



تحلیل ریشه‌های خرابی شکست محافظ حرارتی پایینی چندراهه دود

محمد کاظمی^{۱*}، مهدی روزبان^۲، امیر مافی^۳، حامد نوایی^۴، مهدی رضایی^۵

^۱شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، m_kazemi@ip-co.com

^۲شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، m_roozban@ip-co.com

^۳شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، a_mafi@ip-co.com

^۴شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، h_navabi@ip-co.com

^۵شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، me_rezaei@ip-co.com

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۰۲۱۰۸۱۳۳

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۵ مهر ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

محافظ حرارتی

تحلیل موادی

تنش حرارتی و ارتعاشی

تحلیل اجزاء محدود

محافظ حرارتی چندراهه دود، یکی از قطعات مهم موتور خودروهای سواری است. در اکثر موتورها یک یا دو محافظ حرارتی بر روی چندراهه دود نصب می‌شود تا از انتقال حرارت به قطعات فوقانی موتور جلوگیری شود. از آنجا که این قطعه تحت بارهای حرارتی و ارتعاشی ناشی از کارکرد موتور است، احتمال شکست آن تحت این بارها زیاد است. شکست این قطعه موجب اغتشاش، سروصدا و خرابی‌های دیگر در موتور می‌گردد. عوامل مؤثر در این خرابی بر اساس نمودار استخوان ماهی مشخص گردید و محتمل‌ترین دلایل آن بررسی شدند. در این تحقیق، شکست محافظ حرارتی پایینی یک موتور بنزینی به روش تحلیل خرابی (ابعادی، ساختی، موادی، CAE و ...) بررسی شد. سپس از طریق شبیه‌سازی اجزاء محدود روش‌های اصلاح آن پیشنهاد شد. با توجه به نمودار استخوان ماهی و بررسی اثرات شکست دلیل اصلی خرابی محافظ حرارتی پایینی عدم ساخت دقیق و همبندی کامل این قطعه بوده است. این قطعه به لحاظ ابعادی دقیق نبود و باید با دقت بیشتری ساخته شود و همبندی گردد. همچنین نتیجه‌گیری شد محافظ حرارتی به لحاظ موادی و روش ساخت مشکل خاصی ندارد. بنابراین برای جلوگیری از شکست این قطعه علاوه بر رفع کلیه مغایرت‌ها ساخت و با توجه به نتایج این تحلیل CAE از جمله ایجاد پنخ، خمکاری لبه به سمت بالا یا پایین و ادامه دادن امتداد فرورفتگی برای افزایش استحکام این قطعه ارایه می‌شود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

قطعه محافظ حرارتی، یکی از قطعات مهم موتورهای احتراق داخلی است که به شکل‌های مختلف، در اکثر موتورها وجود دارد. این قطعه که بر روی چندراهه دود نصب می‌شود، از انتقال حرارت چندراهه دود به قسمت‌های فوقانی موتور و قطعات دیگر خودرو جلوگیری می‌نماید. در شکل ۱، موقعیت محافظ حرارتی یک موتور بنزینی نشان داده شده است. این موتور دارای دو محافظ حرارتی است که سپر اول به‌طور مستقیم بر روی چندراهه دود قرار می‌گیرد و سپر دوم نیز با یک فاصله از سپر اول نصب می‌شود. سپر دوم وظیفه آب‌بندی چندراهه دود را نیز بر عهده دارد از این رو برخی قطعه اول را محافظ حرارتی و قطعه دوم را عایق آب‌بندی چندراهه دود می‌نامند اما از آنجا که قطعه دوم سهم مهمی در جلوگیری از انتقال حرارت به قسمت‌های فوقانی موتور بخصوص قالباق دریچه دارد، به عنوان یک محافظ حرارتی است.

بررسی محافظ حرارتی موتور پس از آزمون‌های دوام ۱۱۰ و ۵۰۰ ساعت، نشان داد که محافظ دوم تقریباً از مرکز شکسته شده است (شکل ۲). وجود ترک و شکست در قطعه محافظ حرارتی بالایی بعضاً در برخی از آزمون‌های دوام مشاهده شده است. در حالی که شکست محافظ حرارتی پایینی در طی آزمون‌های صحنه‌گذاری، برای اولین مرتبه رخ داده است و در اکثر آزمون‌ها مشاهده شده است. نکته مهم دیگر این است که با توجه به موقعیت موتور در خودروها، تعویض این قطعه بسیار مشکل و هزینه‌بر است. بنابراین بررسی شکست و اصلاح آن در مرحله صحنه‌گذاری، امری ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش به علل خرابی قطعه و راه‌حل‌های اصلاح آن پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا به جزئیات خرابی و فرضیه‌های مطرح شده برای علل آن پرداخته شد و سپس عوامل مطرح شده بررسی و روش‌های اصلاح قطعه ارائه شده است. همچنین خرابی محافظ حرارتی و راه‌حل‌های بهبود آن به روش تحلیل ارتعاشی و با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی می‌شود.



شکل ۱: موقعیت سپرهای حرارتی یک موتور بنزینی

(۲) مشاهدات

تاریخچه خرابی محافظ حرارتی پایینی برخی موتورها، نشان داد می‌دهد این قطعه تا کنون در برخی آزمون‌ها در موتورهای این سری خراب و شکسته شده است. بررسی‌ها تاریخچه خرابی‌ها بر اساس برگه‌های اعلام خرابی صادر شده نشان داد که از بین دو محافظ حرارتی موتور فقط محافظ حرارتی فوقانی (واشر آب بند چندراهه دود) دچار خرابی شده است. با توجه به اینکه روش ساخت و نوع ماده این دو محافظ حرارتی تقریباً شبیه هم است به همین برای تاریخچه خرابی محافظ حرارتی مطالعه شد. تاکنون پنج مورد برگه اعلام خرابی برای محافظ حرارتی فوقانی صادر شده است. برای تاریخچه خرابی محافظ حرارتی پایینی نیز ۵ مورد شکست و ترک در این قطعه در آزمون دوام مشاهده شده است. همچنین با اندازه‌گیری همه قطعات سالم و شکسته از آزمون‌های مختلف، مشخص گردید که این قطعه با دو ضخامت ۰٫۸ و ۱ میلی‌متر ساخته می‌شود [۶].

برای مشاهده بیشینه آثار به جای مانده از خرابی‌ها، تصاویر تهیه گردیده است. در شکل ۲ نمایی از محافظ حرارتی شکسته شده نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد این سپر محافظ دقیقاً از ناحیه میانی شکسته شده است. همچنین بررسی دقیق چندراهه دود و محافظ حرارتی فوقانی نشان داد این قطعات کاملاً سالم است.



شکل ۲: وجود ترک و شکستگی محافظ حرارتی پایینی

۳) روش تحلیل خرابی

همان‌طور که در دیباچه اشاره شد، عوامل بسیار متعددی در شکست محافظ حرارتی دخیل‌اند. مواد و روش ساخت، ابعاد و هندسه و طراحی وظیفه قطعه در موتور از جمله عوامل مؤثر در بروز شکست محافظ حرارتی بشمار می‌روند. سرشاخه‌های کلی در بروز این خرابی در قالب نمودار استخوان ماهی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

ساختار کلی تحلیل به این ترتیب است که با توجه شکل خرابی عوامل محتمل‌تر تعیین می‌شوند و پس از آن هر عامل به‌طور مستقل بررسی می‌گردد. بررسی عوامل تا زمانی که نتیجه‌ای قابل قبول از علل خرابی بدست آید، ادامه می‌یابد.

بطور کلی سه فرضیه برای شروع خرابی و شکست محافظ حرارتی مطرح گردید:

۱- شکست ناشی از افزایش تنش‌های حرارتی و لرزش باشد.

۲- شکست بعلت مشکلات موادی و روش ساخت قطعه باشد.

۳- شکست بعلت مشکلات طراحی و وظیفه‌ای خود قطعه باشد.

در نمودار تحلیل خرابی محافظ حرارتی فرض بر این است تمام عواملی را که در خرابی محافظ حرارتی سهم مؤثر داشته باشند، بررسی و علل رد یا قبول هر گزینه با دلایل و مستندات ارائه شود.

قطعه محافظ حرارتی با کد فنی مشخص برای موتوری بنزینی دارای موادی با شماره استاندارد AS120 C04 بر اساس استاندارد پژو به شماره B533270 است. ضخامت این قطعه ۱ میلی‌متر و دارای پوشش روی-آلومینیوم است. بررسی موادی قطعه شکسته شده شامل تحلیل موادی، سختی سنجی و عکس‌برداری الکترونی و نوری توسط آزمایشگاه مواد شرکت ایپکو انجام گرفته است.

۴) تحلیل موادی

الف) تحلیل موادی و سختی سنجی:

تحلیل مواد قطعه شکسته شده با ماده مورد نظر تطابق دارد و همان آلیاژ AS100 مطابق استاندارد پژو B53 3270 است اما شاخه آن ۰,۳ است (جدول ۱). سختی قطعه به‌طور میانگین ۶۰ ویکرز (HV15) اندازه‌گیری شد که مطابق استاندارد است (جدول ۲).

ب) بررسی ریز ساختار:

ریزساختار قطعه شکسته شده پس از آماده سازی نمونه با سنباده تا نمره ۲۵۰۰ و پولیش توسط نمد با محلول آلومینا و آب در شکل ۴ نشان داده شده است. ریزساختار شامل فولاد کم کربن فریتی با درصد کمی پرلیت است. این ریزساختار بسیار نرم، انعطاف‌پذیر، مناسب فرآیندهای کششی و ورقکاری و مطابق استاندارد است.

ج) تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM):

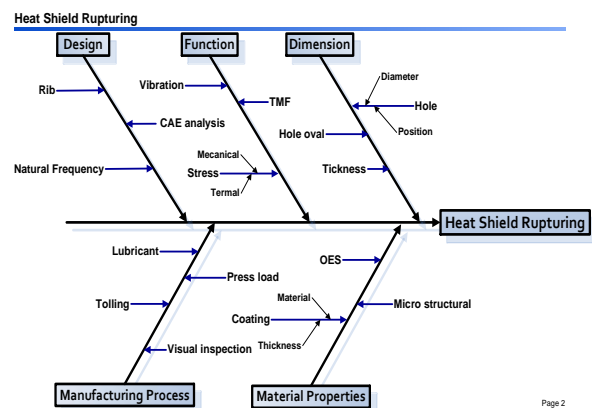
در این تحلیل، از سطح قطعه شکسته شده تصاویر میکروسکوپی تهیه گردید که در شکل ۵ تا ۸ ارایه شده است. در شکل ۵ شکل سطح شکست شامل شکست نرم بین دانه‌های مرز دانه‌های فریت مشخص است. در شکل ۶ تا ۸ تصاویر شناخت مواد سطح محافظ حرارتی نشان داده شده است. همان‌طور که این عکس‌ها نشان می‌دهد ترک‌هایی در سطوح محافظ حرارتی قابل مشاهده است (شکل ۷). در شکل ۶ ضخامت پوشش سطح قطعه نشان داده شده است. وجود رسوب (نمکی مانند) ناشی از محیط اتاق آزمون در شکل ۸ توسط تحلیل SEM نشان داده شده است. در عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی عیب یا نقصی که حاکی از ضعف ماده بوده باشد مانند: آخال، ناخالصی، مک و حفره مشاهده نگردید.

جدول ۱: نتایج تحلیل موادی محافظ حرارتی پایینی

Si	S	P	Mn	C	
۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۴	۰,۰۸	AS100-05
۰,۰۵	۰,۰۳۵	۰,۰۳۵	۰,۵	۰,۱	AS100-03
۰,۰۳۴	۰,۰۲۸	۰,۰۲۶	۰,۳۵	۰,۱۱	قطعه شکسته شده

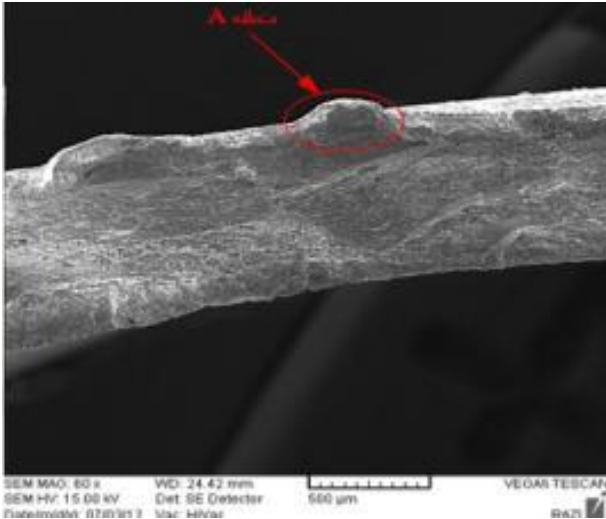
جدول ۲: نتایج آزمون سختی سنجی به روش ویکرز محافظ حرارتی پایینی

ردیف	عدد سختی	سختی استاندارد	انحراف
۱	۵۸	۵۵-۷۰	
۲	۶۰	متوسط سختی	
۳	۶۴	اندازه گیری شده	
۴	۵۸		
۵	۶۲		۲

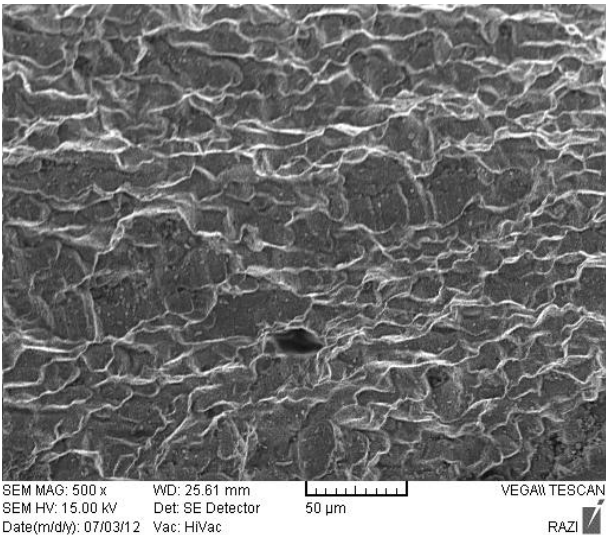


شکل ۳: نمودار استخوان ماهی بررسی علل خرابی شکستگی محافظ حرارتی

(الف)



(ب)



شکل ۵: نمایی از سطح شکست محافظ حرارتی شامل (الف) نمایی از سطح شکست محافظ حرارتی و (ب) نمایی نزدیک از سطح شکست

(الف)



(ب)

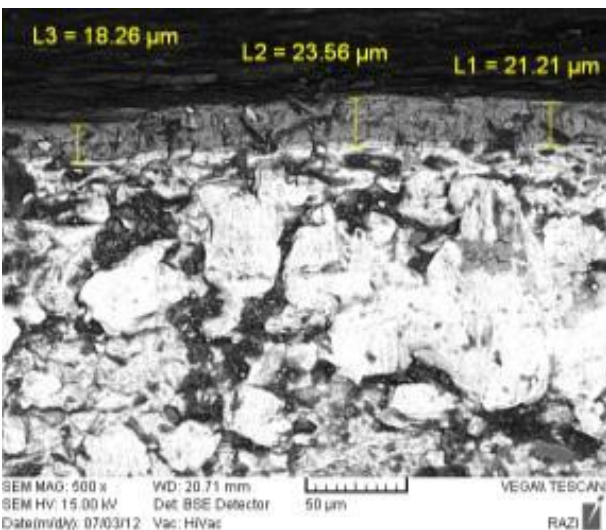


شکل ۴: ریزساختار محافظ حرارتی شکسته شده شامل (الف) ریزساختار محافظ حرارتی - زمینه فریتی و (ب) زمینه فریتی با اندکی پرلیت

(د) تحلیل به روش EDX:

به منظور بررسی ترکیبات تشکیل دهنده در قسمت شکست قطعه با روش EDX از قسمت A سطح شکست (شکل ۵-الف) استفاده شده است. نمودار ترکیب شیمیایی در شکل ۹ و جدول ۳ آورده شده است. ترکیبات مورد نظر حاوی آهن (زمینه فلز) و آلومینیوم که از پوشش تشخیص داده شده است و مقداری اکسیژن که از لایه اکسید شده ایجاد شده است.

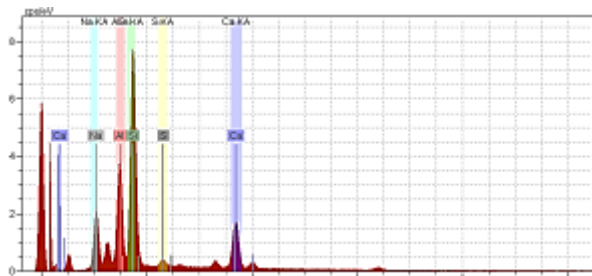
به منظور تعیین عناصر موجود در سطح و ترکیبات تشکیل دهنده رسوب از سطح قطعه map تهیه شد. در شکل ۱۰ طیف تهیه شده به روش EDX و نمودارهای map قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می گردد عنصر آلومینیوم به شدت در سطح قطعه وجود دارد اما در قسمت زیر پوشش (قسمت سبز رنگ معرف عنصر Al) است. در بقیه map آلومینیوم، که با رنگ سیاه مشخص است رسوب تشکیل شده است که بقیه عناصر را شامل می شود. این عناصر به ترتیب غلظت، کلسیم، سدیم، نیتروژن و سیلیسیم است. این عناصر گویای تشکیل نوعی ترکیب شبه نمکی در سطح قطعه روی پوشش آلومینیومی است.



شکل ۶: نمایی از مقطع قطعه برای تعیین ضخامت لایه پوشش ۲۰ میکرومتر

جدول ۳: درصد ترکیبات تشکیل دهنده در قسمت شکست

Spectra : H-A				
Element	Series [wt.%]	Unn. [wt.%]	Norm. C [at.%]	Ato m. C
Oxygen	K Series	۲,۶۹	۳,۰۶	۹,۵
Aluminum	K Series	۲,۵۲	۲,۸۷	۵,۲۸
Silicon	K Series	۱,۱۱	۱,۲۷	۲,۲۴
Potassium	K Series	۰,۳۳	۰,۳۸	۰,۴۸
Calcium	K Series	۰,۵۶	۰,۶۴	۰,۷۹
Iron	K Series	۸۰,۸۱	۹۱,۷۹	۸۱,۷
Total: % ۸۸				

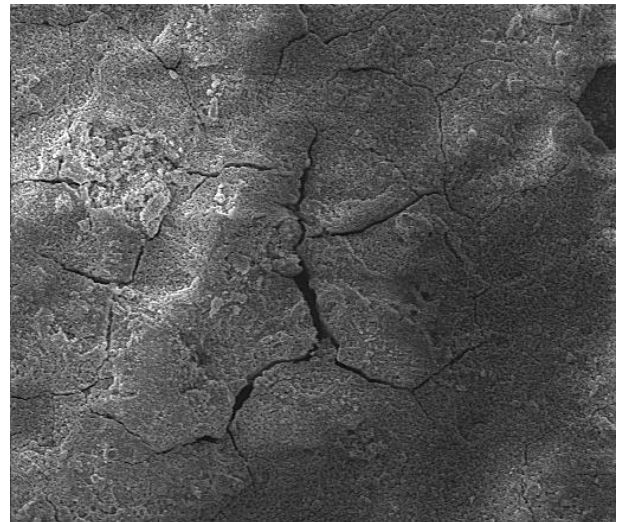


شکل ۱۰: ترکیبات تشکیل دهنده در قسمت سطح قطعه با روش EDX

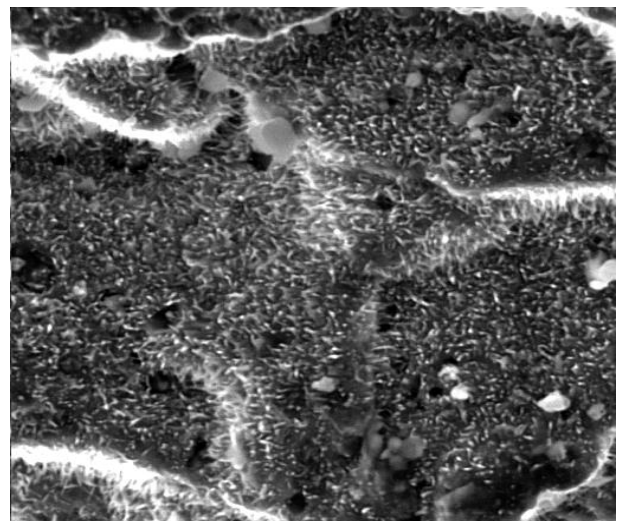
مطابق نتایج بالا می‌توان گفت علت شکست قطعه محافظ حرارتی موادی نبود و علت دیگری مانند: لرزش بیش از حد یا تنش بیش از حد تحمل قطعه بوده است. بنابراین با توجه به نتایج شناخت مواد، این قطعه مشکل موادی نداشت و این عامل نمی‌تواند موجب شکست قطعه گردد.

۵) بررسی وظیفه و عملکرد قطعه محافظ حرارتی

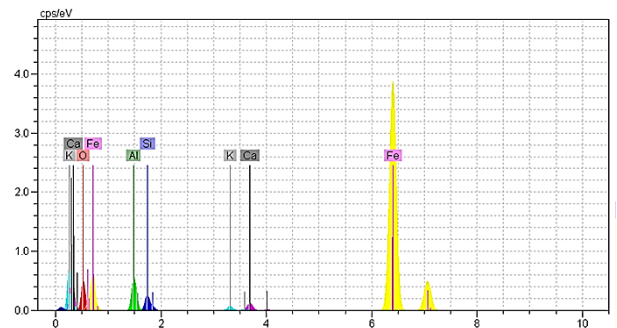
قطعه محافظ حرارتی موتور مطابق با شکل ۱ وظیفه جلوگیری از انتقال حرارت از چندراهه دود به بالای موتور را دارد. بنابراین این قطعه بیشتر تحت تنش‌های شدید حرارتی است. آن چنان که در آزمون‌های دوام نیز مشاهده شد اثرات سوختگی بر روی این قطعه مشاهده شده است (شکل ۴). این قطعه در آزمون‌های دوام ۱۱۰ و ۵۰۰ ساعت شدیداً تحت بارهای حرارتی است. شایان ذکر است موتورها عموماً دارای لرزش بوده‌اند. به همین خاطر این قطعه تحت لرزش بسیار زیادی است. البته تأثیر بارهای ارتعاشی، در طراحی این قطعه نیز لحاظ شده است. ایجاد خمکاری‌های منظم بر روی آن، می‌تواند تا حدی از ارتعاشات قطعه بکاهد. مهم تر از آن استفاده از فولادی با درصد کربن و سیلیسیم پایین، خاصیت انعطاف‌پذیری این قطعه را افزایش می‌دهد. اما این عوامل برای جلوگیری از شکست قطعه کافی نبوده است. به همین منظور تحلیل تنش، حرارتی و ارتعاشی برای این قطعه انجام شده که قسمت بعد ارائه خواهد شد.



شکل ۷: نمای از مقطع سطح محافظ حرارتی



شکل ۸: نمای نزدیک از قسمت ترک خورده سطح محافظ حرارتی (ساختار بلوری رسوبی نمکی مانند در سطح قطعه)



شکل ۹: ترکیبات تشکیل دهنده در قسمت شکست با روش EDX

جدول ۴: قطر سوراخ و ضخامت محافظ حرارتی پایینی موتور

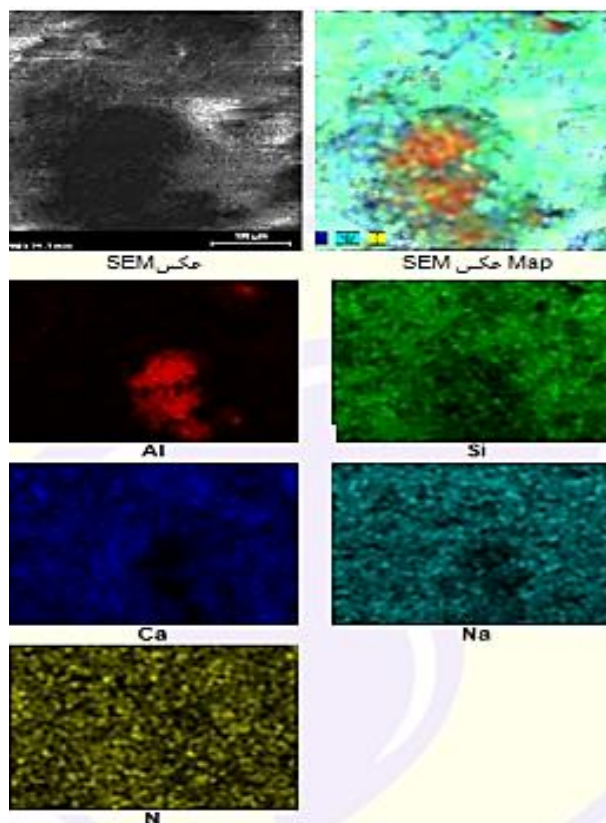
متغیر	معیار	محافظ سالم	
		اندازه (میلیمتر)	اندازه (میلیمتر)
D1	۱۲,۲	۱۰,۸۸	۱۰,۸۲
D2	۸,۲	۷,۸	۷,۹
D1		۶,۶۴	۶,۶
D1	۶,۳	۶,۷	۶,۷
D1		۶,۶۸	۶,۹۶
D1		۶,۷۲	۷,۰۳
D1	۱۲,۲	۱۰,۸۲	۱۰,۸۶
D2	۸,۲	۷,۸۸	۷,۸۶
۱	ضخامت	۰,۸۴	۰,۸۱
۲	۱ mm	۰,۸۲	۰,۹
۳		۰,۸۵	۰,۸۵

با توجه به نتایج تحلیل CAE این قطعه به لحاظ طراحی مشکل خاصی ندارد. تفاوت اصلی محافظ حرارتی پایینی طرح جدید با قبلی ریشه در بسامد طبیعی دو قطعه دارد. در طراحی محافظ حرارتی پایینی از تعداد پیچ‌های بیشتری استفاده شده است تا سطح لرزش این قطعه کاهش یابد. با توجه به اجرای آزمون ۵۰۰ ساعت با محافظ حرارتی طرح اصلی (جدید) و عدم مشاهده هیچگونه شکست و ترک بروی قطعه مشخص گردید که طراحی قطعه کاملاً مناسب است. بنابراین با بررسی‌های انجام شده، این قطعه مشکل طراحی نداشت و این عامل نمی‌تواند موجب شکست قطعه گردد. همچنین کامل ساخته نشدن این قطعه توسط سازنده و همبندی ناقص آن یکی از دلایل مهم شکست این قطعه می‌تواند باشد.

۷) تحلیل اجزاء محدود (CAE)

برای بررسی تنش، حرارتی، بسامدهای تحریک و شکل ارتعاش‌های قطعه محافظ حرارتی پایینی، از تحلیل اجزاء محدود استفاده گردید. بدین منظور ابتدا شبیه‌سازی سه بعدی (D3) در نرم افزار طراحی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار Pro/E مجموعه شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار تخصصی 9 ALTAIR HYPER WORK پس از اصلاح سطوح، قطعات درگیر با دانه‌های شش‌وجهی (Hexa) و چهار وجهی (Tetra) شبکه‌بندی شد (شکل ۱۳) [۱].

پس از شبکه‌بندی، تعیین سطوح تماسی، قراردادن فنرها و اعمال شرایط مرزی، شبیه‌سازی ساخته شده را به صورت یک پوشه متنی (*.dat) که قابلیت وارد شدن به یک نرم افزار تحلیل گر را دارد توسط HYPERMESH ساخته می‌شود. شبیه‌سازی شبکه‌بندی شده به صورت پوشه برنامه‌نویسی وارد نرم‌افزار ABAQUS 6.8.1 می‌شود. در پوشه مورد نظر تمام خواص موادی هر یک از اجزای قطعه، نوع و

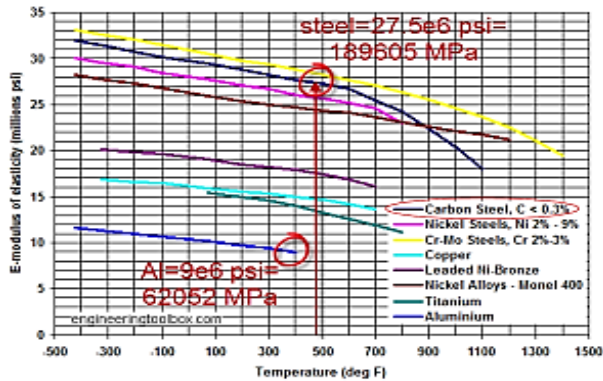


شکل ۱۱: تهیه map تصاویر SEM سطح قطعه

۶) بررسی مشکلات طراحی، روش ساخت و همبندی قطعه محافظ حرارتی

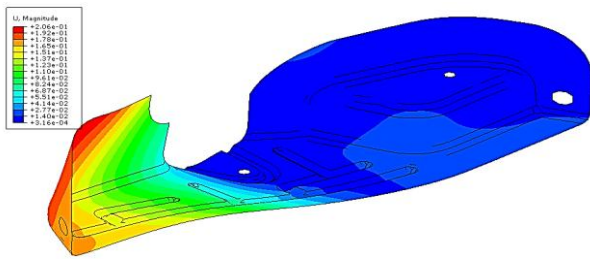
قطعه محافظ حرارتی با کد فنی مشخص برای موتوری بنزینی دارای پیچیدگی‌های خاصی است. این قطعه علاوه بر این پیچیدگی‌ها دارای ۴ سوراخ پیچ، شیب‌ها و پوشش روی آلومینیوم است که در شکل ۲ نشان داده شده است. از ۴ سوراخ در نظر گرفته شده برای محافظ حرارتی ۲ سوراخ به صورت لوبیایی و ۲ سوراخ دیگر به صورت ساده می‌باشند. در جدول ۴، اندازه‌های استاندارد سوراخ‌های محافظ حرارتی نشان داده شده است. این اندازه‌گیری‌ها برای دو قطعه محافظ حرارتی سالم و شکسته شده انجام گرفته است (جدول ۴). همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد تمام اندازه‌ها شامل قطر سوراخ‌ها و ضخامت قطعه خارج از محدوده مجاز نقشه است. بنابراین لازم است سازنده با اصلاح روش ساخت و پایش کیفی فرایند تولید، دقت ابعادی ساخت محافظ حرارتی را بهبود دهد. افزایش کیفیت ساخت موجب تامین نیازمندی‌های و الزامات خود قطعه مطابق با نقشه ساخت آن می‌شود. قطعه محافظ حرارتی دارای لرزش بیشتری است. در طراحی جدید، این قطعه به صورت ۲ تکه طراحی شده که سپس ساخت هر قطعه به صورت مجزا، بهم جوش داده می‌شوند (شکل ۱۲ ب). این محافظ حرارتی موتور دارای ضخامت این قطعه ۱ میلیمتر و پوشش روی آلومینیوم است. فرایند ساخت آن کششی و ورقکاری و جوشکاری برخی نقاط آن بر اساس استاندارد ISO 2553 است.

افزایش دما تا حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش ضریب ارتجاعی شده است ولی این کاهش تأثیر چشم‌گیری بر تغییر بسامدهای طبیعی نداشته است. این تغییر کمتر از ۳ درصد است که در جدول (۵) نشان داده شده است. افزودن قطعه heat_shield_lat با دو اتصال به بدنه مجموعه تأثیر زیادی در افزایش بسامد طبیعی نداشته است (افزایش ۵ درصدی بسامد طبیعی از ۲۰۰ هرتز تا ۲۱۰ هرتز). اگر این قطعه با سه اتصال مطابق شکل ۱۶ به بدنه مجموعه متصل شود، بسامد طبیعی را تا ۲۵۷ هرتز افزایش خواهد داد.

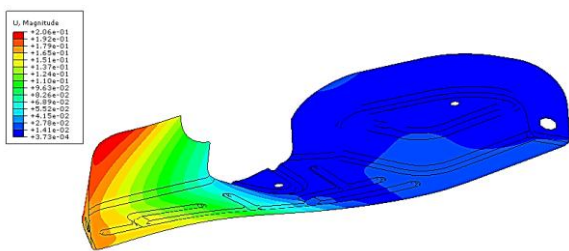


شکل ۱۴: ملاحظات دمایی بروی خواص مواد [۷ و ۸]

(الف)



(ب)



شکل ۱۵: شکل ارتعاش سوم محافظ حرارتی در موتور شامل (الف) در دمای معمولی و (ب) در دمای گرم

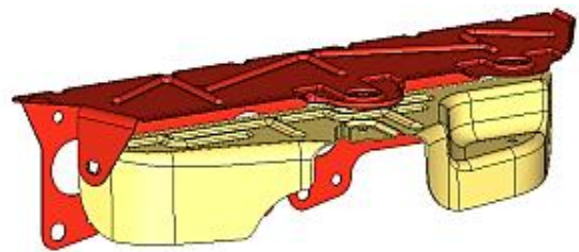
جدول ۵: بسامد سه شکل ارتعاش اول در دو دمای معمولی و گرم [۷ و ۸]

دمای گرم	دمای معمولی	
$E_s=189.605$ (GPa)	$E_s=200$ (GPa)	
$E_{al}=62.052$ (GPa)	$E_{al}=69$ (GPa)	
۱۹۵,۸۳	۲۰۱,۳۷	بسامد اول (Hz)
۲۵۵,۲	۲۶۲,۳۶	بسامد دوم (Hz)
۲۹۳,۱۴	۳۰۱,۲۶	بسامد سوم (Hz)

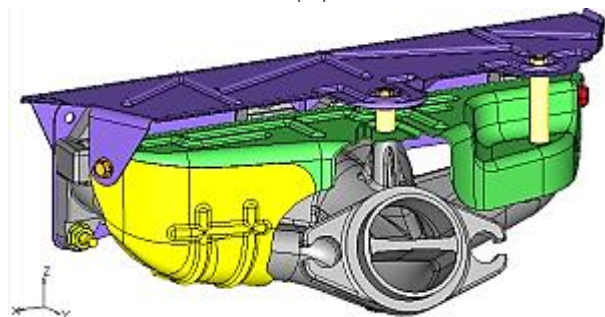
تعداد مراحل تحلیل، کلیه بارها، شرائط مرزی و تکیه‌گاه‌ها و نتایج خروجی مورد نظر به زبان برنامه‌نویسی خود نرم‌افزار ABAQUS مشخص می‌شود. بارگذاری در نرم افزار ABAQUS در مرحله (step) جداگانه صورت گرفت، که شامل شرائط مرزی، بارهای حرارتی دما و تحلیل ارتعاش است.

هدف این تحلیل، بررسی بسامد طبیعی محافظ حرارتی در دمای گرم عملکردی است. با توجه به استانداردهای موجود و دور کاری موتور خودرو، محافظ حرارتی باید توانایی تحمل بسامد کاری حدود ۲۴۰ هرتز (با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱,۲) را داشته باشد. همچنین سه بسامد اول این قطعه در دمای عادی و گرم بررسی شد و نتایج آن با یکدیگر مقایسه و پیشنهادهایی برای بهبود بسامد طبیعی و قبول شدن در استانداردها ارائه شده است (شکل ۱۵).

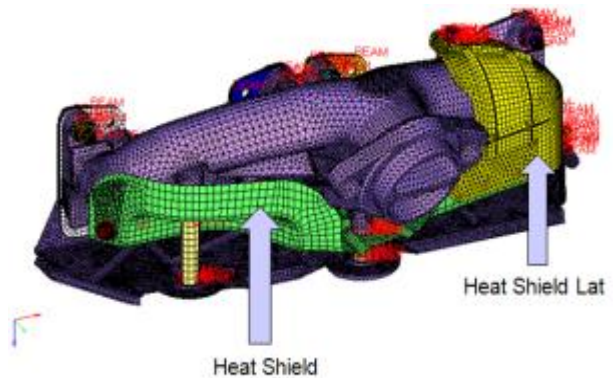
(الف)



(ب)



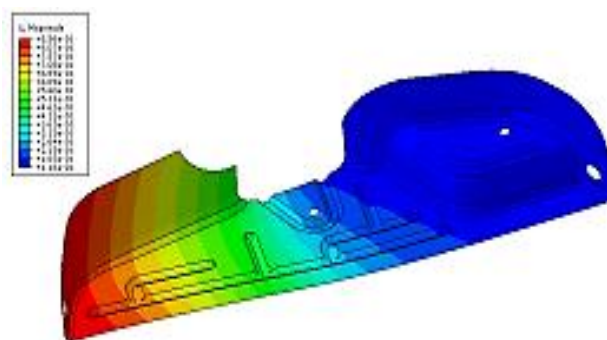
شکل ۱۲: مدل سه بعدی و موقعیت محافظ های حرارتی در موتور شامل (الف) طرح قدیمی محافظ پایینی و (ب) طرح جدید محافظ پایینی



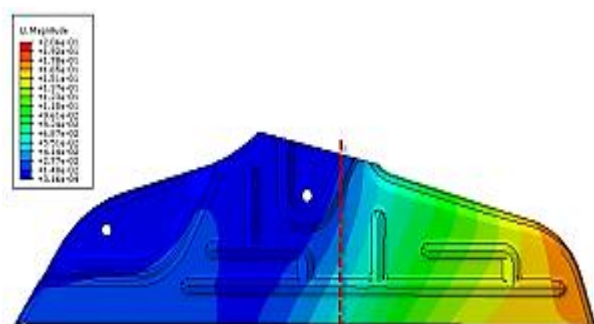
شکل ۱۳: شبیه‌سازی سه بعدی محافظ حرارتی در موتور

چگالی انرژی کرنشی در محافظ حرارتی، نقاط حساس برای شکست را به صورت شکل ۱۹ پیش‌بینی می‌کند. متغیر مهم دیگر در تعیین نقطه شکست، مقدار اندازه کل کرنش است. این متغیر با عنوان ELSE در ABAQUS شناخته می‌شود. این متغیر مکان شکست در محافظ حرارتی در بسامد طبیعی اول خود را به صورت شکل ۲۰ پیش‌بینی می‌کند.

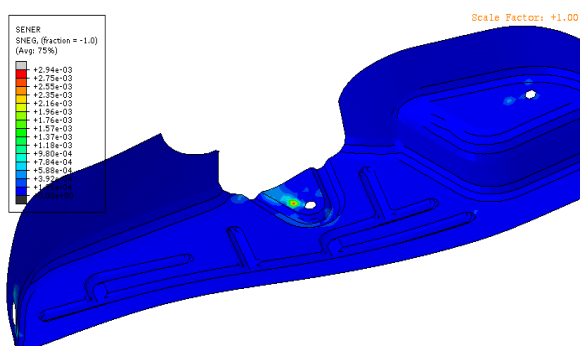
در شکل ۲۱ مقایسه نتایج تحلیل CAE با نمونه‌های شکسته شده در آزمون دوام ارائه شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد محل شکست محافظ حرارتی در آزمون‌های دوام بسیار به نقاط بحرانی در تحلیل CAE نزدیک است.



شکل ۱۷: شکل ارتعاش سوم محافظ حرارتی با ضخامت بیشتر



شکل ۱۸: شکل ارتعاش اول خمشی محافظ حرارتی پایینی



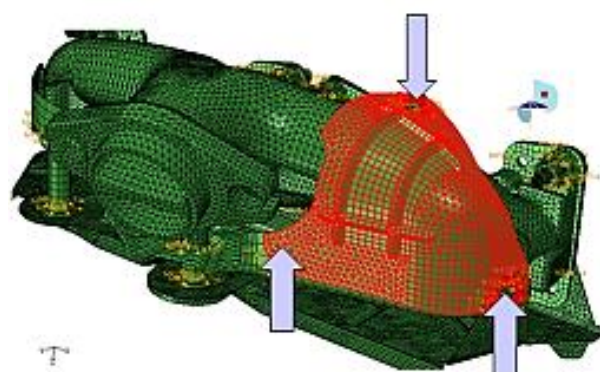
شکل ۱۹: طیف چگالی انرژی کرنشی محافظ حرارتی پایینی

با افزایش ضخامت محافظ حرارتی می‌توان بسامد طبیعی آن را افزایش داد. اگر ضخامت محافظ حرارتی از ۱ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر افزایش داده شود بسامد طبیعی اول این قطعه تا ۳۰۲ هرتز خواهد رسید؛ ولی این راهکار به نظر غیرعملی است (شکل ۱۷).

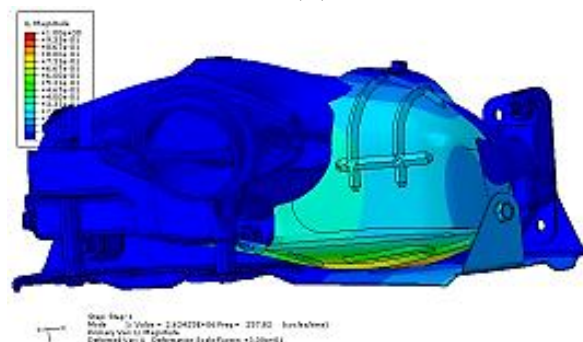
یکی از روش‌های مرسوم برای افزایش مقاومت در برابر خمش، تقویت سطح در نقطه بحرانی خمش است. با افزایش گشتاور سطح در چنین ناحیه‌ای می‌توان اثرات تخریبی خمش را بهبود بخشید. با افزایش یک برآمدگی در سطح مورد نظر (مطابق شکل ۱۲)، گشتاور سطح را تا حدود ۷ درصد می‌توان افزایش داد و لذا مقاومت در برابر خمش را بهبود بخشید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سطح مقطع بحرانی در خمش شکل اول ارتعاشی، در شکل زیر نشان داده شده است. پیشنهاد می‌شود در این مقطع برآمدگی ایجاد شود. به نظر می‌رسد که این روش نسبت به پیشنهادهای دیگر عملی‌تر است.

شایان ذکر است که مقدار تجمع انرژی کرنشی در محافظ حرارتی بررسی شد. این انرژی محتمل‌ترین نقطه برای شکست را نشان می‌دهد. تجمع چگالی انرژی کرنشی که با نام SENER در ABAQUS شناخته می‌شود، یکی از معیارهای مناسب برای پیش‌بینی نقطه شکست در قطعات است.

(الف)



(ب)



شکل ۱۶: شکل ارتعاش سوم محافظ حرارتی پایینی شامل (الف) مدل سه‌بعدی اجزای محدود و (ب) طیف تحلیل ارتعاشی

بررسی CAE و نتایج CMM، دو عامل زیر در شکست تأثیر گذارند که این دلایل عبارت از (الف) عدم ساخت دقیق و کامل قطعه توسط سازنده و (ب) عدم همبندی کامل قطعه و به وجود آمدن لرزش‌های زیاد در قطعه می‌باشند. بنابراین برای جلوگیری از شکست این قطعه علاوه بر رفع تمامی مغایرت‌ها ساختی و با توجه به نتایج این تحلیل پیشنهادهایی برای افزایش استحکام این قطعه ارائه می‌شود:

۱- برای رفع مشکل یکی از شکستگی‌ها پیشنهاد می‌شود که گوشه محافظ مطابق شکل (۲۲-الف) پخ زده شود. این پخ از افزایش تمرکز تنش در ناحیه می‌کاهد.

۲- برای رفع مشکل شکستگی دوم مطابق شکل (۲۲-ب) می‌توان لبه مورد نظر را به اندازه حدود ۵ میلی‌متر به سمت بالا یا پایین خم کرد. این موضوع مستلزم وجود مکان مناسب برای ایجاد خم است. با این کار مقاومت در برابر خمش سطح مقطع مورد نظر افزایش خواهد یافت.

۳- راه کار دیگر ادامه دادن امتداد فرورفتگی (ریب) نشان داده شده در شکل (۲۲-ج) است.

(الف)



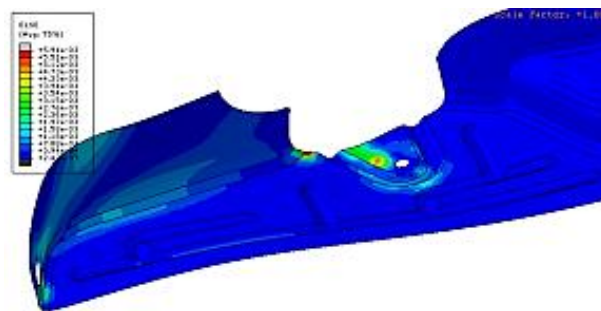
(ب)



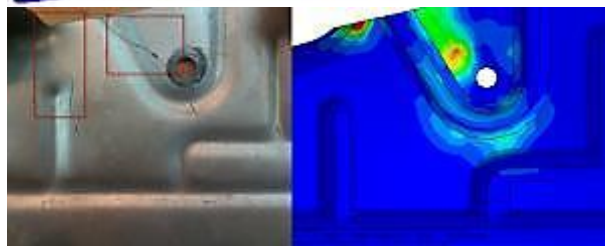
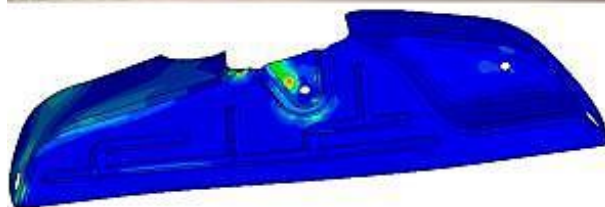
(ج)



شکل ۲۲: افزایش مقاومت محافظ حرارتی به سه روش شامل (الف) افزایش مقاومت محافظ حرارتی با اضافه کردن پخ، (ب) افزایش مقاومت محافظ حرارتی با خم کردن لبه و (ج) افزایش مقاومت محافظ حرارتی با ایجاد شیب



شکل ۲۰: طیف کرنش کلی کرنشی محافظ حرارتی پایینی در بسامد طبیعی اول



شکل ۲۱: مقایسه نتایج CAE با نمونه شکسته شده

۸ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

باتوجه به نتایج آزمایشگاه مواد و مشاهدات دقیق نقاط آسیب دیده و تحلیل CAE مراحل شکست محافظ حرارتی بدین شرح است:
مرحله ۱: محافظ حرارتی پایینی موتور توسط تأمین‌کننده به‌طور کامل ساخته نشده و این قطعه مطابق نقشه اصلی همبندی نشده است. به همین دلیل این قطعه تحت لرزش بسیار زیادی بوده است.
مرحله ۲: با وارد شدن لرزش‌های بسیار زیاد به قطعه محافظ حرارتی ترک‌هایی ریز در سطح قطعه ایجاد شده است. با بیشتر شدن دامنه ارتعاشات و تنش‌های حرارتی این ترک‌ها بیش از حد رشد کرده‌اند و موجب ترک قطعه شده‌اند.

با توجه به نمودار استخوان ماهی و بررسی اثرات شکست دلیل اصلی شکست محافظ حرارتی پایینی عدم ساخت و همبندی کامل این قطعه بوده است. همچنین این قطعه به لحاظ دقت ابعادی مشکل داشته و باید با دقت بیشتری ساخته و همبندی گردد. بر اساس نمودار استخوان ماهی تحلیل خرابی، مشاهدات و نتایج آزمایشگاه موادی،

- [3] M. Rezaei, Final engineering report of root cause analysis of exhaust manifold heat shield failure, Report No. 490001E003, Irankhodro Powertrain Company (IPCO), 2011
- [4] Pegout, Test procedure of 110 critical speed durability test, Test No. CDI/DII/DIL/SR/T2753/JCO
- [5] M. Roozban, Engineering report of material analysis of heat shield, Report No. IPL7F51003, Irankhodro Powertrain Company (IPCO), 2013
- [6] M. Kazemi, M. Rezaei, Final engineering report root cause analysis of exhaust manifold heat shield failure, Report No. 410023E0002, Irankhodro Powertrain Company (IPCO), 2013
- [7] ASM Specialty Handbook, Heat-Resistant Material, 1997
- [8] ASM Metals Handbook, Vol. 1, Properties and Selection Irons, 1998

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو) برای همکاری در انجام این تحقیق اعلام می‌دارند. بدین وسیله از همکاری آقایان مهندس نیکروان، مهدی سلیمی و حیدر آهنگری که اطلاعات ارزشمندی در اختیار نویسندگان قرار دادند کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورد.

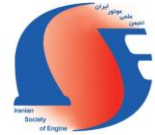
References

- [1] M. Kazemi, Analysis and evaluation of stress, prediction of fatigue lifetime and hydrodynamic analysis of oil film in piston pin of EF7 engine, MSc Thesis, Tarbiyat Moddares University, Tehran, Iran, 2010
- [2] M. Rezaei, Final report of 110 critical speed durability test, Report No. 410023FR012, Irankhodro Powertrain Company (IPCO), 2013



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Root causes failure analysis of exhaust manifold heat shield failure

M. Kazemi^{1*}, M. Roozban², A. Mafi³, H. Navabi⁴, M. Rezaei⁵

¹Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, m_kazemi@ip-co.com

²Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, m_roozban@ip-co.com

³Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, a_mafi@ip-co.com

⁴Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, h_navabi@ip-co.com

⁵Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, me_rezaei@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-910-210-8132

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 June 2014

Accepted: 19 August 2014

Keywords:

Heat shield

Material analysis

Stress and vibration analysis

Finite element analysis

ABSTRACT

Many internal combustion engines have one or two heat shields that have been installed on the exhaust manifold to avoid the heat transfer to upper parts of the engine, such as the valve cover. In some engines, this part fails due to the fracture and then causes the engine noise and other failures in the engine. In this analysis, root causes of the failure were determined based on the fish bone diagram. In this research, the failure of a heat shield of the spark engine has been investigated and the finite element method (FEM) simulation was used for its design improvement. The analysis of the studied heat shield with the RCA method showed that the malfunction and the assembly problem were both root causes of this failure. Therefore, this part has been produced by dimensional and geometrical approaches. In addition, the heat shield was not a significant problem in the material. Therefore, to prevent this failure, in addition to removing all odds of the production; according to CAE results, have any suggestion for increasing the strength of this part includes the fillet creation, edge bending up or down and the rib creation.