



## بررسی اثر هندسه همریختگاه در بهینه‌سازی عمر خستگی کم‌چرخه منیفولد دود

### حجت عاشوری

استادیار، گروه مکانیک، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

### چکیده

خستگی ناشی از بارگذاری ترمومکانیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد آسیب و کاهش عمر منیفولد دود دارد. هدف این پژوهش ارزیابی اثر اصلاح هندسی و بهینه‌سازی همریختگاه منیفولد بر عمر خستگی کم‌چرخه آن است. در این پژوهش، تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه منیفولد دود با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس به منظور پیش‌بینی دما و تنش و سپس عمر خستگی کم‌چرخه با استفاده از تئوری اسمیت-واتسون-تایپر و نرم‌افزار انسیس انجام شد. خواص مکانیکی چدن خاکستری با استفاده از تست‌های خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف بدست آمده است. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث کاهش دمای آن در حدود ۳۴ درجه سانتیگراد می‌شود. براساس نتایج تحلیل مکانیکی، منیفولد دود بهینه‌سازی شده در مقایسه با منیفولد دود اولیه در حدود ۲۴ مگاپاسکال یا ۱۱ درصد تنش کمتری را تحمل می‌کند. نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه نشان داد که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث افزایش عمر خستگی آن در حدود ۵۹۸۰ سیکل یا ۵۰ درصد خواهد شد. 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 ناحیه بحرانی مطابقت مناسبی با ناحیه گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

**کلمات کلیدی:** منیفولد دود؛ بهینه‌سازی؛ تحلیل اجزای محدود و عمر خستگی کم‌چرخه.

## Investigating the effect of confluence geometry on optimizing the low-cycle fatigue life of the exhaust manifold

Hojjat Ashouri

Assist. Prof., Department of Mechanic, VaP.C., Islamic Azad University, Varamin, Iran.

### Abstract

Fatigue caused by thermomechanical loading plays a decisive role in causing damage and reducing the life of the exhaust manifold. The aim of this research was to evaluate the effect of geometric modification and optimization of the manifold confluence on its low-cycle fatigue (LCF) life. In this research, the LCF life analysis of the exhaust manifold was performed using the finite element method and ANSYS software to predict temperature and stress, and then the low-cycle fatigue life by using Smith-Watson-Topper theory and ANSYS NCode Design Life software. Mechanical properties of gray cast irons obtained by LCF tests at different temperatures. Thermal analysis results showed that optimizing the exhaust manifold reduces its temperature by about 34°C. Based on the results of thermo-mechanical analysis, the optimized exhaust manifold withstands about 24MPa or 11% less stress than the original exhaust manifold. The results of the low-cycle fatigue life analysis showed that optimizing the exhaust manifold will increase its fatigue life by about 5980 cycles or 50%. To verify the accuracy of the results of the thermo-mechanical analysis and LCF life, the simulated results were compared with the real sample of the damaged exhaust manifold and it was shown that the critical region corresponds well to the rupture region in the real sample.

**Keywords:** Exhaust manifold; Optimization; Finite element analysis and Low cycle fatigue life.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر باتوجه به گسترش روزافزون صنعت خودروسازی، بهینه‌سازی عملکرد موتور و ساخت موتورهایی با وزن و حجم کم، آلاینده‌گی حداقل و بازده بالا مورد توجه قرار گرفته است. منی‌فولد دود یکی از قطعات مهم و چالش برانگیز موتور است که وظیفه آن جمع‌آوری و انتقال گازهای داغ ناشی از احتراق موتور از سرسیندر به سمت کاتالیست یا توربوشاژر است [۱ و ۲]. منی‌فولد دود باید دوام و مقاومت خوبی در برابر گازهای داغ ناشی از احتراق از خود نشان دهد. با توجه به دمای بالای گازهای خروجی موتور، شناسایی نقاط بحرانی منی‌فولد دود به منظور پیش‌گیری از گسیختگی منی‌فولد دود بسیار مهم است. این قطعه باید از استحکام خستگی بالایی برخوردار باشد تا در مقابل تنش‌های حرارتی نوسانی موتور دچار مشکلاتی از قبیل تاب برداشتن، ایجاد ترک و نشی نشود [۳ و ۴]. با توجه به افزایش بازده موتور و در نتیجه افزایش دمای منی‌فولد دود، تنش‌های ترمومکانیکی وارد بر منی‌فولد دود افزایش می‌یابد که اهمیت تحلیل ترمومکانیکی، پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه و بهینه‌سازی آن را نشان می‌دهد [۵ و ۶].

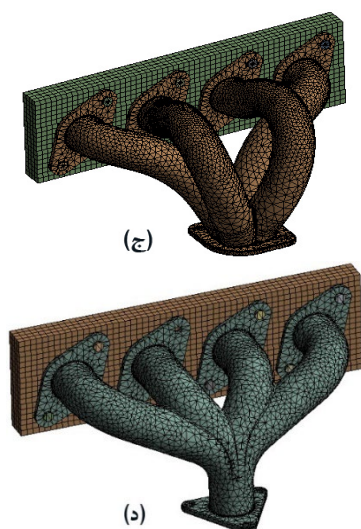
در زمینه تحلیل ترمومکانیکی، پیش‌بینی عمر خستگی و بهینه‌سازی منی‌فولد دود تاکنون پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. تحلیل ترمومکانیکی و بهینه‌سازی منی‌فولد دود به وسیله محمدی و صالح‌نژاد مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش ضخامت اتصال باعث افزایش مقاومت سازه‌ای منی‌فولد دود می‌شود [۷]. نصری و همکاران طرح‌های مختلفی را به منظور بهینه‌سازی منی‌فولد دود مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات مختلف موتور نشان داد که منی‌فولد دود بهینه‌سازی شده باعث افزایش توان موتور در حدود ۱۵ درصد [۸]. بهینه‌سازی و بهبود عمر خستگی منی‌فولد دود با استفاده از فین‌های حلقوی به وسیله عاشوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه نشان داد که استفاده از فین‌های حلقوی باعث افزایش عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود در حدود ۵۵ درصد می‌شود [۹]. عاشوری تحلیل ترمومکانیکی، پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه و بهینه‌سازی منی‌فولد دود را بادر نظر گرفتن گرادین تنش مورد پژوهش قرار داد. نتایج تحلیل عمر خستگی پرچرخه نشان داد که تعداد سیکل‌های گسیختگی منی‌فولد دود اصلاح شده در حدود ۶۳ درصد از منی‌فولد دود اولیه بیشتر

است [۱۰]. تحلیل گسیختگی و بهینه‌سازی منی‌فولد دود با استفاده از تحلیل‌های سیالاتی و اجزای محدود به وسیله لو و همکاران انجام شد. پژوهش آنها نشان داد که منی‌فولد دود اصلاح شده دچار گسیختگی نخواهد شد [۱۱]. وینایمورثی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عمر خستگی کم‌چرخه و پرچرخه منی‌فولد دود اقدام به بهینه‌سازی آن کردند. حداقل عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود ۳۰۰۰ سیکل تعیین گردید [۱۲]. کاله و همکاران تحلیل گسیختگی و بهینه‌سازی منی‌فولد دود را مورد پژوهش قرار دادند. بهینه‌سازی منی‌فولد دود باعث گردید که منی‌فولد دود در آزمون اعتبارسنجی دچار گسیختگی نشود [۴]. تحلیل سیالاتی منی‌فولد دود به منظور شناسایی نقاط بحرانی آن به وسیله رامش‌کومار و همکاران انجام شد. شبیه‌سازی آنها نشان داد که ناحیه پایینی منی‌فولد دود بحرانی است [۱۳]. لورنزینی و همکاران روش جدیدی را جهت ارزیابی طراحی منی‌فولد دود ارائه کردند که با استفاده از آن می‌توان عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد [۱۴]. بهینه‌سازی هندسی منی‌فولد دود موتور دیزل لوکوموتیو به وسیله آپایدین و همکاران انجام شد. براساس تحقیقات آنها جریان سیال در مدلی که خروجی منی‌فولد دود در وسط آن طراحی شده باشد، بهتر است [۱۵]. وای و همکاران تحلیل ترمومکانیکی و بهینه‌سازی منی‌فولد دود را مورد پژوهش قرار دادند. شبیه‌سازی آنها نشان داد که منی‌فولد دود اصلاح شده در حدود ۱۴ مگاپاسکال تنش کمتری را تحمل می‌کند [۱۶]. بهینه‌سازی منی‌فولد دود موتور M15 به وسیله نجات‌زادگان و همکاران انجام شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بهینه‌سازی منی‌فولد دود باعث کاهش افت فشار در آن می‌شود [۵]. تحلیل گسیختگی منی‌فولد دود یک موتور گازسوز به وسیله چن و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی آنها نشان داد که شکست خستگی کم‌چرخه علت گسیختگی منی‌فولد دود است [۱]. هایگیانگ و همکاران تحلیل ترمومکانیکی و گسیختگی منی‌فولد دود یک موتور بنزینی را انجام دادند. براساس تحقیقات آنها شکست خستگی حرارتی علت گسیختگی منی‌فولد دود است [۲]. بهینه‌سازی منی‌فولد دود یک موتور دیزل توربوشاژر دو مرحله‌ای به وسیله چن و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. بهینه‌سازی منی‌فولد دود باعث بهبود عملکرد موتور شد [۶]. لیو و همکاران بهینه‌سازی منی‌فولد دود را به منظور بهبود عملکرد موتور انجام دادند.

نیکلایف و همکاران بهینه‌سازی منی فولد دود را با تغییر جنس آن مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها نشان داد که فولاد ضدزنگ در مقایسه با چدن و تیتانیوم از دوام بیشتری برخوردار است [۳]. اثر شکل هندسی منی فولد دود بر توزیع صدای آن به وسیله کیو و همکاران ارزیابی شد. پژوهش آنها نشان داد که منی فولد ایزومتریک و ایزومتریک متقارن می‌توانند توزیع صدای منی فولد را کنترل کنند [۲۷]. سان و همکاران اثر قطر لوله منی فولد دود بر عملکرد موتور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش قطر منی فولد دود در یک محدوده مشخص، مصرف سوخت را در سرعت‌های پایین به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۲۸]. تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود با استفاده از مدل الاستوویسکوپلاستیک چابوچه به وسیله عاشوری مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که ماکزیمم دما و تنش در ناحیه هم‌ریختگاه قابل مشاهده است [۲۹]. پرتو و همکاران بهینه‌سازی منی فولد دود با استفاده از فین را مورد پژوهش قرار دادند. تحلیل‌های آنها نشان داد که استفاده از فین باعث کاهش تنش‌های حرارتی منی فولد دود در حدود ۲۸ درصد می‌شود [۳۰]. بهینه‌سازی منی فولد دود با تغییر تعداد مجرای خروجی آن به وسیله سنگامش و همکاران مورد پژوهش قرار گرفت. شبیه‌سازی آنها نشان داد که منی فولد دود چند مجرای نسبت به منی فولد دود تک مجرای حدود ۲۰ مگاپاسکال تنش کمتری را تحمل می‌کند [۳۱].

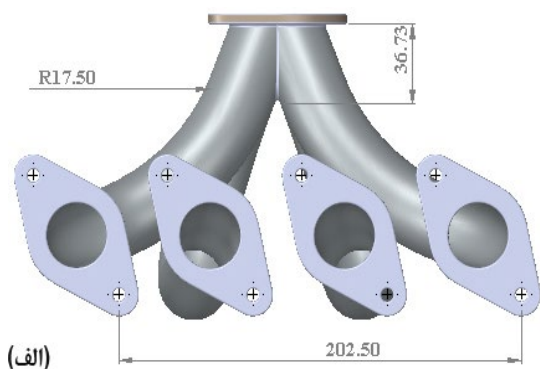
براساس مطالبی که در قسمت مقدمه ذکر شد، بررسی پژوهش‌هایی که در زمینه تحلیل و بهینه‌سازی منی فولد دود انجام شده است، نشان می‌دهد که محققین از روش‌های مختلفی مثل اصلاح طول طول‌ها یا تغییر ضخامت جداره منی فولد دود، اصلاح هندسی فلنج‌های ورودی و خروجی منی فولد دود، اصلاح شعاع فیلت لوله‌های منی فولد دود و استفاده از فین یا دیفیوزر به منظور بهینه‌سازی منی فولد دود استفاده نموده‌اند. بنابراین اصلاح هندسی هم‌ریختگاه منی فولد دود مورد پژوهش قرار نگرفته است. از طرف دیگر بررسی منابعی که در قسمت مقدمه بیان گردید، نشان می‌دهد که اصلاح هندسی منی فولد دود علاوه بر کاهش تنش ترمومکانیکی اعمالی بر منی فولد دود و افزایش عمر خستگی آن، باعث بهبود عملکرد موتور نیز می‌شود. بنابراین هدف این پژوهش ارزیابی اثر اصلاح هندسی هم‌ریختگاه منی فولد دود بر عمر خستگی

تحقیقات آنها نشان داد که بهینه‌سازی منی فولد دود باعث کاهش دما آن بصورت قابل توجه‌ای خواهد شد [۱۷]. تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه منی فولد دود با در نظر گرفتن اثر کشسان لزج به وسیله عاشوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه نشان داد که در نظر نگرفتن اثر کشسان لزج باعث می‌شود که عمر خستگی حدود ۵,۷ درصد بیشتر از مقدار مجاز تخمین زده شود [۱۸]. عاشوری تحلیل خستگی چندمحوره منی فولد دود را با در نظر گرفتن تنش ویسکوزیته انجام داد. براساس تحقیقات او در نظر نگرفتن اثر تنش ویسکوزیته باعث می‌شود که عمر خستگی حدود ۵,۲ درصد بیشتر از میزان مجاز تخمین زده شود [۱۹]. ارزیابی آسیب خستگی با استفاده از ترکیب روش‌های المان محدود و المان محدود توسعه یافته به وسیله اویوسف و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی آنها نشان داد که ناحیه هم‌ریختگاه منی فولد دود بحرانی است [۲۰]. نادری حق و همکاران عمر خستگی پرچرخه منی فولد دود یک موتور توربوشارژر را پیش‌بینی کردند. پژوهش آنها نشان داد که ماکزیمم تنش و حداقل عمر خستگی در ناحیه هم‌ریختگاه منی فولد دود قابل مشاهده است [۲۱]. پیش‌بینی عمر خستگی ترمومکانیکی منی فولد دود با استفاده از الگوی سیتقلو با در نظر گرفتن آسیب‌های اکسیدشدن و خزش به وسیله عاشوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل خستگی ترمومکانیکی ثابت کرد که آسیب مکانیکی نقش برجسته‌ای در خستگی ترمومکانیکی منی فولد دود دارد [۲۲]. راماسامی و همکاران بهینه‌سازی هندسی منی فولد دود را بررسی کردند. تحقیقات آنها نشان داد که بهینه‌سازی منی فولد دود باعث افزایش توان ترمزی در حدود ۰/۴ درصد خواهد شد [۲۳]. اثر بهینه‌سازی منی فولد دود بر قدرت خروجی موتور به وسیله بوبر و همکاران مورد پژوهش قرار گرفت. بررسی آنها نشان داد که امکان افزایش قدرت موتور در حدود ۲۱ اسب‌بخار با بهینه‌سازی منی فولد دود وجود دارد [۲۴]. مورالی و همکاران بهینه‌سازی هندسی منی فولد دود را با استفاده از تحلیل سیالاتی و روش تاگوچی انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که بهینه‌سازی منی فولد دود باعث کاهش فشار برگشتی در حدود ۱۳/۵۶ درصد خواهد شد [۲۵]. تحلیل شکست و بهینه‌سازی دیفیوزر منی فولد دود به وسیله جوشی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. پژوهش آنها نشان داد که خستگی حرارتی علت شکست دیفیوزر است [۲۶].



شکل ۱- الف - منیفولد دود اولیه، ب - منیفولد دود بهینه‌سازی شده، ج - مدل اجزای محدود منیفولد دود اولیه و د - مدل اجزای محدود منیفولد دود بهینه‌سازی شده

منیفولد دود از جنس چدن خاکستری با مدول یانگ ۱۱۵ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۶ و ضریب انبساط حرارتی  $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ساخته شده است [۸]. به منظور اینکه تحلیل اجزای محدود و بهینه‌سازی منیفولد دود به واقعیت نزدیکتر باشد، علاوه بر منیفولد دود، سرسیلندر نیز به صورت یک قطعه مجازی مدل‌سازی شده است. مدل اجزای محدود از ۱۰۴۰۷۹ المان جهت افزایش دقت نتایج تحلیل اجزای محدود تشکیل شده است. جهت مش‌بندی منیفولد دود از المان‌های سه‌بعدی Tet10 استفاده شده است. در شکل ۲ ابعاد هندسی مهم منیفولد دود اولیه و اصلاح شده نشان داده است. به منظور بهینه‌سازی منیفولد دود، ارتفاع همریختگاه منیفولد دود از ۳۶/۷۳ میلیمتر به ۴۴/۵۳ افزایش یافته است. شعاع همریختگاه نیز به ۳۵ میلیمتر افزایش یافته است.

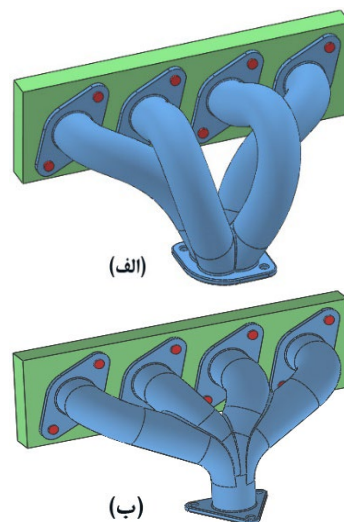


کم‌چرخه آن است. در این پژوهش جهت انجام تحلیل مکانیکی و سپس پیش‌بینی عمر خستگی منیفولد دود از تست‌های خستگی کم‌چرخه به منظور استخراج خواص مکانیکی منیفولد دود استفاده شده است. این نکته پژوهش حاضر را از مقالات مشابه متمایز می‌کند. برای این منظور ابتدا از نرم‌افزار سالی‌دورکس جهت مدل‌سازی منیفولد دود استفاده گردید. سپس از نرم‌افزار انسیس جهت تحلیل تنش‌های ترمومکانیکی منیفولد دود استفاده شد و در نهایت از نرم‌افزار انسیس ان‌کد دیزاین برای پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه منیفولد دود و بررسی اثر اصلاح هندسی همریختگاه منیفولد بر عمر خستگی آن استفاده گردید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل اجزای محدود

امروزه جهت کاهش هزینه و زمان تولید محصول از تکنیک‌های شبیه‌سازی به جای آزمون‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شود. منیفولد دود یکی از قطعات پیچیده و چالش برانگیز موتور است که تحلیل اجزای محدود نقش مهمی در تحلیل ترمومکانیکی، پیش‌بینی عمر خستگی و بهینه‌سازی آن دارد [۴، ۸ و ۱۲]. منیفولد دود اولیه و بهینه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شوند. برای تعریف بخش همگن از رابطه (۳) استفاده می‌شود

: [۳۲]

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_{\infty}(1 - \exp(b\dot{\epsilon}^{PL})) \quad (۳)$$

### ۳-۲- معادلات حاکم بر تحلیل ترمومکانیکی

انتقال حرارت در منی‌فولد دود به سه روش هدایت، جابه‌جایی و تابش صورت می‌گیرد [۳۱، ۳۳]. نرخ انتقال حرارت هدایتی در واحد سطح که شار حرارتی نامیده می‌شود، از قانون فوریه محاسبه می‌شود. انتقال حرارت ناشی از گازهای داغ خروجی موتور با جداره داخلی منی‌فولد دود، انتقال حرارت جابه‌جایی از نوع اجباری است. انتقال حرارت تابشی بین سطح خارجی منی‌فولد دود و محیط اطراف آن با استفاده از قانون استفان-بولتزمن بیان می‌شود. بنابراین [۳۳]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_{\text{conduction}} + q_{\text{convection}} + q_{\text{radiation}} = -kA(dT/dx) + h(T_{\text{gas}} - T_{\text{air}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{man}}^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (۴)$$

### ۴-۲- شرایط مرزی در تحلیل ترمومکانیکی

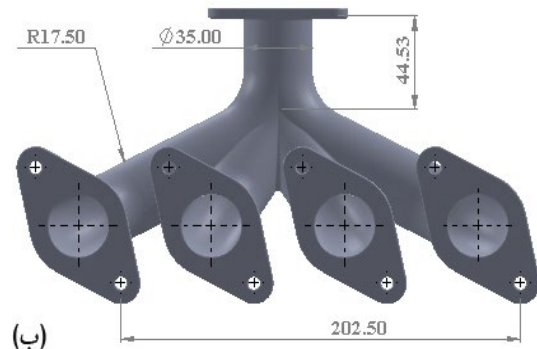
شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی منی‌فولد دود بصورت در نظر شده است [۹، ۱۸ و ۲۲]:

۱- گازهای داغ خروجی موتور جابه‌جایی اجباری در جداره داخلی منی‌فولد دود اعمال می‌کنند که این اثر با شرایط جابجایی بصورت  $500 \text{ W/m}^2\text{C}$  و دمای  $816$  درجه سانتیگراد مدلسازی شده است.

۲- سطح خارجی منی‌فولد در معرض انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و تابش قرار دارد. شرط انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح خارجی منی‌فولد دود بصورت  $25 \text{ W/m}^2\text{C}$  و دمای  $30$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. گسیلمندی سطح منی‌فولد دود برای مدلسازی انتقال حرارت تابشی  $0.77$  در نظر گرفته شده است.

۳- دمای فلنجهای ورودی و خروجی منی‌فولد دود به ترتیب  $355$  و  $122$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

۴- در این پژوهش سرسیلندر موتور بصورت یک قطعه مجازی مدلسازی شده و بصورت کامل مقید شده است. در سطح تماس بین سرسیلندر و منی‌فولد از تماس اصطکاکی استفاده شده است. شرط مرزی دیگر فشار گازهای خروجی موتور است که بصورت فشار بر جداره داخلی منی‌فولد دود اعمال شده است.



شکل ۲- ابعاد هندسی مهم منی‌فولد دود الف- اولیه و ب- بهینه‌سازی شده

### ۲-۲- مدل اجزای محدود

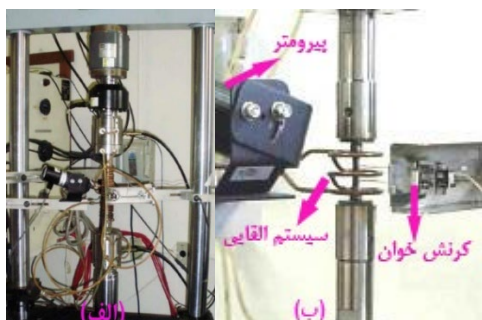
در این مقاله چدن خاکستری EN-JGL-250 با کاربرد در منی‌فولد دود موتور، مورد مطالعه قرار گرفته است. انتخاب یک مدل مناسب برای ارزیابی خستگی ترمومکانیکی مواد اهمیت زیادی دارد. مدل سخت‌شوندگی سینماتیک دارای دو قسمت مدل سخت‌شوندگی خطی و غیرخطی همگن-سینماتیک است. مدل دوم با سطح تسلیم وان مایسز به کار می‌رود و برای بررسی مسایل با بارگذاری سیکلی مثل منی‌فولد دود کامل‌ترین و دقیق‌ترین الگو است [۱ و ۲۹]. الگوی سخت‌شوندگی غیرخطی همگن-سینماتیک شامل حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  به عنوان تنش بازگشتی در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش مومسان است. در این الگو  $\sigma^0$  (اندازه سطح تسلیم) ثابت می‌ماند. بعبارت دیگر همواره مساوی  $\sigma_0$  که تنش تسلیم به ازای کرنش مومسان صفر است، باقی می‌ماند. این مدل بر اساس تحقیقات چاپوچه بنا نهاده شده است که معادله آن بصورت رابطه زیر است [۳۲]:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\epsilon}^{PL} - \gamma_{ij} \dot{\epsilon}^{PL} + \frac{1}{C} \dot{C} \alpha_{ij} \quad (۱)$$

تنش بازگشتی کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (۲)$$

در معادله (۲) با در نظر گرفتن  $N$  برابر ۳، متغیر سخت‌شوندگی به سه قسمت تقسیم می‌شود که باعث افزایش دقت الگو می‌شود. به منظور معرفی این الگو به نرم افزار انسیس لازم است بخش همگن و بخش سینماتیک بصورت جداگانه تعریف



شکل ۳- الف- دستگاه تست خستگی و ب- پیرومتر، سیستم القایی و دستگاه اندازه‌گیری کرنش

## ۲-۷- روند ارزیابی بهینه‌سازی همریختگاه منی فولد دود بر عمر خستگی کم‌چرخه آن

روند ارزیابی بهینه‌سازی همریختگاه منی فولد دود بر عمر خستگی کم‌چرخه آن بصورت زیر است:

- ۱- مدلسازی منی فولد دود اولیه در نرم‌افزار سالی‌دورکس
- ۲- مدلسازی منی فولد دود بهینه‌سازی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکس
- ۳- مش‌بندی منی فولد دود اولیه و بهینه‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس
- ۴- تعیین ثابت‌های مدل چابوچه با استفاده از تست‌های خستگی کم‌چرخه

- ۵- تعیین شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی در تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود
- ۶- تحلیل حرارتی و مکانیکی منی فولد دود اولیه و بهینه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار انسیس
- ۷- ارزیابی بهینه‌سازی همریختگاه منی فولد دود بر عمر خستگی کم‌چرخه آن با استفاده از نرم‌افزار انسیس ان‌کد دیزاین.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج تست خستگی کم‌چرخه

نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه نمونه‌های چدنی در دماهای ۳۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۴ نشان داده شده است. ثابت‌های قسمت سخت‌شوندگی ایزوتروپ مدل چابوچه باتوجه به نتایج آزمون‌های خستگی بدست آمده است که در جدول ۱ گزارش شده است. لازم به ذکر است که برای در نظر گرفتن قسمت سینماتیک مدل چابوچه، تنش تسلیم برحسب

فشار گازهای خروجی موتور ۰/۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۹].

## ۲-۵- مدل تحلیل خستگی کم‌چرخه

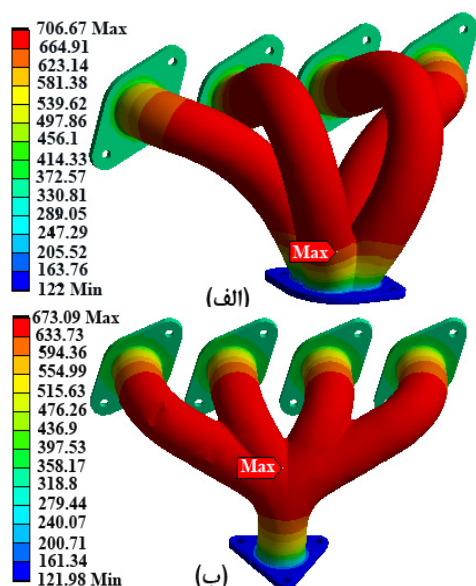
شکست خستگی قطعات مختلف موتور و خودرو فرایندی است ناگهانی که قبل از شکست هیچ تغییری در کارکرد آنها مشاهده نمی‌شود. بروز شکست خستگی در قطعات مختلف خطرناک و پرهزینه است. بنابراین لازم است عمر خستگی قطعات مختلف موتور تعیین و محاسبه شود. در طراحی قطعات حضور تنش میانگین غیر صفر می‌تواند بر روی رفتار خستگی ماده تاثیر داشته باشد. زیرا تنش میانگین کششی یا فشاری می‌تواند تشکیل و رشد ترک خستگی را کند یا تسريع نماید. مدل‌های مختلفی برای در نظر گرفتن تنش‌های میانگین در رفتار خستگی قطعات پیشنهاد شده‌اند [۳۴]. در تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه چدن خاکستری EN-JGL-250 می‌توان از دو معیار مارو و اسمیت-واتسون-تاپر استفاده کرد که معیار اخیر انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد [۳۵]. این مدل با معادله زیر بیان می‌شود [۳۴]:

$$E\epsilon_{a1}\sigma_{n,max} = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^a + (E\sigma'_f \epsilon'_f) (2N_f)^{a+c} \quad (5)$$

## ۲-۶- تست خستگی کم‌چرخه

در این پژوهش تست‌های خستگی کم‌چرخه براساس استاندارد ASTM-E606 تحت شرایط پایش کرنش مکانیکی و در دماهای ۳۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد روی نمونه‌های چدنی انجام شده است. نرخ کرنش مکانیکی در همه دماهای آزمون 0.003 1/s بود. تجهیزات تست خستگی کم‌چرخه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، از سامانه القایی برای گرم کردن نمونه تست خستگی استفاده شده است. کرنش مکانیکی و دمای نمونه با دستگاه اندازه‌گیری کرنش در دمای گرم و پیرومتر اندازه‌گیری شده است.

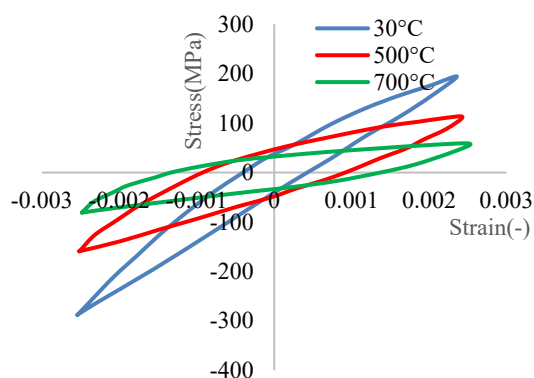
ناشی از همگرایی گازهای خروجی موتور در این ناحیه است که این نتیجه با منابع [۱، ۳، ۱۱، ۲۲ و ۲۹] مطابقت دارد. حداقل دما با توجه به تحلیل حرارتی، ۱۲۲ درجه سانتیگراد است و در فلنج خروجی منیفولد دود رخ داده است. کانتور توزیع دما در منیفولد دود اصلاح شده در شکل ۵-ب قابل مشاهده است که نشان می‌دهد ماکزیمم دما در منیفولد دود بهینه‌سازی شده ۶۷۳/۰۹ درجه سانتیگراد است و در هم‌ریختگاه آن رخ داده است. حداقل دما نیز ۱۲۱/۹۸ درجه سانتیگراد است و در فلنج خروجی منیفولد دود رخ داده است. با بررسی شکل ۵ ملاحظه می‌شود که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث کاهش دمای آن در حدود ۳۴ درجه سانتیگراد می‌شود. بنابراین منیفولد دود تنش حرارتی کمتری را تحمل نموده و عمر خستگی آن افزایش خواهد یافت.



شکل ۵- توزیع دما در منیفولد دود الف- اولیه و ب- اصلاح شده

در شکل ۶ تغییرات دما در یک سیکل موتور در گره بحرانی در منیفولد اولیه و بهینه‌سازی شده قابل مشاهده است که نشان می‌دهد که منیفولد دود اصلاح شده در حدود ۴/۷ درصد دمای کمتری را تحمل می‌نماید. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث کاهش تنش اعمالی و در نهایت باعث افزایش عمر خستگی آن شود.

کرنش پلاستیک باتوجه به نتایج آزمون‌های خستگی محاسبه شده است و وارد نرم‌افزار انسیس شده است.



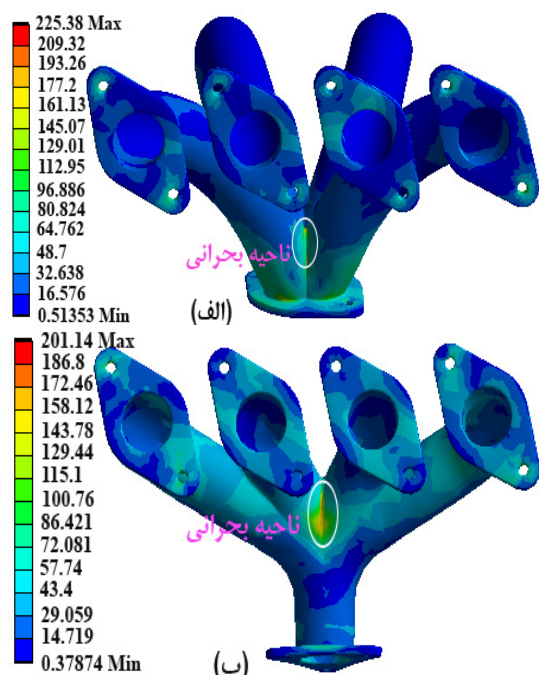
شکل ۴- نتایج تست خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف

جدول ۱- ثابت‌های ایزوتروپ مدل چابوچه

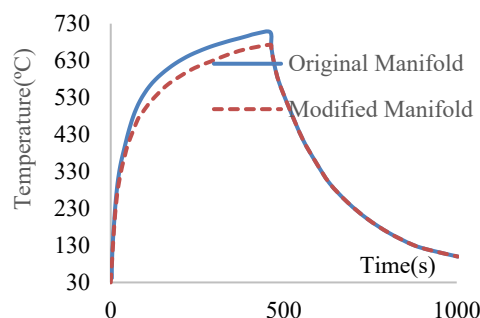
| b(-) | $Q_n$ (MPa) | E(GPa) | T(°C) |
|------|-------------|--------|-------|
| ۰/۲۷ | ۴۱/۸۸       | ۱۲۴/۳۱ | ۳۰    |
| ۰/۵۴ | -۴۸/۸۹      | ۸۹/۹۷  | ۵۰۰   |
| ۰/۷۱ | -۲۳/۳۶      | ۶۹/۷۶  | ۷۰۰   |

### ۳-۲- تحلیل حرارتی

خستگی ناشی از بارگذاری حرارتی نقش تعیین کننده‌ای در ایجاد آسیب و کاهش عمر خستگی منیفولد دود دارد. تنش‌های غالب و حاکم در منیفولد دود، تنش‌های حرارتی هستند که منجر به خستگی کم‌چرخه در آن می‌شوند [۱، ۲ و ۱۴]. بنابراین تحلیل حرارتی منیفولد دود مهمترین گام در تحلیل ترمومکانیکی و سپس پیش‌بینی عمر خستگی آن است. زیرا پیش‌بینی دقیق توزیع دما در نقاط مختلف منیفولد دود باعث افزایش دقت تحلیل مکانیکی در توزیع تنش‌های ترمومکانیکی در مختلف منیفولد دود و در نهایت پیش‌بینی دقیق عمر خستگی آن خواهد شد [۱، ۱۸ و ۲۹]. یک سیکل کامل موتور در تحلیل حرارتی منیفولد دود بصورت افزایش دمای منیفولد دود از دمای محیط تا ماکزیمم دمای کاری موتور و سپس کاهش دمای منیفولد دود تا دمای محیط مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل حرارتی منیفولد دود در شکل ۵-الف نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که ماکزیمم دما برابر ۷۰۶/۶۷ درجه سانتیگراد است و در محل تقاطع لوله‌های یا هم‌ریختگاه منیفولد دود رخ داده است که



شکل ۷- توزیع تنش در منیفولد دود الف- اولیه و ب- اصلاح شده



شکل ۶- تغییرات دما در یک سیکل موتور در منیفولد دود اولیه و اصلاح شده

### ۳-۳- تحلیل مکانیکی

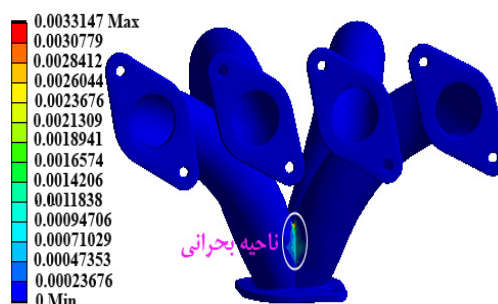
منیفولد دود یکی از قطعات مهم موتور است که تنش مکانیکی ناشی از پیش‌بار پیچ‌ها و تنش حرارتی ناشی از تغییرات دمای موتور را تحمل می‌کند و باتوجه به اینکه در معرض تغییرات شدید دما و فشار احتراق قرار دارد، قطعه‌ای بسیار بحرانی است. بنابراین تحلیل ترمومکانیکی تنش‌های اعمالی بر منیفولد دود به منظور پیش‌بینی عمر خستگی آن لازم و ضروری است. هدف تحلیل مکانیکی شناسایی نقاط بحرانی است. برای اساس نقاطی از منیفولد دود که ماکزیمم تنش ترمومکانیکی را تحمل می‌کنند از دیدگاه تحلیل مکانیکی بحرانی هستند [۱-۳ و ۱۱] توزیع دمای بدست آمده از تحلیل حرارتی به همراه نیروی پیش‌بار پیچ‌های منیفولد دود در تحلیل مکانیکی بر آن اعمال می‌شود [۲، ۳ و ۱۴]. نتایج تحلیل مکانیکی منیفولد دود اولیه در شکل ۷-الف نشان داده شده است. نتایج تحلیل مکانیکی نشان می‌دهد که ماکزیمم تنش وان مایسس در منیفولد دود اولیه ۲۲۵/۳۸ مگاپاسکال است و در همریختگاه آن رخ داده است. این نتیجه در تحلیل مکانیکی منیفولد دود که در منابع [۳، ۲۲، ۲۹ و ۳۰] انجام شده است نیز گزارش شده است. توزیع تنش در منیفولد دود اصلاح شده در شکل ۷-ب قابل مشاهده است که نشان می‌دهد ماکزیمم تنش وان مایسس در منیفولد دود بهینه‌سازی شده ۲۰۱/۱۴ مگاپاسکال است و در همریختگاه منیفولد دود قابل مشاهده است.

با بررسی شکل ۷ ملاحظه می‌شود که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث کاهش تنش آن در حدود ۲۴ مگاپاسکال می‌شود. عبارت دیگر منیفولد دود بهینه‌سازی شده درمقایسه با منیفولد دود اولیه در حدود ۱۱ درصد تنش کمتری را تحمل خواهد نمود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بهینه‌سازی منیفولد دود باعث افزایش عمر خستگی آن شود. کرنش پلاستیک معیاری دیگری جهت شناسایی نقاط بحرانی منیفولد دود است. براساس نتایج منابع [۱، ۱۴ و ۱۸] جوامه‌زنی ترک‌های خستگی در منیفولد دود در نقاطی از آن رخ خواهد داد که کرنش پلاستیک در آنها ایجاد می‌شود. توزیع کرنش پلاستیک در شکل ۸ نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که کرنش پلاستیک از صفر بزرگتر است و نشان می‌دهد که ماده منیفولد دود وارد ناحیه تسلیم شده است. با بررسی شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که ماکزیمم تنش وان مایسس و کرنش پلاستیک در همریختگاه منیفولد دود موتور داده است. بنابراین همریختگاه منیفولد دود ناحیه بحرانی است و احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در آن وجود دارد.

چدن سیلیسیم-مولیبدن است. در منبع مذکور ماکزیمم دما و تنش در همریختگاه منی فولد دود رخ داده که به ترتیب ۷۵۷/۲ درجه سانتیگراد و ۳۹۵/۲ مگاپاسکال گزارش شده است. بر اساس نتایج تحلیل حرارتی منی فولد دود فولادی که در منبع [۱۴] انجام شده، ماکزیمم دما ۸۷۰ درجه سانتیگراد است که در همریختگاه قابل مشاهده است. این نتایج صحت تحلیل ترمومکانیکی را تایید می‌کند.

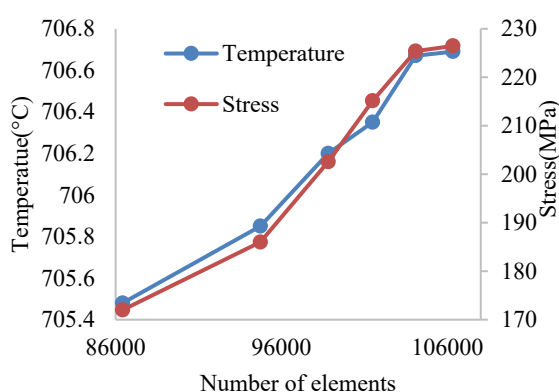
### ۳-۴- تحلیل خستگی کم‌چرخه

منی فولد دود باید بتواند در مقابل بارهای سیکلی ترمومکانیکی مقاومت نموده و مقاومت به شکست خستگی ترمومکانیکی بالایی داشته باشد تا بتواند دوام مورد نیاز را تامین کند [۳] و [۴]. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که معیار کرنش پایه اسمیت-واتسون-تاپر انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارد [۳۵]. بنابراین در این پژوهش از این معیار استفاده شده است. نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه منی فولد دود اولیه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که عمر خستگی منی فولد دود در معیار فوق برای ناحیه بحرانی همریختگاه ۱۲۰۱۰ سیکل است. این نتیجه نشان می‌دهد که عمر خستگی منی فولد دود از ۱۰۰۰۰۰ سیکل کمتر است و بنابراین منی فولد دود تحت خستگی کم‌چرخه قرار دارد [۳۴]. با بررسی شکل‌های ۷ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که نواحی بحرانی در تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی با یکدیگر مطابقت دارند. نتایج تحلیل عمر خستگی منی فولد دود بهینه‌سازی شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که حداقل عمر خستگی کم‌چرخه ۱۷۹۹۰ سیکل است و در ناحیه همریختگاه منی فولد دود قابل مشاهده است. بررسی نتایج تحلیل خستگی نشان می‌دهد که عمر خستگی منی فولد دود اصلاح شده در مقایسه با منی فولد دود اولیه حدود ۵۹۸۰ سیکل بیشتر است. بنابراین بهینه‌سازی منی فولد دود باعث افزایش عمر خستگی آن در حدود ۵۰ درصد خواهد شد.



شکل ۸- توزیع کرنش پلاستیک در منی فولد دود اولیه

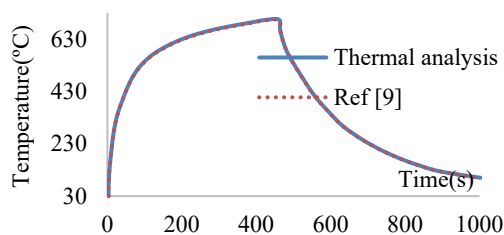
در شکل ۹ نتایج تحلیل ترمومکانیکی منی فولد دود اولیه برحسب تعداد المان مورد استفاده در مش‌بندی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد المان، تغییرات دما ناچیز است. مقدار تنش وان مایسس با افزایش تعداد المان بیش از ۱۰۴۰۷۹ المان، تغییر قابل توجهی نمی‌کند. بنابراین بهترین تعداد المان ۱۰۴۰۷۹ است.



شکل ۹- همگرایی مش در منی فولد دود اولیه

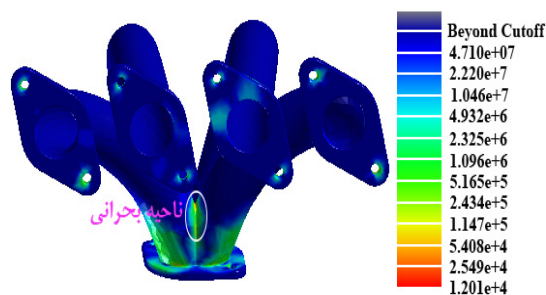
در منبع [۱۰] بهبود عمر خستگی پرچرخه منی فولد دود از جنس EN-JGL-250 و شکل هندسی تقریباً مشابه پژوهش حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است. ماکزیمم دما و تنش در منبع مذکور در همریختگاه منی فولد دود به ترتیب ۷۰۷/۱۲ درجه سانتیگراد و ۲۱۹/۰۷ مگاپاسکال محاسبه شده است. بنابراین اختلاف نتایج تحلیل حرارتی و مکانیکی پژوهش حاضر با منبع مذکور با شکل هندسی و جنس مشابه به ترتیب تقریباً ۰/۰۶۴ و ۲/۹ درصد است. در پژوهش دیگری تحلیل خستگی منی فولد دود با در نظر گرفتن تنش ویسکوزیته در منبع [۱۸] با شکل هندسی مشابه انجام شده که جنس منی فولد دود از

این پژوهش ۷۰۶/۶۷ درجه سانتیگراد و در همریختگاه منی‌فولد دود قابل مشاهده است. بنابراین انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل حرارتی این پژوهش و منبع [۹] وجود دارد. در شکل ۱۲ تغییرات دما در گره بحرانی برای یک سیکل موتور با منبع [۳۲] مقایسه شده است. بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که اختلاف نتایج تحلیل حرارتی و منبع [۹] ۱/۵۷ درجه سانتیگراد یا حدود ۰/۲ درصد است. ماکزیمم تنش وان مایسز در منبع [۹] ۲۳۳,۱۲ مگاپاسکال محاسبه شده است که در ناحیه همریختگاه منی‌فولد دود رخ داده است. ماکزیمم تنش وان مایسز در این پژوهش ۲۲۵/۳۸ مگاپاسکال است که در ناحیه همریختگاه منی‌فولد دود قابل مشاهده است. عبارت دیگر اختلاف تنش وان مایسز در تحلیل مکانیکی در مقایسه با منبع [۹] ۷/۷۴ مگاپاسکال یا حدود ۳/۳ درصد است. بنابراین انطباق مناسبی بین نتایج تحلیل مکانیکی این پژوهش و منبع مذکور وجود دارد. حداقل عمر خستگی کم‌چرخه در منبع [۹] ۱۲۴۹۳ سیکل در معیار اسمیت-واتسون-تایپر در ناحیه همریختگاه منی‌فولد دود پیش‌بینی شده است. حداقل عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود اولیه در این پژوهش ۱۲۰۱۰ است که در ناحیه همریختگاه منی‌فولد دود قابل مشاهده است. عبارت دیگر اختلاف عمر خستگی کم‌چرخه در ناحیه بحرانی منی‌فولد دود در مقایسه با منبع [۹] ۴۸۳ سیکل یا حدود ۳/۹ درصد است. بنابراین انطباق مناسبی بین نتایج تحلیل عمر خستگی کم‌چرخه این پژوهش و منبع مذکور وجود دارد.

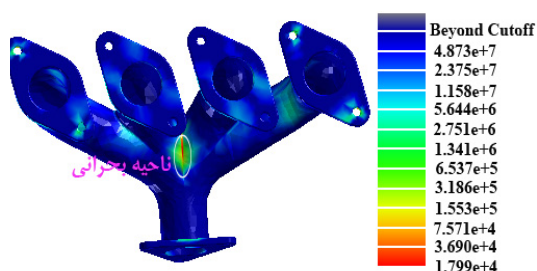


شکل ۱۲- مقایسه تغییرات دما در گره بحرانی در یک سیکل موتور با نتایج منبع [۹]

نتایج تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد که ناحیه همریختگاه منی‌فولد دود موتور بحرانی است و حداکثر تنش وان مایسز و حداقل عمر خستگی کم‌چرخه در آن قابل مشاهده است. منی‌فولد دود آسیب دیده در شرایط واقعی



شکل ۱۰- عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود اولیه



شکل ۱۱- عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود اصلاح شده

در جدول ۲ نتایج تحلیل اجزای محدود در منی‌فولد دود اولیه و اصلاح شده با یکدیگر مقایسه شده است. با بررسی جدول ۲ ملاحظه می‌شود که دما و تنش در منی‌فولد دود اصلاح شده در مقایسه با منی‌فولد دود اولیه به ترتیب ۴/۷ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. عمر خستگی منی‌فولد بهینه‌سازی شده نیز نسبت به مدل اولیه در حدود ۵۰ درصد افزایش یافته است.

جدول ۲- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود

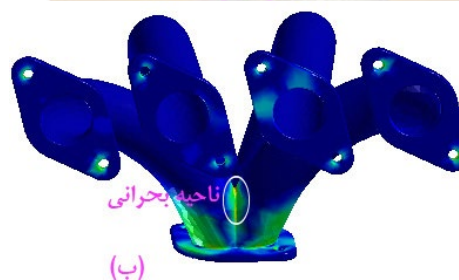
| مدل       | دما (°C) | تنش (MPa) | عمر خستگی (Cycle) |
|-----------|----------|-----------|-------------------|
| اولیه     | ۷۰۶/۶۷   | ۲۲۵/۳۸    | ۱۲۰۱۰             |
| اصلاح شده | ۶۷۳/۰۹   | ۲۰۱/۱۴    | ۱۷۹۹۰             |

### ۳-۵- اعتبارسنجی نتایج تحلیل اجزای محدود

به منظور ارزیابی نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی کم‌چرخه منی‌فولد دود از نتایج پژوهش منبع [۹] استفاده شده است. در این پژوهش اثر فین‌های حلقوی بر عمر خستگی کم-چرخه منی‌فولد دود از جنس EN-JGL-250 مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مدل هندسی منی‌فولد دود در پژوهش حاضر مشابه مدل هندسی منبع مذکور است و فقط فلنج‌های ورودی آنها با یکدیگر متفاوت است. در منبع مذکور ماکزیمم دما در منی‌فولد دود ۷۰۵/۰۹ درجه سانتیگراد و در همریختگاه منی‌فولد دود پیش‌بینی شده است. ماکزیمم دما در

خستگی آن شود. ماکزیمم تنش وان مایسس در منی فولد دود اولیه و اصلاح شده به ترتیب ۲۲۵/۳۸ و ۲۰۱/۱۴ مگاپاسکال در ناحیه همریختگاه منی فولد دود محاسبه گردید. نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که پیستون اصلاح شده حدود ۲۴ مگاپاسکال تنش کمتری را تحمل می کند. بنابراین بهینه سازی منی فولد دود باعث کاهش تنش منی فولد دود در حدود ۱۱ درصد خواهد شد. براساس نتایج تحلیل عمر خستگی کم چرخه حداقل تعداد سیکل های گسیختگی منی فولد دود اولیه و اصلاح شده به ترتیب ۱۲۰۱۰ و ۱۷۹۹۰ سیکل است که در ناحیه همریختگاه منی فولد دود پیش بینی گردید. بنابراین عمر خستگی کم چرخه منی فولد دود اصلاح شده در مقایسه با منی فولد دود اولیه ۵۹۸۰ سیکل یا در حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که ناحیه همریختگاه منی فولد دود ناحیه بحرانی است و حداکثر تنش وان مایسس و حداقل عمر خستگی کم چرخه در آن قابل مشاهده است. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی کم چرخه، نتایج شبیه سازی شده با نتایج تحلیل اجزای محدود منی فولد دود در منبع [۹] مقایسه گردید و نشان داده شد که انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل اجزای محدود در این پژوهش و نتایج منبع [۹] وجود دارد. نتایج شبیه سازی شده با نمونه واقعی منی فولد دود آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که ناحیه بحرانی منی فولد دود مطابقت مناسبی با ناحیه گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

کارکرد موتور در شکل ۱۳-الف نشان داده شده است که محل ایجاد ترک در ناحیه همریختگاه منی فولد دود قرار دارد. این نتیجه در یافته های پژوهش حاضر که براساس آن حداکثر تنش ترمومکانیکی و حداقل عمر خستگی کم چرخه در ناحیه مذکور رخ داده است، نیز قابل مشاهده است.



شکل ۱۳-الف- منی فولد دود گسیخته شده در شرایط واقعی در پژوهش لونده و یاداف [۳۶] و ب- ناحیه بحرانی منی فولد دود در پژوهش حاضر

#### ۴- نتیجه گیری

هدف این پژوهش ارزیابی اثر اصلاح هندسی و بهینه سازی همریختگاه منی فولد بر عمر خستگی کم چرخه آن است. با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود امکان پیش بینی دقیق و قابل اطمینان توزیع دما، تنش و عمر خستگی کم چرخه منی فولد دود وجود دارد. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که ماکزیمم دما در منی فولد دود اولیه و اصلاح شده به ترتیب ۷۰۶/۶۷ و ۶۷۳/۰۹ درجه سانتیگراد است که در ناحیه همریختگاه منی فولد دود قابل مشاهده است. بنابراین منی فولد دود بهینه سازی شده در مقایسه با منی فولد دود اولیه حدود ۳۴ درجه سانتیگراد یا ۴،۷ درصد دمای کمتری را تحمل می نماید. بنابراین می توان انتظار داشت که بهینه سازی منی فولد دود باعث کاهش تنش اعمالی و در نهایت باعث افزایش عمر

#### ۵- فهرست علائم

|                                                      |               |
|------------------------------------------------------|---------------|
| ثابت ماده، (-)                                       | $b$           |
| نمای شکل پذیری خستگی، (-)                            | $c$           |
| ثابت ماده، MPa                                       | $C$           |
| مدول الاستیسیته، GPa                                 | $E$           |
| هدایت حرارتی، W/m°C                                  | $k$           |
| هدایت جابه جایی، W/m <sup>2</sup> C                  | $h$           |
| تعداد سیکل های گسیختگی، (-)                          | $N_f$         |
| دمای گاز، °C                                         | $T_{gas}$     |
| دمای هوا، °C                                         | $T_{air}$     |
| دمای منی فولد، °C                                    | $T_{man}$     |
| گسیلمندی، (-)                                        | $\varepsilon$ |
| ثابت استفان-بولتزمن، W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> | $\sigma$      |

- [13] Ramesh Kumar R, Razak A, Alshahrani S, Sharma A, Thakur D, Shaik S, Saleel A, Afzal A (2022) Vibration analysis of composite exhaust manifold for diesel engine using CFD. *Case Stud Ther Eng* 32: 1-13.
- [14] Lorenzini M, Barbieri SG, Mangeruga V, Giacomini M (2023) Development of an experimental/numerical validation methodology for the design of exhaust manifolds of high performance internal combustion engines. *Eng Fail Anal* 152: 1-23.
- [15] Apaydin S, Doner N (2024) Flow analysis in different geometries for optimization of exhaust manifold in a locomotive diesel engine. *Ain Shams Eng J* 15: 1-14
- [16] Yi L, Gang W, Pan N, Wang W, Mo S (2023) Fluid-Structure Coupled Analysis of the Transient Thermal Stress in an Exhaust Manifold. *Fluid Dyn Mater Proc* 19(11): 2777-2790.
- [17] Liu S, Leng L, Zhou W, Shi L (2021) Optimizing the Exhaust System of Marine Diesel Engines to Improve Low-speed Performances and Cylinder Working Conditions. *Fluid Dyn Mater Proc* 17(4): 683-695.
- [18] Ashouri H (2023) Low cycle fatigue life analysis for exhaust manifold considering Elastoviscoplastic effect. *J Engine Res* 70(2): 22-36.
- [19] Ashouri H (2024) Multiaxial fatigue analysis of exhaust manifold with considering viscosity stress. *J New Appl Comput Findings Mech Systems* 4( 3): 11-22.
- [20] Ouyoussef N, Moustabchir H, Scutaru ML, Vasile O (2025) Damage Assessment and Fatigue Life Prediction in Exhaust Manifolds Through a Unified Method Using the FEM and XFEM. *Appl Sci* 15: 1-29.
- [21] 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. *J Eng Res* 60: 29-45.
- [22] Ashouri H (2025) Thermo-mechanical fatigue life prediction for exhaust manifold based on Sehitoglu model considering oxidation and creeping damages. *J Eng Res* 71(4):1-14.
- [23] Ramasamy G, Razlan ZM, Shahrman Abu Bakar S, Rojan MA, Ishak AA, Hilmi Rani MF, Guan NY, Murali R, Sunan S, Akbar Ali MH (2024) Elucidating Optimal Exhaust Manifold Divergence and Temperature Distribution in Improving Low-End Engine Speed Performance. *J Adv Res Fluid Mech Ther Sci* 113(1): 153-166.
- [24] Bober B, Andrych-Zalewska M, Boguś P (2024) Influence of exhaust manifold modification on engine power. *Combustion Engines* 196(1): 54-65.
- [25] Murali R, Shahrman AB, Razlan ZM, Ahmad WKW, Azizul AI, Rojan MA, Ma'arof MIN, Radzuan MA, Hassan MASM, Ibrahim Z, Design optimization of exhaust manifold's length for Spark

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| ثابت ماده، (-)            | $\gamma$              |
| نرخ کرنش پلاستیک، (-)     | $\dot{\epsilon}^{PL}$ |
| ضریب مقاومت خستگی، MPa    | $\sigma_f$            |
| ضریب شکل‌پذیری خستگی، (-) | $\epsilon_f$          |

## مراجع

- [1] Chen G, Hu Y, Yan S, Zhu J, Yang L, Dong Z (2023) Failure analysis of a natural gas engine exhaust manifold. *Eng Fail Anal* 154: 1-16.
- [2] Haiqiang L, Hong Q, Bo Z (2024) Failure and thermal-mechanical coupling analysis of exhaust manifold of a gasoline engine. *Struct* 70: 1-9.
- [3] Nikolaev NK, Skvortsov AA, Khudayarov ZF, Nikolaev RS (2025) Optimization of exhaust catalytic manifold of internal combustion engine, *J Mater Sci: Mater Eng* 20: 1-19.
- [4] Kale P, Potdar V, Thakur AG, Paygude S (2024) Failure Investigation and Design Improvements for Ductile Cast Iron Multi-Piece Exhaust Manifold from Medium Duty Diesel Engine. *SAE Technical Paper Paper No. 2024-26-0335*.
- [5] Nejatadegan F, Sobhani V, Pahlavan M, Dehghan A (2025) Effect of exhaust manifold geometry design on the performance of an internal combustion engine. *Int Commun Heat Mass Transf* 162: 1-9.
- [6] Chen X, Chen T, Zhang K, Hu Z, Qiu H, Shi L, Deng K (2025) Optimization of turbocharging mode switching in multi-turbocharged marine diesel engines based on active exhaust energy redistribution. *Appl Ther Eng* 276: 1-15.
- [7] Mohammadi A, Salehnejad MA (2019) Thermomechanical Analysis of Exhaust Manifold and Catalyst for with Fluid Structure Interaction. *J Engine Res* 56: 55-64.
- [8] Nasri H, Jalali A, Hedayati A (2020) Design, Optimization and Manufacture of Exhaust Manifold for a Outboard Spark Ignition Engine. *J Solid Fluid Mech* 10(1): 253-268.
- [9] Ashouri H (2021) Effect of perimeter fins in low cycle fatigue for exhaust manifold. *J Engine Res* 61: 23-34.
- [10] Ashouri A (2023) Improving High Cycle Fatigue Life in An Exhaust Manifold Using Perimeter Fins with Considering Stress Gradient. *Int J Adv Design Manuf Technol* 16(3): 63-70.
- [11] Luo X, Zou P, Zeng X, Yuan X, Bin L, Ho T, Yingtao X (2020) Failure Prediction and Design Optimization of Exhaust Manifold based on CFD and FEM Analysis. *SAE Technical Paper No.2020-01-1166*.
- [12] Vinaya Murthy V, Namani P, Vellandi V, Rengaraj C (2021) Integrated Exhaust Manifold Design & Optimization of it through HCF and LCF Simulations for a BS6 Compliant Diesel Engine. *SAE Technical Paper No.2021-28-0168*.

- [31] Sangamesh R, Twinkle R, Chiniwar DS, Vishwanatha HM, 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. *Int J Interact Des Manuf* 16: 1-10.
- [32] Chaboche J L (2008) A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int J Plast* 24: 1642–1693.
- [33] Konstantinidis PA, Koltsakis GC, Stamatelos AM (1997) Transient heat transfer modelling in automotive exhaust systems. Part C : *J Mech Eng Sci* 211(1): 1-15.
- [34] Stephens R, Fatemi A, Fuchs H (2001) *Metal fatigue in engineering*. 2nd edition. John Wiley, New York.
- [35] Gigan GL (2015) On improvement of cast iron brake discs for heavy vehicles. Ph.D Thesis, Sweden.
- [36] 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.
- Ignition (SI) engine through CFD analysis on low-end rpm using Taguchi's Method. *J Phys* 2051: 1-7.
- [26] Joshi B, Shih HR, Rose B (2018) Failure Analysis and Robust Optimization of an Exhaust Manifold Diffuser Plate. *J Fail Anal and Preven* 18: 486–495.
- [27] Qiu S, Yuan ZC, Fan RX, Liu J (2019) Effects of exhaust manifold with different structures on sound order distribution in exhaust system of four-cylinder engine. *Appl Acoust* 145: 176–183.
- [28] Sun Z, Songy Z, Ma H, Liu C (2025) Study the Effect of Exhaust Manifold Diameter on the Output Performance of a Four-Cylinder Spark Ignition Engine. *Int J High Speed Electron Syst* 34(4):1-10.
- [29] Ashouri H (2021) Thermo-mechanical analysis for exhaust manifold using elasto-viscoplastic chaboche model. *Automot Sci Eng* 11(4): 3682-3692.
- [30] Partoaa AA, Abdolzadeh M, Rezaeizadeh M (2017) Effect of fin attachment on thermal stress reduction of exhaust manifold of an off road diesel engine. *J of Cent South Univ* 24: 546-559.