



تحلیل خستگی گرمائی - مکانیکی پُر چرخه چندراهه دود موتور پر خوران به روش اثر دو سویه سیال و جامد

مرتضی نادری حق^۱، آرش محمدی^{۲*}، غلامحسین پایگانه^۳

^۱ کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، mechanickaraj@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، amohammadi@sru.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، g.payganeh@sru.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۷ مرداد ۱۳۹۹

پذیرش: ۱۴ آبان ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

موتور پر خوران

چندراهه دود

خستگی گرمائی - مکانیکی پُر چرخه

چکیده

امروزه کارخانه‌های خودروسازی به منظور افزایش گشتاور و توان با در نظر گرفتن مصرف سوخت، به سمت تولید موتورهای پر خوران 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)، برای پیش گیری از شکست چندراهه دود بسیار مهم است. در این پژوهش تحلیل ترمومکانیکی، خستگی و تخمین عمر چندراهه دود در بحرانی‌ترین 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 نرم‌افزار فلونت انجام می‌شود، سپس دما، ضرایب انتقال حرارت جابجایی و فشار از محیط سیال روی سطح داخلی پوسته چندراهه نگاشت می‌شود. در محیط جامد پیش بار پیچ‌ها، بسترهای ارتجاعی برای در نظر گرفتن اثر بستر و پر خوران در نظر گرفته شده و تحلیل ترمومکانیکی با نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود، سپس با محاسبه کرنش و تغییر شکل چندراهه، شبکه جدید برای تحلیل در گام زمانی بعدی به نرم‌افزار فلونت وارد می‌شود و این چرخه با توجه به تعداد گام زمانی تا انتهای چرخه ادامه می‌یابد. نتایج شبیه سازی گرمایی جریان و محیط جامد با داده‌های آزمون تجربی دما، صحت گذاری شده است. در نهایت نقشه‌های دما و ضریب انتقال حرارت، دما در پوسته جامد، کرنش، تنش محوری، فون میزز و تنش‌های تناوبی رسم شده و عمر چندراهه دود تخمین زده شده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

بسیاری از اجزا موتور احتراق داخلی تحت خستگی در دماهای داغ قرار دارند. خستگی دما بالا به طور عمده به محدوده دمایی ۳۰ تا ۴۰ درصد دمای ذوب اطلاق می‌شود. قطعاتی که در دمای بالا کار می‌کنند، به علت عملیات روشن و خاموش شدن موتور در معرض گرادیان گذرای دما قرار می‌گیرند و در طول چرخه، تنش‌های تناوبی به واسطه تغییرات دما به وجود می‌آید و هر دو آسیب خستگی و خزش اتفاق می‌افتد. چندراهه دود نمونه برجسته‌ای از قطعاتی است در معرض خستگی و خزش است [۱].

گرم کردن غیر یکنواخت و متناوب قسمت‌های یک قطعه‌ی مقید می‌توانند تولید تنش گرمایی کند و منجر به شکست گردد که به آن خستگی گرمایی^۱ می‌گویند. تغییر متناوب بارهای مکانیکی (یا کرنش) و دما متداول هستند شکستی را ایجاد می‌کنند که عموماً به خستگی گرمایی-مکانیکی^۲ تعبیر می‌شود. که هر دو مورد با خستگی هم دما که در آن در طول بارگذاری متناوب دما ثابت باقی می‌ماند، تفاوت دارد. چندراهه دود موتورهای احتراق داخلی جز دسته‌بندی خستگی گرمایی-مکانیکی در دمای بالا قرار می‌گیرد [۲].

چندراهه دود از جنس چدن Si-Mo (مولیبدن-سیلیسیم) در معرض دمای گاز بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 چرخه‌های گرمایی بدست می‌آید برای ارزیابی رفتار خستگی چندراهه دود مورد استفاده قرار می‌گیرد [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 سامانه خروجی گازهای آگزوز که تحت لرزش بسامد بالا و همچنین در معرض گازهای خروجی از دمای داغ قرار دارند؛ نیاز به مقاومت در برابر خستگی در دمای داغ دارند [۴].

کارخانه‌های خودروسازی به منظور افزایش توان و گشتاور با در نظر گرفتن مصرف سوخت و رو به تولید موتورهای پرخوران کرده اند، که در میان خودروسازهای داخلی شرکت ایران خودرو موتور EF7-TC را به بازار عرضه کرده است. استفاده از سامانه پرخوران موجب افزایش دمای حاصل از احتراق شده و این دما به صورت مستقیم عمر چندراهه دود را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

روش‌های مختلفی در شناسایی نقاط بحرانی در چندراهه دود به کار گرفته شده است. روش‌های رایانه‌ای متکی بر حل اجزاء محدود، روش‌های آزمایشگاهی و بررسی ریزساختار از جمله این روش‌ها هستند. امروزه با توجه به دقت نرم‌افزارهای رایانه‌ای و به منظور کاهش

هزینه‌های تحقیق، از نرم‌افزارهای اجزاء محدود بیشتر استفاده می‌شود. در این میان روش برهم کنش سازه و سیال^۳ به علت و نزدیکی نتایج آن با واقعیت از اهمیت زیادی برخوردار است. از آنجا که چندراهه دود قطعه‌ای است که در معرض گازهای خروجی با فشار و دمای بالایی قرار دارد، لذا روش برهم کنش سازه و سیال جواب‌گوی حل معادلات حاکم بر آن است.

روش برهم کنش سازه و سیال یک مسأله چند وجهی است که در آن جریان سیال منجر به تغییر شکل ساختار جامد و از سوی دیگر تغییر شکل جامد منجر به عوض شدن هندسه سیال می‌شود. چندراهه دود به علت قرار گرفتن در معرض گرادیان گذرای دماهای بالای احتراق، تنش‌های گرمایی متناوبی در سطوح داخلی و خارجی آن به وجود می‌آید.

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 تنش‌هایی در سطوح داخلی و خارجی چندراهه دود می‌شود که به تنش‌های گرمایی معروف است. در این زمینه پژوهش‌هایی توسط محققین انجام شده است که به آن اشاره می‌شود.

هزیم و همکاران [۲] از یک روش اجزاء محدود غیرخطی گذرا برای شبیه‌سازی تغییر شکل و بر آورد عمر خستگی گرمایی برای چندراهه چدنی استفاده کردند. آنها نشان دادند که تغییر شکل خزشی، مهمترین جزء تغییر شکل چندراهه و شروع ترک است.

سونگ یانگ پارک و همکاران [۳] بر روی توسعه مقاومت گرمایی همبسته چدن‌هایی که در ساخت چندراهه استفاده می‌شود، تحقیق کردند. تحقیقات دقیق در این مقاله بر روی بهینه‌سازی ترکیب Si-Mo برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی برای استفاده در یک چندراهه دود موتور متمرکز شده بود.

دلپرت و رسو [۴] در پژوهشی که انجام دادند از روش مبتنی بر شبیه‌سازی غیرخطی استفاده کردند. در این پژوهش تمامی قطعات از جمله چندراهه خروجی، بستار، پرخوران، واشر بین بستار و چندراهه، تمامی بست‌ها و پیچ‌ها شبیه‌سازی شد. هدف، تحلیل گرمایی و ارزیابی توزیع دما در چندراهه خروجی است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ترک‌هایی که به صورت تجربی به وجود آمده در همان مکان‌هایی هستند که توسط شبیه‌سازی پیش‌بینی شده بودند.

ها و همکاران [۵] روشی برای آزمون خستگی خمشی در دمای داغ روی فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر گرما ارائه دادند. آنها سه نوع فولاد را تحت شرایط مختلف آزمایش و مقایسه کردند.

دانگ و همکاران [۶] از روش برهم کنش سازه و سیال استفاده کردند و با استفاده از نرم‌افزار انسیس و شبیه‌سازی دینامیک سیالات

³ Fluid Structure Interaction

⁴ Computational Fluid Dynamics

¹ Thermal fatigue

² Thermomechanical fatigue

طی تحقیقی که در شرکت فیات انجام دادند [۱۴] از نمونه‌هایی با ابعاد ۱۶mm عرض و ۱,۴۵mm ضخامت استفاده کرده و با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون شکست بر اساس تعداد چرخه و دامنه کرنش، منحنی مانسون برای فولاد ضد زنگ مورد استفاده در چندراهه دود خودرو را رسم نمودند. نتایج حاصل از آزمون نشان می‌دهد که با دامنه کرنش [۰,۲٪] و [۰,۹٪] عمر مواد بدست آمده در ۸۰۰°C، طولانی‌تر از مواد در ۶۰۰°C است. در حالی که خارج از این محدوده، مدت عمر در ۶۰۰°C نسبت به ۸۰۰°C طولانی‌تر است.

سیزا و همکاران [۱۵] خستگی گرمایی کم چرخه و خستگی پرچرخه ناشی از ارتعاشات را بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحلیل گرمایی نشان می‌دهد که دمای بیشینه در قسمت هم‌ریختگاه و دور از محفظه پرخوران و فلنچ‌های متصل به بستار است.

یان و همکاران [۱۶] بر روی ترک ناشی از خستگی گرمایی یک چندراهه دود کار کردند. ایشان از تحلیل ترک خستگی و ترکیب CFD- FEM استفاده کردند. در شبیه‌سازی CFD جریان داخلی چندراهه و تحلیل گرمایی با نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی چندراهه دود به صورت اجزاء محدود شبیه‌سازی شد و توزیع تنش گرمایی چندراهه تحت بار کامل و حالت دور آرام بدست آمد.

مینگ چن و همکاران [۱۷] با استفاده از روش شبیه‌سازی تحقیقات خود را بر روی یک موتور ۱,۵ لیتری پرخوران دارای چندراهه چدنی با جنس D5S انجام دادند. نتایج نشان داد که تغییر شکل پلاستیک علت اصلی ترک خوردگی چندراهه، اعوجاج فلنچ چندراهه و نشست گازها می‌شود و مکان‌های شکست پیش بینی شده و ناحیه نشست گاز، با آزمون دوام موتور مطابقت دارد.

صالح نژاد و همکاران [۱۸] مکان‌های به وجود آمدن ترک را با توجه به تحلیل اجزاء محدود تنش‌های گرمایی در چندراهه دود موتور ۴ استوانه 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 پیچ‌ها که در آن تمرکز تنش وجود دارد، بیشترین مقدار تنش عمودی در محل هم‌ریختگاه چندراهه جایی که مجاری‌های دود به هم می‌رسند، قرار دارد.

کاسترو و همکاران [۱۹] چندراهه دود یک موتور ۸ استوانه مربوط به فورد که مورد استفاده در خودروهای سواری و وانت‌های باری بود را مورد بررسی قرار دادند. شکست چندراهه دود در سه مرحله تعیین مشخصات مواد، فراکتوگرافی و الگوی اجزاء محدود ارزیابی شده است. آنها نشان دادند که ناحیه‌های شکستگی دارای کرنش همیشگی و انرژی کرنشی قوی بوده اند.

صالح نژاد [۲۰] از روش اجزای محدود برای تعیین توزیع تنش روی چندراهه دود موتور پرخوران ملی بنزینی برای سنجش مقدار مقاومت و استحکام آن استفاده کردند و با استفاده از آزمون دمایی در اتاق آزمون موتور، نتیجه الگوی اجزای محدود صحت‌داری شده و با استفاده از اجزاء

محاسباتی موضوع را تحلیل کردند. موتور پایه مورد بحث یک موتور چهار استوانه چهار زمانه دیزل با دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه بود و موتور، تحت تأثیر بارهای مختلف و تنش گرمایی گذرا قرار گرفت و با توجه به آزمون دوام، عمر آن محاسبه شد.

هاواکازدال زیتین و همکاران [۷] با در نظر گرفتن یک نوع چندراهه دود، عوامل موثر بر ترک‌های بوجود آمده بر ریزساختار آهن داکتیل SiMo را از دیدگاه متالورژی بررسی کردند و بر روی چدن‌های همبسته‌ی سیلیکون-مولیبدن بحث کردند.

دلپرت و همکاران [۸] به بررسی یک چندراهه دود با استفاده از روش اجزاء محدود، برای تعیین نقاط بحرانی تنش پرداختند. آنها از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند. شبیه‌سازی در چهار چرخه تکرار شده است و در نهایت عمر چندراهه توسط شبیه‌سازی تخمین زده شد و عمر آن با چندین معیار خستگی مقایسه شد.

لی و همکاران [۹] به شبیه‌سازی چندراهه دود یک موتور چهاراستوانه از جنس استنلس-استیل SUS441 که توسط نرم‌افزار آباکوس و محاسبات CFD بر اساس تعامل جامد-سیال انجام شده بود، پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بیشینه تنش و کرنش در نتیجه ی کارکردن در حالت تمام بار یا تغییر نسبتا سریع دما به وجود می‌آید که موجب تجاوز مقدار تنش از محدوده تنش تسلیم شده و خزش گرمایی اتفاق می‌افتد.

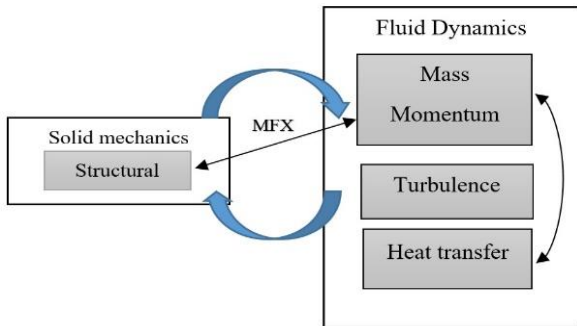
یانگ یون-لونگ [۱۰] بیشتر تمرکز خود را بر روی همبسته سیلیکون و مولیبدن در چندراهه چدنی معطوف ساختند. هدف اصلی آنها مطالعه رفتار خستگی گرمایی و عوامل ایجاد ترک در چدن Si-Mo NCI با ترکیب سیلیکون در حدود ۴,۵٪ تا ۵٪، به منظور یافتن مقدار مناسب برای چندراهه دود بود.

سیزمایکا و همکارانش [۱۱] به بررسی سه نوع چدن پرکاربرد در چندراهه دود و پرخوران‌های مورد استفاده در صنایع خودروسازی پرداختند. چدن‌های SG-SiMo (چدن فریتی کرومی) و SG-SiMoNi (چدن فریتی فشرده) D5S (چدن آستنیت کرومی) بیشترین کاربرد را دارند. محاسبات گرمایی-مکانیکی و خستگی گرمایی-مکانیکی روی فلانچ پرخوران نشان داد که بحرانی‌ترین منطقه بر روی پوسته داخلی چندراهه قرار دارد.

اکستروم و جانسون [۱۲] خواص فیزیکی و مکانیکی هفت ماده که در ساخت چندراهه دود موتورهای دیزل سنگین کاربرد دارند را مورد آزمایش قرار دادند. دو نوع چدن Ni resist D5s و Si-Mo 51، چهار نوع فولاد ریخته‌گری شده آستنیتی HF-A3N-HK30-HKnb و فولاد ریخته‌گری فرییتی مورد مطالعه قرار گرفت.

ماتیبیز و همکاران [۱۳] نیز به بررسی میکروسکوپی چدن Si-Mo تحت آزمون کشش با نسبت کرنش معکوس در دماهای ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد و تحت بسامد ۱۵۰ هرتز پرداخته‌اند. طبق نتایج بدست آمده، استحکام خستگی با افزایش دما شروع به کاهش می‌کند. گابلون و پلنو

بعد تغییر شکل‌ها از انسیس به فلوئنت منتقل می‌شود و در آنجا با تغییر شکل جدید، متغیرهای جریان محاسبه می‌شود.



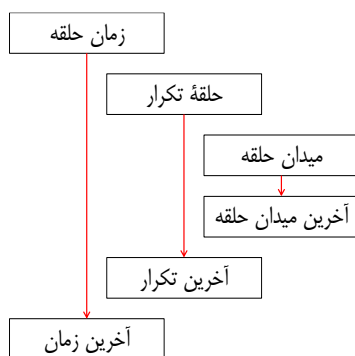
شکل ۱: تعامل بین جامد و سیال (انسیس و فلوئنت)

در شکل (۱) ارتباط تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و اجزاء محدود نشان داده شده است. یک شبیه‌سازی تعامل سازه و سیال گذرای دوطرفه دارای سه مرحله تکرار است:

۱- حلقه گذرا^۶ (مربوط به زمان): برای شبیه‌سازی مسائل وابسته به زمان در یک بازه زمانی مشخص، ابتدا دامنه زمانی به تعداد مناسبی گام زمانی تقسیم می‌شود که در هر گام زمانی مسئله به صورت تکراری در حلگر انسیس و فلوئنت حل می‌شوند.

۲- حلقه تناوبی^۷ در حلگرهای انسیس و فلوئنت نیروها و جابجایی‌ها با یک الگوریتم تکراری محاسبه می‌شوند. تکرارهای این حلقه زمانی متوقف می‌شود که مقادیر نیروها و جابجایی‌ها به مقدار هدف همگرا شوند.

۳- حلقه داخلی: این حلقه برای همگرایی میدان‌های مختلف در حلگرهای انسیس و فلوئنت استفاده می‌شود. این حلقه در فلوئنت به نام حلقه ضرایب^۸ و در انسیس به نام تکرارهای تعادلی^۹ موسوم اند. در شکل ۲ سطوح مختلف تکرارها در نرم‌افزار نشان داده شده است. تکرارهای این حلقه زمانی متوقف می‌شود که مقادیر متغیرهای میدان‌ها به معیار همگرایی برسد یا تعداد تکرارها به مقدار بیشینه خود برسد.



شکل ۲: الگوی حلقه‌های تکرار در نرم‌افزار [۳۱]

محدود، توزیع تنش روی چندراهه دود بدست آمد.

لیو زن و همکاران [۲۱] دو نرم‌افزار star-ccm+ و نرم‌افزار آباکوس را به صورت تعامل به کار بردند و از این روش برای حل میدان دما برای چندراهه یک موتور با سوخت پایه بنزین استفاده کردند. در این شبیه‌سازی موتور در حالت‌های دور آرام و دور حداکثر با بار کامل بوده و عمر خستگی چندراهه دود را با ارزیابی کرنش دائمی، 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 اکسیدهای ازت کاهش می‌یابد و سختی در چندراهه پوشش داده شده افزایش یافته است.

یویی لیو و همکاران [۲۳] برای تحلیل خستگی گرمایی-مکانیکی یک موتور ۴ استوانه‌ای پرخوران دیزل از روش تعامل اجزاء محدود و دینامیک سیالاتی محاسباتی برای شناسایی نقاط بحرانی و به وجود آمدن ترک استفاده کردند. نتایج با استفاده از کرنش پلاستیک معادل نشان داد که ترک‌ها در مکان‌هایی با تغییر شکل پلاستیک بیشتر اتفاق می‌افتد و علت این خرابی خستگی گرمایی-مکانیکی است.

هدف این پژوهش و نوآوری آن استفاده از روش برهم کنش سازه و سیال در نرم‌افزار انسیس- فلوئنت به صورت تعامل دوطرفه سیال و سازه^۱ برای شناسایی نقاط بحرانی شروع خستگی پُرچرخه^۲ چندراهه دود موتور EF7-TC و تخمین عمر آن می‌باشد.

خستگی پُرچرخه به عنوان گسیختگی خستگی در تنش‌های پایین و تعداد چرخه‌های بالا در نظر گرفته می‌شود. تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۲۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جریانی از تحلیل فلوئنت^۳ و تکیه‌گاه‌ها در محل اتصال چندراهه با بستار و ورودی پرخوران، به صورت بستر ارتجاعی لحاظ شده است.

۲- تعامل سازه و سیال دو طرفه^۴

به منظور تحلیل همزمان با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل در هر دو سامانه انسیس و فلوئنت نیاز است تا حل به صورت تکرار شونده^۵ انجام شود که نیاز به یک الگوریتم تکراری دارد. زمانی که تعامل بین دو حلگر انجام می‌گیرد متغیرهای جریان تاثیر گزار بر سازه و تغییر شکل اثر گذار در تحلیل جریان، بین دو جامد و سیال منتقل شوند.

به این صورت که در هر گام زمانی فشار، دما و ضریب انتقال گرمایی جابجایی از حلگر فلوئنت به حلگر انسیس منتقل می‌شود و در آنجا به قیدهای مشخص شده، تغییر شکل و تنش‌ها محاسبه می‌شود. در چرخه

⁵ Iterative

⁶ Transient Loop

⁷ Stagger Loop

⁸ Coefficient Loops

⁹ Equilibrium Iterations

¹ Two-Way fluid structure interaction

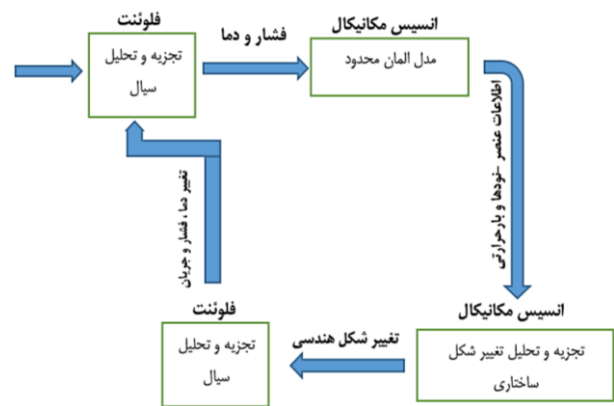
² High Cycle Fatigue

³ Fluid Flow

⁴ Two-way coupling FSI

۳- مواد و روش‌ها

در شبیه‌سازی حاضر از روش FSI به صورت تعامل دوطرفه استفاده شده است به طوری که اثرات متغیرهای دما، ضریب انتقال گرمایی جابجایی و فشار ناشی از سیال گذرنده بر توزیع دما و تغییر شکل جسم جامد اثر می‌گذارد. در پژوهش حاضر موتور در بیشترین سرعت و حالت بار کامل در نظر گرفته شده است. به طوری که متغیرهای اصلی دما و شار جرمی جریان در بالاترین حد خود قرار گرفته است و تمامی محاسبات نرم‌افزاری در ۷۲۰ درجه از گردش میل‌لنگ است. شکل ۳ چارچوب نظری تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در ابتدا هنده در نرم‌افزار فلونت تحلیل جریانی می‌شود و فشار و دما و ضریب انتقال گرمایی جابجایی به عنوان شرایط مرزی به چندراهه دود در الگوی اجزاء محدود وارد می‌شود. سپس تغییر شکل ساختاری در انسیس محاسبه شده و هندسه تغییر یافته وارد نرم‌افزار فلونت می‌شود و این شروع حلقه دوم است.



شکل ۳: چارچوب تحقیق حاضر

تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی‌ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۲۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جریانی از تحلیل فلونت و تکیه‌گاه‌ها در محل اتصال چندراهه با بستر و ورودی پرخوران چندراهه، به صورت بستر ارتجاعی لحاظ شده است. مشخصات فنی موتور ملی پرخوران در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی موتور پرخوران ملی

نوع موتور	EF7 TC
حجم موتور (CC)	۱۶۵۰
توان موتور بیشینه	۱۴۸ اسب بخار در ۵۵۰۰ د.د.د.
گشتاور بیشینه	۲۱۵ (N.m) در (۴۸۰۰-۲۲۰۰) د.د.د.
نسبت تراکم	۹٫۶:۱
تعداد دریچه	۱۶
نوع سوخت سازگار	بنزین بدون سرب اکتان ۹۵
سامانه افشانه‌ای	پاشش برقی چند نقطه‌ای
استاندارد حد آلاینده‌گی	یورو ۴

۳-۱- معادلات حاکم بر الگوسازی

۳-۱-۱- معادلات جریان

معادلات حاکم جریان تراکم‌پذیر همان معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و معادله K-E برای الگوسازی جریان متلاطم و معادله گاز آرمانی است [۲۳-۱۸].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \sigma \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + p)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma \cdot \nabla u \quad (۳)$$

معادله انرژی تالطم K :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (۴)$$

معادله انرژی تالطم ε :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۵)$$

۳-۱-۲- معادلات تحلیل ترمومکانیکی

در تحلیل گرمایی، قانون حاکم بر سامانه، 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 شکل معادله (۶) می‌آید [۳۰].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (۶)$$

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

$$\varepsilon = C \sigma \quad (۷)$$

که در آن ε و σ به ترتیب تانسورهای کرنش و تنش بوده و C و وارون ماتریس سختی مجموعه است که تحت عنوان ماتریس نرمی نیز شناخته می‌شود.

در حضور بارگذاری گرمایی، به دلیل وجود قیدهای جابجایی و گرا دیان دما که باعث رفتار انبساطی و انقباضی در چندراهه می‌شود و سامانه در

که در معادله (۱۵) به جای $E\alpha_{ij}$ از نماد β_{ij} که معرف به تانسور گرما-کشسان است استفاده می‌کنیم. با جایگذاری و مجموع‌گیری این عبارت در معادله، تنش در نهایت بصورت معادله (۱۶) می‌شود [۱۸]:

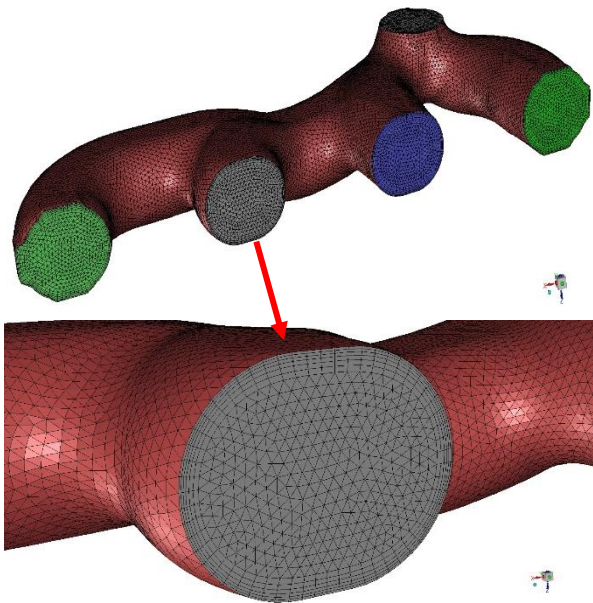
$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot e_{kl} - \beta_{ij}(T_2 - T_1) \quad (16)$$

۳-۲- شبکه‌بندی دینامیک سیالات محاسباتی

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

۳-۳- شرایط مرزی دینامیک سیالات محاسباتی

شرایط مرزی برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی در ورودی و خروجی چندراهه دود از نتایج شبیه سازی تبادل گاز و عملکرد یک بعدی از نرم‌افزار جی تی پاور بدست می‌آید.



شکل ۴: شبکه‌بندی دینامیک سیالات محاسباتی چندراهه دود

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

معرض کرنش گرمایی قرار می‌گیرد با برقراری اصل برهم نهی در تحلیل‌های خطی، کرنش مجموع را می‌توان حاصل ترکیب قانون تعمیم یافته هوک و انبساط گرمایی مطابق معادله (۸) می‌شود [۳۰]:

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

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

با حل مجموعه معادلات فوق، توزیع تانسور کرنش محاسبه می‌شود. با کمک معادلات تنش-کرنش و همچنین کرنش-جایجایی توزیع تنش و جایجایی مجموعه نیز مشخص شده و وضعیت سامانه به طور کامل معین می‌گردد.

برای تعمیم قانون هوک در حالت سه بعدی، طبیعی ترین راه این است که فرض شود، هر مؤلفه تنش متاثر از تمام مؤلفه‌های کرنش و هر مؤلفه کرنش متاثر از تمام مؤلفه‌های تنش است. این مفهوم به صورت تانسورهای (۱۱-۱۰) قابل بیان است [۲۷-۲۴]:

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

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

که σ_{ij} مؤلفه‌های تنش و D_{ijkl} و C_{ijkl} به ترتیب تانسور سختی و تانسور نرمی یا انعطاف پذیری ماده و e_{ij} مؤلفه‌های کرنش نامیده می‌شود. با توجه به تانسور بالا می‌توان بصورت معادله (۱۲) نوشت [۲۷]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{61} & \dots & C_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 2e_{xy} \\ 2e_{yz} \\ 2e_{zx} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

که تانسورهای C_{ij} در معادله (۱۲) ضرایب سختی ماده اند، بطوری که بدون در نظر گرفتن تغییرات دمایی و در دمای ثابت محیط اند. اما چنانچه تغییرات دمای غیر یکنواختی در داخل یک ماده ایزوتروپیک و یا ارتوتروپیک تصور شود و یا حتی در صورت یکنواخت بودن دما، قیودی در مقابل تغییر شکل ماده وجود داشته باشد، در آن ایجاد تنش می‌شود که به آن تنش گرمایی گویند.

چنانچه ماده غیر ایزوتروپیکی تحت اثر میدان گرمایی قرار گیرد، اعم از اینکه تغییر دمای جسم یکنواخت و یا غیریکنواخت باشد در آن ماده تنش گرمایی به وجود می‌آید اگر مؤلفه‌های کرنش ارتجاعی با ε_{ij}^E نشان داده شوند، کرنش کل با در نظر داشتن اصل برهم نهی مطابق معادله (۱۳) نوشته می‌شود:

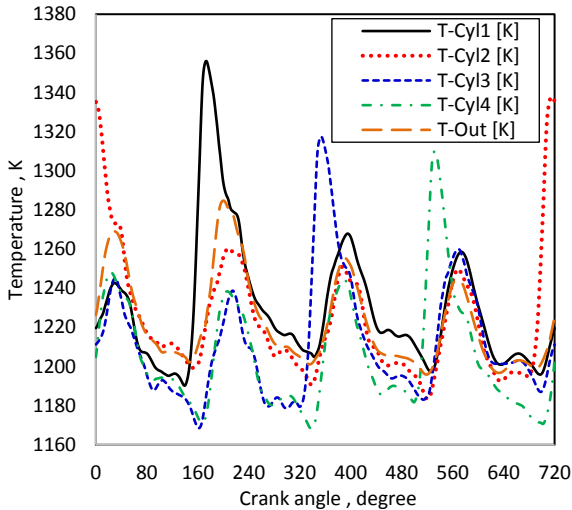
$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^E + \alpha\Delta T\delta_{ij} \quad (13)$$

قسمت دوم معادله بیانگر کرنش گرمایی بوده و می‌توان α را به صورت تانسور α_{ij} که بیانگر تانسور ضریب انبساط گرمایی است نمایش داد:

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

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

در شکل ۷ دمای ورودی (t-cyl 4, t-cyl 3, t-cyl 2, t-cyl 1) و دمای خروجی چندراهه دود (t-out) بر حسب زاویه لنگ آورده شده است. بیشینه دمای ورودی چندراهه در حدود ۱۳۵۰ کلوین است و دمای خرجی چندراهه بصورت نوسانی است در بیشینه ترین حالت در زاویه میل لنگ ۲۰۰ درجه و با مقدار ۱۲۸۴ کلوین است.



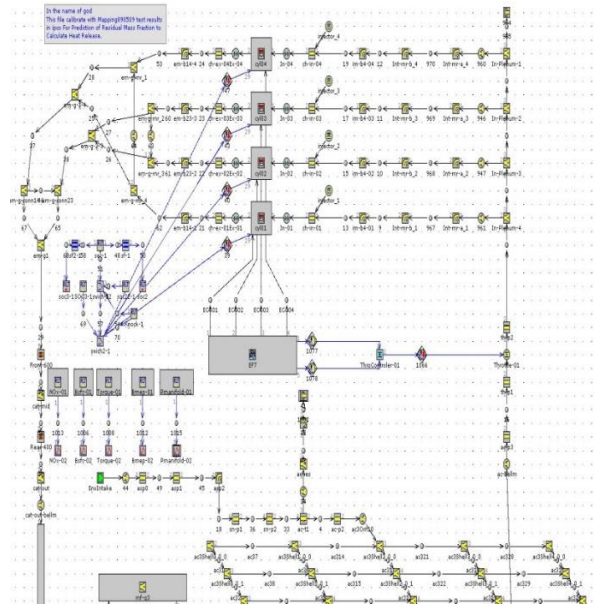
شکل ۷: دمای ورودی و خروجی چندراهه دود بر حسب زاویه میل لنگ

۳-۴- شبکه بندی اجزاء محدود پوسته جامد

برای شبکه بندی پوسته جامد از محیط شبکه بندی نرم افزار انسیس استفاده شده به طوری که چندراهه با ۵۵۰۲۷۳ شبکه چهار وجهی، بستر با ۴۹۷۹۱۰ شبکه چهار وجهی و قسمتی که چندراهه با فلنج پرخوران در تماس هست از شبکه های مربعی با تعداد ۲۶۵۱ استفاده شده است. شکل ۸ شبکه بندی پوسته چندراهه دود را برای تحلیل اجزاء محدود نشان می دهد.

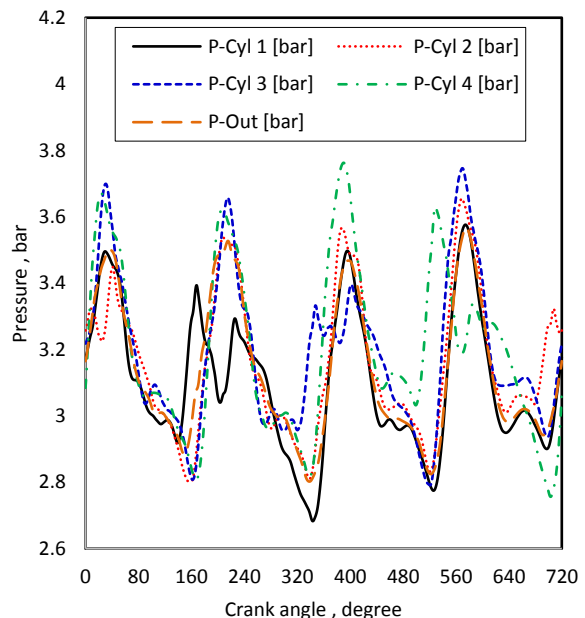
به منظور اعمال اثرات کشسان بستر و پرخوران، بستر کشسان برای پرخوران و بستر مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است. با توجه به هندسه چندراهه و با توجه به استفاده از روش تعامل دوطرفه که در این پژوهش انجام شده است؛ چندراهه با شبکه هایی با تعداد ۵۵۰۲۱۹ و به صورت شبکه های چهار وجهی^۱ و بستر نیز برای انطباق بهتر نتایج تبدلی از حل قسمت انتقال حرارت پایا به همین صورت شبکه بندی شده است.

نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود به طور قابل ملاحظه ای به شبکه بندی جسم مرتبط می شود. به طوری که با افزایش تعداد شبکه ها خطای حاصل از حل اجزاء محدود در حل بعدی انباشته شده (خطای حاصل از گرد کردن) و خطای محاسباتی را بالا می برد. همچنین کاهش تعداد شبکه ها نیز موجب دقت محاسبات نرم افزاری می شود. به



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

در شکل ۶ فشار ورودی (p-cyl 4, p-cyl 3, p-cyl 2, p-cyl 1) و فشار خروجی چندراهه دود (p-out) بر حسب زاویه میل لنگ آورده شده است. زمان بیشینه فشار برای هر ورودی چندراهه قبل از زمان بیشینه باز شدن دریچه دود است. مقدار فشار در هر ورودی با باز شدن دریچه دود مربوط به آن افزایش می یابد. بعد از باز شدن دریچه دود برای هر استوانه، فشار در چندراهه به شدت بالا رفته و به بیشینه فشار حدود ۳٫۷۳ بار می رسد. فشار خروجی چندراهه بصورت نوسانی است و در حدود ۳٫۳۴ بار است.



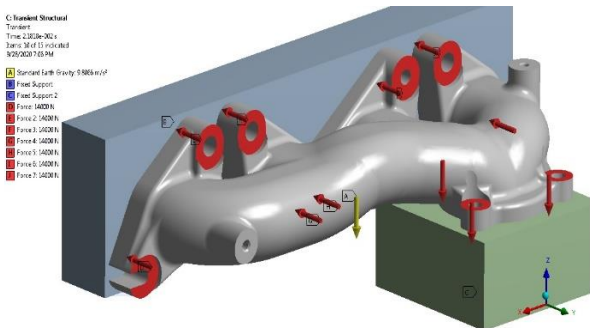
شکل ۶: فشار ورودی و خروجی چندراهه دود بر حسب زاویه میل لنگ

^۱ tetrahedron

جدول ۳: مشخصات ضریب انبساط گرمایی DS5 بر حسب دما [۱۸]

دما (°C)	ضریب انبساط گرمایی (1/°C)
۷۰۰	$۱,۶۵ \times ۱۰^{-۶}$
۷۵۰	$۱,۶۸ \times ۱۰^{-۶}$

در این پژوهش فلنچ‌های مربوط به چندراهه به صورت پایه ثابت^۱ در نظر گرفته شده است که نیروی اعمالی هر یک از ۸ پیچ بر فلنچ (مطابق شکل ۹) برابر ۱۴,۵ کیلو نیوتن طبق استاندارد شرکت سازنده در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه هدف از پژوهش مطالعه چندراهه است، هیچ یک از قطعات دیگر در شبیه‌سازی 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 می‌دهد که بر سطوح چندراهه در قسمت تحلیل اجزاء محدود اعمال می‌شود. 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 فلونت در تعامل دوطرفه خواهند بود. خواص مکانیکی مواد چندراهه در جدول ۴ آمده است [۱۸].



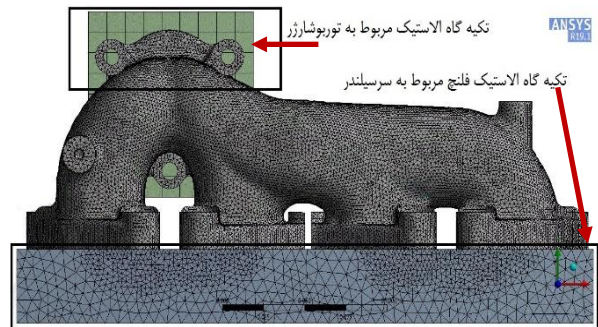
شکل ۹: بارهای مکانیکی و گرمایی روی سطح چندراهه

جدول ۴: مشخصات مکانیکی چندراهه DS5 [۱۸]

۷۵۰	۷۰۰	دما (سانتیگراد)
۷,۴۵	۷,۴۵	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۹۵,۵	۹۷	ضریب یانگ (گیگا پاسکال)
۰,۲۹	۰,۲۹	ضریب پواسون
۹۸,۳	۹۸,۳	ضریب بالک (گیگا پاسکال)
۴,۵۴	۴,۵۴	ضریب برشی (گیگا پاسکال)
۱۱۷	۱۳۹	استحکام کششی (مگا پاسکال)
۱۵۳	۲۰۲	استحکام نهایی کششی (مگا پاسکال)

همین دلیل از روش استقلال شبکه‌بندی در این پژوهش استفاده شده است.

بطوری که در تحلیل گرمایی دمایی قسمتی از چندراهه با اندازه‌های مختلفی از شبکه‌بندی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت در شبکه‌بندی‌هایی که نتیجه تغییرات چندانی در محل مذکور نداشت استفاده شد. همچنین در سطوح تماس نیز برای همگرایی بهتر روش انطباق گره به گره اعمال شده است. سطوح تماس به صورت اصطکاکی بین چندراهه و بستار و گلوگاه پرخوران تعریف شده است.



شکل ۸: شبکه‌بندی پوسته جامد برای تحلیل اجزاء محدود

۳-۵- 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 می‌آیند. برای شرط مرزی گرمایی سطح خارجی چندراهه که با هوای محیط در تماس ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت ثابت $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ [۱۱] و دمای محیط 37 °C در نظر گرفته شده است. دمای بستار 150 درجه سانتیگراد تعریف شده است [۱۸]. دمای محیط اطراف چندراهه 37 درجه سانتیگراد و کل زمان شبیه‌سازی با توجه با حالت پایا متغیرها 720 درجه از گردش میل‌لنگ در نظر گرفته شده است.

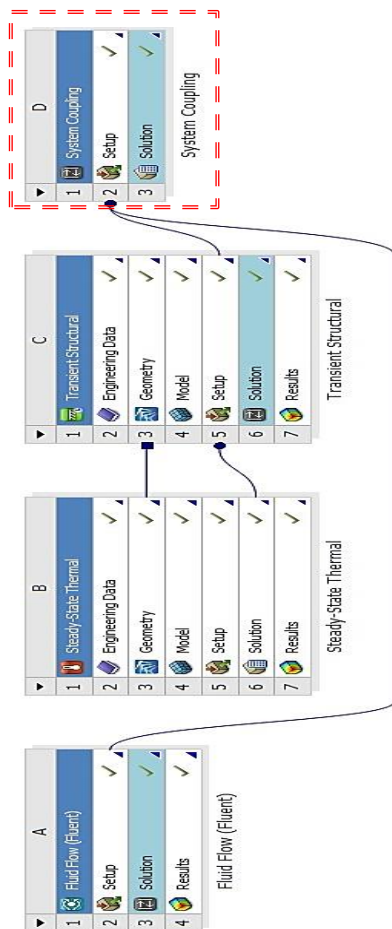
جنس چندراهه دود از نوع چدن DS5 است و ضریب هدایت گرمایی برای چندراهه با توجه به تغییرات دما طبق جدول ۲ تعریف شده است. همچنین ضریب انبساط گرمایی به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شده است [۱۸].

جدول ۲: ضریب هدایت گرمایی چندراهه DS5 [۱۸]

دما (°C)	ضریب هدایت گرمایی ($W/m \cdot k$)
۲۰	۱۴,۶
۱۰۰	۱۶,۷
۸۰۰	۲۵
۱۰۰۰	۲۸

^۱fixed support

چندراهه دود اعمال می‌شود و سپس تحلیل به گام دوم وارد می‌شود و تکرار می‌شود تا به گام زمانی نهایی برسیم. کل زمان شبیه‌سازی توسط رایانه، با مشخصات جدول ۵، نزدیک به ۴۹ ساعت به طول انجامید.



شکل ۱۱: مراحل شبیه‌سازی تعامل دو طرفه

جدول ۵: مشخصات رایانه مورد استفاده برای شبیه‌سازی

تعداد ترد	۴۸
حجم دیسک	۱۰۰ (گیگا بایت)
حجم حافظه	۱۲۸ (گیگا بایت)
نوع پردازنده	Intel xeon E5-2690 V3@2.6-3.5 GHz
توان پردازشی پایه	۹۹۸ (تا ۱۰۴۲) (گیگافلاپس ^۴)

۳-۸- بررسی استقلال از شبکه در تحلیل اجزاء محدود

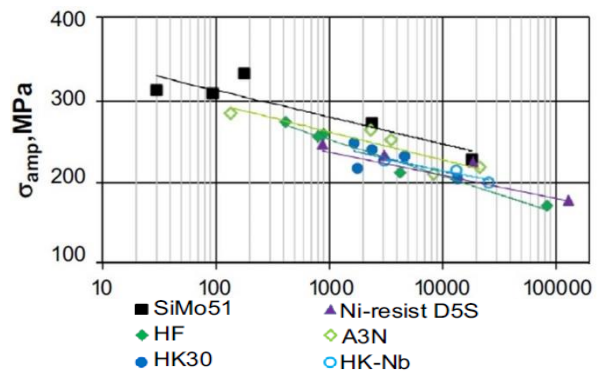
همان طور که از نمودار شکل‌های ۱۲-الف و ب مشاهده می‌شود، نتایج تنش فون میزز و معیار حداکثر تنش اصلی بر حسب تعداد شبکه ۲۵۰ تا ۷۰۰ هزار برای پوسته جامد نشان داده شده است. در نمودار ۱۲ الف و ب مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد شبکه به بیش از ۵۷۰ هزار

خواص مکانیکی مذکور در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد اند که در شبیه‌سازی به الگو اعمال شده است. با توجه به خواص اعمال شده و محاسبات نرم‌افزار، 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 قسمت‌هایی که چندراهه با بستار در تماس است برای همگرایی بهتر، شبکه‌بندی‌ها در این مناطق بر یکدیگر منطبق شده‌اند و از شبکه‌های ریزتری برای تحلیل استفاده شده است. همچنین سطوح تماسی به صورت اصطکاکی در نظر گرفته شده است.

۳-۶- خواص خستگی

منحنی $S-N$ در خستگی پرچرخه نیز در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به صورت شکل (۱۰) در نرم‌افزار انسیس تعریف شده است [۱۲].



شکل ۱۰: منحنی $S-N$ برای DS5 در دمای ۵۰۰ درجه [۱۲]

۳-۷- محیط تعامل

بعد از شبکه‌بندی سیال و پوسته جامد و تعریف شرایط مرزی و دیگر متغیرها در محیط‌های نرم‌افزار، تعامل کردن دینامیک سیالات محاسباتی و اجزاء محدود انجام می‌شود.

شمای مراحل تعامل به صورت شکل ۱۱ است. در قسمت تعامل، محیط‌های در نظر گرفته شده به صورت تعامل دوطرفه حل خواهند شد. در این قسمت نواحی مرزی که سیال و سازه با هم در تماس هستند انتخاب شده و در معرض تعامل قرار می‌گیرند. در صد خطای همگرایی سازه و سیال ۰،۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

ابتدا تحلیل جریان گازهای داغ خروجی موتور در چندراهه دود در نرم‌افزار فلونت انجام می‌شود. سپس به منظور تحلیل اجزاء محدود ابتدا حل گرمایی پوسته چندراهه در انسیس بصورت پایا^۱ انجام شده و نتایج خروجی گرمایی برای تحلیل اجزاء محدود گذار^۲ فرستاده می‌شود.

در نهایت نتایج تحلیل جریان و خروجی اجزاء محدود گذرا^۳ به قسمت تعامل^۳ فرستاده می‌شود که در آن اثرات جریان روی تغییر شکل

^۳ System coupling

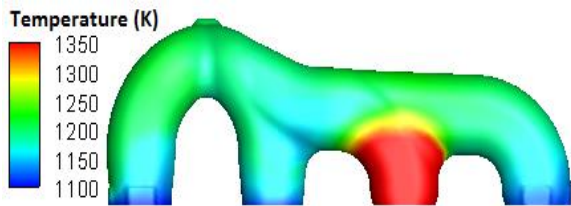
^۴ FLOPS

^۱ Steady-state thermal

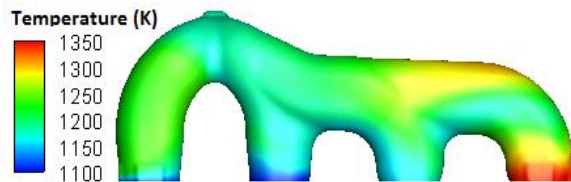
^۲ Transient-structural

شرایط مرزی برای تحلیل ترمومکانیکی توزیع فشار، ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای گاز روی سطح داخلی چندراهه دود است. بنابراین لازم است ابتدا تحلیل جریان چندراهه دود بصورت گذرا در نرم افزار فلونت نت انجام شود.

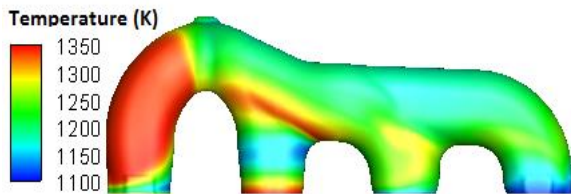
در شکل ۱۴ نقشه دمای گذرا در زمانهایی که در پیچه دود بیشینه جابجایی را دارد (مطابق شکل ۷ زاویه ۱۷۶، ۷۱۸، ۳۵۶، ۵۳۵ درجه) دیده می شود. همانطور که در هر چهار شکل دیده می شود با ورود گازهای داغ به چندراهه دمای چندراهه مربوط به آن افزایش می یابد. در دهانه ورودی چندراهه دود بیشترین دما حدود ۱۳۵۰ کلوین دیده می شود. میانگین سطحی دما ۱۲۶۰ کلوین است.



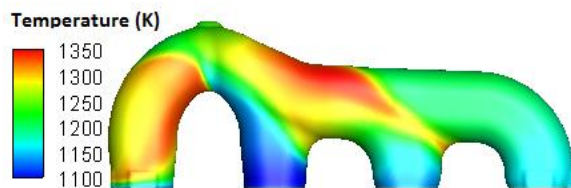
زاویه لنگ ۷۱۸ درجه



زاویه لنگ ۱۷۶ درجه



زاویه لنگ ۳۵۶ درجه

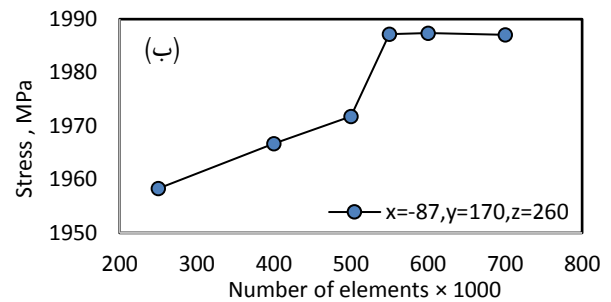
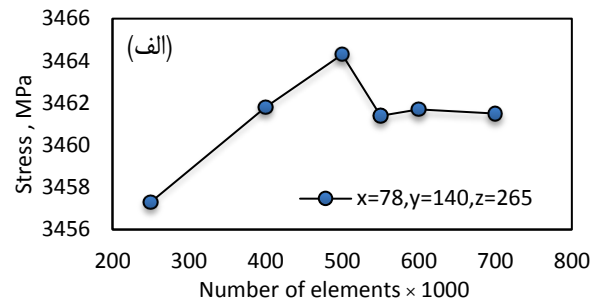


زاویه لنگ ۵۳۵ درجه

شکل ۱۴: توزیع دمای گازهای خروجی روی سطح داخلی چندراهه دود در زمان بیشینه بازشدگی در پیچه دود

در شکل ۱۵ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمانهایی که در پیچه دود ماکزیمم 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 می رود. مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت 800 W/m².K در ورودی هر مجرا

مقدار تنش تغییر چندانی نمی کند. بنابراین تعداد شبکه مناسب در نقطه میان ۵۷۰ هزار شبکه در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۲: وضعیت تنش بر حسب تعداد خانه

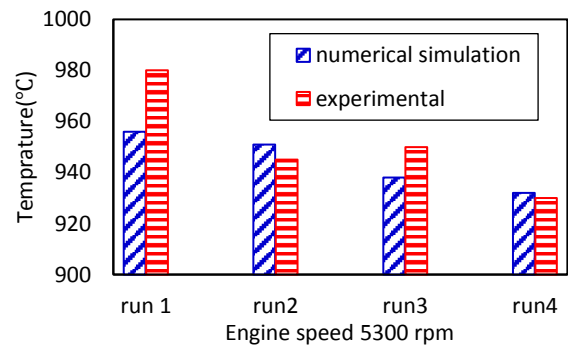
(الف) تغییرات تنش فون میز نسبت به تعداد شبکه

(ب) تغییرات حداثر تنش اصلی نسبت به افزایش تعداد شبکه

۴- نتایج و بحث

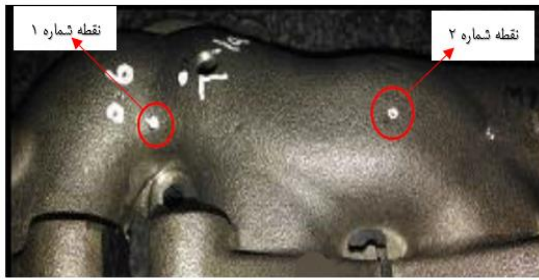
۴-۱- نتایج فلونت نت (حل گذرای جریان)

جریان گازهای ورودی چندراهه دود بصورت مخلوطی از گازهای تراکم پذیر اکسیژن، ازت، دی اکسید کربن و بخار آب است که از تحلیل یک بعدی عملکرد موتور از نرم افزار جی تی پاور بر حسب زاویه میل لنگ بدست آمده است. ابتدا به منظور صحت گذاری نتایج فلونت نت دمای گازهای چندراهه های ۱ تا ۴ چندراهه دود با نتایج آزمون آزمایشگاهی مقایسه شده است. شکل ۱۳ نتایج حاصل از آزمون دمایی [۲۰] و شبیه سازی را مقایسه می کند. طبق شکل ۱۳ به ترتیب، خطا برای چندراهه یک ۲٫۵٪، چندراهه دو ۰٫۰۶٪، چندراهه سه ۱٫۲۷٪ و چندراهه چهار ۰٫۰۲٪ است.



شکل ۱۳: مقایسه عددی و تجربی دمای گازهای چندراهه های ۱ تا

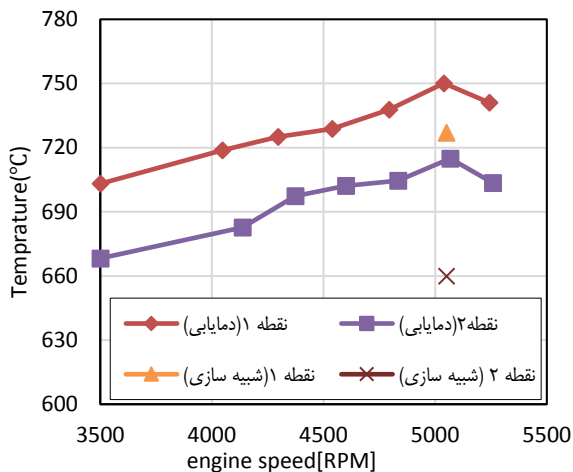
۴ [۲۰]



شکل ۱۶: نقاط علامت گذاری برای دمایی [۱۸]

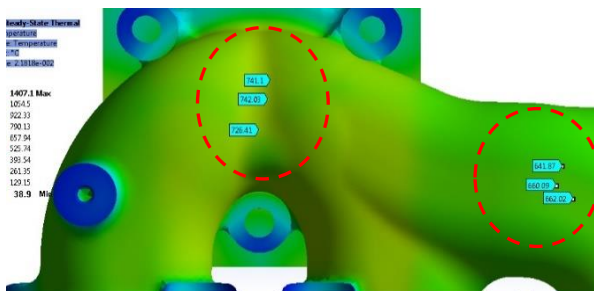
همان طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است دمای نقطه ۱ نزدیک به ۷۲۷ درجه سانتیگراد و دمای نقطه ۲ نزدیک به ۶۶۲ درجه سانتیگراد بدست آمده است. به طوری که در آزمون دمایی، دمای این نقاط به ترتیب ۷۳۵ و ۶۸۵ درجه سانتیگراد ثبت شده است. به این ترتیب میان نتایج دمایی با نتایج عددی سازگاری خوبی دیده می‌شود. (خطایی نزدیک به ۳٫۵ درصد).

مقایسه نتایج شبیه‌سازی 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 است.



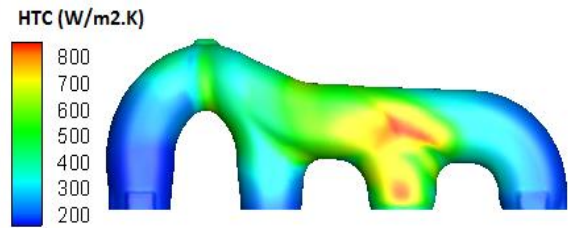
شکل ۱۷: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و دمایی تجربی [۱۸]

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.

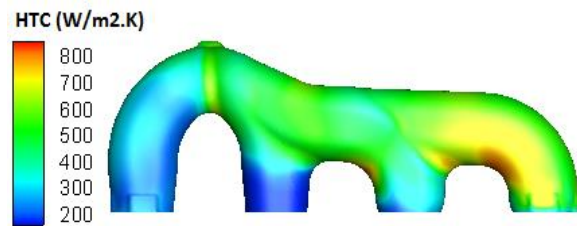


شکل ۱۸: نتایج توزیع دما در پوسته چندراهه

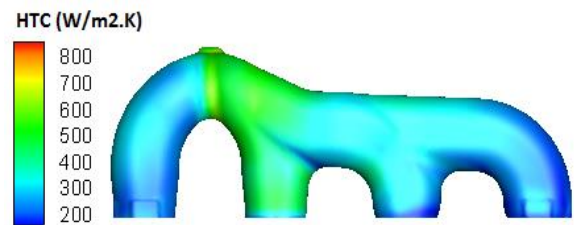
و در لحظه بیشینه شار گرمی آن است. مقدار کمینه آن $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ است و در ورودی‌هایی است که دریچه دود در آن لحظه بسته است و یا در حال بسته شدن است و کمترین جریان گاز خروجی وجود دارد.



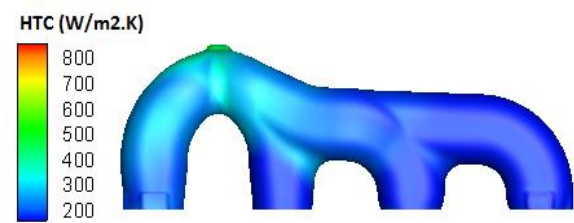
زاویه لنگ ۷۱۸ درجه



زاویه لنگ ۱۷۶ درجه



زاویه لنگ ۳۵۶ درجه



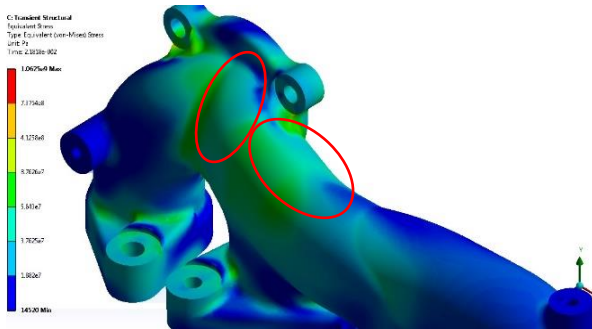
زاویه لنگ ۵۳۵ درجه

شکل ۱۹: توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی روی سطح داخلی چندراهه دود در زمان بیشینه بازشدگی دریچه دود

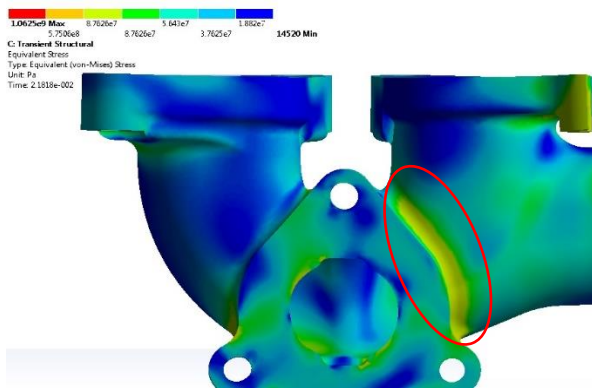
۴-۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود گرمایی بعد از چرخه کامل

به منظور اعتبار سنجی نتایج حل عددی، مقادیر دما در محل حسگرهای آزمون تجربی با نتایج عددی مقایسه شده اند. در شکل ۱۶ دو مکان که در آن حسگر دما کار گذاشته شده (نقطه ۱ و ۲) دیده می‌شود. در شکل ۱۷ دما در نقاطی که مطابق شکل ۱۶ در آن حسگر دما کار گذاشته شده در بار کامل و دورهای بین ۳۵۰۰ تا ۵۲۵۰ دور در دقیقه آورده شده است. از آنجایی که شبیه سازی در دور ۵۲۵۰ دور در دقیقه انجام شده، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تنها در این دور انجام شده است.

اطراف گلوگاه فلنچ پرخوران در بیشترین مقدار برابر ۱۲۴ مگاپاسکال است. در شکل ۲۱ محل‌های آن علامت گذاری شده است.



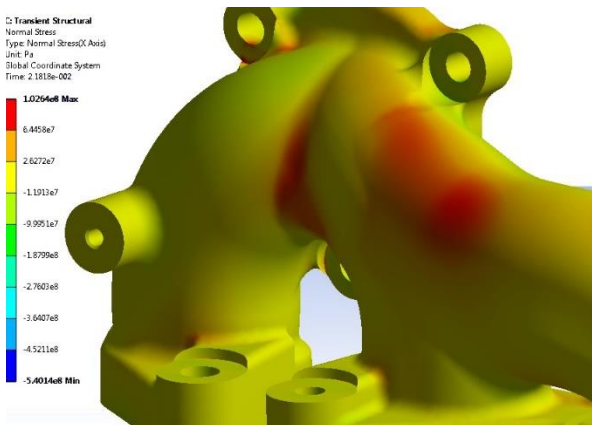
(الف)



(ب)

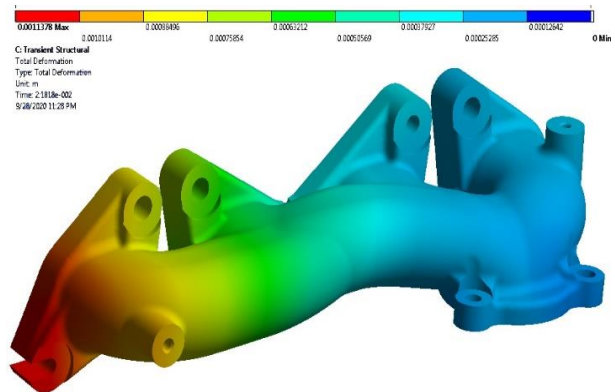
شکل ۲۱: (الف) توزیع حداکثر تنش فون میزز در چندراهه دود
(ب) توزیع حداکثر تنش فون میزز در چندراهه دود

شکل ۲۲ نیز توزیع تنش محوری را بعد از ۷۲۰ درجه میل‌لنگ را نشان می‌دهد. تنش محوری در محل پیچ‌ها دارای مقادیر پایینی هستند و همان طور که از شکل ۲۲ مشخص است بیشترین تنش محوری مربوط به محل همریختگاه و قسمت بالای چندراهه است که در شکل مشخص شده است.



شکل ۲۲: توزیع تنش محوری در چندراهه دود

۳-۴ نتایج اجزاء محدود مکانیکی بعد از چرخه کامل شکل ۱۹ تغییر شکل چندراهه بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل‌لنگ را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۱۹ مشخص است بیشترین تغییرات ابعادی در نزدیکی اولین ورودی چندراهه است. به نظر می‌رسد علت این تغییر شکل بیشتر، ناشی از فاصله ی بیشتر این خروجی نسبت به قیدهای حرکتی تکیه‌گاه فلنچ پرخوران است که در انقباض و انبساط‌هایی که در زمان گرم و سرد شدن چندراهه است اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۹: تغییر شکل چندراهه دود بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل‌لنگ

شکل ۲۰ حداکثر تنش اصلی بعد از ۷۲۰ درجه از گردش میل‌لنگ را نشان می‌دهد. همان طور که پیش بینی می‌شد حداکثر تنش‌های اصلی به غیر از نواحی اطراف پیچ‌ها در قسمتی از بدنه و محل همریختگاه جایی که خروجی‌ها به یکدیگر می‌رسند، اتفاق می‌افتد. این مکان‌ها 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 می‌افتد.



شکل ۲۰: توزیع حداکثر تنش‌های اصلی در چندراهه دود

شکل ۲۱ الف و ب معیار تنش فون میزز بعد از ۷۲۰ درجه میل‌لنگ نشان داده شده است. بیشترین تنش فون میزز نیز در همان نواحی اتفاق می‌افتد که حداکثر تنش‌های عمودی رخ داد. به این ترتیب تنش فون میزز در محل همریختگاه در بیشترین مقدار برابر ۸۲,۴ مگاپاسکال و

در معادله ۱۸، $(N_f)_{TMF}$ تعداد چرخه تا شکست خستگی گرمائی-مکانیکی و M_0 و β تابعی از دمای بالا و دامنه دمایی، σ_{iu} استحکام نهایی کششی، σ_1 حد خستگی است.

این موضوع اشاره می‌کند که مقادیر $M_0(T_{max}\Delta T)$ تحت وضعیت TMF می‌تواند توسط $M_0(T_{max})$ در یک دمای معادل T_e که منجر به همان اثر در خستگی TMF در آزمایش می‌شود، جایگزین شود. از این رو مقادیر M_0 را در حداکثر دما در نظر می‌گیریم و نشان می‌دهیم:

$$M_0(T_{max}\Delta T) = M_0(T_e) \quad (۱۹)$$

$$T_e = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(t) dt + \frac{\lambda(T_2)}{2} \cong T_2 = T_{max} \quad (۲۰)$$

این آسیب اضافی تولید شده توسط تغییر دما ΔT می‌تواند با ضریب تجربی $\beta(T_{max}\Delta T)$ به صورت معادله ۲۱ شبیه‌سازی شود [۲۹]:

$$\beta(T_{max}\Delta T) = \alpha \left| \frac{T_{max} - \Delta T}{T_{max}} \right| \beta(T_{max}) \quad (۲۱)$$

در معادله (۲۱) دمای حداکثر بر حسب کلونین است و متغیر α به معادله جهتی^۴ چرخه‌های گرمایی و مکانیکی بستگی دارد. همچنین β از منحنی S-N تحت شرایط کاملاً معکوس ($R = -1$) توسط ترسیم $\sigma_{mean}\sigma_{max}$ به عنوان تابعی از نسبت $N_f(\sigma_{max} - \sigma_1)$ به $(\sigma_u - \sigma_{max})$ بدست می‌آید.

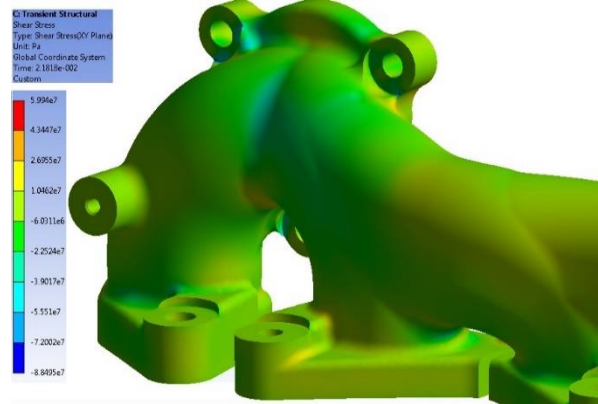
از معادله (۱۸) و (۲۱) می‌توان حد عمر را در خستگی‌های گرمائی-مکانیکی محاسبه نمود. معیار آسیب در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی بیشینه تنش اصلی در نظر گرفته شده است. از معیارهای تنش آسیب برای تخمین عمر به جای معیارهای کرنشی استفاده شده است. شکل ۲۳ بیانگر معیارهای در نظر گرفته شده در تخمین عمر چندراهه است.

همان طور که از جدول ۶ مشخص است معیار آسیب با توجه به منحنی S-N شکل ۱۰ بر روی عمر تنش تنظیم شده است. معیار شکست به برای طراحی محتاطانه، گودمن اصلاح شده، نسبت بار به صورت ثابت و ضریب حد دوام که به عواملی همچون کیفیت سطح، اندازه، بار و... وابسته است.

جدول ۶ معیارهای در نظر گرفته شده در تخمین عمر چندراهه است. نتایج خروجی بیانگر این است که محدوده بهترین عمر طراحی، در تعداد چرخه $1E9$ برای مناطق بحرانی و آسیب پذیر است.

شایان ذکر است مقادیر بدست آمده صرفاً با توجه به منحنی S-N دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و در محدوده خستگی پر چرخه است [۱۲] که در شبیه‌سازی اعمال شد. در حالی که برای طراحی قطعاتی که تحت بارهای استاتیکی قرار می‌گیرد حد تسلیم ماده از مهم‌ترین

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



شکل ۲۳: توزیع تنش ترسکا در چندراهه دود

۴-۴- تخمین عمر

در تخمین عمر چندراهه، منحنی S-N چدن D5S [۱۲] در نرم‌افزار وارد گردد. پیش‌بینی‌های عمر از لحاظ تعداد چرخه‌های که منجر به شکست می‌شود به الگوی انتخاب شده بستگی دارد. ارتباط بین دما و کرنش را می‌توان به دو دسته هم‌جهت^۱ و غیرهم‌جهت^۲ تقسیم کرد. TMF^3 هم‌جهت دلالت دارد بر اینکه کرنش عمودی و بیشینه دما هم‌زمان اتفاق می‌افتد، درحالی که در TMF غیرهم‌جهت بیشینه کرنش عمودی هم‌زمان با مینیمم دما اتفاق می‌افتد [۱]. در نتیجه چندراهه دود را می‌توان در TMF هم‌جهت قرار داد.

برای تخمین عمر در موادی که دارای رفتار ترد هستند، معمولاً از معیار بیشینه تنش اصلی استفاده می‌شود [۱] که در آن $S_{qa} = S_{a1}$ است. در اینجا S_{qa} دامنه تنش اسمی معادل است و S_{a1} برابر با تنش اسمی تناوبی اصلی است.

در خستگی‌های گرمائی-مکانیکی هم‌جهت ضرایب آسیب در هر چرخه را می‌توان نه تنها با تنش‌های حداکثر و متوسط بلکه با دماهای موثر و دامنه دمایی اعمالی مطابق معادله ۱۷ بدست آورد [۲۹].

$$\frac{dD}{dN} = f(\sigma_{max}\sigma_{mean}T_{max}\Delta T) \quad (۱۷)$$

که در آن D متغیر آسیب، N چرخه، σ_{max} تنش حداکثر، σ_{mean} تنش متوسط، T_{max} دمای حداکثر، ΔT دامنه دما است و معادلات، زمانی که $\sigma_{mean} = 0$ باشد به صورت معادله ۱۸ است [۲۹]:

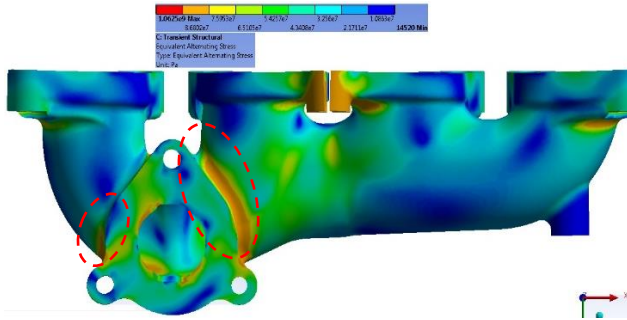
$$(N_f)_{TMF} = \frac{(\sigma_u - \sigma_{max}) \left[\frac{\sigma_{max}}{M_0 T_{max} \Delta T} \right]^{\beta(T_{max}\Delta T)}}{\alpha [\beta(T_{max}\Delta T) + 1] (\sigma_{max} - \sigma_1)} \quad (۱۸)$$

^۳ Thermomechanical fatigue

^۴ phasic relation

^۱ In-phase

^۲ Out-of-phase



(ب)

شکل ۲۴: الف) تنش‌های تناوبی به وجودآمده در چندراهه (نمای روبه رو)
ب) تنش‌های تناوبی به وجودآمده در چندراهه (نمای پشت)

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش استفاده از روش برهم کنش سازه و سیال در نرم‌افزار انسیس-فلوئنت به صورت تعامل دوطرفه سیال و سازه برای شناسایی نقاط بحرانی شروع خستگی پُرچرخه چندراههٔ دود موتور EF7-TC و تخمین عمر آن استفاده شده است. تحلیل در حالت گذرا و شرایط کاری موتور در بحرانی ترین شرایط کارکرد، حالت بار کامل و دور ۵۲۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

اعتبارسنجی با استفاده از آزمون دمایی چندراههٔ دود انجام شد و نتایج نقشه‌های دینامیک سیالات محاسباتی (دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی) و اجزاء محدود (تنش‌های اصلی، تنش فون میزز، کرنش، توزیع دما در پوسته جامد) نشان داده شده است. در نهایت عمر پُرچرخه چندراههٔ دود در شرایط بحرانی تعیین شده است. به طور کلی در پایان پژوهش و شبیه‌سازی انجام شده نتایج زیر بدست آمده است:

- ۱- با توجه به نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دمای سطحی چندراهه با توجه به ترموکوپل‌های کار گذاشته شده در برخی از نقاط نزدیک به یکدیگر بوده و این به نوبه‌ی خود بیانگر صحت شبیه‌سازی است. به طوری که خطای بدست آمده از نتایج دمایی و شبیه‌سازی زیر ۴ درصد است.
- 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 لوله‌های خروجی چندراهه به یکدیگر می‌رسند و در نواحی منطقه‌ای که فلنچ پرخوران نصب می‌شود، بیشینه است. به نظر می‌رسد علت تجمع تنش در محل هم‌ریختگاه بالا بودن گرادیان دما در این منطقه بوده و هندسه فلنچ پرخوران از عوامل تمرکز تنش در این منطقه است.
- ۳- تخمین عمر چندراههٔ دود با استفاده از معیارهای خستگی‌های ترمومکانیکال پُرچرخه^۹ در شرایط بحرانی کارکرد موتور است و پیش بینی می‌شود مناطق بحرانی در سطح چندراههٔ دود پس از عبور از این محدوده چرخه، دچار واماندگی شود.

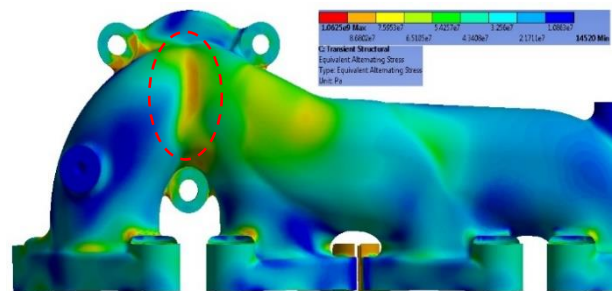
کمیت‌های مکانیکی است، برای اجزایی که در بارهای چرخه‌ی قرار دارند و تحت تنش‌های متناوب قرار می‌گیرند، بررسی تنش دیگری غیر از حد تسلیم مورد نیاز است.

اگر این گونه قطعات تحت تأثیر نیروهای متناوب قرار گیرند پس از مدتی می‌شکنند، هرچند که تنش‌های وارد بر آن‌ها بسیار پایین‌تر از استحکام کششی یا حد تسلیم باشد. هر چه تعداد تناوب تنش‌های وارده بیشتر باشد، تنش شکست آن کوچکتر است.

جدول ۶: معیار آسیب

ابزار خستگی	
نام موضوع	محاسبه شده
حالت	ابزار خستگی
دامنه	
نام موضوع	زمان
نوع دامنه	مواد
1.	
فاکتور مقاومت خستگی (Kf)	
بارگذاری	
نسبت	نوع
1.	نسبت بار
1.	فاکتور مقیاس
تعریف	
زمان پایان	زمان نمایش
گزینه‌ها	
عمر تنش	نوع تحلیل
گودمن	نظریه تنش
فون میزز	مؤلفه تنش
واحد عمر	
ثانیه	نام واحد
5.4545×10^{-3}	یک چرخه برابر است با

شکل ۲۴ تنش‌های تناوبی را بعد از ۷۲۰ درجه میل‌لنگ 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 اند که به علت تمرکز تنش در سطوحی که تغییر شکل یافته‌اند و یا به عبارتی تیز شده‌اند، است.



(الف)

- [8] Delprete, C., Sesana, R., & Vercelli, A. (2010). Multiaxial 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] Szymyka, 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.

۴- به علت قرار گرفتن چندراهه در گرادیان دمایی مختلف، و وجود قیدهای حرکتی و محدودیت درجه آزادی چندراهه و اجزاء پرخوران و بستار، تنش‌های تناوبی گرمایی در آن به وجود آمده و همین عامل موجب به وجود آمدن تنش‌های پسماند کششی در سطح چندراهه شده و موجب جوانه زدن ترک و واماندگی چندراهه خواهد شد.

فهرست علائم و اختصارات

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
\dot{q}	شار گرمایی
T	دمای سیال
T_w	دمای دیواره
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی
k	ضریب رسانایی
u_i	مؤلفه سرعت سیال در برای i
σ_{ij}	تنش برشی در سیال
e	انرژی داخلی سیال
μ	ضریب لزجت سیال
ε	تانسور کرنش
σ	تانسور تنش
C	ماتریس نرمی

مراجع و 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 Sung, H. (2007). High temperature bending fatigue behavior of stainless steels for automotive exhaust. *Materials Processing 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 Exhaust Manifold Cracks Produced From SiMo Ductile Iron. *Journal of iron and steel research, international*, 5.

- [۲۸] محمد مهدی سعادت پور، ۱۳۹۵ مبانی تئوری الاستیسیته، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [29] 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
- [30] 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.
- [31] Salehnejad, M., & Mohammadi Dizgoveini, A. (2019). Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction. The Journal of Engine Research, 9
- [۳۲] کاظم اسماعیل پور، ۱۳۹۵ راهنمای جامع انسیس CFX
- [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.
- [23] Farrukh Saleem, Y. L. (2018). Low-Cycle Fatigue Life Prediction of D5S for Application in Exhaust. 11.
- [24] 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.
- [25] ASM Handbook-Cast Iron Science and Technolog. (2017). United States of America.
- [26] J. R. Davis, Alloying- understanding the basic. (2001). United States of America.
- [۲۷] حسین تویسرکانی، ۱۳۹۲ اصول علم مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.



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

M. Naderi Hagh¹, A. mohammadi^{2*}, G. Payganeh³

¹ MSc mechanical engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, mechanickaraj@yahoo.com

² Assistance professor, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, amohammadi@sru.ac.ir

³ Associate Assistance professor, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, g.payganeh@sru.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 August 2020

Accepted: 04 November 2020

Keywords:

Turbocharged engine

exhaust manifold

mechanical high-cycle fatigue

ABSTRACT

Nowadays, car manufactures to increasing torque and power with consider to fuel consumption, have swept to the production of turbocharged engines. With considering exhaust gas-temperature rises in boosted engines, recognition of critical locations of the exhaust manifold in the worse condition of the engine (full load and maximum speed), to prevent fracture of the exhaust manifold is very important. In this research thermomechanical analysis, fatigue and life-span estimation in the most critical case of engine performance using the 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 the inner shell of the exhaust manifold. In solid preload of bolts, an elastic foundation based for the effect of cylinder head and turbocharger were considered and thermomechanical analysis was carried out with ANSYS software. Then with computing strain and changing geometry, a new mesh for analysis in the next time step was entered into FLUENT software and this cycle with consider to time step until the end of the 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 Mises stress and dynamic stress plot and life-span of exhaust manifold have been estimated.

