میزز، کرنش، توزیع دما در پوسته جامد) نشان داده شده است. به طور کلی در پایان پژوهش و شبیه سازی انجام شده نتایج زیر بدست آمده است:

۱- با توجه به نتایج شبیه سازی دمای دو میلیمتر زیر سطح چندراهه با اندازه گیری آزمایشگاهی دمای حسگرهای دما کار گذاشته شده در دو نقطه نزدیک به یکدیگر بوده و این به نوبه‌ی خود بیانگر صحت شبیه سازی می باشد. به طوری که خطای بدست آمده از نتایج دمایی و شبیه سازی زیر ۴ درصد می باشد.

۲- با توجه به معیارهای حداکثر تنش عمودی، تنش فون میزز و تنش ترسکا، تنش در نواحی به غیر از اطراف پیچ‌ها، در محل همریختگاه جایی که لوله های خروجی چندراهه به یکدیگر می رسند و در نواحی منطقه‌ای که فلنچ پرخوران نصب می شود، بیشینه می باشد. به نظر می‌رسد علت تجمع تنش در محل همریختگاه بالا بودن گرادیان دما

- [21] Liu, Z., Chen, J., and Xiao, S., "Thermo-Mechanical Fatigue Study of Gasoline Engine Exhaust Manifold Based on Weak Coupling of CFD and FE," SAE Technical. 5.
- [22] Saravanan, J., Valarmathi, T. N., Rajdeep, N., Prasanth, K. (2017). Experimental Analysis of Exhaust Manifold with Ceramic Coating for Reduction of Heat Dissipation. Series: Materials Science and Engineering, 7.
- [22] Farrukh Saleem, Y. L. (2018). Low-Cycle Fatigue Life Prediction of D5S for Application in Exhaust. 11.
- [23] Xuwei Luo, Pingping Zou, Xiaochun Zeng, Xiaojun Yuan, Bin Li, Ho Teng, Yingtao Xu., Failure Prediction and Design Optimization of Exhaust Manifold based on CFD and FEM Analysis, SAE Technical. 7.
- [24] ASM Handbook-Cast Iron Science and Technology. (2017). United States of America.
- [25] J. R. Davis, Alloying- understanding the basic. (2001). United States of America.
- [26] حسین توپسرکانی، ۱۳۹۲ اصول علم مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
- [27] محمد مهدی سعادت پور، ۱۳۹۵ مبانی تئوری الاستیسیته، دانشگاه صنعتی اصفهان
- [28] M. M. Mirafzal, A. Hajalimohammadi, S. M. Mousavi Mashhadi, A. Mohammadi. (2015). Design and manufacturing process simulation of sheet metal exhaust manifold for turbocharged bi fuel engine. The Journal of Engine Research, 10
- [29] J. R. FANG, Q. C. JIANG, Q. F. GUAN, S. Q. WANG (2001). The characteristics of fatigue under isothermal and thermo-mechanical load in Cr±Ni±Mo cast hot work die steel. Department of Materials Science and Engineering, Jilin University at Nanling Campus, Changchun, 8.
- [30] Salehnejad, M., & Mohammadi Dizgoveini, A. (2019). Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction. The Journal of Engine Research, 9
- [31] <https://cfdgroup.ir>
- [32] کاظم اسماعیل پور، ۱۳۹۵ راهنمای جامع انسیس CFX Exhaust Manifold Cracks Produced From SiMo Ductile Iron. Journal of iron and steel research ,international, 5.
- [8] Delprete, C., Sesana, R., & Vercelli, A. (2010). Multi-axial damage assessment and life estimation: application to an automotive exhaust manifold. Fatigue, 10.
- [9] Li, D., Yin, Y., Chen, G., Cui, C., & Han, B. (2012). Thermal fatigue Analysis of the Engine Exhaust Manifold. 7.
- [10] Yun-long, Y., Zhan-yi, C., Zhen-song, L., & Hai-xia, Y. (2013). Thermal Fatigue Behavior and Cracking Characteristics of High Si-Mo Nodular Cast Iron for Exhaust Manifolds Journal of iron and steel research ,international, 6.
- [11] Szmytka, F., Michaud, P., Rémy, L., & Köster, A. (2013). Thermo-mechanical fatigue resistance characterization and materials ranking from heat-flux-controlled tests. Application to cast-irons for automotive exhaust part. International Journal of Fatigue, 10.
- [12] Ekström, M., & Jonsson, S. (2014). High-temperature mechanical and fatigue properties of cast alloys intended for use in exhaust manifolds. Materials Science & Engineering A, 10.
- [13] Matteis, P., Scavino, G., Castello, A., & Firrao, D. (2014). High temperature fatigue properties of a Si-Mo ductile cast iron. 20th European Conference on Fracture, 5.
- [14] Gabellone, D., & Plano, S. (2014). LCF and TMF on ferritic stainless steel for exhaust application International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals, 7.
- [15] Sissa, S., Giacomini, M., & Rosi, R. (2014). Low-Cycle Thermal Fatigue and High-Cycle Vibration Fatigue Life Estimation of a Diesel Engine Exhaust Manifold. International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals, 8.
- [16] Zhang, Y., Zhien, L., Wang, X., & Zheng, H. (2014). Cracking Failure Analysis and Optimization on Exhaust Manifold of Engine with CFD-FEA Coupling. SAE, 9.
- [17] Chen, M., Wang, Y., Wu, W., & Xin, J. (2015). Design of the Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine Based on a Transient Thermal Mechanical Analysis Approach. SAE, 7.
- [18] Salehnejad, M., Mohieddin Ghomshei, M., & Mohammadi Dizgoveini, A. (2016). Thermal Stress Analysis for D5S Cast Iron Exhaust Manifold of a Turbo-Charged Gasoline Engine Based on FSI Method and Temperature-Detection. The Journal of Engine Research, 10.
- [19] Castro Güiza, G., Hormaza, W., Galvis E, A., & Méndez Moreno, L. (2017). Bending overload and thermal fatigue fractures in a cast exhaust. Engineering Failure Analysis, 16.
- [20] Salehnejad, M., Mohammadi, A., Hashemi, J., & Ahangari, H. (96). Turbocharged gasoline engine exhaust manifold finite element analysis methodology. tenth national conference on internal combustion engines.