



تحلیل خستگی چندمحوره منی فولد دود با در نظر گرفتن تنش ویسکوزیته

حجت عاشوری *

گروه مهندسی مکانیک، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* نویسنده مسول: ashouri1394@gamil.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

منی فولد دود به علت هندسه پیچیده و شرایط بارگذاری یکی از چالش برانگیزترین قطعات موتور است. این قطعه باید نوسانات سیکلی تنش‌های ترمومکانیکی را در طول عمر خود تحمل کند. بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل ترک‌های خستگی آن لازم و ضروری است. در این پژوهش، تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه منی فولد دود با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس به منظور پیش‌بینی دما و تنش و سپس عمر خستگی با استفاده از معیار چندمحوره صفحه بحرانی براون-میلر و نرم‌افزار MSC-FATIGUE انجام شده است. از ترکیب الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه با قانون تنش ویسکوز به منظور در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته استفاده شده است. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که بیشینه دما و تنش وان-میسز ۷۵۷/۷ درجه سانتی‌گراد و ۳۹۵/۲ مگاپاسکال است و موقعیت آن در ناحیه هم‌ریختگاه است. پس هم‌ریختگاه منی فولد دود موتور ناحیه بحرانی است و احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در آن وجود دارد. عمر خستگی منی فولد دود بدون و با در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته به ترتیب ۹۳۱۰ و ۸۸۵۰ سیکل محاسبه گردید. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی باعث می‌شود که تعداد سیکل‌های گسیختگی ۴۶۰ سیکل یا حدود ۵/۲ درصد بیشتر از میزان مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی منی فولد دود در نظر گرفته شود. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی منی فولد دود آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

کلمات کلیدی: منی فولد دود، تحلیل اجزای محدود و خستگی چند محوره

مقدمه

امروزه با رشد تقاضا برای در اختیار داشتن موتوری با توان و گشتاور بالا، دمای گازهای خروجی موتور به صورت قابل توجهی نسبت به گذشته افزایش یافته است. منی فولد دود یکی از قطعات حساس موتور است که وظیفه آن هدایت گازهای داغ ناشی از احتراق موتور به سمت کاتالیزور یا توربوشاژر است. یکی از سازوکارهای مهم خرابی در منی فولد دود، پدیدایش و رشد ترک خستگی است. بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل ترک‌های خستگی در طراحی منی فولد دود اهمیت زیادی دارد. با توجه به اینکه منی فولد در مدت زمان طولانی در معرض گازهای بسیار داغ حاصل از احتراق موتور قرار دارد، ضروری است تا تنش‌های ترمومکانیکی به وجود آمده در نقاط مختلف آن تحلیل و از عملکرد صحیح آن اطمینان حاصل شود [۱ و ۲]. منی فولد باید مقاومت به شکست خستگی ترمومکانیکی بالایی داشته باشد تا بتواند دوام مورد نیاز را تامین کند. اگر طراحی و جنس منی فولد دود مناسب نباشد، بارهای متناوب ترمومکانیکی موجب خستگی و در نهایت گسیختگی آن می‌شود.

در زمینه تحلیل تنش و خستگی منی فولد دود پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. تحلیل حرارتی منی فولد دود توسط بانولوس و همکاران [۲] مورد مطالعه قرار گرفت و بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده انطباق خوبی وجود داشت. کاستروگویرا و همکاران [۳] بررسی شکست خستگی در منی فولد دود یک موتور هشت سیلندر را انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که برخی از نقاط منی فولد دود موتور وارد ناحیه تسلیم می‌شوند. لیو و همکاران [۴] تجزیه و تحلیل شکست منی فولد دود را با استفاده از مدل سیتقلو انجام دادند. تحلیل‌های آنها نشان داد که گسیختگی منی فولد دود عمدتاً به دلیل خستگی ترمومکانیکی است. تحلیل گسیختگی و بهینه‌سازی منی فولد دود به وسیله لو و همکاران [۵] انجام شد. نتایج تحلیل آنها نشان داد که منی فولد بهینه‌سازی



شده در آزمون دوام دچار گسیختگی نمی‌شود. چن و همکاران [۶] ارزیابی عمر خستگی منی فولد دود یکپارچه با سرسیلندر را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. اثر پره‌های حلقوی بر عمر خستگی کم‌چرخه منی فولد دود توسط عاشوری [۷] مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی ایشان ثابت کرد که تعداد سیکل‌های گسیختگی برای منی فولد دود اصلاح شده تقریباً ۵۵ درصد بیشتر از منی فولد دود اولیه است. ارزیابی پوشش حائل حرارتی بر عمر خستگی کم‌چرخه منی فولد دود توسط عاشوری [۸] انجام شد. نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه ثابت کرد که تعداد سیکل‌های گسیختگی برای منی فولد دود پوشش داده شده تقریباً دو برابر منی فولد دود بدون پوشش است. عاشوری [۹] اثر دما بر آنالیز مودال منی فولد دود را بررسی نمود. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که فشار گاز باید در تحلیل منی فولد دود در نظر گرفته شود. تحلیل خستگی ترمومکانیکی منی فولد دود به وسیله کاردسو و کلودیو [۱۰] انجام شد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که امکان ایجاد ترک ترک خستگی در هیچ نقطه منی فولد دود وجود ندارد. تحلیل خستگی ترمومکانیکی گرمایی - مکانیکی پرچرخه منی فولد دود موتور پرخوران به روش اثر دو سویه سیال و جامد توسط نادری حق و همکاران [۱۱] مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل‌های آنها نشان داد که بیشینه دما و تنش‌های حرارتی در ناحیه هم‌ریختگاه^۱ رخ می‌دهد. شبیه‌سازی خستگی ترمومکانیکی منی فولد دود توسط عاشوری [۱۲] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که ناحیه هم‌ریختگاه منی فولد دود بحرانی است. کوریبارا و همکاران [۱۳] روشی را برای پیش‌بینی خستگی منی فولد دود یک موتور سیکلت با در نظر گرفتن ارتعاش و تنش حرارتی توسعه دادند. طبق تحقیقات آنها، انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. بهبود عمر خستگی پرچرخه منی فولد دود با استفاده از فین‌های حلقوی به وسیله عاشوری [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحلیل او نشان داد که عمر خستگی منی فولد دود اصلاح شده تقریباً ۶۳ درصد نسبت به مدل اولیه افزایش خواهد یافت. عاشوری [۱۵] با استفاده از مدل خستگی سیتقلو^۲ آسیب‌های مکانیکی، اکسیداسیون و خزش در منی فولد دود را بررسی کرد. نتایج تحلیل خستگی ترمومکانیکی ثابت کرد که آسیب مکانیکی نقش برجسته‌ای در خستگی ترمومکانیکی منی فولد دود دارد. تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود و واکنش گر به روش وابستگی جامد و سیال به وسیله محمدی و صالح‌نژاد [۱۶] انجام شد. نتایج تحلیل‌های آنها نشان داد که انطباق خوبی بین نتایج آنالیز حرارتی تجربی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. اثر تعداد مجرای خروجی منی فولد دود بر تنش‌های ترمومکانیکی منی فولد دود به وسیله سنگامش و همکاران [۱۷] مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که منی فولد دود چند مجرای حدود ۲۰ مگاپاسکال نسبت به منی فولد دود تک مجرای تنش کمتری را تحمل می‌کند. پرتو و همکاران [۱۸] اثر استفاده از فین در توزیع دما و تنش در منی فولد دود را ارزیابی کردند. تحلیل‌های آنها نشان داد که استفاده از فین باعث کاهش تنش‌های حرارتی منی فولد دود در حدود ۲۸ درصد می‌شود. تحلیل گسیختگی منی فولد دود به وسیله صالح‌نژاد و همکاران [۱۹] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که امکان گسیختگی در هیچ نقطه منی فولد دود وجود ندارد. تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود با استفاده از مدل الاستوپلاستیک چابوچه به وسیله عاشوری [۲۰] مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که بیشینه دما و تنش در ناحیه هم‌ریختگاه منی فولد دود رخ می‌دهد.

بنابراین می‌توان بیان نمود، تحلیل‌های انجام شده در منی فولد دود به علت در دسترس نبودن اطلاعات رفتار سخت‌شوندگی، نرم‌شوندگی و ویسکوزیته ماده، بیشتر براساس الگوهای ساده رفتاری ماده مثل ارتجاعی - مومسان بوده و کمتر اثر ویسکوزیته در منی فولد دود در نظر گرفته شده است. چدن داکتیل سیلیسیم - مولیدن دارای رفتار ویسکوزیته است که این رفتار نیز باید در نظر گرفته شود [۲۱]. لذا در این پژوهش هدف اصلی شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی منی فولد دود براساس الگوی سخت‌شوندگی

¹ Confluence

² Sehitoglu



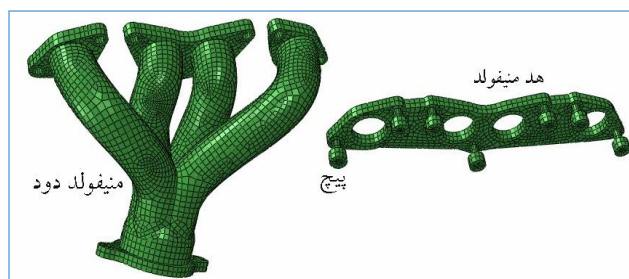
غیرخطی همگن - سینماتیک چابوچه و ترکیب آن با قانون تنش ویسکوزیته و در نهایت تحلیل عمر خستگی منی فولد دود است. قطعات گرم موتور مثل منی فولد دود در سیکل کاری خود تحت دمای بالا و بارگذاری مکانیکی چندمحوری قرار دارند و لذا در ارزیابی عمر خستگی ترمومکانیکی آنها باید از معیارهای خستگی چند محوره استفاده نمود [۲۲-۲۴]. مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ترک‌های خستگی بر روی صفحات خاصی که صفحه بحرانی نامیده می‌شوند، جوانه زده و رشد می‌کنند. برای تحلیل عمر خستگی چند داکتیل سیلیسیم-مولیبدن می‌توان از معیارهای مختلفی استفاده کرد که معیار چندمحوره صفحه بحرانی براون-میلر^۱ انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد [۲۳]. بنابراین در این پژوهش از آن استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مدل اجزای محدود و خواص مواد

برای کاهش زمان، هزینه طراحی و انجام تست‌های کمتر باید از ابزارهای مناسب شبیه‌سازی در تحلیل‌های اجزای محدود استفاده نمود [۲۵ و ۲۶]. روش تحلیل اجزای محدود برای طراحی و توسعه قطعات دارای هندسه پیچیده مثل منی فولد دود موتور در زمان کوتاه و با حداقل هزینه پذیرفته شده است. منی فولد دود یکی از قطعات پیچیده و چالش برانگیز موتور است که تحلیل المان محدود نقش مهمی در بهینه‌سازی آن دارد. با استفاده از این ابزار در پیش بینی دما و توزیع تنش در یک قطعه می‌توان نواحی بحرانی آن را تعیین کرد و پارامترهای هندسی را مورد مطالعه و بهبود قرار داد [۹ و ۱۲].

منی فولد دود مورد بررسی در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. منی فولد دود از جنس چند سیلیسیم-مولیبدن با مدول یانگ ۱۴۵ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۸، و ضریب انبساط حرارتی $11.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ساخته شده است [۲۷]. هد منی فولد دود دارای چهار مجرا است که به لوله‌های منی فولد دود متصل می‌شوند. هد از جنس آلومینیم با مدول یانگ ۶۹ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳۳ و ضریب انبساط حرارتی $22.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ است. منی فولد دود و هد آن به کمک هفت پیچ به سرسیلندر متصل می‌شوند. پیچ‌ها از جنس فولاد با مدول یانگ ۲۰۷ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و ضریب انبساط حرارتی $13.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ساخته شده‌اند. مدل اجزای محدود از ۷۴۵۰ المان هشت گرهی C3D8 و ۲۸۲ المان شش گرهی C3D6 تشکیل شده است [۱۲].



شکل ۱: منی فولد دود و اجزای آن [۱۲]

ماده و الگوی رفتاری آن

در این پژوهش چند داکتیل سیلیسیم-مولیبدن با کاربرد در منی فولد دود موتور، مورد مطالعه قرار گرفته است. آلیاژ موردنظر، شامل ۴/۱٪ عنصر سیلیسیم و ۵۵٪ عنصر مولیبدن است [۲۱]. انتخاب یک مدل مناسب برای ارزیابی خستگی ترمومکانیکی مواد اهمیت زیادی دارد. مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی دارای دو قسمت مدل سخت‌شوندگی خطی و غیرخطی همگن-سینماتیک است. مدل دوم با سطح تسلیم وان-مایسز به کار می‌رود و برای بررسی مسایل با بارگذاری سیکلی مثل

^۱ Brown-Miller



منی‌فولد دود کامل‌ترین و دقیق‌ترین الگو است. الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن- سینماتیک شامل حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار X به عنوان تنش بازگشتی در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش مومسان است. این مدل بر اساس تحقیقات چابوچه بنا نهاده شده است که معادله آن به صورت رابطه زیر است [۲۸]:

$$\dot{X} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - X_{ij}) \dot{\varepsilon}^{PL} - \gamma_{ij} \dot{\varepsilon}^{PL} + \frac{1}{C} \dot{C} X_{ij} \quad (1)$$

که در آن C مدول سخت‌شوندگی سینماتیک، \dot{C} نرخ تغییرات C بر حسب دما و ε^{PL} نرخ کرنش پلاستیک معادل است. در این الگو σ^0 (اندازه سطح تسلیم) ثابت می‌ماند. در رابطه الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن- سینماتیک C و γ ثابت‌های ماده است. تنش بازگشتی کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$X = \sum_{K=1}^N X_K \quad (2)$$

در معادله (۲) با در نظر گرفتن N برابر ۳، متغیر سخت‌شوندگی به سه قسمت تقسیم می‌شود که باعث افزایش دقت این الگو می‌شود. به منظور معرفی این الگو به نرم افزار آباکوس لازم است بخش همگن و بخش سینماتیک به صورت جداگانه تعریف شوند. برای تعریف بخش همگن از رابطه (۳) استفاده می‌شود که b و Q_{∞} ثابت‌های ماده هستند [۲۸]:

$$R = Q_{\infty} (1 - \exp(-b \varepsilon^{PL})) \quad (3)$$

معیار تسلیم f در این مدل با استفاده از معادله زیر بیان می‌گردد [۲۸]:

$$f = |\sigma - X| - k - R \quad (4)$$

که در آن σ ، k و R بترتیب تنش، تنش تسلیم اولیه و متغیر سخت‌شوندگی ایزوتروپ است. جهت در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته از معادله زیر استفاده می‌شود [۲۱]:

$$\sigma_v = \frac{1}{\beta} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\alpha} \right) \quad (5)$$

که در آن α و β ثابت‌های ماده و $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش است.

معادلات حاکم بر تحلیل ترمومکانیکی

در تحلیل حرارتی، قانون حاکم بر سیستم، اصل بقای انرژی یا همان قانون اول ترمودینامیک است. با فرض حالت پایا، ماده همگن و همچنین عدم حضور منبع گرما، معادله ساده شده در فضای سه بعدی به فرم معادله (۱) بیان می‌گردد که در آن X ، Y و Z بیانگر مختصات در فضای سه بعدی و T دما است [۲۹]:

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

با داشتن شرط مرزی دما و انتقال حرارت جابه‌جایی روی سطح داخلی و خارجی منی‌فولد دود و حل معادله (۱)، توزیع دما در منی‌فولد دود بدست خواهد آمد. در تحلیل گرمائی- مکانیکی، با فرض همگن بودن مواد سازنده قطعات، معادله حاکم بر مسأله، قانون تعمیم یافته هوک است که شکل تانسوری آن در معادله (۲) نشان داده شده است [۲۹]:

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

یا به فرم ماتریسی:



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & \frac{1}{E} & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن ε و σ 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 گرمایی، به دلیل وجود قیدهای جابجایی و گرادیان دما که باعث رفتار انبساطی و انقباضی در منیفولد دود می‌شود و سیستم در معرض کرنش گرمایی قرار می‌گیرد. با برقراری اصل برهم نهی، کرنش مجموع را می‌توان حاصل ترکیب قانون تعمیم یافته هوک و انبساط گرمایی دانست [۲۹]:

$$\varepsilon = C\sigma + \varepsilon_T \quad (9)$$

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (10)$$

که α ضریب انبساط حرارتی و ε_T کرنش حرارتی است. 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.

مدل خستگی چندمحوره

قطعات گرم موتور مثل منیفولد دود در سیکل کاری خود تحت دمای بالا و بارگذاری مکانیکی چندمحوری قرار دارند. خستگی ترمومکانیکی مهمترین عامل شکست در این قطعات است و لذا ارزیابی عمر خستگی ترمومکانیکی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نیروهای ناشی از فشار گاز خروجی موتور، همبندی پیچ‌ها بر منیفولد دود در دمای بالا در جهت‌های مختلف اعمال می‌شوند. بنابراین منیفولد دود تحت خستگی چند محوره قرار دارد. واماندگی خستگی که در اکثر قطعات مهندسی رخ می‌دهد عموماً به بارگذاری چند محوره ارتباط داده می‌شود. مدل‌های خستگی چندمحوره شامل مدل‌های تنش پایه، کرنش پایه و صفحه بحرانی است. مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ترک‌های خستگی بر روی صفحات خاصی که صفحه بحرانی نامیده می‌شوند، جوانه زده و رشد می‌کنند. مدل‌های خستگی چندمحوری که آسیب خستگی را به تنش‌ها یا کرنش‌های روی این صفحات مرتبط می‌سازند، مدل‌های صفحه بحرانی نامیده می‌شوند. این مدل‌ها نه تنها عمر خستگی بلکه جهت ترک یا صفحه واماندگی را نیز پیش‌بینی می‌کنند [۳۰]. معیار صفحه بحرانی براون-میلر بر پایه مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی در ترکیب با تغییرات کرنش محوری در صفحه‌ای است که مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی در آن اتفاق می‌افتد [۳۰]:

$$\frac{\Delta \gamma_{max} + S \Delta \varepsilon_n}{2} = A \frac{\sigma_f'}{E} * (2N_f)^b + B \varepsilon_f' * (2N_f)^c \quad (11)$$

در این رابطه $\Delta \gamma_{max}$ بازه تغییرات کرنش برشی بیشینه، $\Delta \varepsilon_n$ دامنه کرنش عمودی در صفحه‌ای است که بیشینه کرنش برشی اتفاق می‌افتد، S ضریبی است که وابسته به جنس قطعه است، σ_f' ضریب استحکام خستگی، E مدول یانگ، $2N_f$ تعداد نیم‌سیکل‌های منجر به شکست، b عدد استحکام خستگی، ε_f' ضریب شکل‌پذیری خستگی یا ضریب داکتیلیتی خستگی و c نمای شکل‌پذیری خستگی یا عدد داکتیلیتی خستگی است. ضرایب A و B از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۳۰]:

$$A = 1.3 + 0.7S \quad (12)$$

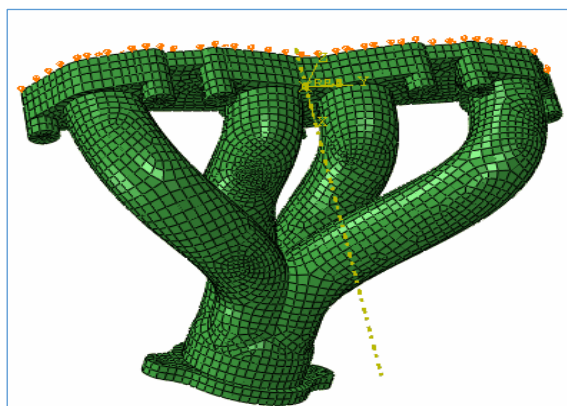
$$B = 1.5 + 0.5S \quad (13)$$



شرایط مرزی در تحلیل ترمومکانیکی

شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی منی فولد دود به صورت زیر تعریف گردیده‌اند:

- ۱- گازهای داغ خروجی موتور جابه‌جایی اجباری در جداره داخلی منی فولد دود اعمال می‌کنند که این اثر با شرایط جابه‌جایی به صورت W/m^2C ۵۰۰ و دمای ۸۱۶ درجه سانتی‌گراد مدل‌سازی شده است.
- ۲- سطح خارجی منی فولد دود در معرض انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و تابش قرار دارد. شرط انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح خارجی منی فولد دود به صورت W/m^2C ۲۵ و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. گسیلمندی^۱ سطح منی فولد دود برای مدل‌سازی انتقال حرارت تابشی ۰/۷۷، در نظر گرفته شده است.
- ۳- دمای فلنج‌های ورودی و خروجی منی فولد دود به ترتیب ۳۵۵ و ۱۲۲ درجه سانتی‌گراد لحاظ شده است.
- ۴- سرسیلندر موتور به صورت هد منی فولد دود مدل‌سازی شده است. به عبارت دیگر همانند شکل (۲) قسمتی از سرسیلندر که به وسیله پیچ به منی فولد دود متصل می‌شود، مدل‌سازی گردیده است. با توجه به اتصال منی فولد دود به سرسیلندر، سطح تماس هد به سرسیلندر به صورت کامل مقید می‌شود. در سطح تماس بین هد و منی فولد از تماس اصطکاکی استفاده شده است. شرط مرزی دیگر فشار گازهای خروجی موتور است که به صورت فشار بر جداره داخلی منی فولد دود اعمال می‌شود.



شکل ۲: شرط مرزی در تحلیل مکانیکی

روند تحلیل خستگی چند محوره منی فولد دود

روند تحلیل خستگی چندمحوره منی فولد دود به صورت زیر است:

- ۱- مدل‌سازی و مش‌بندی منی فولد دود در نرم‌افزار آباکوس
- ۲- تعیین شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی
- ۳- تعیین ثابت‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپ و سینماتیک
- ۴- تحلیل حرارتی منی فولد دود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس
- ۵- تحلیل مکانیکی منی فولد دود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس
- ۶- تحلیل خستگی چندمحوره منی فولد دود با استفاده از نرم‌افزار MSC-FATIGUE و معیار براون-میلر

نتایج و بحث

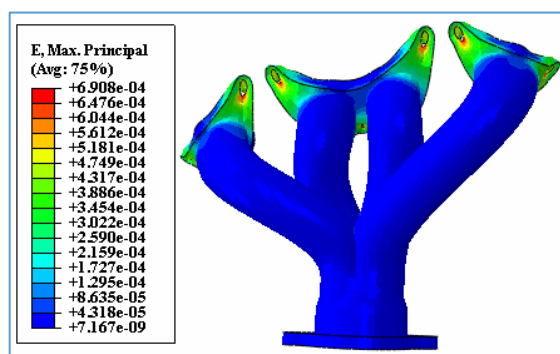
اعمال نیروهای پیش‌بار پیچ‌های منی فولد دود

نیروهای پیش‌بار پیچ‌های منی فولد دود موتور در اولین مرحله از تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود اعمال می‌شود. نیروهای پیش‌بار به صورت یکسان و به میزان ۲۰ کیلو نیوتن به هفت پیچ به منی فولد دود اعمال می‌گردد. از تحلیل استاتیکی جهت انجام

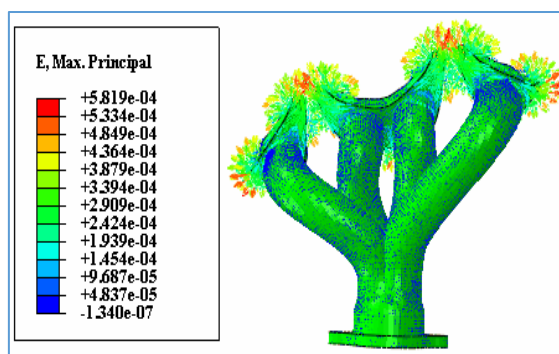
^۱ Emissivity



این عمل استفاده گردید. توزیع تنش بیشینه اصلی در این مرحله در شکل (۳) نشان داده شده است. از این شکل ملاحظه می‌گردد که تنش‌های ناشی از بارهای همبندی^۱ پیچ‌های منی فولد دود در فلنچ‌های آن کششی است. در شکل (۴) بردارهای تنش بیشینه اصلی در این مرحله در منی فولد دود نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که تنش‌های بیشینه اصلی در فلنچ‌های منی فولد دود ناشی از بارهای همبندی پیچ‌های منی فولد دود کششی است که با نتایج مراجع [۱۰، ۱۲ و ۲۰] مطابقت دارد.



شکل ۳: توزیع تنش بیشینه اصلی در مرحله اول بارگذاری منی فولد دود

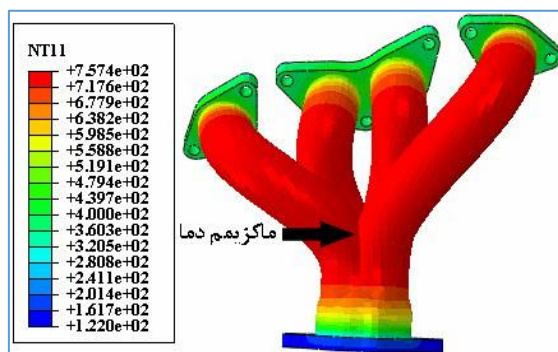


شکل ۴: بردارهای تنش بیشینه اصلی در اثر بارهای همبندی در در فلنچ‌های منی فولد دود

تحلیل حرارتی

هدف تحلیل حرارتی، یافتن توزیع دما در منی فولد دود است. تنش‌های حرارتی در منی فولد دود، تنش‌های غالب و حاکم هستند که منجر به خستگی کم‌چرخه در آن می‌شوند. خستگی کم‌چرخه منی فولد دود ناشی از سیکل تکراری روشن و خاموش شدن موتور است. بنابراین بارگذاری حرارتی مهم‌ترین بارگذاری در تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود است. هرچه توزیع دما در منی فولد دود دقیق‌تر باشد، تنش‌های حرارتی نیز در نقاط مختلف آن دقیق‌تر خواهد بود. افزایش دقت تحلیل حرارتی باعث افزایش دقت تحلیل مکانیکی و تخمین عمر خستگی آن می‌شود. نتایج تحلیل حرارتی منی فولد دود در شکل (۵) نشان داده شده است. از این شکل ملاحظه می‌گردد که بیشینه دما برابر ۷۵۷/۷ درجه سانتی‌گراد است و در محل تقاطع لوله‌های یا هم‌ریختگاه منی فولد دود رخ داده است که ناشی از همگرایی گازهای خروجی موتور در این ناحیه است. در جدول (۱) نتایج تحلیل حرارتی در مراجع [۵، ۹، ۱۲، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۱] نشان داده شده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که ناحیه هم‌ریختگاه ناحیه بحرانی است و بیشینه دما را تحمل می‌کند. این نکته نیز در این پژوهش محقق شده است (شکل ۵). بارگذاری حرارتی اثر قابل ملاحظه‌ای روی عمر خستگی منی فولد دود دارد و میدان دما مناطق بحرانی را مشخص می‌کند.

¹ Assembly



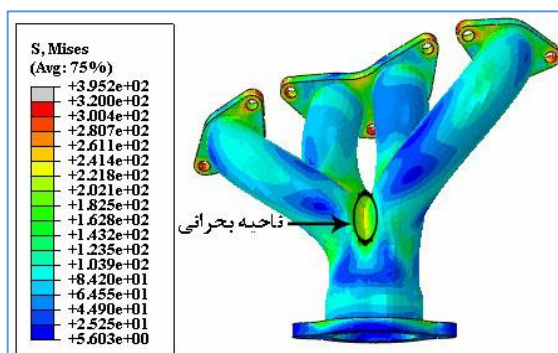
شکل ۵: توزیع دمما در منیفولد دود

جدول ۱: نتایج تحلیل حرارتی منیفولد دود در مراجع مختلف

مرجع	موقعیت بحرانی	دمما (سانتی‌گراد)
۵	همریختگاه	۶۵۱/۵۲
۹	همریختگاه	۷۰۵/۳
۱۲	همریختگاه	۷۵۶/۹
۱۶	همریختگاه	۶۱۰
۱۸	همریختگاه	۷۴۹
۲۰	همریختگاه	۷۵۹/۷
۳۱	همریختگاه	۷۰۸/۶۵

تحلیل مکانیکی

منیفولد دود تنش ناشی از نیروی پیش‌بار پیچ‌ها و تنش حرارتی ناشی از تغییرات دمای موتور را تحمل می‌کند. بنابراین تحلیل ترمومکانیکی تنش‌های اعمالی بر آن لازم و ضروری است. در تحلیل مکانیکی نیروی پیش‌بار پیچ‌ها، نیروی فشار گاز دود خروجی موتور و میدان دمایی محاسبه شده در تحلیل حرارتی در نظر گرفته می‌شود. توزیع تنش وان مایسز در انتهای مرحله بارگذاری مکانیکی در منیفولد دود در شکل (۶) نشان داده شده است. به جز نواحی اطراف پیچ‌های منیفولد دود که در آنها تمرکز تنش وجود دارد، بیشینه تنش در محل همریختگاه منیفولد دود رخ داد.

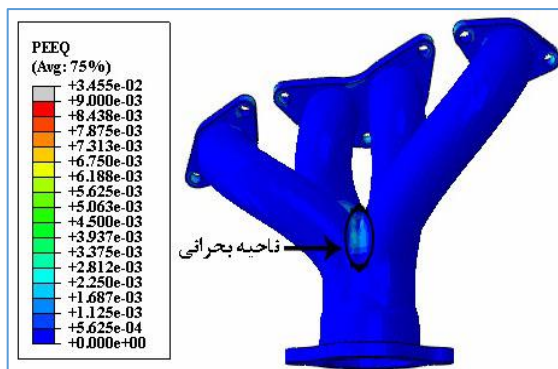


شکل ۶: توزیع تنش وان مایسز در منیفولد دود

توزیع کرنش پلاستیک معادل در شکل (۷) نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد که ماده منیفولد دود وارد ناحیه تسلیم شده است. براساس نتایج مراجع [۳-۵، ۱۰ و ۱۲] جوانه‌زنی ترک‌های خستگی در منیفولد دود در نقاطی از آن مشاهده خواهد



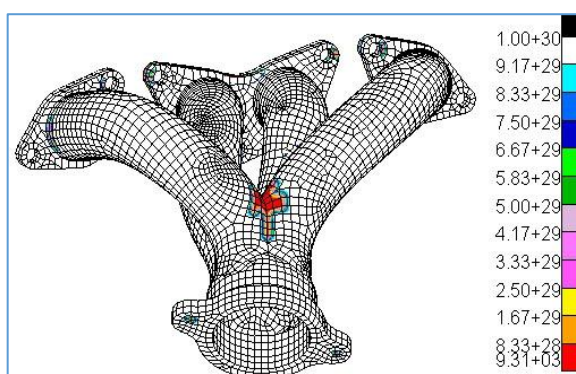
شد که کرنش پلاستیک در اثر تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد می‌شود. کرنش پلاستیک معادل معیاری جهت شناسایی نقاط بحرانی منی فولد دود است. با بررسی شکل (۷) مشاهده می‌گردد که هم‌ریختگاه منی فولد دود موتور ناحیه بحرانی است و احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در آن وجود دارد.



شکل ۷: توزیع کرنش پلاستیک معادل در منی فولد دود

تحلیل خستگی چندمحوره

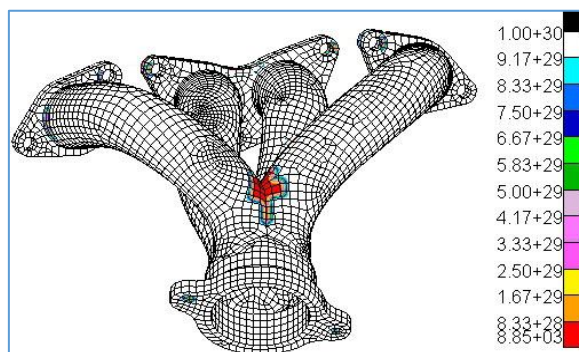
تعداد سیکل‌های گسیختگی منی فولد دود در معیار چندمحوره صفحه بحرانی براون-میلر در شکل (۸) نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌گردد که عمر خستگی منی فولد دود در معیار فوق برای ناحیه بحرانی هم‌ریختگاه ۹۳۱۰ سیکل است. این نتیجه نشان دهنده این موضوع است که عمر خستگی منی فولد دود از ۱۰۰۰۰ سیکل کمتر است و منی فولد دود تحت خستگی کم‌چرخه قرار دارد [۳۰]. حداقل عمر خستگی در ناحیه هم‌ریختگاه مشاهده می‌شود که با نتایج تحلیل ترمومکانیکی مطابقت دارد. در شکل (۹) توزیع تعداد سیکل‌های گسیختگی منی فولد دود با در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های (۸ و ۹) ملاحظه می‌شود که تعداد سیکل‌های گسیختگی منی فولد دود بدون و با در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته به ترتیب ۹۳۱۰ و ۸۸۵۰ سیکل است. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی باعث می‌شود که تعداد سیکل‌های گسیختگی ۴۶۰ سیکل یا حدود ۵/۲ درصد بیشتر از میزان مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی منی فولد دود در نظر گرفته شود.



شکل ۸: توزیع عمر خستگی چندمحوره منی فولد دود بدون تنش ویسکوزیته

اعتبارسنجی تحلیل اجزای محدود

نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که بیشینه دما برابر ۷۵۷/۷ درجه سانتی‌گراد است و در محل تقاطع لوله‌های یا هم‌ریختگاه منی فولد دود رخ می‌دهد که این نتیجه با مراجع معتبر یاد شده مطابقت دارد. در جدول (۱) نتایج تحلیل حرارتی در مراجع مختلف ذکر گردیده است.



شکل ۹: توزیع عمر خستگی چندمحوره منی فولد دود با تنش ویسکوزیته

در مراجع [۲۰ و ۱۲] نیز از مدل اجزای محدود شکل (۱) استفاده شده است که جنس منی فولد دود به ترتیب چدن داکتیل سیلیسیم-مولیبدن-کرم و فولاد است. بیشینه دما در هم‌ریختگاه رخ داده است و به ترتیب $759/6$ و $759/7$ درجه سانتی‌گراد است. حداقل دما با توجه به تحلیل حرارتی، 122 درجه سانتی‌گراد است و در فلنج خروجی منی فولد دود رخ داده است. حداقل دما نیز در مراجع [۲۰ و ۱۲] نیز 122 درجه سانتی‌گراد و در این محل گزارش شده است. این نتیجه صحت تحلیل حرارتی را تایید می‌کند. نتایج تحلیل مکانیکی و عمر خستگی نشان داد که بیشینه تنش و حداقل عمر خستگی در ناحیه بحرانی هم‌ریختگاه رخ می‌دهد که این نتیجه با مراجع [۵، ۹، ۱۲، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۱] مطابقت دارد. نتایج تحلیل ترمومکانیکی و خستگی نشان می‌دهد که هم‌ریختگاه منی فولد دود ناحیه بحرانی است. نتایج تست شوک حرارتی منی فولد دود که در این قسمت دچار گسیختگی می‌شود، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با بررسی نتایج تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با این شکل ملاحظه می‌شود که نتایج شبیه‌سازی شده تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی منی فولد دود با آزمایش‌های تجربی مطابقت دارد.



شکل ۱۰: منی فولد دود گسیخته شده در ناحیه هم‌ریختگاه در تست شوک حرارتی [۳۲]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عمر خستگی منی فولد دود موتور با استفاده از معیار چندمحوره صفحه بحرانی براون-میلر مورد ارزیابی قرار گرفت. از ترکیب الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه با قانون تنش ویسکوز به منظور در نظر گرفتن اثر ویسکوزیته استفاده شده است. با استفاده از تحلیل اجزای محدود امکان پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان توزیع دما، تنش‌های ترمومکانیکی و عمر خستگی منی فولد دود وجود دارد. با استفاده از این ابزار می‌توان نواحی بحرانی آن را تعیین کرد و پارامترهای هندسی را مورد مطالعه و بهبود قرار داد. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که بیشینه دما و تنش وان-میسز $759/7$ درجه سانتی‌گراد و $395/2$ مگاپاسکال است و موقعیت آن در ناحیه هم‌ریختگاه است. توزیع کرنش پلاستیک معادل نشان داد که این پارامتر در هم‌ریختگاه از صفر بزرگتر است و نشان می‌دهد که ماده منی فولد دود موتور در این قسمت وارد ناحیه تسلیم شده است. بنابراین هم‌ریختگاه منی فولد دود موتور ناحیه بحرانی است و احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در آن وجود دارد. نتایج



شبیه‌سازی شده نشان داد که حداقل عمر خستگی کم‌چرخه در ناحیه‌ای که دما و تنش حداکثر است، رخ می‌دهد. نتایج تحلیل عمر خستگی نشان داد که منیفولد دود تحت خستگی کم‌چرخه قرار دارد و حداقل عمر خستگی کم‌چرخه منیفولد دود در ناحیه بحرانی هم‌ریختگاه رخ می‌دهد. عمر خستگی کم‌چرخه منیفولد دود بدون و با در نظر گرفتن اثر تنش ویسکوزیته به ترتیب ۹۳۱۰ و ۸۸۵۰ سیکل است. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی باعث می‌گردد که تعداد سیکل‌های گسیختگی ۴۶۰ سیکل یا حدود ۵/۲ درصد بیشتر از میزان مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر تنش ویسکوزیته در تحلیل عمر خستگی منیفولد دود در نظر گرفته شود. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی کم‌چرخه، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی منیفولد دود آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

مراجع

- [1] Zhang, W., Li, J., Yang, L., Barber, G., Chen, J., Iqbal, O., Singh, K., (2020). Multiple 3D-DIC Systems for Measuring the Displacements and Strains of an Engine Exhaust Manifold, SAE Technical Paper No. 2020-01-0540.
- [2] Banuelos, E., Carlos Navarro, L.H., Sawkar, A.N., Gaikwad, S., (2018). Thermal Map of an Exhaust Manifold for a Transient Dyno Test Schedule: Development and Test Data Correlation, SAE Technical Paper No.2018-01-0126.
- [3] Castro Güiza, G.M., Hormaza, W., Andres, R., Galvis, E., Méndez Moreno, L.M., (2017). Bending overload and thermal fatigue fractures in a cast exhaust Manifold, Journal of Engineering Failure Analysis, 28: pp 138-148.
- [4] Liu, Y., Hsin Chen, Y., Sawkar, N., Xu, N., Gaikwad, S., Seaton, P., Singh, K., (2018). A Thermo-mechanical Fatigue Analysis on a Ductile Cast Iron Exhaust Manifold, SAE Technical Paper No.2018-01-1215.
- [5] Luo, X., Zou, P., Zeng, X., Yuan, X., Li, B., (2020). Failure Prediction and Design Optimization of Exhaust Manifold based on CFD and FEM Analysis, SAE Technical Paper No.2020-01-1166. 2020.
- [6] Chen, M., Wang, Y., Wu, W., Cui, Q., Wang, M.K., Wang, L., (2016). Thermal-Mechanical Fatigue Prediction of Aluminum Cylinder Head with Integrated Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine, SAE Technical Paper No.2016-01-1085.
- [7] Ashouri, H., (2021). Effect of perimeter fins in low cycle fatigue life for exhaust manifold, Journal of engine research, 61: pp 23-34.
- [8] Ashouri, H., (2019). Evaluation of thermal barrier coating in low cycle fatigue for exhaust manifold, Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, 12(4): pp 41-51.
- [9] Ashouri, H., (2021). Evaluation of temperature effect on modal analysis for exhaust manifold, Journal of engine reserch, 61: pp 11-21.
- [10] Azevedo Cardoso, A.D., Claudio Andreatta, D., (2016). Thermomechanical Analysis of Diesel Engine Exhaust Manifold, SAE Technical Paper No.2016-36-0258.
- [11] Naderi Hagh, N., Mohammadi, A., Payganeh, G., (2020). Thermo-mechanical high cycle fatigue analysis of exhaust manifold of turbocharged engine with two way coupling FSI, The Journal of Engine Research, 60: pp 29-45.
- [12] Ashouri, H., (2018). Thermo-mechanical fatigue simulation of exhaust manifolds, Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, 11(2): pp 59-66.
- [13] Kuribara, H., Horikawa, H., Teraguchi, T., Nagata, T., Kitamura, D., (2015). Prediction of Fatigue Strength of Motorcycle Exhaust System Considering Vibrating and Thermal Stresses, SAE Technical Paper No.2015-32-0739.
- [14] Ashouri, H., (2023). Improving High Cycle Fatigue Life in An Exhaust Manifold Using Perimeter Fins with Considering Stress Gradient, International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 16(3): pp 63-70.



- [15] Ashouri, H., (2023). Thermo-mechanical fatigue life prediction for exhaust manifold based on Sehitoglu model considering oxidation and creep damages, *The Journal of Engine Research*, Accepted paper.
- [16] Mohammadi, A., Salehnejad, M.A., (2019). Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction, *Journal of engine research*, 56: pp 55-64.
- [17] Sangamesh, R., Twinkle, R., Chiniwar D.S., Vishwanatha, H.M., Sonda, P., Hiremath, S., (2022). Modelling of single and multi-port manifolds and studying the influence of structural and thermal behaviour on exhaust manifolds used in automotive applications, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01171-x>.
- [18] Partoaa, A.A., Abdolzadeh, M., Rezaeizadeh, M., (2017). Effect of fin attachment on thermal stress reduction of exhaust manifold of an off road diesel engine, *Journal of Central South University*, 24: pp 546-559.
- [19] Salehnejad, M.A., Mohammadi, A., Rezaei, M., Ahangari, H., (2019). Cracking failure analysis of an engine exhaust manifold at high temperatures based on critical fracture toughness and FE simulation approach, *Journal of Engineering FractureMechanics*, 211: pp 125-136.
- [20] Ashouri, H., (2021). Thermo-mechanical analysis for exhaust manifold using elasto-viscoplastic chaboche model, *Automotive Science and Engineering*, 11(4): pp 3682-3692.
- [21] Bartošák, M., Španiel, M., Doubrava, K., (2020). Unified viscoplasticity modelling for a SiMo 4.06 cast iron under isothermal low-cycle fatigue-creep and thermo-mechanical fatigue loading conditions, *International Journal of Fatigue*, 136: pp 1-15.
- [22] Ayatollahi, M., Mohammadi, F., Chamani, H., (2011). Thermo-mechanical fatigue life assessment of a diesel engine piston, *International Journal of Automotive Engineering*, 1(4): pp 256-266.
- [23] Delprete, C., Sesana, R., Vercelli, A., (2010). Multiaxial damage assessment and life estimation: application to an automotive exhaust manifold, *Procedia Engineering*, 2: pp 725-734.
- [24] Alm, J., (2018). Critical plane approach to low cycle thermal fatigue of welds in exhaust manifolds, Master Thesis, Sweden.
- [25] Ashouri, H., Beheshti, B., Ebrahimzadeh, M.R., (2015). Analysis of fatigue cracks of diesel engines cylinder heads, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(1): pp 369-383.
- [26] Ashouri, H., (2015). Finite element analysis of thermo-mechanical stresses in diesel engines cylinder heads using a two-layer viscoplasticity model, *International Journal of Automotive Engineering*, 5(4): pp 2054-2064.
- [27] SAE J2515 Standard, (1999). High Temperature Materials for Exhaust Manifolds.
- [28] Chaboche, J.L., (2008). A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, *International Journal of Plasticity*, 24: pp 1642-1693.
- [29] Saad, M.H., (2005). *Elasticity Theory, Applications and Numerics*, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [30] Stephens, R., Fatemi, A., Fuchs, H., (2001). *Metal fatigue in engineering*, 2nd edition, John Wiley.
- [31] Ashouri, H., (2021), Low cycle fatigue life prediction of an engine exhaust manifold, *Automotive Science and Engineering*, 11(2): pp 3560-3568.
- [32] Londhe, A., Yadav, V., (2007). Thermo-structural Strength Analysis for Failure Prediction and Concern Resolution of an Exhaust Manifold, CAE, R&D, Mahindra and Mahindra Ltd, Automotive Sector, Nasik India.