



## تحلیل تنش گرمایی چندراهه خروجی چدنی D5S موتور بنزینی پرخوران بر اساس روش FSI و دمایی

محمد امین صالح نژاد<sup>۱</sup>، منصور محی الدین قمشه‌ای<sup>۲\*</sup>، آرش محمدی دیزگوینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران [ma.salehnejad@yahoo.com](mailto:ma.salehnejad@yahoo.com)

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران [gomshei@kiau.ac.ir](mailto:gomshei@kiau.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [amohammadi@srttu.edu](mailto:amohammadi@srttu.edu)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۶ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۱ خرداد ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

چندراهه خروجی

روش FSI

تحلیل اجزاء محدود

خواص وابسته به دما

### چکیده

این پژوهش با هدف تعیین توزیع تنش در چندراهه چدنی خروجی دود موتور بنزینی پرخوران به انجام رسیده است. بدین منظور ابتدا بر اساس روش تعامل سازه و سیال (FSI)، با انجام تحلیل حرارتی، توزیع دمای ایستا در گاز عبوری از مجموعه چندراهه و نیز در مجموعه چندراهه به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی گردیده است. البته، شرایط مرزی دمایی قبلاً با انجام آزمون دمایی روی موتور تعیین شده است. به منظور اجرای پردازش تنش گرمایی، نخست شرایط مرزی مکانیکی در نمونه اجزاء محدود غیرخطی از مجموعه چندراهه ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، اعمال گردیده است. همچنین، توزیع دمای حاصل از تحلیل حرارتی، به صورت یک میدان دمای از پیش تعریف شده به نمونه اجزاء محدود نسبت داده شده است. دامنه تغییرات دمای چندراهه در قسمت خواص مواد وارد گردیده، به طوری که نرم‌افزار خواص ماده را در هر نقطه مطابق با درجه حرارت آن نقطه تعیین و در محاسبات تنش گرمایی لحاظ می‌نماید. نهایتاً با اجرای برنامه، توزیع تنش‌های حرارتی تعیین گردیده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که محل هم‌ریختگاه چندراهه خروجی به لحاظ تنش‌های حرارتی، بحرانی‌ترین ناحیه است، و در نواحی اطراف اتصالات بیشترین تنش‌های برشی رخ می‌دهد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

طراحی یک چندراهه خروجی با کیفیت همواره از نکات مهم مد نظر صنایع خودروسازی بوده است. دلیل این امر آن است که امروزه با رشد مطالبات عمومی برای دراختیار داشتن خودروبی با توان و گشتاور قوی، دمای گازهای خروجی به صورت قابل توجهی نسبت به گذشته نه چندان دور افزایش پیدا کرده است. یکی از سازوکارهای مهم خرابی در چندراهه‌های خروجی، پیدایش و رشد ترک است. برای شناسایی و اجرای اقدامات مقتضی در این زمینه، تحلیل اجزاء محدود دقیق و واقعی از شرایط مکانیکی حاکم بر چندراهه ضروری است.

با توجه به شرایط مرزی سخت حاکم، احتمال بروز کرنش‌های همیشگی<sup>۱</sup> و ایجاد و رشد ترک وجود دارد، بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل رشد این ترک‌ها، در طراحی چندراهه اهمیت زیادی دارد [۱].

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه شبیه‌سازی چندراهه‌های خروجی انجام شده است. یوان‌فو<sup>۲</sup> و همکاران [۲]، از نتایج میدان دمای اندازه‌گیری شده که از یک میز آزمون بهره می‌بردند، استفاده کردند و نمونه ساختاری-سیالی چندراهه خروجی را بر اساس ضریب انتقال حرارت واقعی پیاده کردند. نتایج آنها نشان می‌داد که ترک در همان نقطه ای که پیش بینی می‌کردند ایجاد می‌شود. بر خلاف آنچه که بعضی بر ساده‌سازی تحلیل اجزاء محدود باور دارند، مامیا<sup>۳</sup> و همکاران [۳]، از یک نمونه کامل و پیچیده که شامل ایجاد تماس‌های غیرخطی بین اجزاء درگیر نیز می‌شود، استفاده کرده‌اند.

در سال ۲۰۰۵، دلپرت<sup>۴</sup> و روسو<sup>۵</sup> [۴]، در مقاله خود یک روش‌شناسی برای شبیه‌سازی حرارتی-سازهای در چندراهه‌های خروجی موتور ارائه نمودند. در این تحقیق ابتدا تمامی قطعات و اجزاء و سپس سطوح درگیر، شبیه‌سازی شدند؛ و بعد از آن پردازش حرارتی و سپس پردازش تنش به روش اجزاء محدود انجام گرفته است.

در سال ۲۰۰۹، گوسمز<sup>۶</sup> و دیوستر<sup>۷</sup> [۵] راه حل جامع‌تری برای طراحی چندراهه خروجی پیشنهاد کردند. آن‌ها در تحقیق خود با بهره‌گیری از روش اجزاء محدود و ساخت نمونه مجازی به جای نمونه حقیقی، دلایل مختلف شکست و خرابی چندراهه خروجی را بررسی کردند. علاوه بر اثرات حرارت و اکسیدشدن و غیره، را بر روی چندراهه خروجی شبیه‌سازی نمودند. آنان شبیه‌سازی خود را برای چندراهه‌های تک جداره و دو جداره به انجام رساندند.

در سال ۲۰۱۴، اشوانی کومار<sup>۸</sup> و همکاران [۶] یک تحلیل حرارتی- مکانیکی برای یک چندراهه خروجی از جنس فولادی ضدزنگ آستنیتی مورد استفاده در یک موتور دیزل بر مبنای تحلیل FEA به انجام

رساندند. آنان ابتدا توزیع دما را توسط نرم‌افزار CFD در چندراهه خروجی تعیین نمودند، و سپس توزیع تنش‌های حرارتی را بدست آوردند. فان<sup>۹</sup> و همکاران [۷]، در سال ۲۰۱۴، یک تحلیل همزمان یا متعامل از جریان حرارت و تنش گرمایی در چندراهه خروجی یک موتور بنزینی ارائه کردند. آنان در پژوهش خود سه رویکرد مختلف برای حل مسائل جفت CFD(FVM)/FEM را با یکدیگر مقایسه نمودند و ساده‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین رویکرد را تعیین کردند و سپس از آن به منظور تحلیل تنش‌های حرارتی در یک چند راهه دود موتور بهره گرفتند.

چن<sup>۱۰</sup> و همکاران [۸] یک تحلیل گرمایی-مکانیکی گذرا برای چندراهه خروجی موتوری پرخوران با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود به انجام رسانده و از آن به منظور بررسی خرابی و ترک خوردگی و شکست چندراهه خروجی، بهره گرفتند. آنان با انجام آزمون دوام چندراهه خروجی، مشاهده کردند نقاطی که ایجاد ترک در آنها پیش بینی شده بود، همان نقاط دچار خرابی شده‌اند.

در سال ۲۰۱۴ فولتون<sup>۱۱</sup> و همکاران [۹] شبیه‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی درجه حرارت دقیق گاز خروجی از چندراهه خروجی دود موتور پرداختند. شبیه‌سازی بر روی یک چرخه باز جریان سیال شامل هوای ورودی به چندراهه هوا، محفظه احتراق، چندراهه خروجی دود و گردای<sup>۱۲</sup> گاز پیاده گردیده است. این الگوی ریاضی به منظور دمایی دو موتور دیزل اروپائی و امریکایی بکار گرفته شد و نتایج عددی با نتایج بدست آمده از آزمون بر روی این دو موتور مقایسه و اعتبارسنجی گردیده است.

راتنراج<sup>۱۳</sup> [۱۰]، در پژوهش خود، چندراهه خروجی را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی اجزاء محدود نمود. این شبیه‌سازی بر روی چندراهه خروجی EM429 با ۴ مجرا و لحاظ کردن ۸ عدد پیچی که آن را به بستار متصل می‌سازد، انجام گرفته است. ماده سازنده بستار و پیچ‌ها، آلومینیوم در نظر گرفته شده است. توزیع دما در چند راهه خروجی به صورت نقطه به نقطه<sup>۱۴</sup> توسط نرم‌افزار با رعایت دانه بندی صحیح و در نظر گرفتن شرایط دمایی داخل و خارج چندراهه خروجی انجام شده است. در تحقیق حاضر، تحلیل اجزاء محدود تنش‌های حرارتی در چندراهه خروجی موتوری ۴ استوانه بنزینی پرخوران با در نظر گرفتن شرایط دمای کاری دقیق، و احتساب تغییرات خواص کشسان ماده با درجه حرارت تعیین گردیده است. به منظور تعیین دقیق شرایط مرزی دمایی، با انجام آزمون دمایی بر روی چندراهه خروجی، دمای گازهای خروجی و دمای سه نقطه بحرانی روی سطح چندراهه استخراج شده است. ساختار پژوهش، مطابق با شکل ۱ است.

8 Ashwani Kumar

9 Q. Fan

10 M. Chen

11 B. Folton

12 Turbine

13 David Rathnaraj

14 Point by Point

1 Plastic strain

2 Yuanfo

3 Mamiya

4 Delprete

5 Rosso

6 Gosmez

7 Deuster

شکل ۲: اتاق آزمون و آزمون دمایی

جدول ۱: رویه آزمون دمایی

ردیف	سرعت موتور rpm	مقدار بازشدگی دریچه
۱	۳۵۰۰	٪ ۱۰۰
۲	۴۰۰۰	٪ ۱۰۰
۳	۴۲۵۰	٪ ۱۰۰
۴	۴۵۰۰	٪ ۱۰۰
۵	۴۷۵۰	٪ ۱۰۰
۶	۵۰۰۰	٪ ۱۰۰
۷	۵۲۵۰	٪ ۱۰۰

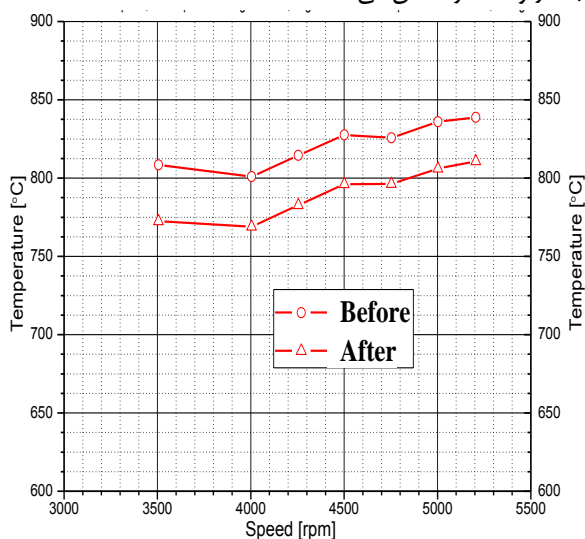


شکل ۱: ساختار تحلیل

## ۲- آزمون دمایی سطح چندراهه خروجی

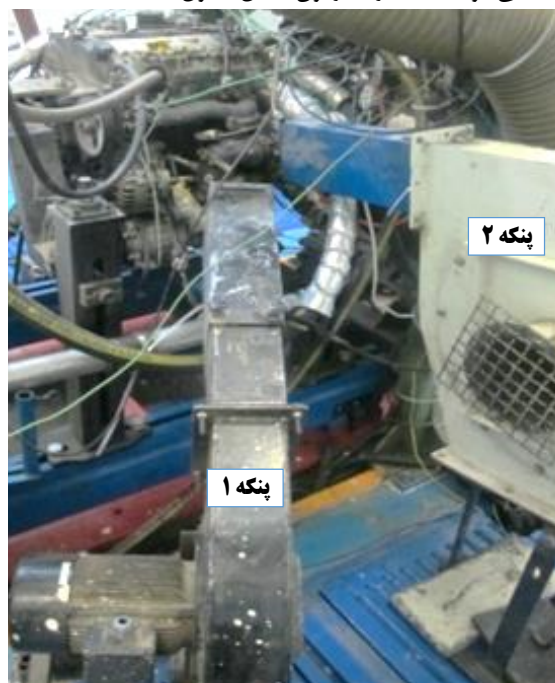
به منظور وارد نمودن ویژگی‌های مکانیکی قطعات درگیر شبیه‌سازی متناسب با تغییرات دما، آزمون دمایی روی چندراهه خروجی اجرا شد. دمای گازهای خروجی و دمای سه نقطه بحرانی روی سطح چندراهه خروجی، به وسیله قرار دادن دماسنج بر روی آن استخراج گردید. شکل ۲ تصویری از مجموعه آزمایشگاهی برای انجام آزمون دمایی را نشان می‌دهد. موتور مورد نظر، چهاراستوانه خطی پرخوران با سوخت بنزین است. با استفاده از مبدل آب، دمای مطلوب ۹۰ درجه سانتی گراد تنظیم می‌شود و بدین ترتیب دمای آب مطابق با استاندارد پایدار می‌گردد. سپس پنکه‌هایی<sup>۱</sup> (شکل ۲) برای شبیه‌سازی جریان هوای خودرویی، که بر اثر حرکت خودرو روی موتور جریان پیدا می‌کند، قرار داده می‌شود. نقاط کاری آزمون شامل جدول ۱ است.

آزمون در حالت تمام بار<sup>۲</sup> انجام می‌شود. به ازای اختلاف ۵۰۰ rpm برای دور موتور، داده<sup>۳</sup> مورد نظر به ازای بسامد ۱ هرتز در مدت ۱ دقیقه جمع آوری می‌شود. یعنی به ازای ۶۰ ثانیه، ۶۰ مقدار برای کمیت مورد نظر داده‌برداری می‌شود. همان طور که در جدول ۱ مشخص شده است، داده‌برداری آزمون از دور ۳۵۰۰ rpm شروع می‌شود و بعد از دور rpm ۴۵۰۰، با گام ۲۵۰ rpm افزایش می‌یابد و تا دور rpm ۵۲۵۰ ادامه پیدا می‌کند. مقدار بازشدگی دریچه ورودی هوا<sup>۴</sup> در هر مرحله به صورت کاملاً باز<sup>۵</sup> است و بعد از ثابت شدن متغیرهای موتور، داده‌برداری انجام می‌شود. در کل، ۷ گام برای آزمون وجود دارد و متناظر با آنها ۷ نقطه روی نمودار خواهیم داشت. شکل ۳، دمای گاز خروجی را در محل قبل و بعد از واکنشگر<sup>۶</sup> نشان می‌دهد.



شکل ۳: دمای قبل و بعد از واکنشگر بر حسب دور موتور

با توجه به فاصله واکنشگر از چندراهه خروجی که بین آنها نمودار شکل ۳، دمای گاز خروجی را در محل قبل و بعد از واکنشگر<sup>۷</sup> نشان می‌دهد.



<sup>5</sup> Fully open

<sup>6</sup> Catalyst

<sup>7</sup> Catalyst

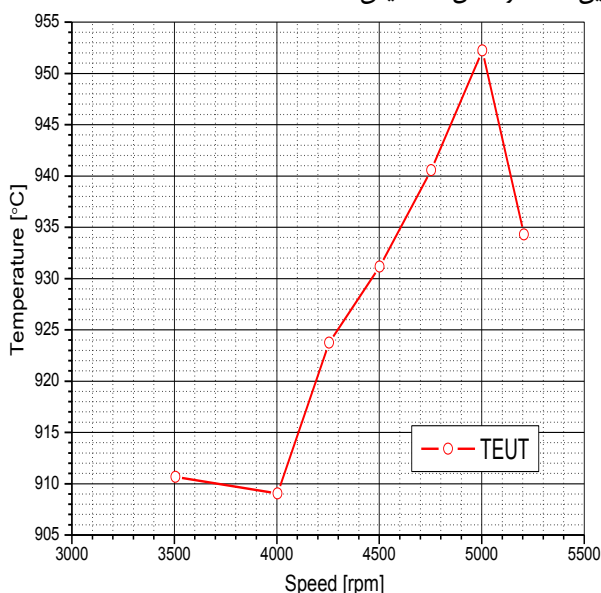
<sup>1</sup> Fan

<sup>2</sup> Full Load

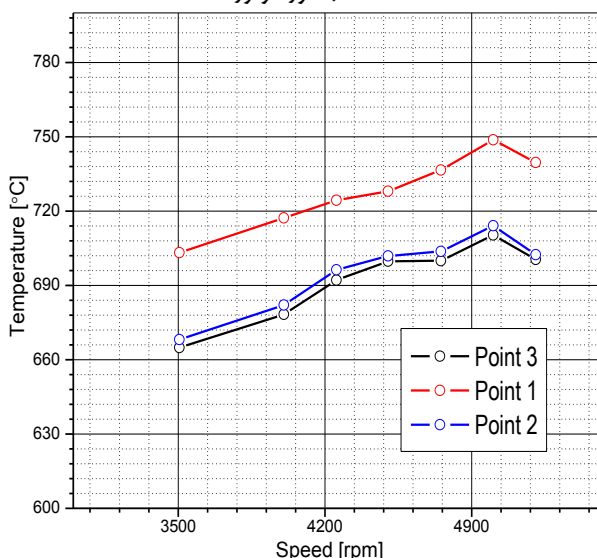
<sup>3</sup> Data

<sup>4</sup> Throttle

دوراندیشی در زمینه ایجاد بیشترین دمای گاز، در آن محل بوده است. بیشترین تجمع دمایی، مطابق با نمودار گازهای خروجی در مجاری، متعلق به مجرا و استوانه ۲ است. باتوجه به اینکه استوانه‌های ۴ و ۱ با هوای محیط در تماس هستند و تنها از یک سمت با استوانه دیگر، مجاورت دارند، معمولاً گاز خروجی از این دو استوانه در سطح و محدوده دمایی سردتری است. رفتار نمودار شکل ۵، شبیه به رفتار نمودار شکل ۴ است. در واقع محل همریختگاه چندراهه خروجی، پیوند و برآیند گازهای مجاری چهارگانه است. نمودار شکل ۶، دمای سطحی چندراهه خروجی در سه نقطه بحرانی را برحسب دور موتور نشان می‌دهد. محل این نقاط در شکل ۷، نمایش داده شده است.

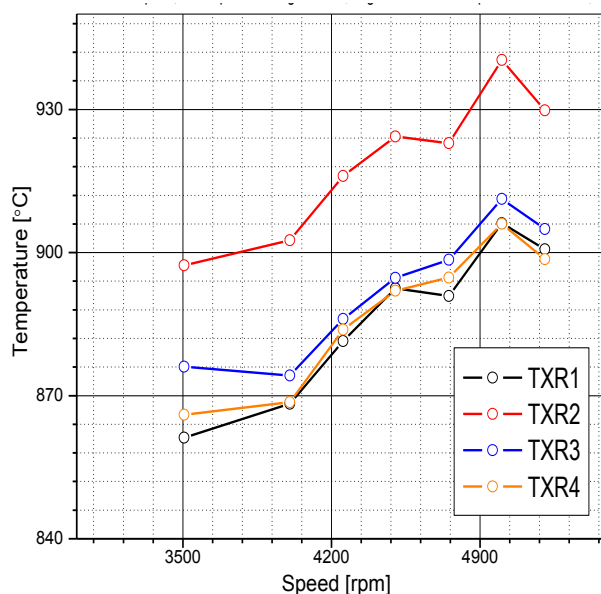


شکل ۵: دمای گاز خروجی در محل همریختگاه چندراهه خروجی بر حسب دور موتور



شکل ۶: دمای سطحی چندراهه خروجی در سه نقطه بر حسب دور موتور

با توجه به فاصله واکنشگر از چندراهه خروجی که بین آنها پرخوران<sup>۱</sup> وجود دارد، نیاز به محاسبه دمای سطح آن به صورت دقیق همانند آنچه در اینجا برای چندراهه خروجی انجام دادیم، نیست لذا تخمینی ساده صرفاً برای یافتن خواص، متناسب با دما، کفایت می‌کند. معمولاً دمای سطح، ۱۵۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد از دمای گاز است لذا چون آماده‌سازی‌ها (چه از نظر هزینه و چه از نظر فنی) برای یافتن دمای گاز خیلی راحت‌تر از آماده‌سازی‌ها برای یافتن دمای سطحی است، به همین دلیل با خوانش دمای گاز در قبل و بعد از واکنشگر، دمای سطح به صورت تخمینی، ۱۵۰-۲۰۰ درجه کمتر در نظر گرفته شده است. نمودار شکل ۴، دمای گازهای خروجی هر استوانه در محل بعد از دریچه‌های خروجی شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ (در شکل ۴ بترتیب با TXR2، TXR1، TXR3 و TXR4 مشخص شده) را نشان می‌دهد.



شکل ۴: دمای گازهای خروجی مجاری ۲، بعد از دریچه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ بر حسب دور موتور

بیشترین مقدار آن برای استوانه ۳ شماره ۲ است که حدود ۹۴۰ درجه سانتیگراد است. روند نمودار با افزایش دور و توان موتور، روندی صعودی است. از دور ۵۰۰۰ rpm به بعد، به دلیل باز و بسته شدن سریع دریچه‌های استوانه، و عدم تأمین هوای کافی، احتراق به صورت کامل صورت نمی‌گیرد، لذا دمای گاز خروجی سرد شده است. اما بیشترین دمای گاز، طبق آنچه که پیش بینی می‌شد در محل همریختگاه ۴ آن، جایی که مجاری ۵ به هم می‌رسند، است. این مقدار تقریباً ۹۵۲ درجه سانتیگراد است (شکل ۵).

به این دلیل یکی از سه حسگر، برای یافتن دمای سطحی در محل همریختگاه چندراهه خروجی کاشته شده است. در واقع این یک

<sup>4</sup> Confluence

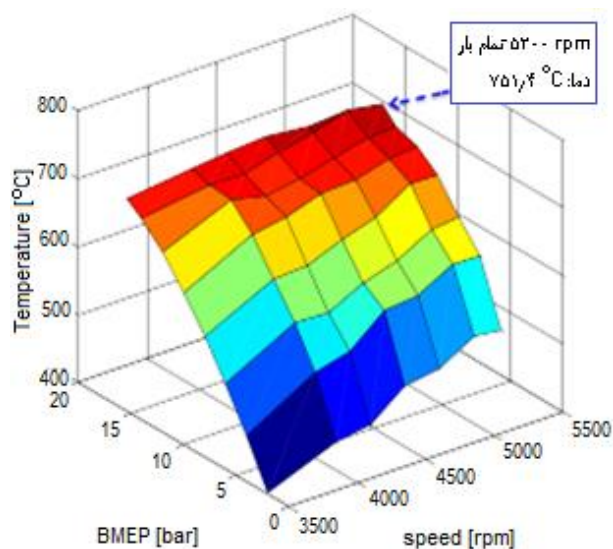
<sup>5</sup> Ports

<sup>1</sup> Turbocharger

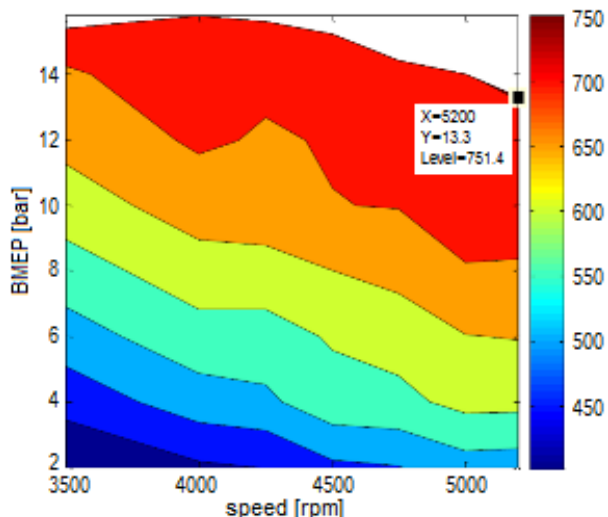
<sup>2</sup> Runners Temperature

<sup>3</sup> Cylinder

نتایج عددی بدست آمده از اندازه گیری دمای نقطه ۱ برحسب دور موتور و توان خروجی مؤثر متوسط ترمزی<sup>۲</sup> در شکل ۸ به صورت یک تصویر سه بعدی نشان داده شده است، و شکل ۹ تصویر خطوط هم‌تراز دمای نقطه ۱ را در صفحه مختصات دور موتور و توان مؤثر متوسط ترمزی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص گردیده، گرمترین دما، در دور ۵۲۰۰ و توان مؤثر متوسط ترمزی ۱۳٫۳ bar اتفاق می‌افتد.



شکل ۸: تصویر دمای نقطه ۱ برحسب دور موتور و توان خروجی

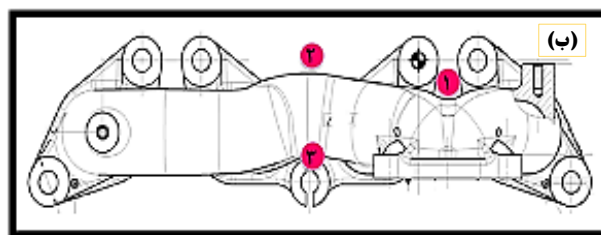


شکل ۹: تصویر خطوط هم‌تراز دمای نقطه ۱ در صفحه مختصات دور موتور و توان مؤثر متوسط ترمزی

### ۳- خواص مواد براساس دمای کاری

یکی از پیش نیازهای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، استخراج خواص مکانیکی قطعات، متناسب با دما است. در شبیه‌سازی حاضر، چندراهه

با مقایسه شکل ۶ و شکل ۴، ملاحظه می‌شود که تغییرات دمای نقاط سطحی چندراهه روندی مشابه تغییرات دمای گازهای خروجی مجاری چهارگانه دارد. همچنین، روند تغییر دما در هر سه نقطه، کاملاً مشابه است لیکن به دلیل شرایط مختلف، از قبیل تهویه و خنک کاری، مقادیر آنها متفاوت است. نقطه ۱ محل تجمع گازهای خروجی است لذا به دلیل تجمع دمایی، داغترین دما را نشان می‌دهد. اختلاف دمای نقاط ۲ و ۳ مقدار اندکی است که کمتر از ۰٫۷ درصد است. لازم به ذکر است که با توجه به هزینه آزمون و آماده‌سازی چندراهه خروجی، از سوراخکاری سطح آن گرفته تا قرار دادن دماسنج<sup>۱</sup> روی آن، این سه نقطه حساس و بحرانی قبلاً با انجام یک تحلیل اجزاء محدود برای توزیع دما در چندراهه، تعیین شده‌اند.



شکل ۷: نمایش نقاط اندازه‌گیری دمای سطحی چندراهه خروجی، (الف) بر روی عکسی از چندراهه (ب) بر روی نقشه از نمای بالای چندراهه

در شکل ۷، نقطه ۱، دقیقاً همان نقطه‌ای است که در محل هم‌ریختگاه گازهای خروجی چندراهه، قرار دارد و قبل از آزمون، به درستی به عنوان گزینه نخست برای تخمین بیشترین دمای سطحی روی چندراهه پیش‌بینی شده بود. هم‌ریختگاه چندراهه خروجی در نزدیکی مجاری گازهای خروجی از استوانه‌های ۳ و ۴ قرار دارد. همچنین، از آنجایی که وسط چندراهه خروجی محلی است که از هر دو سمت با استوانه‌های ۲ و ۳ که گرمترین دمای گاز خروجی را دارند، در تماس است، احتمال یافتن دماهای بیشینه در این نقاط بیش از نقاط دیگر است. لذا یک نقطه در بالا و یک نقطه در زیر محل میانی چندراهه (نقاط ۲ و ۳)، سوراخکاری شده است.

<sup>2</sup> Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

<sup>1</sup> Thermo Couple

جدول ۳: خواص مکانیکی مواد قطعات درگیر در شبیه‌سازی. استخراج از مراجع [۱۱-۱۵].

Material	تشدت کششی نهایی (MPa)	شدت تسلیم (MPa)	ضریب کشسان	نسبت پواسون	ضریب هدایت حرارتی ضریب انبساط حرارتی	ضریب هدایت حرارتی (w/m.k)	نسبت پواسون	ضریب کشسان	شدت تسلیم (MPa)	تشدت کششی نهایی (MPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	بیشینه دما (°C)
AISI 304	۷۵ (MPa)	۲۹	۱۳۹ (GPa)	۰,۳۹	۲۰,۵۸ (w/m.k)	۲۰,۳ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۳۹	۱۳۹ (GPa)	۲۹	۷۵ (MPa)	۷,۹	۹۰۰
Nimonic 80A	۹۰۰ (MPa)	۵۰۰	۳۰۰ (GPa)	۰,۳	۲۲,۳ (w/m.k)	۱۵,۵ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۳	۳۰۰ (GPa)	۵۰۰	۹۰۰ (MPa)	۸,۱	۷۰۰
5115 AISI	۵۵۰ (MPa)	۳۵۰	۲۰۰ (GPa)	۰,۲۷	۴۴,۷ (w/m.k)	۱۴,۰ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۲۷	۲۰۰ (GPa)	۳۵۰	۵۵۰ (MPa)	۷,۸۵	۹۰۰
AISI 409	۷۵ (MPa)	۵۵	۸۳ (GPa)	۰,۲۸	۲۵,۴ (w/m.k)	۱۲,۳ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۲۸	۸۳ (GPa)	۵۵	۷۵ (MPa)	۷,۶	۷۰۰
D5S	۱۵۳ (MPa)	۱۱۷	۹۵,۵ (GPa)	۰,۲۹	۲۰,۹ (w/m.k)	۱۶,۸۹ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۲۹	۹۵,۵ (GPa)	۱۱۷	۱۵۳ (MPa)	۷,۴۵	۷۵۰
JR S235	۲۰۲ (MPa)	۱۳۹	۹۷ (GPa)	۰,۳۱	۲۰,۲ (w/m.k)	۱۶,۵ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۳۱	۹۷ (GPa)	۱۳۹	۲۰۲ (MPa)	۷,۶	۷۰۰
AISI7Mg0.6	۳۰۵ (MPa)	۱۶۷	۱۴۴ (GPa)	۰,۳۱	۱۱,۰ (w/m.k)	۱۴,۰ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۳۱	۱۴۴ (GPa)	۱۶۷	۳۰۵ (MPa)	۷,۶	۵۰۰
	۲۹۰ (MPa)	۲۶۰	۷۳ (GPa)	۰,۳۳	۱۶۰ (w/m.k)	۲۲,۰ (10 <sup>-6</sup> /°C)	۰,۳۳	۷۳ (GPa)	۲۶۰	۲۹۰ (MPa)	۲,۷	۱۵۰

خروجی و پرخوران به همراه بستار مجازی<sup>۱</sup> و واکنشگر، از جمله قطعات درگیر، اند. ضمن اینکه پیچ‌ها و پایه<sup>۲</sup> واکنشگر نیز به موارد فوق اضافه می‌شود. جدول ۲، قطعات به کار رفته در شبیه‌سازی را به همراه جنس آن‌ها مشخص می‌کند.

جدول ۲: قطعات به کار رفته در شبیه‌سازی به همراه جنس آنها

Component	Material *
Can catalyst	AISI 409
Cone catalyst	D5S
Catalyst bracket	ST37-2
Cylinder head	A 357
Exhaust manifold	D5S
Exhaust manifold spacer	AISI 5115
Bolts(TC to Exhaust manifold)	Nimonic 80A
Bolts(Exhaust manifold)	AISI 304
Turbo compressor housing	ZL 101A
Turbo turbine housing	D5S

برای استخراج خواص مکانیکی قطعات درگیر در شبیه‌سازی، شامل چندراهه خروجی، واکنشگر، پرخوران، بستار مجازی، پیچ‌ها، بیش از ۷۸ مقاله و مرجع<sup>۳</sup> و گزارش، مطالعه شده است. نتیجه این مطالعات در جدول ۳، به صورت جمع‌بندی کلی خواص مکانیکی در یک نگاه، متناسب با بیشینه دمای کاری هر ماده، آورده شده است. از مقادیر عددی مندرج در جدول ۳ در شبیه‌سازی اجزاء محدود حاضر استفاده به عمل آمده است. این نرم‌افزار محصول شرکت فرانسوی داسو سیستمز است. آباکوس قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین شبیه‌سازی غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار دارای مجموعه جزءهای بسیار گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این جزءها شبیه‌سازی کرد. برای ۷ ماده در جدول ۳، خواص آن‌ها متناسب با دما آورده شده است. اما در ارتباط با ماده ZL 101A، با توجه به اینکه تنجار پرخوران به نسبت دیگر اجزاء درگیر در شبیه‌سازی، تاثیر کمتری دارد، تنها دو خاصیت مکانیکی ضریب پواسون برابر با ۰,۳۳ و ضریب کشسان برابر با ۷۰ MPa در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، هدف از انجام آزمون دمایی یافتن محدوده دمایی کاری اجزاء درگیر در شبیه‌سازی است. با یافتن خصوصیات مواد متناسب با دامنه دمایی کاری بیشینه آنها، جدول ۳ استخراج گشت، که از اطلاعات مندرج در آن برای شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. جنس قطعات مطابق با آنچه توسط شرکت ایپکو پیشنهاد گردیده است، اند.

<sup>3</sup> HANDBOOK

<sup>1</sup> Dummy Cylinder Head

<sup>2</sup> Bracket

#### ۴- نرم افزار

نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> از جمله نرم افزارهای قدرتمند مهندسی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود<sup>۲</sup> در بازار است. مهمترین مزیت آباکوس در بهره گیری از آن در این مطالعه، قابلیت تحلیل شکست و ترک است. گرچه این پژوهش مستقیماً به بررسی موضوع شکست نمی پردازد ولی مقدمه ای برای ورود به تحلیل رشد ترک های حرارتی در چندراهه است. نوع دانه بندی های آباکوس در مقایسه با دیگر نرم افزارهای مشابه، قابلیت اطمینان بیشتری را در ارائه نتایج دقیق فراهم می کند.

#### ۵- شبیه سازی

روش شناسی<sup>۳</sup> شبیه سازی چند راهه خروجی بر پایه چهار مرحله زیر استوار است:

۱- شبیه سازی اجزاء محدود تمامی قطعات

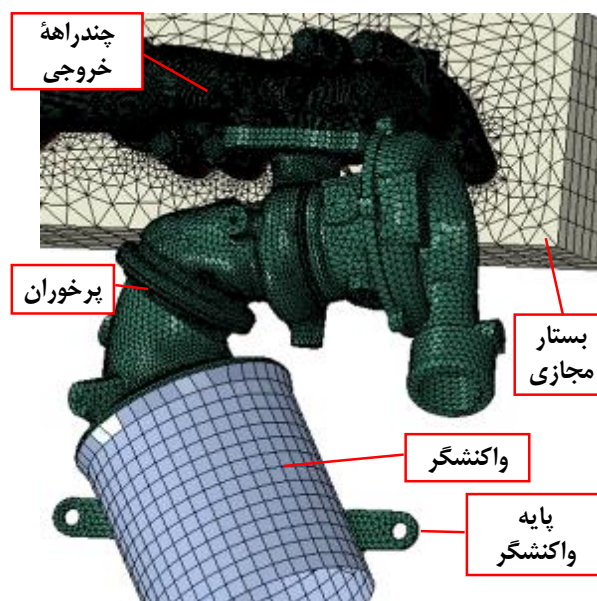
۲- شبیه سازی فصل مشترک تماس ها

۳- تحلیل حرارتی (خواص مواد، فصل مشترک تغییرات حرارتی)

۴- تحلیل ساختاری (قیود شبیه سازی، بارها، پدیده های تماسی)

تحلیل ساختاری مربوط به اعمال بارگذاری ها و تعریف شرایط مرزی مکانیکی می شود. نوع مقید کردن شبیه سازی در قسمت های مختلف بررسی می شود و از بخش های مهم است. پایه واکنشگر به صورت گیردار، کاملاً مقید می شود. تمامی قیود مکانیکی مجموعه اجزاء، از گشتاور گرفته تا جابجایی، بر روی شبیه سازی در قسمت مربوطه اعمال می شود. واکنشگر به صورت آزاد در نظر گرفته شده است لیکن بستر مجازی به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده، و تمامی درجات آزادی آن محدود می گردد. توزیع دما در مجموعه قبلاً توسط یک تحلیل FSI تعیین می شود. این توزیع دما به صورت یک میدان دمای از پیش تعریف شده<sup>۵</sup> به شبیه سازی ساخته شده در آباکوس نسبت داده می شود، و تحلیل تنش های حرارتی براساس آن انجام می شود. دلیل این کار این است که شرایط واقعی روی شبیه سازی اعمال شود. چون شبیه سازی در واقعیت به صورت دفعی در شرایط بحرانی تحلیل قرار نمی گیرد، لذا برای نرم افزار در حقیقت شرایط یک لحظه قبل از حالت مورد نظر تعریف می گردد.

مطابق شکل ۱۰، شبیه سازی شامل بستر مجازی، چند راهه خروجی، پیچ های اتصال چندراهه به بستر، لایه چندراهه خروجی، فاصله اندازه های چندراهه، پرخوران، واکنشگر و پایه آن است. چندراهه خروجی به وسیله ۸ پیچ و فاصله انداز، به بستر متصل می شود. محل اتصال پایه واکنشگر به واکنشگر به صورت یک جوش، شبیه سازی شده است. قیود و برهم کنش های بین چند راهه خروجی و پرخوران، پرخوران و واکنشگر، به صورت گیردار<sup>۶</sup> تعریف شده اند. همچنین، بستر مجازی و پایه واکنشگر، ثابت می شوند. گازهای خروجی از طریق مجاری و صفحات اتصال<sup>۷</sup> چند راهه که متصل به بستر هستند، به سمت پرخوران و از آنجا با عبور از واکنشگر، توسط لوله های تخلیه، به داخل جو تخلیه می شوند. در تحلیل تنش های حرارتی چند راهه خروجی، بارهای مکانیکی که به علت فشار گاز داخلی ایجاد می شوند، از بارهای حرارتی به مراتب کمتر هستند لذا از آنها صرف نظر می شوند. شکل ۱۰، همچنین انواع مختلف جزءها را نشان می دهد. از سه نوع جزء برای دانه بندی به وسیله نرم افزار hypermesh 13 نسخه ۳۲ بیتی، استفاده شده است. چند راهه خروجی، شامل ۵۴۱۰۰۱ جزء شش وجهی است. بدنه پرخوران دارای ۷۵۸۱۶ جزء است که نوع آن نیز همانند چندراهه خروجی به صورت شش وجهی است. تعداد جزءهای شش وجهی ورودی تنجار ۱۸۵۲۰ عدد است. هر فاصله انداز، دارای ۳۵۵۵ جزء خطی مربعی است که با احتساب ۸ عدد فاصله انداز، جمع کلی آنها، ۲۸۴۴۰ عدد می شود. تعداد کل جزءهای شبیه سازی ۶۷۰۵۱۸ عدد برآورد شده است.



شکل ۱۰: شبیه سازی اجزاء محدود مجموعه چند راهه

تحلیل حرارتی از قسمت های مهم شبیه سازی و شبیه سازی است. با توجه به روش FSI<sup>۴</sup>، ابتدا با تحلیل CFD ضریب انتقال حرارت جابجایی بدست می آید و سپس توزیع دمای نقطه به نقطه روی چندراهه استخراج می شود.

<sup>5</sup> Predefined Field

<sup>6</sup> Clamped

<sup>7</sup> Flanges

<sup>1</sup> Abaqus

<sup>2</sup> Finite element method (FEM)

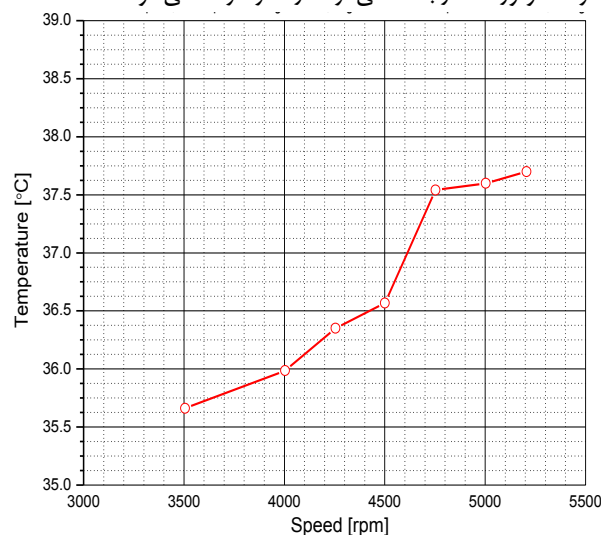
<sup>3</sup> Methodology

<sup>4</sup> Fluid-Structure Interaction

در اینجا قابل ذکر است که روند شبیه‌سازی اجزاء محدود برای بررسی رشد ترک در چند راهه خروجی، همانند سازوکار نشان داده شده در شکل ۱ است، با این تفاوت که یک ترک کوچک اولیه در نقاط بحرانی که بیشترین تنش‌ها را نشان می‌دهند، قرار داده می‌شود. هم‌اکنون شبیه‌سازی رشد ترک در چندراهه توسط این مؤلفین در حال انجام است، که خود در مقاله مجزائی ارائه خواهد شد.

## ۶- تحلیل حرارتی

با توجه به نوع تحلیل اجزاء محدود مورد نظر ما، که استفاده و بهره‌گیری از ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h$ ) است، تعیین شرایط مرزی حرارتی شامل دمای سیال عبوری از چندراهه خروجی و دمای هوای محیط اطراف موتور، لازم و ضروری است. همانطور که در نمودار شکل ۱۱ مشخص شده است، دمای هوای محیط اطراف موتور ( $T_{AMB}$ ) که از آزمون دمایی روی موتور حاصل شده است، در دور ۵۰۰۰ rpm، که بیشترین دمای چندراهه خروجی آنجا اتفاق می‌افتد، برابر با ۳۷٫۶ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، که نزدیکی زیادی با مقدار متوسط در نظر گرفته شده دارد. نقطه مطلوب دمای محیط برای اتاق، روی ۳۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است، لیکن بسته به تجهیزات اتاق، برای محدوده ۳۷٫۷-۳۵٫۵ rpm در حالت تمام بار، بین ۳۷٫۷-۳۵٫۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شده است که اختلاف آن ناچیز است. با توجه به این دمایی‌ها، در تحلیل تنش‌های حرارتی چندراهه، دمای محیط اطراف موتور ۳۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات دمای محیط اطراف موتور بر حسب دور موتور بدست آمده از آزمون دمایی روی موتور

همچنین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی گازهای خروجی،

## ۷- تحلیل تنش‌های حرارتی

### ۷-۱- معادلات حاکم

در تحلیل سه بعدی مواد الاستیک خطی معادلات تنش- کرنش به صورت ذیل بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 2e_{xy} \\ 2e_{yz} \\ 2e_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma_{ij}$  مؤلفه‌های تنش، ضرایب  $C_{ij}$ ها مؤلفه‌های سختی ماده و  $e_{ij}$  مؤلفه‌های کرنش هستند.

معادله (۱) به صورت نگارش استاندارد تانسوری زیر قابل بیان است:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (2)$$

که در آن،  $C_{ijkl}$  تانسور کشسان مرتبه ۴ است. قابل ذکر است که در این تحقیق مؤلفه‌های تانسور کشسان تابع دما در نظر گرفته می‌شود، یعنی  $C_{ijkl} = C_{ijkl}(T)$ .

یک میدان کرنش کلی، ناشی از هر دو اثر مکانیکی و حرارتی است. در محدوده نظریه تغییر شکل‌های کوچک خطی، کرنش کل می‌تواند به صورت مجموع مؤلفه‌های مکانیکی و حرارتی به صورت ذیل بیان گردد:

$$e_{ij} = e_{ij}^{(M)} + e_{ij}^{(T)} \quad (3)$$

اگر  $T_0$  دمای اولیه باشد و  $T$  دمای دلخواه باشد، کرنش‌های حرارتی در یک جامد بدین شکل نوشته می‌شوند:

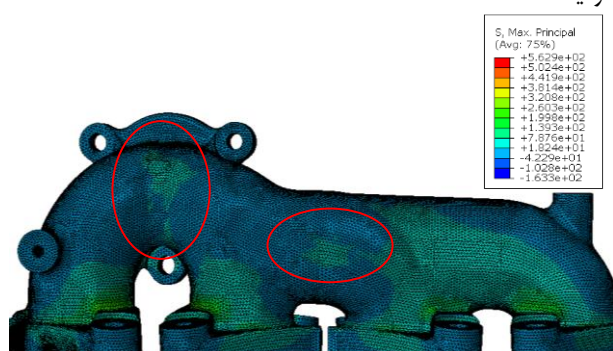
$$e_{ij}^{(T)} = \alpha_{ij}(T - T_0) \quad (4)$$

که در آن،  $\alpha_{ij}$  تانسور ضریب انبساط حرارتی است. با در نظر گرفتن معادلات متناظر تبدیلات تنش-کرنش، معادله ۲، با احتساب مؤلفه حرارتی کرنش، به صورت ذیل بیان می‌شود:

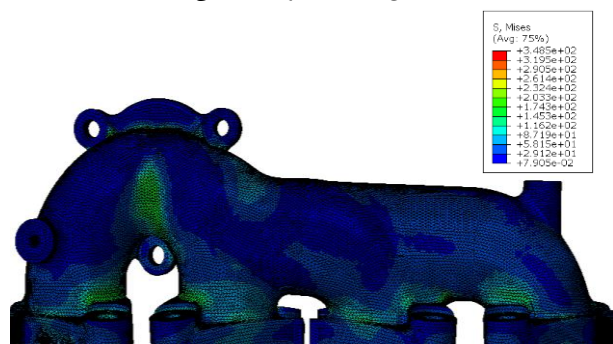
$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} - \beta_{ij}(T - T_0) \quad (5)$$

بترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ است. در هر یک از این شکل‌ها آن سمتی از چندراهه نشان داده شده که محل ایجاد حداکثر مقدار آن مؤلفه تنش قابل دیدن باشد. با توجه به اینکه خصوصیات مکانیکی مواد و دیگر ملزومات تحلیل بر مبنای واحد طول میلیمتر در نظر گرفته شده اند، مقادیر میادین تنش باید در  $1E06$  ضرب شود. مقادیر نشان داده شده در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ بر حسب MPa اند.

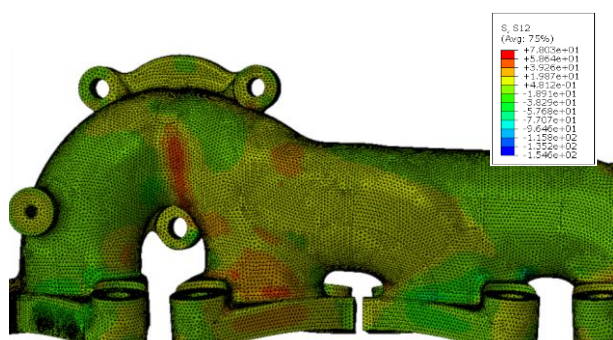
شکل ۱۲، توزیع تنش بر اساس معیار بیشترین تنش عمودی را نشان می‌دهد. بجز نواحی اطراف پیچ‌ها که در آن تمرکز تنش وجود دارد، بیشینه مقدار تنش عمودی در محل هم‌ریختگاه چندراهه، جایی که مجاری به هم می‌رسند و همینطور روی قسمتی از بدنه قرار دارد. این نقاط بترتیب با یک دایره و یک بیضی در اطراف آنها مشخص گردیده‌اند.



شکل ۱۲: نمایش توزیع تنش عمودی اصلی حداکثر در چند راهه و محل‌های مقادیر بیشینه آن



شکل ۱۳: نمایش توزیع تنش فن‌مایز در چند راهه



شکل ۱۴: نمایش توزیع تنش ترسکا در چند راهه

$\beta$ ، تانسور مرتبه دو شامل مؤلفه‌های گرما-کشسان<sup>۱</sup> است. این معادله را قانون اساسی گرما-کشسان دوهمال-نیومان<sup>۲</sup> می‌نامند.

با توجه به مؤلفه‌های میدان تنش  $\sigma_{ij}$ ، تنش مؤثر معیار فون مایز،  $\sigma_F$ ، از معادله ۶ حاصل می‌شود.

$$\sigma_F = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy})^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

بر اساس معیار فون مایز، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که تنش مؤثر از حد نهایی شکست ماده بیشتر گردد.

طبق معیار بیشترین تنش عمودی، زمانی شکست اتفاق می‌افتد که تنش عمودی از حد نهایی شکست ماده بیشتر شود. برای معیار ترسکا، مطابق معادله ۷، هنگامی که بیشترین تنش برشی از نصف حد نهایی شکست بیشتر شود، خرابی روی می‌دهد.

$$T_{xy} \geq \frac{S_y}{2} \quad (۷)$$

## ۲-۷- شبیه‌سازی و تحلیل اجزاء محدود

مانند شبیه‌سازی حرارتی، در اینجا نیز لازم است ابتدا شرایط مرزی مکانیکی مجموعه چندراهه را تعیین نمایم. شرایط مرزی مکانیکی شامل پیش‌بار پیچ‌های اتصال چندراهه خروجی به بستار، اتصال چند راهه خروجی به پرخوران، اتصال پرخوران به واکنشگر، اتصال واکنشگر به پایه آن و ثابت شدنش است. نیروی پیش‌بار پیچ‌های اتصال چندراهه خروجی به بستار براساس گشتاور بستن پیچ‌ها،  $14,5$  KN است. گشتاور بستن پیچ‌ها با استفاده از آچار Torque-meter بدست می‌آید. اتصالات بین اجزاء درگیر ذکر شده، به صورت کاملاً گیردار مهار شده‌اند. این شرایط مرزی را در نمونه اجزاء محدود چندراهه خروجی که در محیط آباکوس ساخته شده، اعمال می‌نمایم.

اکنون به منظور انجام پردازش تنش گرمایی مجموعه چندراهه، توزیع دما در مجموعه چندراهه که قبلاً در تحلیل حرارتی تعیین گردیده، به صورت یک میدان دمای از پیش تعریف شده به شبیه‌سازی ساخته شده در آباکوس نسبت داده می‌شود. همچنین، محدوده تغییرات دما در چندراهه در قسمت خواص مواد وارد گردیده، به طوری که نرم‌افزار در محاسبات تنش، خواص ماده را در هر نقطه مطابق با درجه حرارت آن نقطه تعیین و در محاسبات تنش گرمایی لحاظ می‌نماید. در آخر، با اجرای برنامه، محاسبات تنش‌های حرارتی به انجام می‌رسد. لازم به ذکر است که علاوه بر تنش‌های حرارتی تنش‌های مکانیکی ناشی از پیش‌بار در پیچ‌ها ایجاد می‌شود که البته مقادیر آنها فقط در نواحی اتصال‌ها قابل توجه است. نهایتاً با اجرای برنامه، نتایج اجرای برنامه در بخش بعد آورده شده است.

## ۸- نتایج تحلیل تنش

توزیع تنش‌های نرمال اصلی حداکثر در شکل ۱۲ به صورت طیف رنگی نشان داده شده است. همچنین توزیع تنش‌های فن‌مایز و ترسکا

<sup>2</sup> Duhamel-Neumann

<sup>1</sup> Thermo-Elastic

بی‌دریغی که در مقاطعی از این تحقیق با این مؤلفان داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

### مراجع

- [1] Zhang Yan, L. Z., Cracking failure analysis and optimization on exhaust manifold of engine with CFD-FEA coupling, SAE International, 2014
- [2] C. Z. Yuanfu, et al, Simulation and experimental study on the thermal loads of exhaust manifold, Automotive Engineering, 2012
- [3] N. M. Mamiya, et al, Thermal fatigue life of exhaust manifolds predicted by simulation" SAE Technical, 2004.
- [4] C. Delprete, C. Rosso, Exhaust manifold thermo-structural simulation methodology, SAE International, 2005
- [5] U. D. T. Gocmez, U. Deuster, An integral engineering solution for design of exhaust manifolds, SAE International, 2009
- [6] A. K. Ashwani Kumar, et al, Thermo-mechanical analysis of 321-austenitic stainless steel exhaust manifolds of a diesel engine based on FEA, Int. Conf. on Advances in Communication, Network, and Computing, Elsevier, 2014
- [7] Q. Fan, et al, Coupled analysis of thermal flow and thermal stress of an engine exhaust manifold, SAE Technical, 2004.
- [8] M. Chen, Y. Wang, W. Wu, and J. Xin, Design of the exhaust manifold of a turbo-charged gasoline engine based on a transient thermal mechanical analysis approach, SAE International, 2015
- [9] B. Fulton, et al, Exhaust manifold temperature observer model, SAE Technical Paper, 2014.
- [10] J. (n. d.) Rathnaraj, Thermomechanical fatigue analysis of stainless steel exhaust manifold, IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ), 2012.
- [11] P. I. Fontaine, Ni-resist type D5S- an improved material for turbocharger housing, SAE Technical Congress and Exposition, Cobo Hall, Detroit, USA, February 25-29, 1980,.
- [12] Primary Aluminum Casting alloys handbook, Aluminum Rheinfelden GmbH ALLOYS Sales and Customer Service.
- [13] Elevated temperature physical properties of stainless steels handbook, British Stainless Steel Association, 2016
- [14] High-temperature characteristic of stainless steel, A DESIGNERS' Handbook Series
- [15] Handbook of stainless steel, Steel & Tube Company, New Zealand Stainless Steel Development Association

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ معیارهای فن مایز و ترسکا نیز با ضریب اطمینان کمتر، نتایج معیار بیشترین تنش عمودی را تأیید می‌کنند. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تنش بر اساس دو معیار فن مایز و ترسکا نیز در محل هم‌ریختگاه چندراهه است.

### ۹- نتیجه گیری

در این مقاله مطابق با روش تعامل سازه و سیال (FSI)، ابتدا با تحلیلی حرارتی، توزیع دما در گاز ورودی و خروجی از مجموعه چندراهه و نیز در مجموعه چندراهه بکمک نرم‌افزار CFD شبیه‌سازی گردید. البته، شرایط مرزی دمایی قبلاً با انجام آزمون دمایی روی موتور تعیین شده است. توزیع دما در چندراهه که از تحلیل فوق بدست آمده، با نتایج آزمون دمایی بر روی چندراهه مقایسه و صحت‌گذاری گردید. سپس به منظور انجام پردازش تنش گرمایی مجموعه چندراهه، ابتدا شرایط مرزی مکانیکی مجموعه چندراهه را تعیین نموده، و این شرایط مرزی در نمونه اجزاء محدود چندراهه خروجی که در محیط آباکوس ساخته شده، اعمال گردیده است. همچنین، توزیع دما در مجموعه چندراهه که قبلاً در تحلیل حرارتی تعیین گردیده، به صورت یک میدان دمای از پیش تعریف شده به نمونه اجزاء محدود نسبت داده شده است. علاوه، محدوده تغییرات دما در چندراهه در قسمت خواص مواد وارد گردیده، به طوری که نرم‌افزار در محاسبات تنش، خواص ماده را در هر نقطه مطابق با درجه حرارت آن نقطه تعیین و در محاسبات تنش گرمایی لحاظ می‌نماید. نهایتاً با اجرای برنامه، تحلیل تنش‌های حرارتی به انجام رسیده است. توزیع تنش عمودی اصلی حداکثر، و نیز توزیع تنش‌های فن‌مایز و ترسکا در چندراهه به صورت طیف رنگی ارائه شده. و نقاط بیشینه این مؤلفه‌های تنش معین گردید. با تفحص بر روی توزیع تنش‌های بدست آمده از سه معیار ماکزیمم تنش عمودی، فن‌مایز و ترسکا، چنین ارزیابی می‌شود که محل هم‌ریختگاه چندراهه خروجی وجه مشترک معیارها برای معرفی به عنوان بحرانی‌ترین نقطه تحلیل است. و نواحی اطراف اتصالات بیشترین تنش‌های برشی را دارا هستند.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) که با تشویقات و امکانات آزمایشگاهی و سخت‌افزاری خود از این تحقیق حمایت نموده، اعلام می‌دارند. همچنین، از کارشناسان این شرکت بویژه آقای مهندس حیدر آهنگری کارشناس محاسبات مهندسی و آقای مهندس مهدی رضایی کارشناس آزمون‌های مکانیکی و صحت‌گذاری، بخاطر همکاری‌های



## Thermal Stress Analysis for D5S Cast Iron Exhaust Manifold of a Turbo-Charged Gasoline Engine Based on FSI Method and Temperature-Detection

M. A. Salehnejad<sup>1</sup>, M. Mohieddin Ghomshei<sup>2\*</sup>, A. Mohammadi Dizgoveini<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Karaj Branch-Islamic Azad University, Karaj, Iran, [ma.salehnejad@yahoo.com](mailto:ma.salehnejad@yahoo.com)

<sup>2</sup> Karaj Branch-Islamic Azad University, Karaj, Iran, [ghomshei@kiau.ac.ir](mailto:ghomshei@kiau.ac.ir)

<sup>3</sup> Shahid Rajaei University, Tehran, Iran, [amohammadi@srttu.edu](mailto:amohammadi@srttu.edu)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received: 5 January 2017  
Accepted: 1 June 2017

*Keywords:*  
Exhaust manifold  
FSI method  
FEM analysis  
Temperature dependent properties

### ABSTRACT

This research work is directed toward determining the thermal stresses in a Ni-Resist cast iron commercial exhaust manifold of a turbo-charged gasoline engine. At first, based on a fluid-structure interaction (FSI) method, the steady state temperature distributions in the exhaust gas as well as in the exhaust manifold set are determined, using a CFD model. The thermal B.C.'s previously estimated by conducting a motor temperature detection test. Next, to conduct a thermal stress analysis, a full FEM model for the manifold set has been generated in the Abaqus software, and the mechanical B.C.'s are imposed in that. Also, the temperature distribution resulted from the thermal analysis imputed to the nonlinear FEM model as a predefined temperature field. Also, the range of temperature variations in the manifold is defined for the software material property module, so that Abaqus computes the material properties and stresses in each point according to the local temperature. Finally, executing the FEM model, the thermal stress distributions are computed. The numerical results show that the thermal stresses have the most critical values at the confluence region of the manifold, and maximum shear stresses occur around the bolted joints.

