



## تحلیل ترمومکانیکی چندراهه دود و واکنشگر به روش وابستگی جامد و سیال

آرش محمدی<sup>۱\*</sup>، محمد امین صالح نژاد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مکانیک، مرکز تحقیقات موتور (ایکو)، تهران، ایران، [m\\_salehnejad@ip-co.com](mailto:m_salehnejad@ip-co.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

موتور بنزینی

چندراهه دود

واکنشگر

وابستگی جامد و سیال

### چکیده

طراحی چندراهه دود به دلیل تاثیر روی عملکرد واکنشگر و وجود بارهای حرارتی و ترمومکانیکی بالا، بسیار مهم است. در این مقاله ابتدا تحلیل جریانی گذرای چندراهه دود و واکنشگر با استفاده از نرم افزار فلوئنت انجام شده است و سپس از نمودارهای دما و ضرایب انتقال حرارت برای تحلیل ترمومکانیکی روی سطح داخلی چندراهه دود به کمک نرم افزار متلب در سه چرخه متوالی میانگین زمانی گرفته شده است. توزیع دما و ضریب انتقال حرارت میانگین به عنوان شرط مرزی برای تحلیل ترمومکانیکی پایا روی سطح داخلی چندراهه دود نگاشت شده است. به عنوان اعتبار سنجی نتایج تحلیل حرارتی با داده‌های آزمون تجربی صحت گذاری شده اند. در تحلیل ترمومکانیکی، توزیع تنش در چند راهه ناشی از اعمال بار حرارتی، توزیع تنش پسماند در چند راهه پس از سرد شدن، جابجایی قائم اتصال در اثر اعمال بار حرارتی، تابیدگی اتصال در راستای قائم در اثر کرنش دائمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت اصلاحات هندسی لازم برای بهبود مقاومت سازه‌ای و استحکام آن ارائه شده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

به دلیل دمای بالای گازهای حاصل احتراق و قیدهای جابجایی، چندراهه دود تحت تنش‌های شدید حرارتی قرار می‌گیرد و به همین خاطر غالباً از جنس چدن ساخته می‌شود. یکی از مهمترین وظایف چندراهه دود و واشر آن جلوگیری از نشتی در ناحیه اتصال است. در صورتی که تنش تماسی بین اتصال و بستار از مقدار معینی کمتر شود، گازهای داغ از ناحیه مذکور فرار کرده و باعث سوختن واشر می‌شوند. در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی در حوزه بررسی مقاومت چندراهه دود از جنبه‌های مقاومت استاتیکی و خستگی ارائه شده‌اند. در این میان سهم موتورهای پرخوران، دیزل و تزریق مستقیم به دلیل سختی و بحرانی بودن شرایط کاری، بیشتر بوده است.

دلپرت و همکاران [۲ و ۱] روشی نوین در تحلیل ترمومکانیکی چند راهه‌های دود چدنی ارائه داده و با روش‌های قدیمی تر مقایسه کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که روش پیشنهادی زمان محاسباتی کمتر و دقت بیشتری دارد.

رنبرگ [۳] جریان متلاطم درون چندراهه دود یک موتور دو لیتر پرخوران را بصورت یک بعدی و سه بعدی شبیه سازی کردند. آنها افت فشار کلی چند راهه را بدست آوردند.

سمپات [۴] طراحی چندراهه دود، عملکرد را در یک موتور پرخوران بررسی کردند. ایشان از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری برای طراحی استفاده کرده‌اند.

مدا و همکاران [۵] فعالیت‌های شبیه سازی و آزمایشگاهی برای طراحی چند راهه را بیان کردند. آنها بیان کردند که چند راهه‌های دود بگونه ای طراحی می‌شوند که جریان یکنواخت باشد و بتوانند در مقابل حرارت بالا مقاومت کنند. آنها از دینامیک سیالات محاسباتی و جزء محدود استفاده کردند. ایشان از دینامیک سیالات محاسباتی برای حل همزمان مساله جریان گاز و پوسته جامد استفاده کردند تا توزیع دما در چند راهه را بدست آورند. آنها از جزء محدود برای بررسی دوام آن استفاده کردند. دانگ [۶] از نرم افزار GTPOWER برای بدست آوردن توزیع فشار در ورودی و خروجی به عنوان ورودی برای نرم افزار Star CCM استفاده کردند.

زیین [۷] به منظور پیشبینی شکست حرارتی چندراهه دود، وابستگی همزمان و گذرای دینامیک سیالات محاسباتی و جزء محدود را بکار بردند. آنها از فرمول مانسون-کافین برای عمر شکست حرارتی آن استفاده کردند.

یاموچی و همکاران [۸] در پژوهش خود اثر اضافه کردن عنصر وانادیوم بر مقاومت حرارتی چند راهه چدنی را ارزیابی کرده‌اند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد افزودن این عنصر مقاومت حرارتی و هزینه ساخت را به طرز چشمگیری بهبود بخشیده است.

یکی دیگر از مسائل چالش برانگیز در چند راهه‌های دود، چگونگی آب بندی و جلوگیری از خروج گاز است. اریولات و همکاران [۹] در مقاله

خود با توجه به اعوجاجات ناشی از بارهای ترمومکانیکی در ناحیه اتصال، محل احتمالی خروج گاز را حدس زده‌اند.

فولتون و همکاران [۱۰] در ابتکاری نوآورانه به کمک یک پرخوران دمای گازهای خروجی را با دقت قابل قبولی محاسبه کرده‌اند. در مقاله‌ای که توسط چن و همکاران [۱۱ و ۱۲] انتشار یافته، رفتار خستگی ترمومکانیکی چندراهه دود یکپارچه با بستار در یک موتور بنزینی پرخوران مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها در این تحقیق به کمک روش جزء محدود نواحی در معرض خطر را شناسایی کرده و پس از صحنه‌گذاری با نتایج آزمون تجربی، پیشنهادهایی در جهت بهبود عملکرد و کاهش خطر ارائه داده‌اند.

وایاس و همکاران [۱۳] تحلیل حرارتی و ترمومکانیکی را به صورت همزمان (وابستگی) اجرا کرده و تنش‌های ترمومکانیکی چندراهه دود را استخراج کرده و با نتایج آزمون تجربی صحنه‌گذاری نموده‌اند.

احمد و همکاران [۱۴] در پژوهش خود علاوه بر ملاحظات تنش و جابجایی، پاسخ فرکانسی چندراهه دود را نیز در نظر گرفته و بر این اساس قطعه را تحلیل کرده‌اند.

اروگلو و همکاران [۱۵] طی پژوهشی در مرکز تحقیقات فورد، پس از تحلیل حرارتی مجموعه، به کمک روش جزء محدود در حالت غیرخطی و گذرا مقاومت قطعه در برابر خستگی ترمومکانیکی و همچنین عملکرد آب‌بندی واشر را پیش‌بینی کرده‌اند.

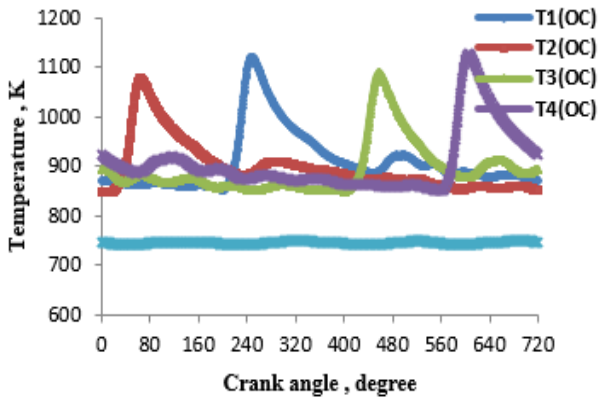
در این مقاله ابتدا تحلیل جریانی گذرای چندراهه دود و واکنشگر با استفاده از نرم افزار فلونت انجام شده است و سپس از نمودارهای دما و ضرایب انتقال حرارت برای تحلیل ترمومکانیکی روی سطح داخلی چندراهه دود به کمک نرم افزار متلب در سه چرخه متوالی میانگین زمانی گرفته شده است.

توزیع دما و ضریب انتقال حرارت میانگین به عنوان شرط مرزی برای تحلیل ترمومکانیکی پایا روی سطح داخلی چندراهه دود نگاشت شده است. سپس تحلیل جزء محدود با نرم افزار اباکوس انجام شده و نتایج تنش، جابجایی و کرنش دائمی آورده شده است. در نهایت اصلاحات هندسی لازم برای بهبود مقاومت سازه‌ای و استحکام آن ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معادلات حاکم بر مدلسازی

معادلات حاکم جریان تراکم پذیر همان معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و معادله گاز ایده آل است. از مدل آشفته  $k-\epsilon$  که برای جریان‌هایی با عدد رینولدز بزرگ بکار می‌رود به همراه قانون تابع دیوار به منظور کاهش زمان محاسبه برای محاسبه جریان در نزدیکی دیوار محفظه احتراق استفاده شده است.

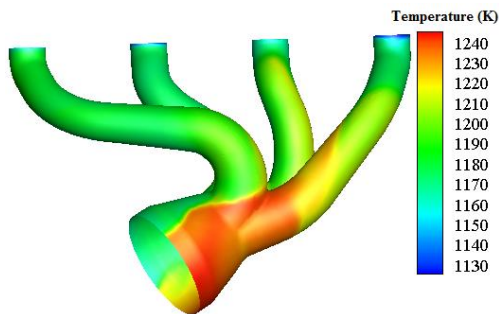


شکل ۳: دمای ورودی چندراهه دود و خروجی واکنشگر بر حسب زاویه میل لنگ

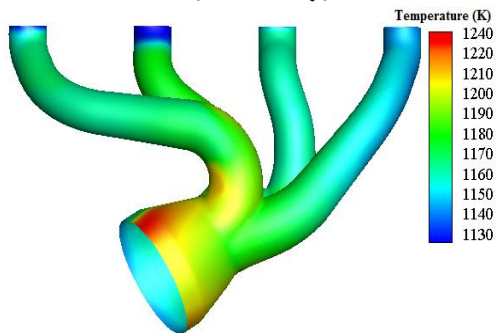
۲-۴- حل گذرای جریان

شرایط مرزی برای تحلیل ترمومکانیکی ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای گاز روی سطح داخلی چندراهه دود است. بنابراین لازم است ابتدا تحلیل جریان چندراهه دود بصورت گذرا انجام در نرم افزار فلوئنت شود و در انتها از نمودارهای بدست آمده در طی چند چرخه میانگین زمانی گرفته شود.

در شکل ۴ نمودار دمای گذرا در زمانهایی که دریچه دود بیشینه جابجایی را دارد (مطابق شکل ۳ زاویه ۹۴، ۲۷۶، ۴۸۳، ۶۳۶ درجه)، دیده می شود. همانطور که در هر سه شکل دیده می شود در دهانه ورودی واکنشگر بیشترین فشار دما حدود 1240 K دیده می شود. میانگین سطحی دما 1160 K است.



زاویه لنگ ۹۴ درجه

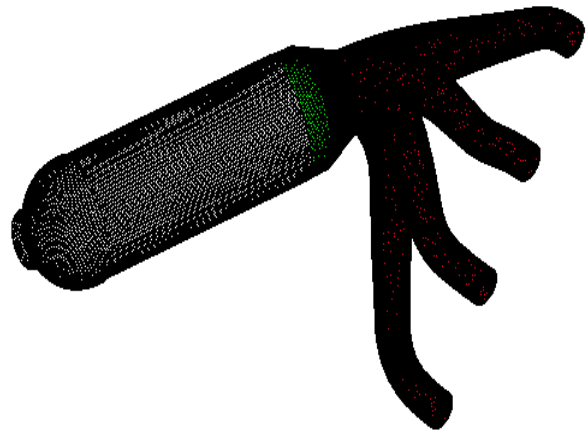


زاویه لنگ ۲۷۶ درجه

شکل ۴: توزیع دما در چندراهه دود

۲-۲- شبکه بندی چندراهه دود و واکنشگر

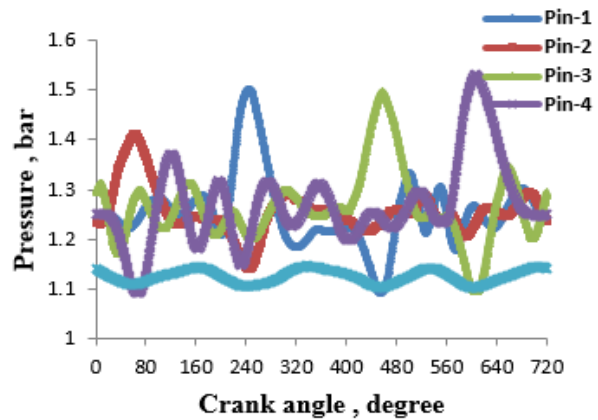
در شکل ۱ شبکه بندی سه طرح دیده می شود. شبکه بندی حدود ۸۰۰ هزار جزء برای هر سه هندسه استفاده شده است. با استفاده از سلولهای شش گوشه و پنج گوشه یک مش ترکیبی در حجم ایجاد می شود. برای کاهش زمان محاسبه، شبکه در نزدیکی سطح، ریز شده است. برای بررسی استقلال از شبکه، از مقدار افت فشار بین ورودی چندراهه دود و خروجی واکنشگر استفاده شده است. افت فشار در واکنشگر ۹،۸ کیلوپاسکال است که نتایج آزمایشگاهی آن ۹،۶ کیلوپاسکال است. بنابراین نتایج شبیه سازی عددی قابل اطمینان است.



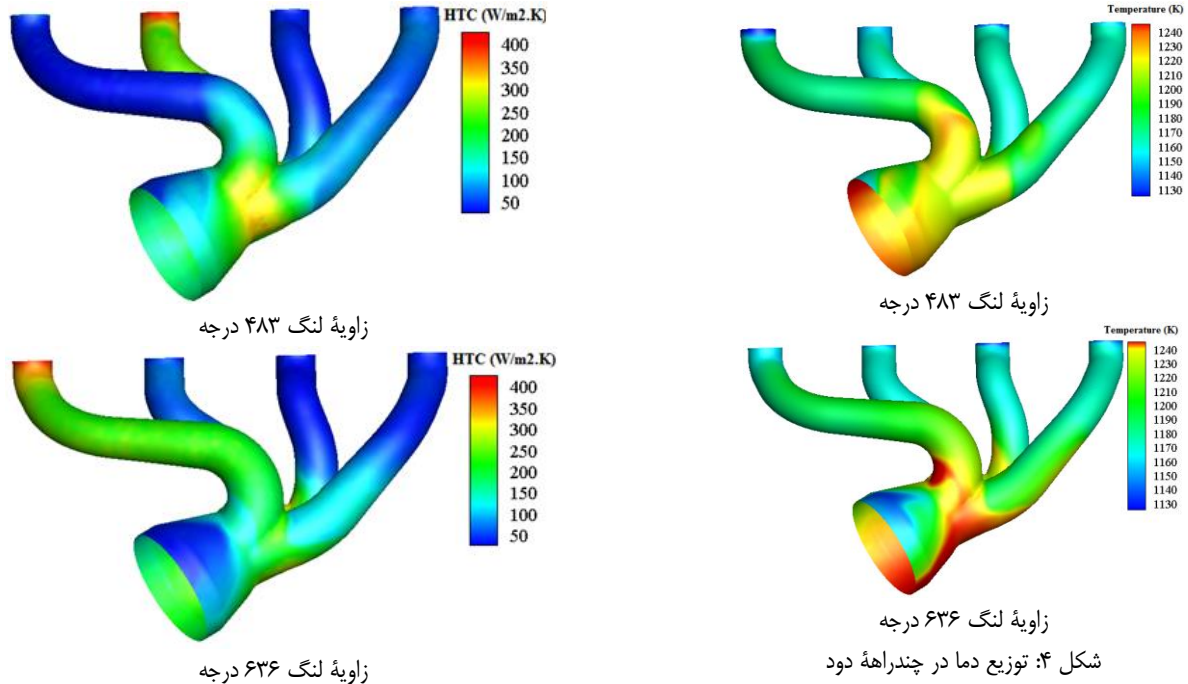
شکل ۱: شبکه بندی چندراهه دود و واکنشگر

۲-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی از نتایج تبادل گاز یک بعدی از نرم افزار جی تی پاور بدست می آید. از داده های دبی جرمی، دما و فشار برای مرزهای مدل استفاده شده است. در شکل ۲ فشار ورودی های چندراهه دود و خروجی واکنشگر بر حسب زاویه میل لنگ آورده شده است. در شکل ۳ دمای ورودی و خروجی واکنشگر بر حسب زاویه لنگ آورده شده است.



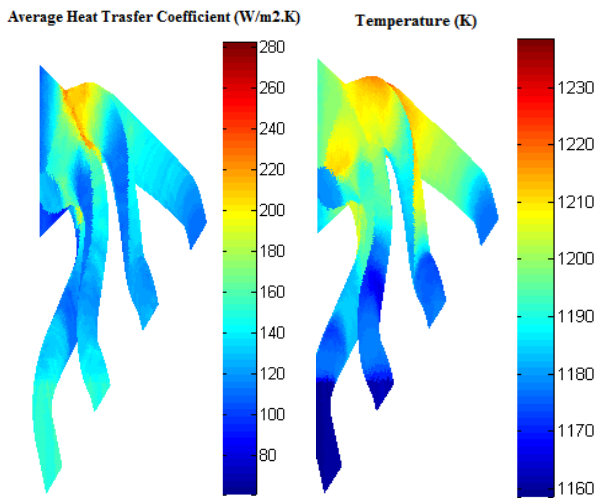
شکل ۲: فشار ورودی چندراهه دود و خروجی واکنشگر بر حسب زاویه میل لنگ



شکل ۵: توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در چندراهه دود

در شکل‌های ۶ و ۷ دما و ضریب توزیع ضریب انتقال حرارت میانگین چرخه‌ای نشان داده شده است. این میانگین گیری بین سه چرخه متوالی (۲۱۶۰ درجه) انجام شده است. برای این منظور ۲۱۶۰ خروجی دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی از نرم افزار فلونت گرفته شده و سپس با استفاده از برنامه نوشته شده نرم افزار متلب از این نمودارها میانگین زمانی گرفته شده است

بیشینه ضریب انتقال حرارت است و مکان آن مطابق شکل در سمت انحنای خروجی است زیرا تندترین سرعت گاز در آن سمت قرار دارد. همانطور که دیده می‌شود بیشینه دما 1235 K است و مکان آن مطابق شکل در سمت انحنای خروجی است.

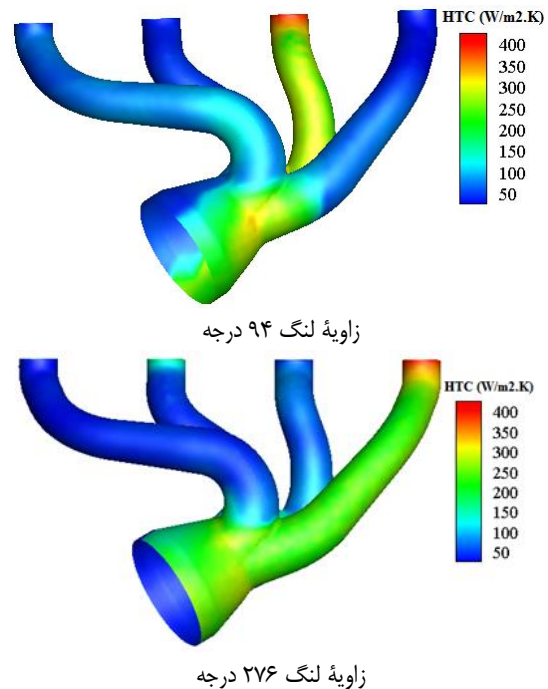


شکل ۷: توزیع ضریب انتقال حرارت میانگین چرخه‌ای در چندراهه دود

شکل ۶: توزیع دمای میانگین چرخه‌ای در چندراهه دود

در شکل ۵ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمانهایی که دریچه دود بیشینه جابجایی را دارد (مطابق شکل ۳ زاویه ۲۷۶، ۹۴، ۴۸۳، ۶۳۶ 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 بالا می‌رود.

مقدار بیشینه ضریب انتقال حرارت 400 W/m2.K در ورودی هر مجرا و در لحظه بیشینه شار جرمی آن است. مقدار کمینه آن 50 W/m2.K است و در ورودی هایی است که دریچه دود در آن لحظه بسته است و یا در حال بسته شدن است و کمترین جریان گاز خروجی وجود دارد.



## ۲-۵- تحلیل ترمو مکانیکی

در قسمت تحلیل ترمومکانیک ابتدا در یک تحلیل حرارتی، توزیع دمایی سرتاسر چند راهه محاسبه می‌شود.

شرایط مرزی این تحلیل (اعم از دما و ضریب انتقال حرارتی جابجایی سطوح داخلی چند راهه) از نتایج تحلیل جریان دود (شکل‌های ۶ و ۷) به دست می‌آید. مقایسه نتایج این تحلیل با آزمون تجربی نشان‌دهنده دقت قابل قبول نتایج حل عددی است. پس از بدست آوردن توزیع دمای چند راهه، نوبت به اجرای تحلیل ترمومکانیکی است. در این حالت بارهای حرارتی و مکانیکی به سامانه اعمال شده و نتایجی چون تنش و جابجایی از آن استخراج می‌گردد.

در شکل ۸ هندسه چندراهه دود، مدل ساده شده بستار، واشر چند راهه، بخش‌هایی از چند راهه هوا، پیچ‌ها و واشر پیچ‌ها نشان داده شده است. به منظور کاهش جابجایی قائم و افقی اتصال و جلوگیری از نشت گاز، چهار طرح پیشنهادی برای چندراهه دود مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲-۵- خواص مواد برای تحلیل ترمومکانیکی

به دلیل دمای بالای مجموعه حین کارکرد، لازم است خواص حرارتی و مکانیکی مواد در دماهای مختلف تعریف شوند. از طرفی احتمال تغییر شکل دائمی در چندراهه دود وجود دارد. لذا برای مطالعه این پدیده لازم است خواص دائمی آن نیز در نظر گرفته شوند. در جدول ۱ جنس چندراهه دود، مدل ساده شده بستار، واشر چند راهه، چند راهه هوا، پیچ‌ها و واشر پیچ‌ها آورده شده است. در جدول ۲ خواص تغییر شکل دائمی تنش تسلیم و کرنش دائمی چدن SiMo در اثر دما آورده شده است.

جدول ۱: جنس قطعات و خواص حرارتی و مکانیکی آنها [۱۶]

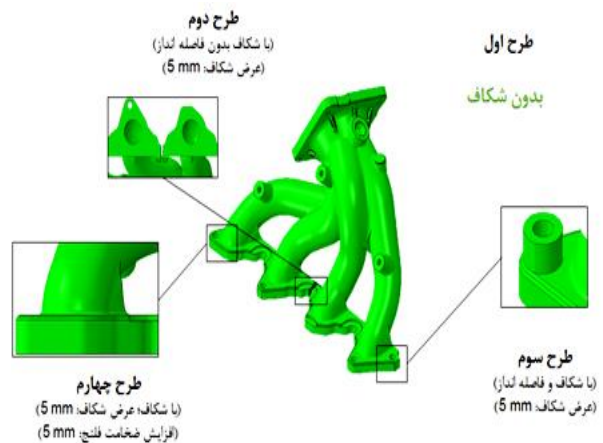
قطعه	جنس	ضریب رسانش حرارتی	ضریب انبساط حرارتی	مدول یانگ (GPa)	رفتار دائمی	ضریب پواسون
چندراهه دود	چدن SiMo	3.2×104	(1.11/1.21/1.35)× 10-5 @ (20/600/900) °C	160/81/18 @ (20/600/900) °C	Yes	0.29
بستار و چند راهه هوا	آلومینیوم	(1.6/1.4/1.38)× 105 @ (20/150/200) °C	(2.11/2.27/2.35)× 10-5 @ (20/250/1000) °C	75/71/60 @ (20/150/250) °C	No	0.31
واشر چندراهه	-	4.0×102	1.17×10-5	80	No	0.25
پیچ و واشر	فولاد	4.5×104	1.17×10-5	206.8	No	0.29

جدول ۲: خواص دائمی چدن SiMo [۱۶]

دما (°C)	کرنش دائمی	تنش تسلیم (MPa)
0	0	431
	0.0025	519
	0.02	571
	0.03	585
450	0	326
	0.0025	405
	0.02	429
	0.03	430
720	0	53
	0.0025	69
	0.02	74
	0.03	74

## ۲-۶- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی شبیه‌سازی جزء محدود بر مبنای شرایط واقعی اتاق آزمون تعریف شده‌اند. در تحلیل حرارتی، دما و ضریب انتقال حرارت سطوح داخلی از تحلیل جریان به دست می‌آیند. دمای محیط و ضریب انتقال حرارت سطح خارجی نیز به ترتیب 42 W/m2.K [۱۱] و 450C فرض شده است.



شکل ۸: هندسه چندراهه دود با در نظر گرفتن محل نصب روی بستار موتور طرح‌های پیشنهادی برای چند راهه

این پدیده با معادله (۴) توصیف می‌گردد.

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (4)$$

که در آن  $\epsilon_T$  کرنش حرارتی،  $\Delta T$  تغییرات دما و  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی است که جزء خواص ذاتی ماده مورد استفاده به شمار می‌رود. بنا بر برقراری اصل برهم نهی در تحلیل‌های خطی، کرنش مجموع را می‌توان حاصل ترکیب قانون تعمیم یافته هوک و انبساط حرارتی مجموعه دانست. لذا طبق معادله (۵) می‌توان نوشت:

$$\epsilon = C\sigma + \epsilon_T \quad (5)$$

که در آن:

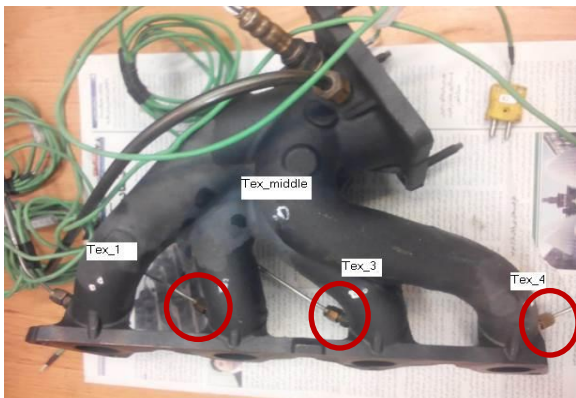
$$\epsilon_T = \alpha \Delta T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (6)$$

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

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج تحلیل حرارتی

به منظور حصول اطمینان از نتایج حل عددی، مقادیر دما در محل حسگرهای آزمون تجربی با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. در شکل ۹ در سه مکان که در آن ترموکوپل کار گذاشته شده است، دیده می‌شود. در جدول ۳ مقایسه قابل مشاهده هستند. 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 ۹: محل نصب حسگرهای دما رو چند راهه

جدول ۳: مقایسه نتایج دمای چند راهه بر حسب درجه سلسیوس

Tex_4	Tex_3	Tex_1	
~570	~610	~550	شبیه‌سازی
594.9	624.9	568.6	تجربی
~4%	~2%	~3%	درصد خطا

بارهای مکانیکی و حرارتی در سه گام به مجموعه اعمال می‌شوند. این گام‌ها عبارتند از:

بستن پیچ‌ها: در این گام تمامی پیچ‌ها به طور همزمان با پیش بار ۱۰/۸ کیلو نیوتن بسته می‌شوند.

گرم شدن: توزیع دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی در این گام به گره‌های مجموعه اعمال می‌شوند.

سرد شدن: به منظور مطالعه تنش‌های پسماند و تابیدگی چند راهه مجموعه تا دمای محیط (۴۵ درجه سلسیوس) سرد می‌شود.

در نقاطی که احتمال تمرکز تنش و یا تغییر شکل دائمی (در محل گلولی چند راهه یا نقاط تماس) وجود دارد، شبکه بندی ریزتری به کار گرفته شده است. در سطوح تماس نیز برای همگرایی بهتر روش انطباق گره به گره اعمال شده است.

#### ۲-۷- معادلات حاکم تحلیل ترمومکانیکی

در تحلیل حرارتی، 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 فرم معادله (۱) می‌آید.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن  $T$  دما است. با داشتن شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی در محفظه احتراق، راهگاه‌های آب و روغن، ورودی هوا و خروجی دود در بستر و انتقال حرارت با محیط، حل معادله (۱) توزیع دمای مجموعه موتور را به دست می‌دهد. در تحلیل ترمومکانیکی، با فرض همگن بودن مواد سازنده قطعات، معادله حاکم بر مسأله، قانون تعمیم یافته هوک است که فرم ماتریسی آن در معادله (۲) نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

یا به طور ساده تر:

$$\epsilon = C\sigma \quad (3)$$

که در آن  $\epsilon$  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 تغییرات دما و رفتار انبساطی و انقباضی، سامانه در معرض کرنش حرارتی قرار می‌گیرد.

### ۳-۲- نتایج تحلیل ترمومکانیکی

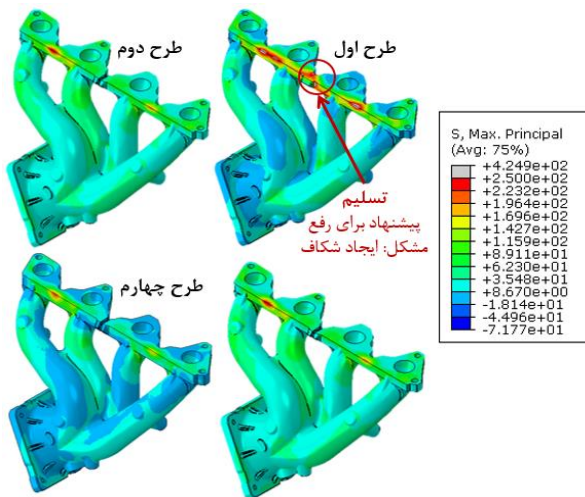
اهداف اجرای تحلیل ترمومکانیکی به طور عمده در موارد زیر خلاصه می‌شود:

- بررسی مقاومت سازه‌ای چند راهه و تحمل تنش‌های مکانیکی و حرارتی
- بررسی جابجایی‌ها در ناحیه اتصال و جلوگیری از نشتی دود
- مطالعه مقدار تابیدگی چند راهه و تنش‌های پسماند در اثر ورود به محدوده دائمی

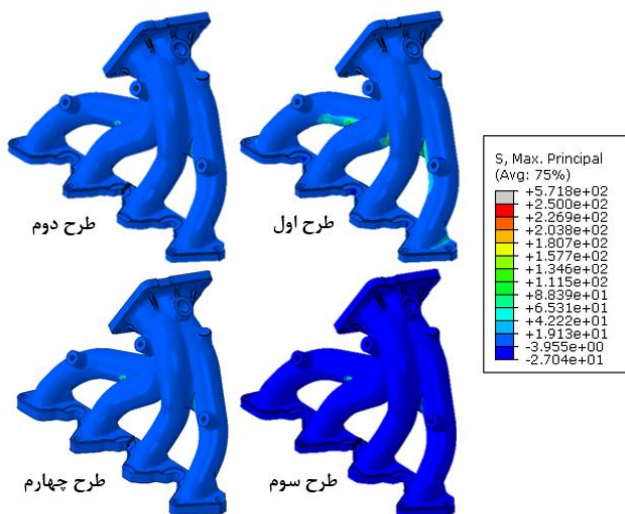
به دلیل تقویت اتصال جابجایی قائم نیز کاهش یافته است. یافتن نواحی دائمی شده چند راهه موضوع بخش بعدی است. شکل ۱۲ بیانگر آن است که در طرح اول بیشینه جابجایی ۰,۳۶ میلیمتر است در حالی که در طرح‌های شکاف دار این مقدار به ۰,۲۸ میلیمتر کاهش یافته است. این امر ناشی از آن است که به دلیل ایجاد شکاف، چند راهه آزادی بیشتری داشته و تغییر شکل آن کمتر در قالب اعوجاج ناحیه اتصال خود را نشان می‌دهد.

### ۳-۵- کرنش دائمی

دلیل اصلی تاب برداشتن و اعوجاج چند راهه، وقوع تغییر شکل دائمی در آن است. به دلیل این پدیده، جابجایی‌های دائمی در قطعه ایجاد شده و منجر به پیدایش تنش‌های پسماند می‌گردد. طراحی و انتخاب مواد چند راهه باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان تنش‌ها در تمامی حالات کارکرد در ناحیه بازگشت‌پذیر باقی بمانند.



شکل ۱۰: توزیع تنش در چند راهه ناشی از اعمال بار حرارتی



شکل ۱۱: توزیع تنش پسماند در چند راهه پس از سرد شدن

### ۳-۳- توزیع تنش

در حوزه بررسی مقاومت سازه‌ای چند راهه لازم است تنش قسمت‌های مختلف چند راهه در همه شرایط کاری پایین تر از مقادیر بحرانی تئوری‌های تسلیم باشد. جنس چند راهه چدن SIMO و از نوع مواد ترد و شکننده است؛ لذا برای بررسی مقدار مقاومت آن، تنش بیشینه کششی معیار قضاوت قرار گرفته است.

نتایج تنش در گام دوم (بار حرارتی) نشان داده شده در شکل ۱۰ از آن است در طرح اول (اتصال یکپارچه) در ناحیه بین لوله‌های ورودی دوم و سوم تنش قابل توجهی وجود دارد. برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است در این ناحیه یک شکاف ایجاد شود.

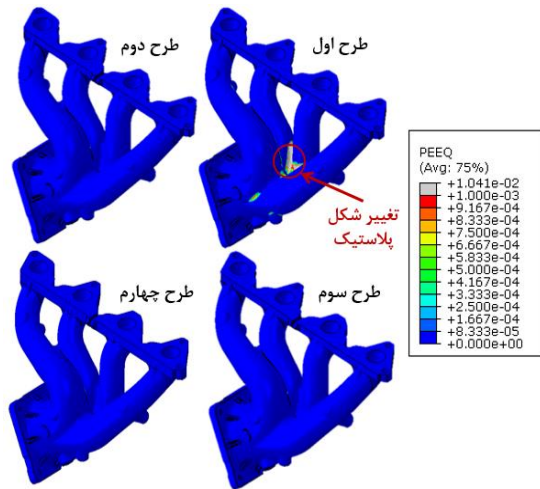
نتایج بررسی طرح‌های بعدی نشان می‌دهد که این کار تأثیر چشمگیری در بهبود توزیع تنش داشته است. در طرح چهارم به دلیل تقویت ناحیه اتصال با افزایش ضخامت، اندکی تنش‌ها کاهش داشته‌اند.

در بخش بعد تنش‌های پسماند حرارتی در مجموعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به وضوح دیده می‌شود که در طرح اول (اتصال یکپارچه) تنش پسماند قابل توجهی در ناحیه اتصال لوله‌های ورودی به یکدیگر وجود دارد و پس از ایجاد شکاف، تنش پسماند در ناحیه یاد شده عملاً به صفر رسیده است. در شکل‌های ۱۱ به وضوح دیده می‌شود که در طرح اول (اتصال یکپارچه) تنش پسماند قابل توجهی در ناحیه اتصال لوله‌های ورودی به یکدیگر وجود دارد و پس از ایجاد شکاف، تنش پسماند در ناحیه یاد شده عملاً به صفر رسیده است.

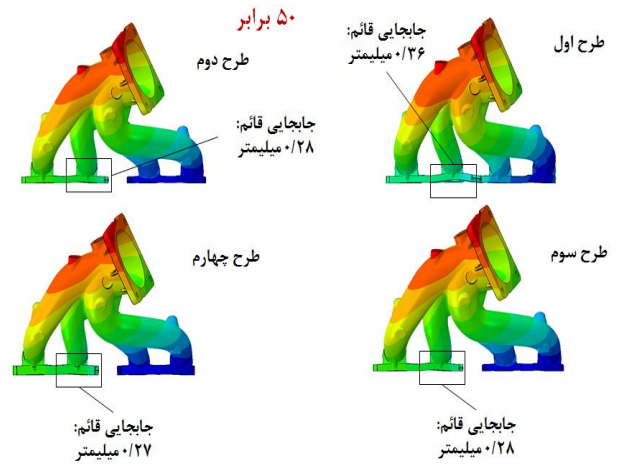
### ۳-۴- جابجایی

کاهش تنش به تنهایی معیار کافی برای داوری درباره عملکرد چند راهه نیست و لازم است کارایی سامانه از جهت جلوگیری از نشت دود نیز بررسی شود. برای این منظور جابجایی قائم اتصال در ناحیه تماس با بستار ارزیابی شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تنش پسماند موجود در ناحیه اتصال لوله‌های ورودی به طور مستقیم در جابجایی قائم ناحیه اتصال و به تبع آن احتمال نشت گاز موثر است.

از این رو کاهش تنش‌های پسماند در منطقه اتصال لوله‌های ورودی منجر به کمتر شدن جابجایی قائم و کاهش احتمال نشتی گاز شده است. در این بین در طرح چهارم (اتصال ضخیم) مشاهده می‌شود که

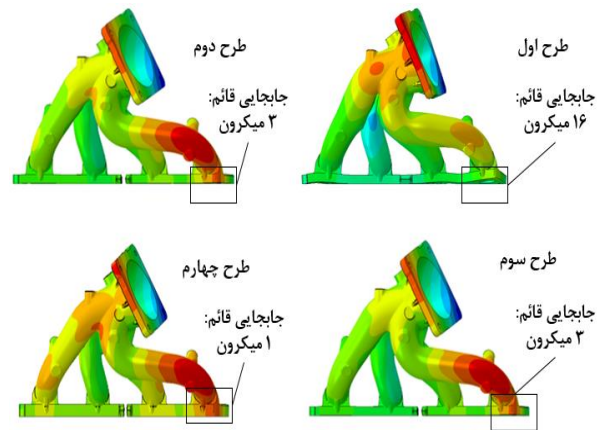


شکل ۱۴: مقایسه مقدار کرنش دائمی معادل میان طرح‌های پیشنهادی



شکل ۱۲: جایجایی قائم اتصال در اثر اعمال بار حرارتی

در شکل ۱۳ تابیدگی اتصال در راستای قائم در اثر کرنش دائمی نشان داده شده است. بیشترین جایجایی ۱۶ میکرون در طرح اول و ۱ میکرون در طرح چهارم است.



شکل ۱۳: تابیدگی اتصال در راستای قائم در اثر کرنش دائمی (مقیاس بزرگنمایی: ۲۰۰ برابر)

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل جریان گذرای جریان در یک چندراهه دود و واکنشگر و و حل ترمومکانیکی در چندراهه دود بررسی شده است. سه ابتدا نتایج دما و ضریب انتقال حرارت به عنوان شرایط مرزی از تحلیل گذرای جریان بدست می‌آید. سپس پس از اعتبار سنجی دما تحلیل ترمومکانیکی، سنجش مقاومت سازه‌ای قطعه در مقابل بارهای حرارتی و مکانیکی، بهبود جلوگیری از نشتی دود و همچنین پیشگیری از ورود به ناحیه دائمی بوده است.

مجموعه در سه گام شبیه‌سازی بستن پیچ‌ها، افزایش دما و سرد شدن مجدد تا دمای محیط تحلیل شده و متغیرهای تنش، جایجایی قائم اتصال و کرنش دائمی معادل استخراج شدند. نتایج حاصله بیانگر آن است که ایجاد شکاف بین راهگاه دوم و سوم و همچنین افزایش ضخامت اتصال توانسته اند مقاومت سازه‌ای مجموعه را بهبود بخشند.

#### فهرست علائم

ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p$
شار حرارتی	$\dot{q}$
دمای سیال	$T$
دمای دیواره	$TW$
ضریب انتقال حرارت جایجایی	$hc$
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	$C$

در شکل ۱۴ کرنش دائمی چندراهه دود نشان داده شده است. معیار دائمی شدن یک ناحیه مقدار کرنش دائمی معادل (در نرم افزار آباکوس PEEQ) است. در صورتی که این کمیت برای یک جزء بزرگتر از صفر باشد، نشان دهنده آن است که تنش در این جزء بیشتر از تنش تسلیم بوده و ماده وارد محدوده تغییر شکل دائمی شده است.

در شکل ۱۴ مقدار کرنش دائمی معادل برای هر چهار طرح مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۴ طرح اول از طرح‌های دیگر بیشتر دائمی شده است و ایجاد شکاف باعث کاهش چشمگیر تغییر شکل دائمی و تاب برداشتن چند راهه گشته است.

## مراجع و منابع

- [10] S. Erpolat, C. Unal, A. Ergan and C. Sever, Assessment of Exhaust Manifold Sealing Performance Using Flange Distortion, SAE Int. J. Engines 5(3):790-793, 2012.
- [11] B. Fulton, M. Van Nieuwstadt, S. Petrovic and D. Roettger, Exhaust Manifold Temperature Observer Model, SAE Technical Paper 2014-01-1155, 2014.
- [12] 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 Int. J. Engines 8(1):75-81, 2015.
- [13] M. Chen, Y. Wang, W. Wu and Q.Cui, Thermal-Mechanical Fatigue Prediction of Aluminum Cylinder Head with Integrated Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine, SAE Technical Paper 2016-01-1085, 2016.
- [14] S. Vyas, A. Patidar, S. Kandreegula and U. Gupta, Multi-Physics Simulation of 6-Cylinder Diesel Engine Exhaust Manifold for Investigation of Thermo-Mechanical Stresses, SAE Technical Paper 2015-26-0182, 2015.
- [15] F. Ahmad, V. Tomer, A. Kumar and P. P. Patil, FEA Simulation Based Thermo-mechanical Analysis of Tractor Exhaust Manifold, CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs, Springer India, 173-181, 2016.
- [16] S. Eroglu, I. Duman, A. Guzel and R. Yilmaz, Durability Analysis of Heavy Duty Engine Exhaust Manifold Using CFD-FE Coupling," SAE Technical Paper 2016-01-0375, 2016.
- [17] M. A. Kenawy, A. M. Abdel-Fattah, N. Okasha and M.EL-Gazery, Mechanical and Structural Properties of Ductile Cast Iron, Egypt. J. Sol., 24 (2001) 151-15
- [1] C. Delprete, C. Rosso, T. Politecnico, Exhaust manifold thermo-structural simulation methodology. SAE paper 2005-01-1076, 2005.
- [2] C. Delprete, C. Rosso, and A. Vercelli, Thermo-Mechanical Analysis of a Cast Iron Exhaust Manifold: a Comparison between the Traditional and a New Methodology, SAE Technical Paper 2010-01-0498, 2010.
- [3] U. Renberg, H. Angstorm, L. Fuchs, A comparative study between 1D and 3D computational results for turbulent flow in an exhaust manifold and in bent pipes, SAE 2009-01-1112, 2009.
- [4] M. K. Sampath, G. Zheng, Y. Zhang, A. Kotrba, CFD optimization of exhaust manifold for large diesel engine aftertreatment systems, SAE 2011-01-2199, 2011.
- [5] [4] L. Meda, Y. Shu and M. Romzek, Exhaust System Manifold Development, SAE Technical Paper 2012-01-0643, 2012.
- [6] K. Haga, I. Hidayha, Y. Shinozaki, Y. Tsuda, T. Ishima, S. Matsumura, Y. Obokata, Flow visualization in exhaust manifold for automobile engine, SAE 2009-28-0005, 2009.
- [7] B. Deng, J. Liu, R. Feng, D. Zhang, The fluid induced vibration analysis on an integrated exhaust manifold, SAE 2013-01-0937, 2013.
- [8] L. Zhieng, X. Wang, Z. Yan, X. Li, Y. Xu, Study on the unsteady heat transfer of engine exhaust manifold based on the analysis method of serial, SAE 2014-01-1711, 2014.
- [9] R. Yamauchi, S. Ishizuka and N. Suzuki, Development of Vanadium-added Heat Resistant Cast Iron for Exhaust Manifold, SAE Technical Paper 2010-32-0073, 2010.



## Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction

A. Mohammadi<sup>1\*</sup>, M. A. Salehnejad<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, [a\\_mohammadi@ip-co.com](mailto:a_mohammadi@ip-co.com)

<sup>2</sup> MSc in Mechanical Engineering, Irankhodro Powetrain Company (IPCo), Tehran, Iran, [m\\_salehnejad@ip-co.com](mailto:m_salehnejad@ip-co.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 20 December 2019

Accepted: 18 February 2020

#### Keywords:

Gasoline engine

Exhaust manifold

Catalyst

Coupled fluid and solid

### ABSTRACT

Design of exhaust manifold is important due to its effects on performance of catalyst, thermal and thermo-mechanical loads. In this paper, first transient analysis of fluid was carried out with FLUENT software, then time-average temperature and heat transfer coefficient contour for three cycle were mapped on inner surface of exhaust manifold with MATLAB software for thermomechanical analysis. For validation of thermal analysis, experimental thermal data was used. In thermomechanical analysis, stress distribution in exhaust manifold due to thermal load, residual stress in exhaust manifold after cooling, vertical displacement of flange due to thermal load, flange torsion in vertical direction due to plastic strain has been validated. Finally, necessary geometrical corrections for optimal design structural resistance and strength of it has been delivered.

