



Low cycle fatigue life analysis for exhaust manifold considering Elastoviscoplastic effect

Hojjat Ashouri*

Department of Mechanical Engineering, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Exhaust Manifold
Finite Element Analysis
Low Cycle Fatigue Life
Elastoviscoplastic Effect

ABSTRACT

Due to the complex geometry and loading conditions, exhaust manifolds are the most challenging components among all parts of internal combustion engines. They must withstand severe cyclic thermo-mechanical loading throughout their lifetime. Thus, simulation and analysis of fatigue cracks are essential. In this paper, low cycle fatigue (LCF) life analysis of the exhaust manifold is performed by using the finite element method and ABAQUS software to predict the temperature and stresses and then LCF life by using Smith-Watson-Topper theory and FE-SAFE software. Mechanical properties of silicon-molybdenum ductile cast irons obtained by LCF tests at different temperatures. The combination of the Chaboche nonlinear isotropic-kinematic hardening model with viscous stress law is used to consider the effect of viscosity. The results of finite element analysis (FEA) showed that the maximum temperature and stress values in the exhaust manifold are 757.7 °C and 395.2 MPa and the position is at the confluence region. According to the fatigue life analysis results, neglecting the elastoviscoplastic effect caused an estimation of 619 cycles or about 5.7% higher than the limit. Therefore, it is necessary to consider the elastoviscoplastic effect in the analysis of the low cycle fatigue life of the exhaust manifold. The results of the fatigue life analysis showed that the minimum LCF life of the exhaust manifold occurs in the confluence area. Thermo-mechanical analysis and LCF life results are compared with experimentally damaged exhaust manifolds to evaluate the results appropriately. It has been shown that the critical identified area match well with the area of failure in the experimental sample.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: ashouri1394@gmail.com (H. Ashouri)

Received 24 July 2023; Accepted 3 December 2023

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Ashouri H. Low cycle fatigue life analysis for exhaust manifold considering Elastoviscoplastic effect. Engine Research. 2023 June 22;70(2):22-36. doi: [10.22034/er.2023.2007571.1010](https://doi.org/10.22034/er.2023.2007571.1010)

تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود با در نظر گرفتن اثر کشسان لزج دائمی (کُلد)

حجت عاشوری*

دانشکده مهندسی مکانیک، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

چکیده

چندراهه دود به علت هندسه پیچیده و شرایط بارگذاری یکی از چالش برانگیزترین قطعات موتورهای احتراق داخلی است. این قطعه باید نوسانات چرخه‌های ترمومکانیکی را در طول عمر خود تحمل کند. بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل ترک‌های خستگی ضروری است. در این پژوهش، تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس به منظور پیش‌بینی دما و تنش و سپس عمر خستگی کم‌چرخه با استفاده از نظریه اسمیت-واتسون-تایپر و نرم‌افزار FE-SAFE انجام شده است. از ترکیب الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه با قانون تنش لزجت به منظور در نظر گرفتن اثر لزجت استفاده شده است. خواص مکانیکی چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن با استفاده از آزمون‌های خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف بدست آمده است. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که بیشینه دما و تنش در چندراهه دود ۷۵۷٫۷ درجه سانتیگراد و ۳۹۵٫۲ مگاپاسکال است و موقعیت آن در ناحیه هم‌ریختگاه است. نتایج تحلیل عمر خستگی نشان داد که در نظر نگرفتن اثر کشسان لزج دائمی (کُلد) باعث می‌شود که تعداد چرخه‌های گسیختگی ۶۱۹ چرخه یا حدود ۵٫۷ درصد بیشتر از مقدار مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر کُلد در تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود در نظر گرفته شود. نتایج تحلیل عمر خستگی نشان داد که حداقل عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود در ناحیه بحرانی هم‌ریختگاه رخ می‌دهد. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی کم‌چرخه، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی چندراهه دود آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

چندراهه دود
تحلیل اجزای محدود
عمر خستگی کم‌چرخه
اثر کشسان لزج دائمی (کُلد)



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: ashouri1394@gmail.com (حجت عاشوری)

دریافت ۲ مرداد ۱۴۰۲؛ پذیرش ۱۲ آذر ۱۴۰۲

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

چندراهه دود یکی از قطعات حساس موتور است که وظیفه آن هدایت و خارج کردن گازهای داغ ناشی از احتراق موتور به سمت واکنشگر یا پرخوران است. به دلیل اینکه چندراهه در مدت زمان طولانی در معرض گازهای بسیار داغ حاصل از احتراق قرار دارد، ضروری است تا تنش‌های ترمومکانیکی به وجود آمده در نقاط مختلف آن تحلیل و از عملکرد صحیح آن اطمینان حاصل شود. امروزه چندراهه دود به علت افزایش قدرت خروجی موتور، کاهش مصرف سوخت و گازهای آلاینده، تنش ترمومکانیکی بیشتری را نسبت به گذشته تحمل می‌کند [۱، ۲]. بنابراین لازم است چندراهه دود از نظر حرارتی و مکانیکی تحلیل شد. چندراهه باید مقاومت به شکست خستگی حرارتی بالایی داشته باشد تا بتواند دوام مورد نیاز را تأمین کند. اگر طراحی و جنس چندراهه دود مناسب نباشد، بارهای متناوب حرارتی موجب خستگی حرارتی و شکست آن می‌شود [۳-۵].

در زمینه تحلیل تنش و خستگی چندراهه دود پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. چن^۱ و همکاران ارزیابی عمر خستگی چندراهه دود یکپارچه با بستار را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد [۶]. اثر پره‌های حلقوی بر عمر خستگی کم چرخه چندراهه دود توسط عاشوری بررسی شد. شبیه‌سازی او ثابت کرد که تعداد چرخه‌های گسیختگی برای چندراهه دود اصلاح شده تقریباً ۵۵ درصد بیشتر از چندراهه دود اولیه است [۷]. لیو^۲ و همکاران تجزیه و تحلیل شکست چندراهه دود را با استفاده از الگوی سیتقلو انجام دادند. تحلیل‌های آنها نشان داد که گسیختگی چندراهه دود عمدتاً به دلیل خستگی ترمومکانیکی است [۴]. کاستروگویزا^۳ و همکاران شکست خستگی در چندراهه دود یک موتور هشت استوانه را انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که برخی از نقاط چندراهه دود موتور وارد ناحیه تسلیم می‌شوند [۳]. ارزیابی پوشش حائل حرارتی بر عمر خستگی کم چرخه چندراهه دود توسط عاشوری انجام شد. نتایج تحلیل عمر خستگی کم چرخه ثابت کرد که تعداد چرخه‌های گسیختگی برای چندراهه دود پوشش داده شده تقریباً دو برابر چندراهه دود بدون پوشش است [۸]. تحلیل گسیختگی و بهینه‌سازی چندراهه دود به وسیله لو^۴ و همکاران انجام شد. نتایج تحلیل آنها نشان داد که چندراهه بهینه‌سازی شده در آزمون دوام دچار گسیختگی نمی‌شود [۵]. عاشوری اثر دما بر تحلیل ارتعاشات چندراهه دود را بررسی کرد. نتایج تحلیل اجرایی محدود نشان داد که فشار گاز باید در تحلیل چندراهه دود در نظر گرفته شود [۹]. تحلیل خستگی ترمومکانیکی چندراهه دود به وسیله کاردسو و کلودیو^۵ انجام شد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که امکان ایجاد ترک ترک خستگی در هیچ نقطه چندراهه دود وجود ندارد [۱۰]. تحلیل خستگی ترمومکانیکی گرمایی - مکانیکی پرچرخه چندراهه دود موتور پرخوران به روش اثر دو سویه سیال و جامد توسط نادری حق و همکاران بررسی شد. تحلیل‌های آنها نشان داد که بیشینه دما و تنش‌های حرارتی در ناحیه هم‌ریختگاه^۶ رخ می‌دهد [۱۱]. شبیه‌سازی خستگی ترمومکانیکی چندراهه توسط عاشوری بررسی شد. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که ناحیه هم‌ریختگاه چندراهه دود بحرانی است [۱۲]. کوریبارا^۷ و همکاران روشی را برای پیش‌بینی خستگی چندراهه 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 [۱۳]. بهینه‌سازی نگهدارنده‌های^۸ سامانه خروجی به منظور کاهش ارتعاشات اتاق خودرو توسط شجاعی فرد و همکاران انجام شد. نتایج شبیه‌سازی شده نشان داد که بهینه‌سازی منجر به کاهش قابل توجه ارتعاشات منتقل شده به کابین خودرو می‌شود [۱۴]. مقایسه توزیع دمایی چندراهه دود پوشش داده شده ثابت کرد که پوشش با ضخامت ۲۵۰

1 Chen

2 Liu

3 Castro Güiza

4 Luo

5 Cardoso and Claudio

6 Confluence

7 kuribara

8 Hangers

میکرومتر نتایج بهتری نسبت به سایر پوشش‌ها دارد [۱۵]. تحلیل حرارتی چندراهه دود توسط بانولوس^۱ و همکاران بررسی شد. انطباق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده وجود داشت [۲]. تحلیل ترمومکانیکی چندراهه دود و واکنشگر به روش وابستگی جامد و سیال به وسیله محمدی و صالح‌نژاد انجام شد. نتایج تحلیل‌های آنها نشان داد که انطباق خوبی بین نتایج تحلیل حرارتی تجربی و شبیه‌سازی شده وجود دارد [۱۶]. اثر تعداد مجرای خروجی چندراهه دود بر تنش‌های ترمومکانیکی چندراهه دود به وسیله سنگامش^۲ و همکاران بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که چندراهه دود چند مجرای حدود ۲۰ مگاپاسکال نسبت به چندراهه دود تک مجرای تنش کمتری را تحمل می‌کند [۱۷]. پرتو و همکاران اثر استفاده از پره در توزیع دما و تنش در چندراهه دود را ارزیابی کردند. تحلیل‌های آنها نشان داد که استفاده از پره باعث کاهش تنش‌های حرارتی چندراهه دود در حدود ۲۸ درصد می‌شود [۱۸]. تحلیل گسیختگی چندراهه دود به وسیله صالح‌نژاد و همکاران ارزیابی شد. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که امکان گسیختگی در هیچ نقطه چندراهه دود وجود ندارد [۱۹]. تحلیل ترمومکانیکی چندراهه دود با استفاده از الگوی الاستوپلاستیک چابوچه^۳ به وسیله عاشوری بررسی شد. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که بیشینه دما و تنش در ناحیه هم‌ریختگاه چندراهه دود رخ می‌دهد [۲۰].

براساس مطالبی که در قسمت مقدمه ذکر شد، تحلیل‌های انجام شده در چندراهه دود به علت در دسترس نبودن اطلاعات رفتار سخت‌شوندگی، نرم‌شوندگی و کُلد ماده، بیشتر براساس الگوهای ساده رفتاری ماده مثل ارتجاعی-مومسان بوده و کمتر اثر کُلد در چندراهه دود در نظر گرفته شده است. چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن دارای رفتار کُلد است که این رفتار نیز باید در نظر گرفته شود [۲۱]. لذا در این پژوهش هدف اصلی شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی چندراهه دود براساس الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه و ترکیب آن با قانون تنش کُلد و در نهایت تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه‌چندراهه دود است. از طرف دیگر در برخی از پژوهش‌های قبلی از فشار گازهای خروجی موتور بر جداره چندراهه دود نیز صرف‌نظر شده است اما در این پژوهش، اثر این فشار در نظر گرفته خواهد شد. حرارت اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص حرارتی و مکانیکی ماده چندراهه دود دارد. بنابراین در این پژوهش برای افزایش دقت تحلیل حرارتی، تنش‌های ترمومکانیکی و عمر خستگی، خواص ماده چندراهه دود وابسته به دما تعریف شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماده و الگوی رفتاری آن

در این مقاله چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن با کاربرد در چندراهه دود موتور، مورد مطالعه قرار گرفته است. آلیاژ موردنظر، شامل ۰.۵۵۵٪ عنصر سیلیسیم و ۰.۱۰٪ عنصر مولیبدن است [۲۱]. انتخاب یک الگوی مناسب برای ارزیابی خستگی ترمومکانیکی مواد اهمیت زیادی دارد. الگوی سخت‌شوندگی سینماتیکی دارای دو قسمت الگوی سخت‌شوندگی خطی و غیرخطی همگن-سینماتیک است. الگوی دوم با سطح تسلیم فون میزس^۴ به کار می‌رود و برای بررسی مسایل با بارگذاری چرخه‌ای مثل چندراهه 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 الگو بر اساس تحقیقات چابوچه بنا نهاده شده است که معادله ۱ آن را بیان می‌کند [۲۲]:

¹ Banuelos

² Sangamesh

³ Chaboche

⁴ Von-Mises

$$\dot{X} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - X_{ij}) \dot{\varepsilon}^{PL} - \gamma_{ij} \dot{\varepsilon}^{PL} + \frac{1}{C} \dot{C} X_{ij} \quad (1)$$

تنش بازگشتی کل از معادله ۲ محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$X = \sum_{k=1}^N X_k \quad (2)$$

در معادله ۳ با در نظر گرفتن N برابر ۳، متغیر سخت شوندگی به سه قسمت تقسیم می‌شود که باعث افزایش دقت الگو می‌شود. به منظور معرفی این الگو به نرم افزار آباکوس، لازم است بخش همگن و بخش سینماتیک بصورت جداگانه تعریف شوند. برای تعریف بخش همگن از معادله ۳ استفاده می‌شود [۲۲]:

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

معیار تسلیم f در این الگو با استفاده از معادله ۴ بیان می‌شود [۲۲]:

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

برای در نظر گرفتن اثر لزجت از معادله زیر استفاده می‌شود [۲۱]:

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

۲-۲- معادلات حاکم بر تحلیل ترمومکانیکی

انتقال حرارت در چندراهه دود به سه روش هدایت، جابه‌جایی و تابش صورت می‌گیرد [۲۳ و ۲۴]. انتقال حرارت هدایت در چندراهه دود با استفاده از قانون فوریه بدین صورت بیان می‌شود [۲۳]:

$$Q = -KA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (6)$$

انتقال حرارت ناشی از گازهای داغ خروجی موتور با جداره داخلی چندراهه دود، انتقال حرارت جابه‌جایی از نوع اجباری است که با استفاده از معادله ۷ بیان می‌گردد [۲۴]:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{gas} - T_{air}) \quad (7)$$

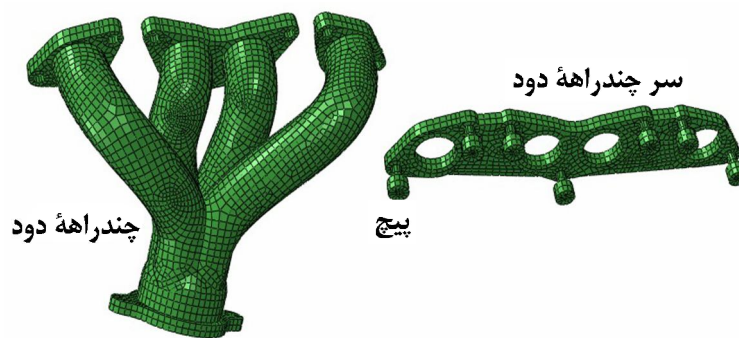
انتقال حرارت تابشی بین سطح خارجی چندراهه دود و محیط اطراف آن با استفاده از قانون استفان-بولتزمن براساس معادله زیر بیان می‌گردد [۲۳]:

$$Q = \varepsilon \sigma (T_{man}^4 - T_{air}^4) \quad (8)$$

۲-۳- الگوی اجزا محدود و خواص مواد

برای کاهش زمان، هزینه طراحی و انجام آزمون‌های کمتر باید از ابزارهای مناسب شبیه‌سازی در تحلیل‌ها استفاده نمود. روش تحلیل اجزای محدود برای طراحی و توسعه قطعات دارای هندسه پیچیده مثل چندراهه دود موتور در زمان کوتاه و با حداقل هزینه پذیرفته شده است. با استفاده از این ابزار در پیش بینی دما و توزیع تنش در یک قطعه میتوان نواحی بحرانی آن را تعیین کرد و متغیرهای هندسی را مورد مطالعه و بهبود قرار داد [۹، ۱۲]. چندراهه دود مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. چندراهه دود از جنس چدن سیلیسیم-مولیبدن با ضریب یانگ ۱۴۵ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰٫۲۸ و ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{\text{C}} \times 10^{-6} \times 11.2$ ساخته شده است [۲۵]. سر چندراهه دود دارای چهار مجرا است که به لوله‌های چندراهه دود متصل می‌شوند.

سر از جنس از جنس آلومینیم با ضریب یانگ ۶۹ گیگاپاسکال، ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{\text{C}} \times 10^{-6} \times 22.9$ و نسبت پواسون ۰٫۳۳ است. چندراهه دود و سر آن به کمک هفت پیچ به بستار متصل می‌شوند. پیچ‌ها از جنس فولاد با ضریب یانگ ۲۰۷ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰٫۳ و ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{\text{C}} \times 10^{-6} \times 13.8$ ساخته شده‌اند. الگوی اجزای محدود از ۷۴۵۰ جزء هشت گرهی C3D8 و ۲۸۲ جزء شش گرهی C3D6 تشکیل شده است [۱۲].



شکل ۱ چندراهه دود و اجزای آن [۲۶]

۲-۴- الگوی تحلیل خستگی کم چرخه

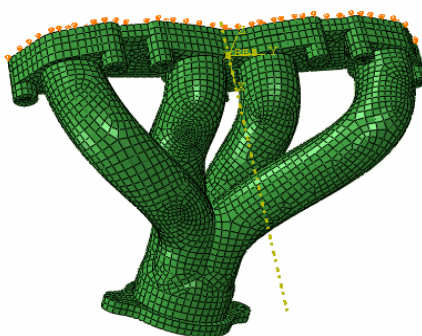
اکثر قطعات مهندسی در معرض تنش‌های نوسانی قرار دارند که ممکن است پس از تعداد نوسان کافی در تنش کمتر از تنش شکست استاتیکی دچار ترک یا گسیختگی شوند. به این نوع شکست ناشی از بارهای نوسانی، خستگی می‌گویند. در بسیاری از موارد شکست اجزای مکانیکی در اثر خستگی، فرایندی است ناگهانی که قبل از شکست هیچ تغییری در کارکرد قطعه مشاهده نمی‌شود که وقوع آن خطرناک و پرهزینه است. بنابراین لازم است عمر خستگی قطعات مختلف تعیین و محاسبه شود. عموماً پدیده خستگی در قطعات، به دو ناحیه خستگی کم چرخه و پر چرخه تقسیم‌بندی می‌گردد. گسیختگی در خستگی کم چرخه در محدوده 10^2 تا 10^4 چرخه و تنش بیشتر از تنش تسلیم رخ داده و در خستگی پر چرخه گسیختگی در محدوده بیشتر از 10^4 چرخه و تنش کمتر از تنش تسلیم رخ می‌دهد [۲۷]. برای تحلیل عمر خستگی کم چرخه چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن می‌توان از دو معیار مارو و اسمیت-واتسون-تاپر استفاده کرد که معیار اخیر انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد [۲۱، ۲۸]. در این الگو متغیر پایش‌کننده آسیب خستگی، دامنه کرنش اصلی ε_{a1} و تنش محوری بیشینه $\sigma_{n,max}$ بر روی صفحه دامنه کرنش اصلی است [۲۷]:

$$E\varepsilon_{a1}\sigma_{n,max} = (\sigma_f')^2 \times (2N_f)^a + (E\sigma_f'\varepsilon_f') \times (2N_f)^{a+c} \quad (9)$$

۲-۵- شرایط مرزی در تحلیل ترمومکانیکی

شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی چندراهه دود بدین صورت است [۷-۹، ۱۲]:

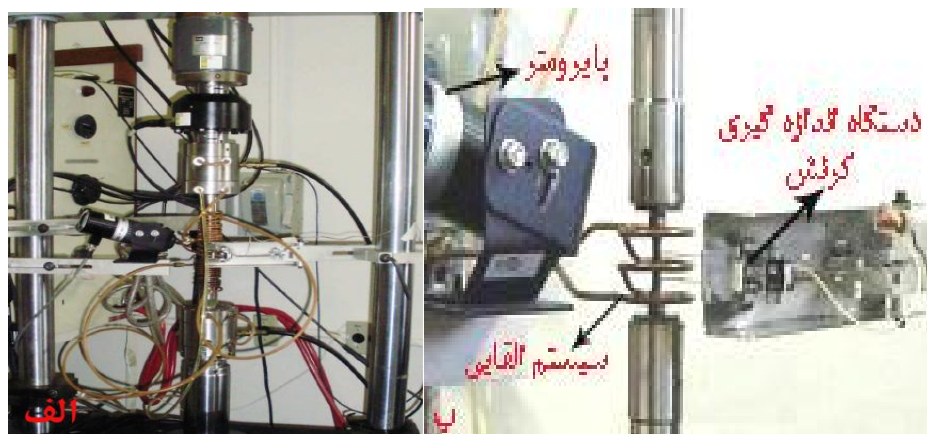
- ۱- گازهای داغ خروجی موتور جابه‌جایی اجباری در جداره داخلی چندراهه دود اعمال می‌کنند که این اثر با شرایط جابجایی بصورت $500 \text{ W/m}^2\text{C}$ و دمای 816 درجه سانتیگراد شبیه‌سازی شده است.
- ۲- سطح خارجی چندراهه دود در معرض انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و تابش قرار دارد. شرط انتقال حرارت جابجایی در سطح خارجی چندراهه دود بصورت $25 \text{ W/m}^2\text{C}$ و دمای 30 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. گسیلمندی سطح چندراهه دود برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی 0.77 در نظر گرفته شده است.
- ۳- دمای اتصال‌های ورودی و خروجی چندراهه دود بترتیب 355 و 122 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.
- ۴- در این پژوهش بستار موتور بصورت سر چندراهه دود شبیه‌سازی شده است. به عبارت دیگر قسمتی از بستار که به وسیله پیچ به چندراهه دود متصل می‌شود، شبیه‌سازی شده است. باتوجه به اتصال چندراهه دود به بستار، سطح تماس سر به بستار بصورت کامل مقید می‌شود. در سطح تماس بین سر و چندراهه از تماس اصطکاکی استفاده شده است. شرط مرزی دیگر فشار گازهای خروجی موتور است که بصورت فشار بر جداره داخلی چندراهه دود اعمال می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲ شرط مرزی در تحلیل مکانیکی

۲-۶- آزمون خستگی کم چرخه

در این پژوهش آزمون‌های خستگی کم چرخه براساس استاندارد ASTM-E606 تحت شرایط پایش کرنش مکانیکی و در دماهای ۲۰، ۵۵۰، و ۶۵۰ درجه سانتیگراد روی نمونه های چدنی انجام شده است. نرخ کرنش مکانیکی در همه دماهای آزمون 1/s ۰,۰۰۳ بود. تجهیزات آزمون خستگی کم چرخه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، از سامانه القایی برای داغ کردن نمونه آزمون استفاده شده است. کرنش مکانیکی و دمای نمونه با دستگاه اندازه گیری کرنش در دمای گرم^۱ و پایرومتر اندازه گیری می شود.



شکل ۳ الف) دستگاه آزمون خستگی و ب) پایرومتر، سامانه القایی و دستگاه اندازه گیری کرنش

۲-۷- روند تحلیل خستگی کم چرخه چندراهه دود

روند تحلیل خستگی کم چرخه چندراهه دود بدین صورت است:

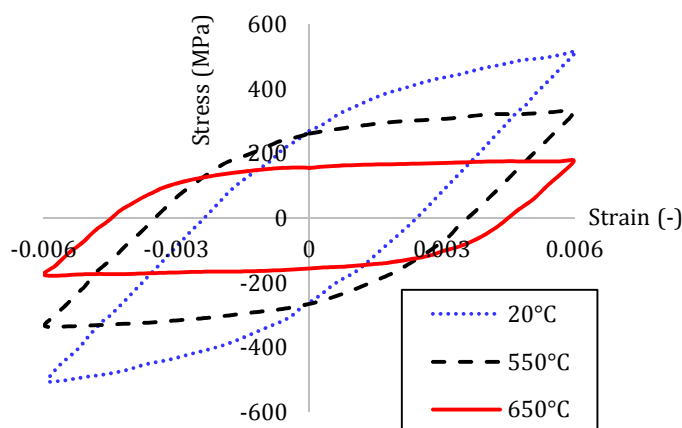
- ۱- شبیه سازی و دانه بندی چندراهه دود در نرم افزار آباکوس
- ۲- تعیین شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی
- ۳- تعیین ثابت های سخت شوندگی همسانگرد و سینماتیک با استفاده از آزمون های خستگی
- ۴- تحلیل حرارتی چندراهه دود با استفاده از نرم افزار آباکوس
- ۵- تحلیل مکانیکی چندراهه دود با استفاده از نرم افزار آباکوس
- ۶- تحلیل خستگی کم چرخه چندراهه دود با استفاده از نرم افزار FE-SAFE و معیار اسمیت- واتسون- تاپر

¹ High Temperature Extensometer

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون خستگی کم چرخه

نتایج آزمون خستگی کم چرخه نمونه‌های چدنی سیلیسیم-مولیبدن در دماهای ۲۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتیگراد در شکل ۴ نشان داده شده است. ثابت‌های قسمت‌های سخت‌شوندگی همسانگرد و سینماتیک باتوجه به نتایج آزمون‌های خستگی بدست آمده است که در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.



شکل ۴ نتایج آزمون خستگی کم چرخه در دماهای مختلف

جدول ۱ ثابت‌های سخت‌شوندگی همسانگرد و ضریب یانگ

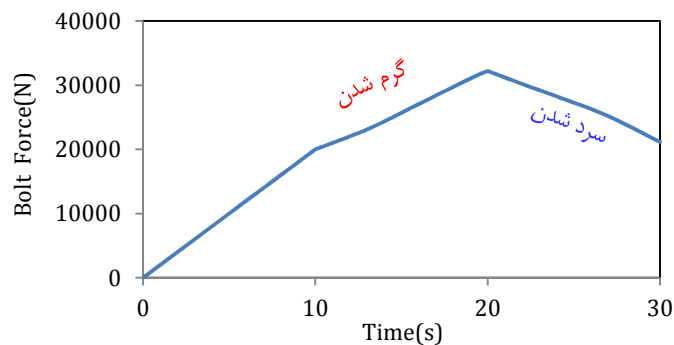
b	Q_{∞} (MPa)	k (MPa)	E (GPa)	دما (°C)
۰,۳۰	۴۲,۳	۲۵۶,۲۰	۱۴۲,۲	۲۰
۰,۵۰	-۳۳,۰	۳۶,۸۶	۱۳۴,۸	۵۵۰
۰,۶۹	-۱۸,۱	۱۸,۱۲	۱۲۰,۸	۶۵۰

جدول ۲ ثابت‌های سخت‌شوندگی سینماتیک

γ_3	γ_2	γ_1	C_3 (MPa)	C_2 (MPa)	C_1 (MPa)	دما (°C)
۰	۳۴۲,۳۰	۳۴۳۰,۲	۳۲۷۵,۰	۵۶۴۳۱,۱	۴۲۴۶۵۴,۲	۲۰
۰	۳۱۹,۷۰	۱۹۵۰,۷	۹۷۸,۱	۱۶۴۵۱,۵	۱۱۳۱۴۹,۵	۵۵۰
۰	۳۱۸,۲۸	۱۹۰۵,۳	۴۶۹,۲	۷۶۹۰,۵	۴۴۹۹۰,۶	۶۵۰

۳-۲- اعمال نیروهای پیش‌بار پیچ‌های چندراهه دود

نیروهای پیش‌بار پیچ‌های چندراهه دود موتور در اولین مرحله از تحلیل ترمومکانیکی چندراهه دود اعمال می‌شود. نیروهای پیش‌بار بصورت یکسان و به مقدار ۲۰ کیلونیوتن به هفت پیچ به چندراهه دود اعمال می‌شود. در شکل ۵ تغییرات نیروی یکی از پیچ‌های چندراهه دود موتور برحسب زمان در گام اول بارگذاری چندراهه دود نشان داده شده است. این نیرو بصورت قابل ملاحظه‌ای در زمان گرم شدن چندراهه دود افزایش می‌یابد اما به علت تنش پسماند و تغییر شکل دائمی به وضعیت اولیه خود بر نمی‌گردد [۱۲، ۲۰].

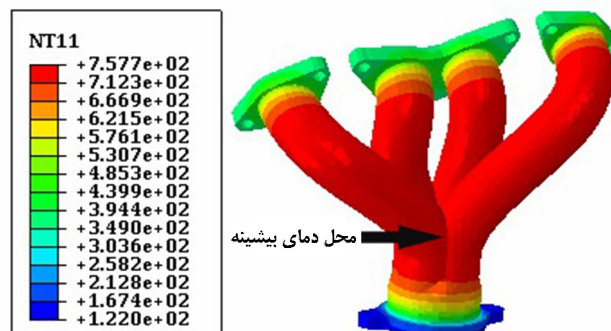


شکل ۵ تغییرات نیروی پیچ

۳-۳- تحلیل حرارتی

هدف تحلیل حرارتی یافتن توزیع دما در چندراهه دود است. تنش‌های حرارتی در چندراهه دود، تنش‌های غالب و حاکم هستند که منجر به خستگی کم چرخه در آن می‌شوند. خستگی کم چرخه چندراهه دود ناشی از چرخه تکراری روشن و خاموش شدن موتور است. بنابراین بارگذاری حرارتی مهمترین بارگذاری در تحلیل ترمومکانیکی چندراهه دود است. هرچه توزیع دما در چندراهه 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. در این تحلیل سه چرخه اعمال شد تا پاسخ پایدار حرارتی بدست آید [۲۰].

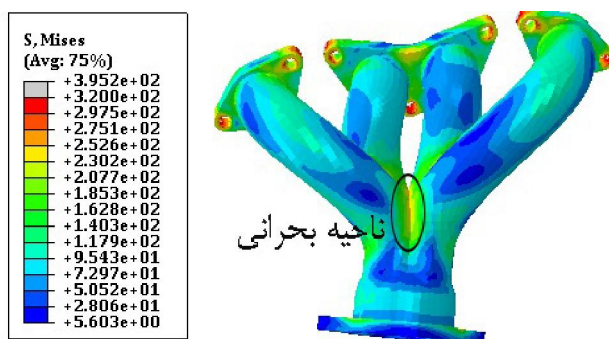
هر چرخه شامل دو قسمت گرم کردن چندراهه دود تا بیشینه دمای کاری آن و سرد کردن آن تا حداقل دمای کاری آن است. نتایج تحلیل حرارتی چندراهه دود در شکل ۶ نشان داده شده است. از این شکل ملاحظه می‌شود که بیشینه دما برابر ۷۵۷٫۷ درجه سانتیگراد است و در محل تقاطع لوله‌های یا هم‌ریختگاه چندراهه دود رخ داده است که ناشی از همگرایی گازهای خروجی موتور در این ناحیه است که این نتیجه با منابع [۵-۹، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۹]. مطابقت دارد. در منابع ۱۲ و ۲۰ نیز از الگوی اجزای محدود شکل ۱ استفاده شده است که جنس چندراهه دود بترتیب چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن-کرم و فولاد است. بیشینه دما در هم‌ریختگاه رخ داده است و بترتیب ۷۵۹٫۶ و ۷۹۵٫۷ درجه سانتیگراد است. حداقل دما با توجه به تحلیل حرارتی، ۱۲۲ درجه سانتیگراد است و در اتصال خروجی چندراهه دود رخ داده است. حداقل دما نیز در منبع‌های ۱۲ و ۲۰ نیز ۱۲۲ درجه سانتیگراد و در محل فوق گزارش شده است. این نتیجه صحت تحلیل حرارتی را تأیید می‌کند. بارگذاری حرارتی اثر چشمگیری روی عمر خستگی چندراهه دود دارد و میدان دما مناطق بحرانی را مشخص می‌کند. جوانه‌زنی ترک‌های خستگی چندراهه دود ناشی از تغییرات میدان دما است. از تحلیل حرارتی می‌توان نتیجه گرفت که هم‌ریختگاه چندراهه دود ناحیه بحرانی است.



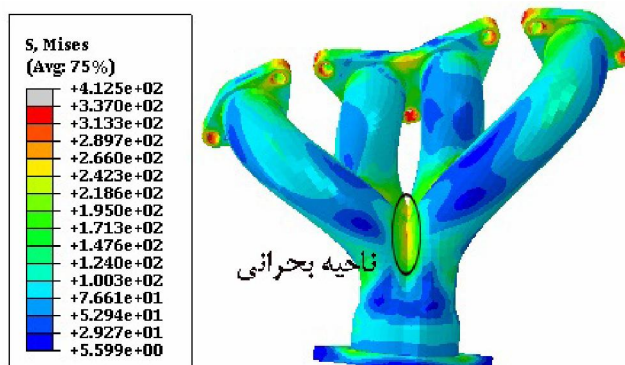
شکل ۶ توزیع دما در چندراهه دود

۳-۴- تحلیل مکانیکی

چندراهه 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 دمای محاسبه شده در تحلیل حرارتی در نظر گرفته می‌شود [۳-۵، ۷، ۱۰، ۱۱]. توزیع تنش فون میزس در انتهای مرحله بارگذاری مکانیکی در چندراهه دود در شکل ۷ نشان داده شده است. به جز نواحی اطراف پیچ‌های چندراهه دود که در آنها تمرکز تنش وجود دارد، بیشینه تنش در محل هم‌ریختگاه چندراهه دود رخ داد. حداکثر تنش فون میزس در منابع ۱۲ و ۲۰ نیز در هم‌ریختگاه رخ داده است. در شکل ۸ توزیع تنش فون میزس با در نظر گرفتن اثر لزجت دائمی^۱ نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که بیشینه تنش فون میزس در چندراهه دود بدون و با در نظر گرفتن اثر لزجت دائمی بترتیب ۳۹۵،۲ و ۴۱۲،۵ مگاپاسکال است. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر کُلد باعث می‌شود که تنش فون میزس ۱۷ مگاپاسکال کمتر از مقدار مجاز تخمین زده شود.



شکل ۷ توزیع تنش فون میزس در چندراهه دود بدون اثر کُلد

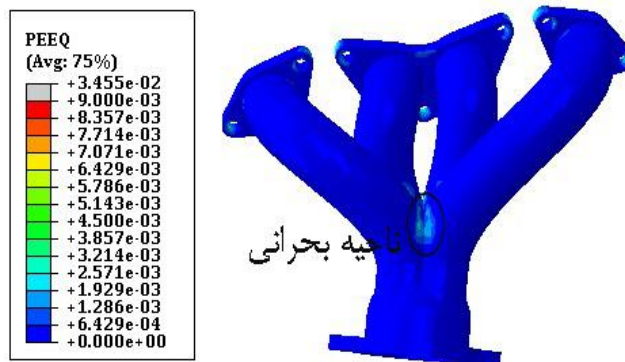


شکل ۸ توزیع تنش فون میزس در چندراهه دود با اثر کُلد

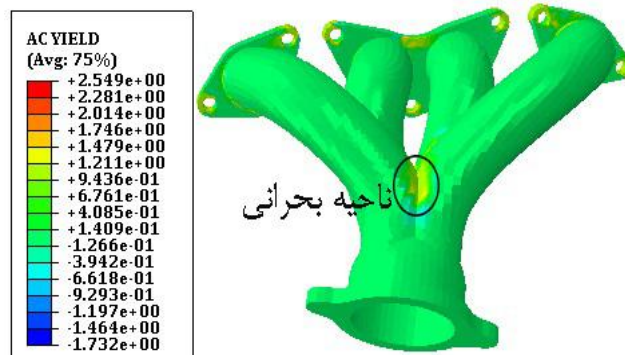
براساس نتایج منابع [۳-۵، ۱۰، ۱۲] اولین ترک خستگی ترمومکانیکی چندراهه دود موتور در گرمترین نقطه آن مشاهده خواهد شد. با بررسی شکل ۶ ملاحظه می‌شود که این ناحیه نیز در محل هم‌ریختگاه چندراهه دود قرار دارد. توزیع کرنش دائمی معادل در شکل ۹ نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که کرنش دائمی معادل از صفر بزرگتر است و نشان می‌دهد که ماده چندراهه دود وارد ناحیه تسلیم شده است. براساس نتایج منابع [۳-۵، ۱۰، ۱۲] جوانه‌زنی ترک‌های خستگی در چندراهه دود در نقاطی از آن مشاهده خواهد شد که کرنش دائمی در اثر تنش‌های

¹ Viscoplasticity

ترمو مکانیکی ایجاد می‌شود. کرنش دائمی معادل معیاری برای شناسایی نقاط بحرانی چندراهه دود است. با بررسی شکل ۹ مشاهده می‌شود که هم‌ریختگاه چندراهه دود موتور ناحیه بحرانی است و احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در آن وجود دارد. از شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نتیجه می‌شود که بیشینه تنش فون میزس و کرنش دائمی معادل در هم‌ریختگاه چندراهه دود موتور رخ داده است. در شکل ۱۰ نواحی از چندراهه دود موتور که وارد ناحیه تسلیم می‌شوند، نشان داده شده است. براساس نتایج منبع [۱۲] اولین ترک خستگی در این نواحی رخ خواهد داد. گسیختگی و ایجاد ترک در چندراهه دود موتور ناشی از تغییرات دما است که ماده چندراهه دود موتور باید بتواند در مقابل آن مقاومت نماید. تغییرات چرخه‌ای دمای موتور باعث می‌شود که برخی از نواحی چندراهه دود موتور وارد ناحیه تسلیم شده و کرنش دائمی در آنها ایجاد شود. در نهایت ترک‌های خستگی در این نواحی جوانه خواهند زد.



شکل ۹ توزیع کرنش دائمی معادل در چندراهه دود

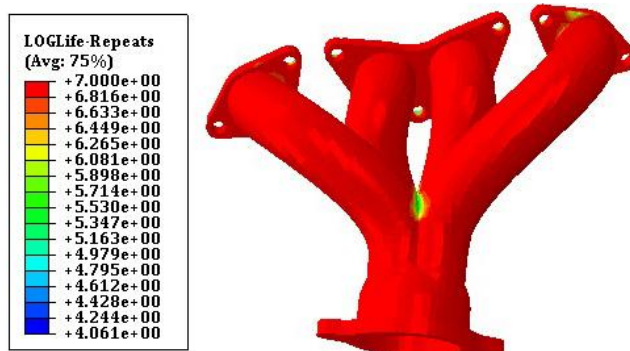


شکل ۱۰ نواحی از چندراهه دود که وارد ناحیه تسلیم می‌شوند

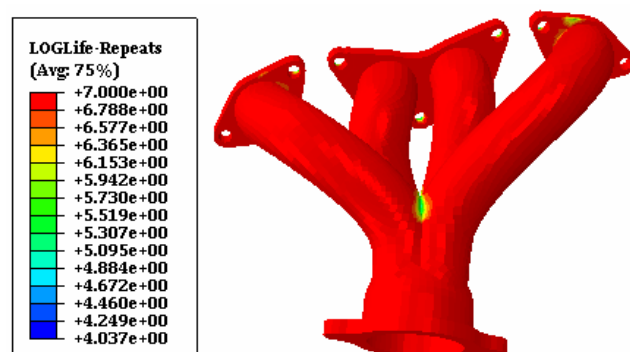
۳-۵- تحلیل خستگی کم چرخه

گسیختگی ناشی از خستگی حرارتی در قطعات مختلف موتور به آسانی در اثر تغییرات دما و تنش‌های ترمو مکانیکی رخ می‌دهد. چندراهه دود باید بتواند در مقابل بارهای چرخه‌ای حرارتی و مکانیکی مقاومت نمایند. چندراهه دود باید مقاومت به شکست خستگی ترمو مکانیکی بالایی داشته باشد تا بتواند دوام مورد نیاز را تأمین کند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که معیار کرنش پایه اسمیت- واتسون- تاپر استفاده کرد انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد [۲۱، ۲۸]. بنابراین در این پژوهش از این معیار استفاده شده است. تعداد چرخه‌های گسیختگی چندراهه دود در معیار اسمیت- واتسون- تاپر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که عمر خستگی چندراهه دود در معیار فوق برای ناحیه بحرانی هم‌ریختگاه ۱۱۵۰۸ چرخه است. این نتیجه نشان می‌دهد که عمر خستگی چندراهه دود از ۱۰ هزار چرخه کمتر

است و چندراهه دود تحت خستگی کم‌چرخه قرار دارد [۲۷]. حداقل عمر خستگی در ناحیه هم‌ریختگاه مشاهده می‌شود که با نتایج تحلیل ترمومکانیکی مطابقت دارد. در شکل ۱۲ توزیع تعداد چرخه‌های گسیختگی چندراهه دود با در نظر گرفتن اثر کُلد نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می‌شود که تعداد چرخه‌های گسیختگی چندراهه دود بدون و با در نظر گرفتن اثر کُلد بترتیب ۱۱۵۰۸ و ۱۰۸۸۹ چرخه است. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر لزجت دائمی در تحلیل عمر خستگی باعث می‌شود که تعداد چرخه‌های گسیختگی ۶۱۹ چرخه یا حدود ۵٫۷ درصد بیشتر از مقدار مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر کُلد در تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود در نظر گرفته شود.



شکل ۱۱ عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود در مقیاس لگاریتمی بدون اثر کُلد



شکل ۱۲ عمر خستگی کم‌چرخه چندراهه دود در مقیاس لگاریتمی با اثر کُلد

نتایج تحلیل ترمومکانیکی و خستگی کم‌چرخه نشان می‌دهد که هم‌ریختگاه چندراهه دود ناحیه بحرانی است. نتایج آزمون ضربه حرارتی چندراهه دود که در این قسمت دچار گسیختگی می‌شود، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با بررسی نتایج تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که نتایج شبیه‌سازی شده تحلیل ترمومکانیکی و خستگی کم‌چرخه چندراهه دود با آزمایش‌های تجربی مطابقت دارد.



شکل ۱۳ چندراههٔ دود گسیخته شده در ناحیهٔ هم‌ریختگاه در آزمون ضربهٔ حرارتی [۳۰]

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحلیل عمر خستگی کم‌چرخهٔ چندراههٔ دود موتور با استفاده از نظریهٔ اسمیت-واتسون-تاپر بررسی شد. از ترکیب الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه با قانون تنش لزجت به منظور در نظر گرفتن اثر لزجت استفاده شده است. خواص مکانیکی و متغیرهای الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک چابوچه برای چدن نرم سیلیسیم-مولیبدن با استفاده از آزمون‌های خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف بدست آمده است. با استفاده از اجزای محدود امکان پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان توزیع دما، تنش‌های ترمومکانیکی و عمر خستگی چندراههٔ دود وجود دارد. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که بیشینهٔ دما و تنش در دود ۷۵۷,۷ درجه سانتیگراد و ۳۹۵,۲ مگاپاسکال است و موقعیت آن در ناحیهٔ هم‌ریختگاه است. نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که بیشینهٔ تنش فون میزس در چندراههٔ دود بدون و با در نظر گرفتن اثر کُلد بترتیب ۳۹۵,۲ و ۴۱۲,۵ مگاپاسکال است. به عبارت دیگر در نظر نگرفتن اثر کُلد باعث می‌شود که تنش فون میزس ۱۷ مگاپاسکال کمتر از مقدار مجاز تخمین زده شود. توزیع کرنش دائمی معادل نشان داد که این متغیر در هم‌ریختگاه از صفر بزرگتر است و نشان می‌دهد که مادهٔ چندراههٔ دود موتور در این قسمت وارد ناحیهٔ تسلیم شده است. بنابراین هم‌ریختگاه چندراههٔ دود موتور ناحیهٔ 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 کم‌چرخه نشان داد که حداقل عمر خستگی کم‌چرخهٔ چندراههٔ دود در ناحیهٔ بحرانی هم‌ریختگاه رخ می‌دهد. عمر خستگی کم‌چرخهٔ چندراههٔ دود بدون و با در نظر گرفتن اثر کُلد بترتیب ۱۱۵۰۸ و ۱۰۸۸۹ چرخه محاسبه گردید. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که در نظر نگرفتن اثر کُلد باعث می‌شود که تعداد چرخه‌های گسیختگی ۶۱۹ چرخه یا حدود ۵,۷ درصد بیشتر از مقدار مجاز تخمین زده شود. بنابراین لازم است اثر کُلد در تحلیل عمر خستگی کم‌چرخهٔ چندراههٔ دود در نظر گرفته شود. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی کم‌چرخه، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونهٔ واقعی چندراههٔ دود آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونهٔ واقعی دارد.

فهرست علائم

a	عدد استحکام خستگی
A	سطح عمود بر جریان حرارتی، m^2
b	ثابت ماده
c	شکل‌پذیری خستگی

C	ثابت ماده، MPa
k	هدایت حرارتی، $W/m^{\circ}C$
K	اندازه سطح تسلیم اولیه، MPa
E	ضریب کشسانی یا ضریب یانگ، GPa
h	ضریب هدایت جابه‌جایی، $W/m^2^{\circ}C$
Q_{∞}	ثابت ماده، MPa
Q	شار انتقال گرما، J
R	متغیر سخت‌شوندگی سینماتیک، MPa
T_{gas}	دمای گاز، $^{\circ}C$
T_{air}	دمای هوا، $^{\circ}C$
T_{man}	دمای چندراهه، $^{\circ}C$
N_f	تعداد چرخه‌های گسیختگی

علائم یونانی

α	ثابت ماده
β	ثابت ماده، MPa^{-1}
γ	ثابت ماده
ε	گسیلمندی
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش، s^{-1}
σ	تنش، MPa
σ_f	ثابت استفان-بولتزمن، W/m^2K^4
σ'_f	ضریب مقاومت خستگی، MPa
ε'_f	ضریب شکل‌پذیری خستگی
ε^{PL}	کرنش دائمی

References

- [1] Zhang W, Li J, Yang L, Barber G, Chen J, Iqbal O, Singh K. Multiple 3D-DIC Systems for Measuring the Displacements and Strains of an Engine Exhaust Manifold. SAE Technical Paper No. 2020-01-0540. 2020. doi: 10.4271/2020-01-0540
- [2] Banuelos E, Carlos Navarro LH, Sawkar AN, Gaikwad S. Thermal Map of an Exhaust Manifold for a Transient Dyno Test Schedule: Development and Test Data Correlation. SAE Technical Paper No.2018-01-0126. 2018. doi: 10.4271/2018-01-0126
- [3] Castro Güiza GM, Hormaza W, Andres R, Galvis E, Méndez Moreno LM, Bending overload and thermal fatigue fractures in a cast exhaust Manifold. Journal of Engineering Failure Analysis. 2017;28:138-148. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.08.016
- [4] Liu Y, Hsin Chen Y, Sawkar N, Xu N, Gaikwad S, Seaton P, Singh K. A Thermo-mechanical Fatigue Analysis on a Ductile Cast Iron Exhaust Manifold. SAE Technical Paper No.2018-01-1215. 2018. doi: 10.4271/2018-01-1215
- [5] Luo X, Zou P, Zeng X, Yuan X, Li B. Failure Prediction and Design Optimization of Exhaust Manifold based on CFD and FEM Analysis. SAE Technical Paper No.2020-01-1166. 2020. doi: 10.4271/2020-01-1166
- [6] Chen M, Wang Y, Wu W, Cui Q, Wang MK, Wang L. 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. 2016. doi: 10.4271/2016-01-1085
- [7] Ashouri H. Effect of perimeter fins in low cycle fatigue life for exhaust manifold. Journal of engine research. 2021;61:23-34.

- [8] Ashouri H. Evaluation of thermal barrier coating in low cycle fatigue for exhaust manifold. *Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;12(4): 41-51.
- [9] Ashouri H. Evaluation of temperature effect on modal analysis for exhaust manifold. *Journal of engine reserch*. 2021;61:11-21.
- [10] Azevedo Cardoso AD, Claudio Andreatta D. Thermomechanical Analysis of Diesel Engine Exhaust Manifold. SAE Technical Paper No.2016-36-0258. 2016. doi: [10.4271/2016-36-0258](https://doi.org/10.4271/2016-36-0258)
- [11] Naderi Hagh N, Mohammadi A, Payganeh G. Thermo-mechanical high cycle fatigue analysis of exhaust manifold of turbocharged engine with two way coupling FSI. *The Journal of Engine Research*. 2020;60:29-45.
- [12] Ashouri H. Thermo-mechanical fatigue simulation of exhaust manifolds. *Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*. 2018;11(2):59-66.
- [13] Kuribara H, Horikawa H, Teraguchi T, Nagata T, Kitamura D. Prediction of Fatigue Strength of Motorcycle Exhaust System Considering Vibrating and Thermal Stresses. SAE Technical Paper No.2015-32-0739. 2015. doi: [10.4271/2015-32-0739](https://doi.org/10.4271/2015-32-0739)
- [14] Shojaeifard MH, Ebrahimi-Nejad S, Kamarkhan S. Optimization of Exhaust System Hangers for Reduction of Vehicle Cabin Vibrations. *International Journal of Automotive Engineering*. 2017; 7:2314-2325. doi: [10.22068/ijae.7.1.2314](https://doi.org/10.22068/ijae.7.1.2314)
- [15] Valarmathi TN, Sekar S, Purusothaman M, Saravanan J, Balan KN, Sekar & Mothilal SD. Design and thermal analysis of coated and uncoated exhaust manifold. *International Journal of Ambient Energy*. 2018;41(2):1-11. doi: [10.1080/01430750.2018.1456969](https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1456969)
- [16] mohammadi A, Salehnejad MA. Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction. *Journal of engine research*. 2019;56:55-64.
- [17] Sangamesh R, Twinkle R, Chiniwar DS, Vishwanatha HM, Sonda P, Hiremath S. 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*. 2022;16:1-10. doi: [10.1007/s12008-022-01171-x](https://doi.org/10.1007/s12008-022-01171-x)
- [18] Partoaa AA, Abdolzadeh M, Rezaeizadeh M. Effect of fin attachment on thermal stress reduction of exhaust manifold of an off-road diesel engine. *Journal of Central South University*. 2017;24: 546-559. doi: [10.1007/s11771-017-3457-1](https://doi.org/10.1007/s11771-017-3457-1)
- [19] Salehnejad MA, Mohammadi A, Rezaei M, Ahangari H. Cracking failure analysis of an engine exhaust manifold at high temperatures based on critical fracture toughness and FE simulation approach. *Journal of Engineering FractureMechanics*. 2019;211:125-136. doi: [10.1016/j.engfracmech.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.02.005)
- [20] Ashouri H. Thermo-mechanical analysis for exhaust manifold using elasto-viscoplastic chaboche model. *Automotive Science and Engineering*. 2021;11(4):3682-3692. doi: [10.22068/ase.2022.591](https://doi.org/10.22068/ase.2022.591)
- [21] Bartošák M, Španiel M, Doubrava K. Unified viscoplasticity modeling for a SiMo 4.06 cast iron under isothermal low-cycle fatigue-creep and thermo-mechanical fatigue loading conditions. *International Journal of Fatigue*. 2020;136:1-15. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2020.105566](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105566)
- [22] Chaboche JL. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International Journal of Plasticity*. 2008;24:1642-1693. doi: [10.1016/j.ijplas.2008.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009)
- [23] Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill press; 1998.
- [24] Konstantinidis PA, Koltsakis GC, Stamatelos AM. Transient heat transfer modelling in automotive exhaust systems. Part C : *Journal of mechanical engineering science*. 1997;211(1):1-15. doi: [10.1243/0954406971521610](https://doi.org/10.1243/0954406971521610)
- [25] SAE J2515 Standard. *High Temperature Materials for Exhaust Manifolds*; 1999.
- [26] ABAQUS/CAE. *User's Manual*; 2017.
- [27] Stephens R, Fatemi A, Fuchs H. *Metal fatigue in engineering*. 2nd edition. John Wiley; 2001.
- [28] Bartošák M. *Phenomenological models for lifetime prediction under low-cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue loading conditions* (Doctoral dissertation, Czech Technical University). 2019.
- [29] Ashouri H. Low cycle fatigue life prediction of an engine exhaust manifold. *Automotive Science and Engineering*. 2021;11(2):3560-3568.
- [30] Londhe A, Yadav V. *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; 2007.