



## ارزیابی حرارتی لایه فلزی پرخوران به روش تجربی

علی ذاکری<sup>۱</sup>، آرمن آدامیان<sup>۲\*</sup>، آرش محمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران، [a\\_zakeri@ip-co.com](mailto:a_zakeri@ip-co.com)

<sup>۲</sup>گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران، [arm.adamian@iauctb.ac.ir](mailto:arm.adamian@iauctb.ac.ir)

<sup>۳</sup>گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۲ اسفند ۱۳۹۷

پذیرش: ۴ تیر ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

لایه پرخوران

اندازه‌گیری دما

چندراهه دود

### چکیده

افزایش توان و گشتاور موتورهای امروزی در کنار کاهش مصرف سوخت و کوچک‌سازی ابعادی آنها منجر به استفاده از سامانه‌های پرخورانی هوای ورودی شده است. از آنجا که پرخوران در معرض گازهای داغ خروجی قرار داشته و دوره‌های کاری آن بسیار بالا است بکارگیری فن‌آوری‌های مکانیکی و موادی خاص و پرهزینه در آنها ضروری است. دمای اجزای مسیر دود این قطعه با سوخت بنزین گاهی تا ۹۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد و تغییر نقاط کاری موجب خستگی حرارتی آن می‌شود. از این رو ارزیابی حرارتی از کارهای اساسی طراحی، ساخت و آزمون‌های پرخوران و قطعات وابسته به آن مانند واشر پرخوران است. در این مقاله روش جدیدی برای ارزیابی دمای لایه پرخوران یک موتور چهار استوانه بنزینی ارائه شده است. در این روش دمای نزدیک‌ترین نقاط لایه پرخوران و چندراهه دود اندازه‌گیری شده و دمای لایه با استفاده از آنها تخمین زده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این بررسی حداکثر دمای لایه پرخوران به حدود ۸۰۷ درجه سلسیوس می‌رسد که با نتایج تحلیل‌ها و سایر اندازه‌گیری دمایی پرخوران مطابقت دارد. از آنجا که دسترسی به لایه پرخوران و اندازه‌گیری مستقیم دمای آن کاری دشوار و یا غیرممکن می‌باشد روش ارائه شده می‌تواند در ارزیابی حرارتی لایه پرخوران مفید باشد. سپس از دمای اندازه‌گیری شده در آزمون دوام خستگی حرارتی - مکانیکی لایه پرخوران استفاده شده و نتیجه دمایی بدست آمده در آن ارزیابی شده است. خرابی لایه پرخوران در این آزمون می‌تواند نشان دهنده صحت دمای بدست آمده باشد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## مقدمه

پرخوران، لایه‌ی آببندی گازهای خروجی است که در معرض گازهای داغ قرار دارد. این قطعه که بین چندراهه دود و پرخوران قرار می‌گیرد گازهای خروجی را آببندی می‌کند. اهمیت این قطعه به قدری است که هرگونه نشتی از آن می‌تواند منجر به تعویض کل پرخوران گردد زیرا نشتی گازهای داغ از آن با گذشت زمان منجر به تاب برداشتن یا سوختن سطوح تماس لایه‌ی می‌شود. اثرات دیگر نشتی دود از لایه‌ی پرخوران حتی به مقدار کم، هدر رفتن انرژی گازهای خروجی، ایجاد نویز و صدای اضافه و سوختگی قطعات بیرون پرخوران است که همگی اهمیت پرداختن به این قطعه را نشان می‌دهد. این لایه‌ی از نوع فلزی (فولادی) با روکش نسوز بوده و معمولاً با سه و یا چهار پیچ با سطوح تماس درگیر می‌شود. ایجاد لبه‌ی آببند<sup>۳</sup> در اطراف مسیر دود از اجزای اصلی لایه‌ی پرخوران است. در شکل ۲ یک نمونه لایه‌ی پرخوران و لبه‌ی آببندی آن نشان داده شده است.

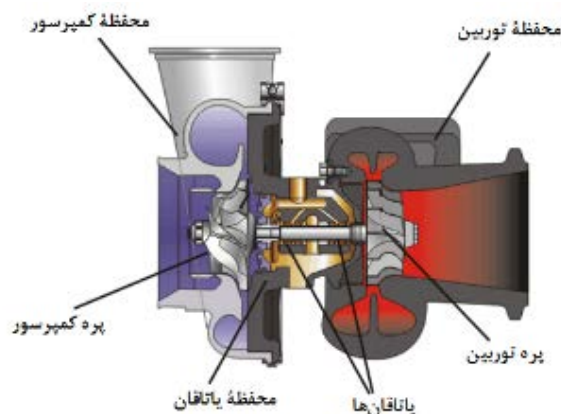


شکل ۲: نمونه‌ای از لایه‌ی پرخوران و لبه‌ی آببندی آن [۲]

بدست آوردن دمای لایه‌ی پرخوران علاوه بر طراحی و ساخت این قطعه، در آزمون‌های دوام آن نیز کاربرد دارد. در آزمون‌های خستگی لایه‌ی پرخوران، شرایط کاری موتور که بیشینه دمای لایه‌ی در آن نقطه بدست آمده است اعمال می‌شود و دوام این قطعه در شرایط خستگی حرارتی - مکانیکی کم چرخه ارزیابی می‌گردد. منظور از شرایط کاری موتور سرعت و بار موتور است.

از آنجا که اندازه‌گیری دمای لایه‌ی‌ها بخصوص لایه‌ی های مسیر دود، پیچیده و سخت است کارهای انجام شده در این زمینه اندک بوده و اغلب خودروسازها نیز این لایه‌ی را بصورت عددی و از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای بررسی می‌نمایند. چن و همکارانش [۳] با مدل‌سازی بستار، چندراهه دود و پرخوران به روش اجزای محدود دمای این قطعات را استخراج کردند. در کار آنها جابجایی انتقال حرارت از گازهای خروجی به قطعات مورد بررسی مدل شده است. علویون و همکارانش [۴] با نصب دمابان<sup>۴</sup> بر روی نقاط محدودی از سطح خارجی چندراهه دود و پرخوران یک موتور چهار استوانه، دمای این قطعات را در دورها و بارهای مختلف کاری اندازه‌گیری کردند.

موتورهای احتراق داخلی همچنان جایگاه خود را در دنیای خودروسازی حفظ کرده است و با وجود ظهور فن‌آوری‌های نوین مانند خودروهایی الکتریکی یا دورگه<sup>۱</sup>، تحقیق، توسعه و بهینه‌سازی موتورهای احتراق داخلی ادامه دارد. یکی از رویکردهای جدید در این زمینه، کوچک‌سازی ابعادی موتور در کنار کاهش مصرف سوخت و افزایش توان (گشتاور) موتور می‌باشد. در این راستا موتورهای سه استوانه در صنعت خودرو سازی توجه بیشتری یافته است که این امر نیازمند استفاده از روش‌ها و سامانه‌های جدیدتر مانند پاشش مستقیم سوخت، کنترل هوشمند دمای سیال خنک‌کاری و پرخورانی<sup>۲</sup> هوای ورودی می‌باشد. سامانه پرخوران یکی از اجزای اصلی اغلب موتورهای سه استوانه است اگرچه در سایر موتورهای بنزینی و بیشتر موتورهای دیزلی کاربرد دارد. پرخوران سامانه‌ای است که از انرژی حاصل از برخورد گازهای خروجی به یک سری پره متصل به یک محور (توربین) و انتقال آن به پره‌های مسیر ورودی (کمپرسور)، موجب مکش و ورود هوای بیشتر به موتور می‌شود. در شکل ۱ نمای پرخوران و اجزای آن نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای پرخوران و اجزای آن [۱]

قرارگیری در معرض گازهای خروجی داغ به همراه کارکرد در دوره‌های بسیار بالا از ویژگی‌های این سامانه است. در برخی از نقاط کاری یک موتور چهار استوانه بنزینی، دمای محفظه دود پرخوران به ۹۵۰ درجه سلسیوس و دور آن به ۲۰۰ هزار دور در دقیقه (د.د.د) می‌رسد. استفاده از مواد مقاوم در مقابل حرارت مانند سوپرالیاژها، ساخت دقیق پره‌ها، روانکاری و آببندی یاتاقان‌ها نیازمند فن‌آوری‌های دقیق و پرهزینه‌ای است که طراحی و ساخت این سامانه را منحصر به چند کشور صنعتی کرده است. ارزیابی دمایی یکی از گام‌های اصلی طراحی و توسعه پرخوران است که هم در ساخت و هم تحلیل خرابی پرخوران و قطعات مسیر آن مانند لوله‌ها و لایه‌ی‌ها لازم است. یکی از قطعات مهم مسیر

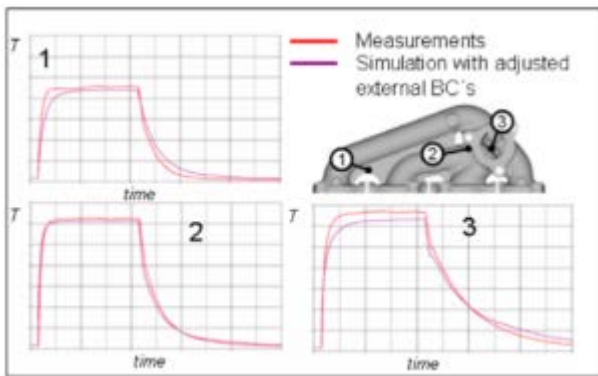
<sup>3</sup> Bead

<sup>4</sup> Thermocouple

<sup>1</sup> Hybrid

<sup>2</sup> Turbocharging

مشخصات گاز آگروز شامل جرم، فشار و دما براساس زاویه میل لنگ استخراج کردند. سپس در حل سه بعدی سیالاتی ضرایب انتقال حرارت و دمای گاز نزدیک دیواره بدست آمده است که نتایج آن بعنوان شرایط مرزی دیواره داخلی بروی مدل المان محدود اعمال گردیده است. به روی سطح خارجی چند راه دود سه عدد ترموکوپل سطحی نصب شده است و با تغییر و بهینه کردن ضرایب انتقال حرارت (جابجایی و تشعشع) در مدل انتقال حرارت به نتایج تجربی موجود رسیده اند. شکل ۴ محل نصب حساسه‌های دما و دقت نتایج حل عددی را در یک فرایند گذرا نشان می دهد. در ادامه به حل عددی جامد، شبیه سازی خرابی لایه در اثر خستگی حرارتی-مکانیکی و بهینه سازی طراحی پرداخته شده است.

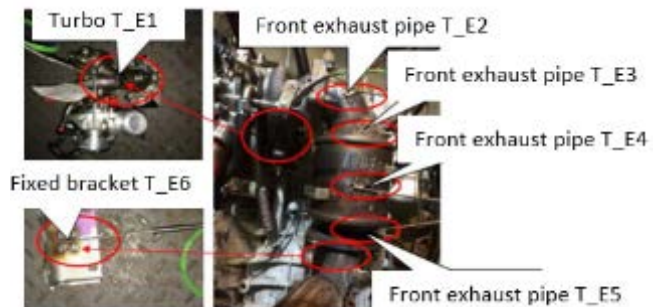


شکل ۱: مقایسه نتایج دمای سطح خارجی حاصل از مدل شبیه سازی و نتایج تجربی توسط گوکمز و دوایستر [۹]

چن و دیگر همکارانش [۱۰] به بررسی طراحی یک چند راه دود یک موتور بنزینی پرخوران به روش آنالیز حل عددی گذرا پرداخته اند. بدین صورت که به کمک حل یک بعدی فرایند احتراق، شرایط مرزی مورد نیاز مدل سه بعدی جریان داخل چند راه خروجی بر حسب زاویه میل لنگ بدست آمده است. در ادامه با حل مدل سه بعدی جریان داخلی ضرایب انتقال حرارت و دمای گاز نزدیک دیواره داخلی بدست آمده است. با انتگرال گیری از نتایج ذکر شده در طی ۷۲۰ درجه زاویه میل لنگ مقدار متوسط آنها بدست می آید. نتایج حاصل به عنوان شرایط مرزی دیواره‌های داخلی در مدل المان محدود اعمال شده است. برای ارزیابی نتایج حاصل از حل عددی به روی چند راه خروجی سه عدد حساسه سطحی دما نصب شده است. محل نصب حساسه‌ها و مقایسه نتایج آزمون تجربی و حل عددی در شکل ۵ آمده است. نتایج بصورت کیفی ارائه شده اند و میزان دقت آن مشخص نیست.

اروگلو و دیگر همکاران [۱۱] به بررسی آنالیز حرارتی چند راه خروجی موتور دیزل با سه روش مختلف حل عددی دینامیک سیالات برای شبیه سازی جریان سیال داخل چند راه دود به همراه توزیع دما پرداخته اند. از بین روشهای معرفی شده، حل عددی کوپل از بیشترین دقت

نتایج کار آنها نشان می داد که حداکثر دمای چندراه دود در شرایط تمام بار و دور ۵۰۰۰ د.د.د برابر ۷۶۰ درجه سلسیوس است که در این نقطه کاری دمای پرخوران ۷۵۵ درجه سلسیوس بدست می آید. بصیر و همکارانش [۵] بوسیله دوربین حرارتی<sup>۱</sup> دمای نقاط مختلف سطح خارجی پرخوران یک موتور چهار استوانه را در شرایط مختلف کاری اندازه گیری کردند. آنها برای استخراج دقیق ضریب تشعشع سطح پرخوران که از ورودی های دوربین حرارتی است، از کوره حرارتی استفاده نمودند. نتایج کار بصیر و همکارانش دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس را در دور ۲۰۰۰ د.د.د تمام بار برای محفظه دود پرخوران نشان می داد. حبیب آقا علی و همکارانش [۶] با انجام آزمون تجربی و نصب ۷ حسگر عمقی و ۳ حسگر سطحی بر روی پرخوران یک موتور چهار استوانه، تراز حرارتی قسمت های مختلف پرخوران را در شرایط کاری مختلف پرخوران استخراج کردند. از جمله شرایط بررسی شده توسط آنها شرایط با و بدون سیال خنک کاری داخلی پرخوران و تأثیر فن خنک کاری سطح خارجی بود. لی و همکارانش [۷] با اعمال بار چرخه ای بر موتور و اندازه گیری دمای پرخوران و چندراه دود، دمای لایه پرخوران را از راه شبیه سازی بدست آوردند. آنها برای انجام این کار مطابق شکل ۳ حسگرهای دما را بر روی پرخوران و چندراه دود نصب کردند. حداکثر دمای اندازه گیری شده توسط لی و همکارانش در پرخوران ۷۰۹ درجه سلسیوس بود.



شکل ۳: حسگرهای دمای نصب شده توسط لی و همکارانش [۷]

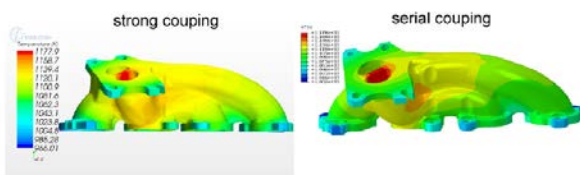
اندازه گیری مستقیم دمای لایه به کمک سازندگان این قطعه و با نصب حسگر چین ساخت آن انجام می شود. این کار برای لایه های چندلایه قابل انجام است. رضائی و همکارانش [۸] اندازه گیری دمای لایه بستار سه لایه یک موتور چهار استوانه را به این روش انجام دادند و قادر به اندازه گیری دمای لایه بستار در دوره های مختلف با سوخت بنزین و گاز شدند. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است اکثر لایه های پرخوران بصورت فلزی تک لایه بوده و امکان نصب حسگر بر روی آنها مشکل و یا غیرممکن است.

گوکمز و دوایستر [۹] بمنظور بررسی تخمین شکست و بهینه سازی طراحی چند راه دود، در ابتدا با حل یک بعدی فرایند احتراق

<sup>1</sup> Thermal Infra-Red Camera

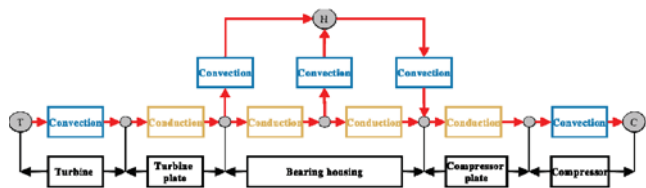
شده برای حالت پایا پرخوران در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست مدل انتقال حرارت پرخوران گسترده و پیچیده می باشد.

ابتیشام و همکارانش [۱۴] در بررسی میزان انتقال حرارت در حلزونی محافظه توربین و تاثیر آن بر عملکرد توربین، مدل ساده شده براساس سطح داخلی حلزونی پیشنهاد داده‌اند. مدل ساده شده یک نازل همگراست که شکل آن به همراه مدل واقعی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در ادامه به تعیین شرایط مرزی و حل عددی یکی بعدی، دو بعدی و سه بعدی برای بدست آوردن اختلاف دمای دیواره داخلی و خارجی پرداخته اند.



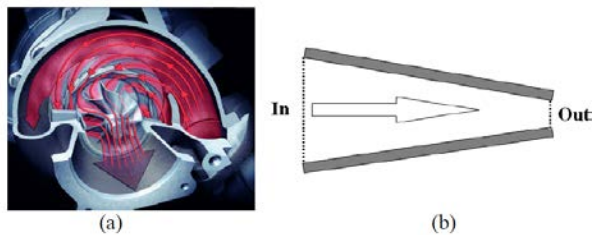
(c). Comparison of temperature field distribution

شکل ۸: مقایسه حل روش کوپل قوی و سری توسط ژین و همکاران [۱۲]



شکل ۹: چیدمان مقاومت انتقال حرارت پرخوران کامل شامل توربین،

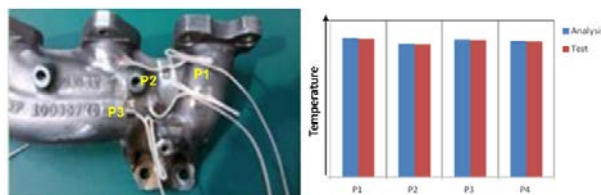
محفظه یاناقان و کمپرسور در حالت پایا کورمیراس و دیگر همکاران [۱۳]



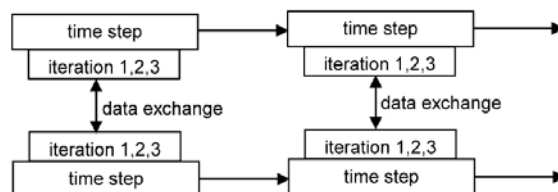
شکل ۱۰. مدل ساده حلزونی پرخوران، (a) تصویر واقعی حلزونی (b) مدل ساده شده حلزونی توربین [۱۴]

مائو لیم [۱۵] به بررسی جریان سیال گاز اگزوز، انتقال حرارت و تاثیر آن بر عملکرد پرخوران با فرض ثابت بودن پره توربین و لغزش مش بطور مفصل پرداخته است. مدل هندسی در نظر گرفته شده برای توربین ساده سازی شده است و فقط با دو لوله واگرا و همگرا جایگزین شده است. شرایط مرزی ورودی چند راهه خروجی و خروجی پرخوران بصورت گذرا در نظر گرفته شده است. مطابق با نتایج حاصله، فرض ثابت بودن پره توربین ۲٪ نرخ انتقال حرارت را در مقایسه با روش مش لغزشی بیشتر پیش بینی میکند. همچنین با توجه به میزان انتقال حرارت

برخوردار است اما زمان حل (۱۷۰ روز در مقایسه با ۵ روز) بسیار طولانی می باشد. برای صحت گذاری نتایج حل عددی، از دوربین حرارتی و حساسه دما در آزمونهای تجربی استفاده شده است. ژین و دیگر همکاران [۱۲] به مطالعه انتقال حرارت گذرا چند راهه دود براساس روش حل همزمان بطور سری پرداخته‌اند. در این پژوهش از یک نرم افزار رابط بین دو نرم افزار CFD و FEA استفاده شده است تا نتایج حل ناحیه سیال به قسمت جامد انتقال و برعکس انتقال یابد. در شکل ۶ روش حل همزمان مورد استفاده نشان داده شده است. مطابق با این روش کوپل معادلات هر فاز در هر گام زمانی تا همگرا شدن حل می شوند. سپس نتایج انتقال می‌یابد و حل معادلات به گام بعدی زمانی انتقال می یابد.

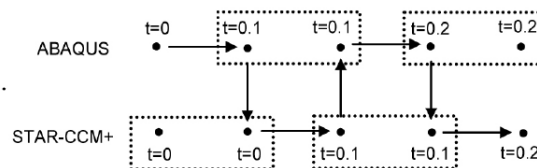


شکل ۵: مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی و نتایج تجربی توسط چن و دیگر همکارانش [۱۰]



شکل ۶: روش حل همزمان مورد استفاده توسط ژین و دیگر همکاران [۱۲]

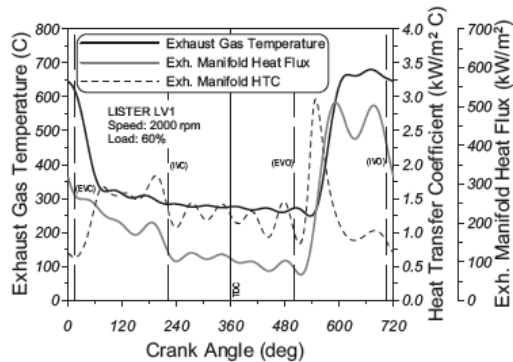
در روش حل سری مطابق با شکل ۷، حل در محیط FEA شروع می-شود و پس همگرا شدن، نتایج به محیط CFD به گام زمانی صفر انتقال می‌یابد. در ادامه حل در محیط سیال ادامه می‌یابد و پس از همگرایی به محیط جامد انتقال می‌یابد.



شکل ۷: روش حل سری ژین و دیگر همکاران [۱۲]

این روش برای دو حالت حل گذرا و پایا استفاده شده است که نتیجه توزیع دما جامد در حالت پایا در شکل ۸ نشان داده است. مطابق با نتایج محل بیشینه دفرمگی و محل بیشینه تنش حرارتی بدست آمده از هر دو روش یکسان می‌باشد و اختلاف ناچیزی با هم دارند. کورمیراس و دیگر همکاران [۱۳] به بررسی انتقال حرارت پرخوران در شرایط پایا و گذرا و تاثیر آن بر عملکرد پرخوران پرداخته اند. مدل تهیه

این رو در این مقاله روش جدیدی برای ارزیابی دمای لایه پرخوران در شرایط مختلف کاری موتور بصورت تجربی با کمک نصب حساسه های دما در مجاورت آن ارائه می شود.



شکل ۱۲. دمای گاز اگزوز، شار حرارتی محلی چند راهه دود و ضریب انتقال حرارت محلی برای دور ۲۰۰۰ دد و بار ۶۰ درصد [۱۶]

### آزمون تجربی

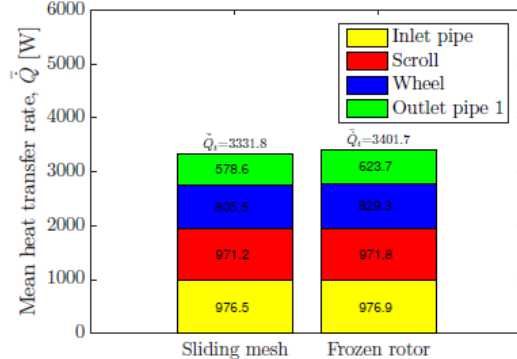
همان طور که ذکر شد در این مقاله روش جدید تجربی برای ارزیابی دمای لایه پرخوران یک موتور چهار استوانه ارائه می شود. مشخصات موتور در جدول ۱ آمده است. لایه پرخوران این موتور از جنس فولاد با آلیاژ کروم-نیکل است که با نام تجاری AISI 301 شناخته می شود. از آنجا که در موتور بررسی شده لایه پرخوران بصورت تک لایه بود امکان نصب حسگر بر روی آن وجود نداشت. از این رو دمای سه نقطه از نزدیک ترین نقاط به لایه از پرخوران و چندراهه دود ارزیابی شد. در این روش نقاط ارزیابی شده در فاصله ۱ میلی متری از لایه بوده و تا عمق ۱۰ میلی متر از ضخامت چندراهه دود و پرخوران نفوذ کرده است. در شکل ۱۳ محل نصب حسگرها بر روی چندراهه دود و پرخوران و نام گذاری آنها نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات موتور آزمون

مشخصه	مقدار
تعداد استوانه	۴ استوانه خطی
حجم موتور	۱٫۷ لیتر
نسبت تراکم	۹٫۶
بیشینه توان	۱۱۰ کیلووات
سرعت بیشینه توان	۵۵۰۰ د.د.د
بیشینه گشتاور	۲۱۵ نیوتن متر
سرعت بیشینه گشتاور	۲۲۰۰ تا ۴۸۰۰ د.د.د

نقاط مشخص شده در شکل ۱۳ که با نام های اختصاری TTF1 تا TTF3 و TFM1 و TFM2 نشان داده شده است، در زوایای ۱۲۰ درجه از این دو قطعه است که بدلیل محدودیت جانمایی، در چندراهه دود فقط دو حسگر نصب شده است که در سمت واکنش شکر دود و همچنین جلوی موتور می باشند. در ادامه به نحوه آماده سازی حسگرها و آزمون تجربی پرداخته می شود.

در قسمتهای مختلف، انتخاب نوع مش پره تاثیر ناچیزی در انتقال حرارت ورودی دارد. نرخ انتقال حرارت بدست آمده برای قسمتهای مختلف یک پرخوران با هر دو فرض فوق در شکل ۱۱ نشان داده شده است و مقایسه شده اند.



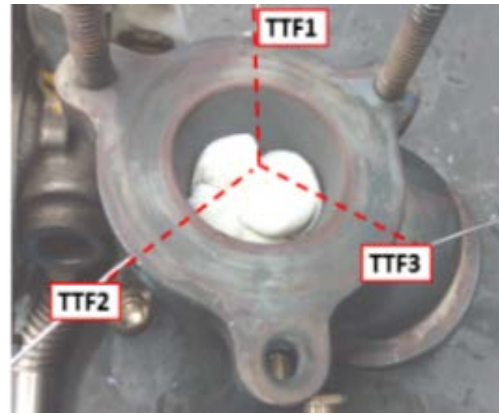
شکل ۱۱: مقایسه نتایج انتقال حرارت محفظه توربین بدست آمده از دو روش توسط مائو لیم [۱۵]

در یک پژوهش کاملا تجربی، ماوروپولوس و همکارانش [۱۶] به بررسی دمای گاز اگزوز، ضریب انتقال حرارت و دمای دیواره سرسیلندر و چند راهه دود یک موتور دیزل هوا خنک در سیکل کاری موتور در دورهای ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور در دقیقه و هر دور با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد بار پرداخته اند. با نصب حساسه های پاسخ سریع دما، فشار و شار حرارتی سطح اندازه گیری شده و با فرض گاز کامل و اندازه گیری مشخصات فیزیکی همچون فشار، دما و محاسبه دقیق دبی جرمی گازهای عبوری دیگر پارامترها همچون ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت و ... از طریق محاسبات بدست آمده است.

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ میزان دمای گازهای اگزوز بین ۳۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد و شار حرارتی چند راهه دود بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع و ضریب انتقال حرارت بین ۰٫۵ تا ۳ کیلووات بر مترمربع بر درجه سانتیگراد در دور ۲۰۰۰ د.د.د و بار ۶۰ درصد را بر حسب زاویه میل لنگ نشان می دهد. مطابق با نتایج، دمای دیواره چند راهه دود با افزایش دور و میزان بار موتور افزایش می یابد. مطابق با آنچه در این قسمت بطور کامل توضیح داده شد برای بدست آوردن توزیع دما لایه پرخوران با استفاده از روش حل عددی نیازمند پشت سر گذاشتن مراحل مختلف و پیچیده است. بطور خلاصه این مراحل شامل:

- تهیه مشخصات گازهای خروجی همچون دما، فشار بر حسب زاویه میل لنگ
  - حل جریان سیال گازهای اگزوز در چندراهه و محفظه پرخوران
  - حل مدل انتقال حرارت جامد چندراهه خروجی و محفظه پرخوران
  - حل مدل انتقال حرارت لایه
- علاوه بر موارد فوق، در حل عددی نیازمند در نظر گرفتن برخی از مفروضات و انتخاب روش حل مناسب بر دقت نتایج تاثیر می گذارد. از

حساسه ها نیز همانند مشخصات مندرج در جدول ۲ می باشد. استفاده از این حسگرها برای مقایسه دمای گاز خروجی و قطعات درگیر (چندراهه دود، پرخوران، لایه پرخوران) می تواند مفید باشد. علاوه بر این در شبیه سازی های رایانه ای و بررسی نتایج بدست آمده کمک می نماید. نمونه ای از حساسه های دما نصب شده در یکی از راهگاه های چند راهه دود در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



الف. محل حسگرهای دمای پرخوران



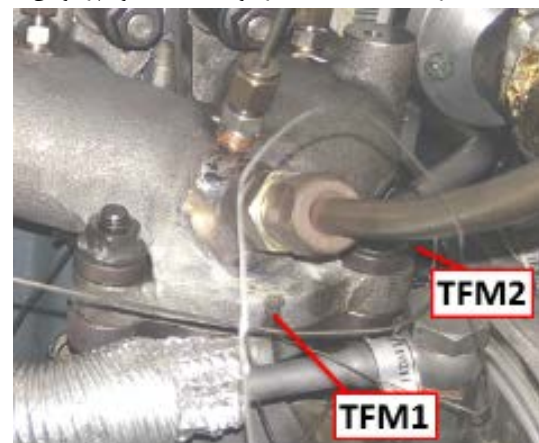
الف. چندراهه دود سوراخکاری شده برای نصب حسگر دما TFM1



ب. حسگر دمای نصب شده بر روی محفظه دود پرخوران



ب. چندراهه دود سوراخکاری شده برای نصب حسگر دما TFM2  
شکل ۱۴: چندراهه دود سوراخکاری شده برای نصب حسگرهای دما در اطراف فلنج پرخوران



ج. حسگرهای دمای چندراهه دود

شکل ۱۳: محل نصب حسگرهای دما



شکل ۱۵: حساسه نصب شده در راهگاه دود چند راهه

جدول ۲: مشخصات حسگرهای دما

مشخصه	مقدار
دمای کارکردی	۲۰۰ °C تا ۱۱۵۰ °C
جنس پوشش	اینکونل ۶۰۰
مقدار خطای اندازه گیری	کمتر از ۱٫۵ °C
زمان پاسخ	کمتر از ۱۵۰ ms

بمنظور اندازه گیری دمای پرخوران و چندراهه دود، از دمابان های نوع K با ضخامت ۱ میلی متر استفاده شد که در فاصله ۱ میلی متر از لایه و در عمق ۱۰ میلی متر از ضخامت این قطعات نصب شد. مشخصات حسگرها در جدول ۲ آمده است. برای این کار پس از سوراخکاری پرخوران و چندراهه دود و نصب دمابان ها، محل سوراخها مجدداً با چسب فلزی پر شد. شکل ۱۴ محل دقیق نصب حسگرهای TFM1 و TFM2 که بر روی چندراهه دود می باشد را نشان می دهد. علاوه بر ۳ حسگرهای دمای چندراهه دود و پرخوران، چهار حسگر دما از نوع K با ضخامت ۳ میلی متر نیز در راهگاه های چندراهه دود نصب شد تا دمای گازهای خروجی را اندازه گیری نمایند. مشخصات این

گاز در راهگاه‌های خروجی نسبت به دور (شکل ۱۷-ب) در حالت تمام بار، نگاشت موتور پرخوران می‌باشد. بدین صورت که در دورهای بالا گشتاور خروجی موتور به علت افزایش دما گازهای خروجی در چند راهه خروجی محدود می‌گردد. محدوده ایمن دمایی با توجه به قطعات درگیر پایین‌تر از ۹۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. این محدودیت از دور د.د.د. ۴۰۰۰ به بعد کاملاً مشهود می‌باشد و مطابق با نگاشت موجود موتور همواره سعی شده دمای گازهای خروجی بین ۹۲۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس محدود گردد. از آنجا که در سیستم مدیریت موتور دمای گازهای خروجی بصورت محاسباتی بدست می‌آید لذا اختلاف موجود در دمای گازهای خروجی در دورهای مختلف می‌تواند ناشی از تنوع تولید باشد. شکل ۱۷-ج دمای گازهای آگزوز در خروجی چند راهه دود و بالادست محفظه پرخوران را نشان می‌دهد. مطابق شکل بیشینه دما در دور د.د.د. ۴۰۰۰ برابر ۹۵۷,۷ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین بیشینه دما در دور د.د.د. ۵۵۰۰ برابر ۹۴۵,۰ درجه سلسیوس می‌باشد اما از آنجا که در دور د.د.د. ۵۵۰۰ سرعت سیال آگزوز بیشتر است با وجود کاهش ۱۲ درجه‌ای در دمای گازهای آگزوز احتمال واقع شدن بیشینه دمای قطعات درگیر و لایه پرخوران در دور د.د.د. ۵۵۰۰ نیز محتمل می‌باشد.



الف: موتور و فن خنک کاری



ب: تصویر چندراهه دود و پرخوران حین آزمون  
شکل ۱۶: اتاق آزمون و موتور نصب شده در آن

همان طور که در شکل ۱۷-الف مشاهده می‌شود دمای حسگر TFM1 با TTF1 و حسگر TFM2 با TTF2 در سرعت‌های مختلف موتور بسیار نزدیک به هم می‌باشد. این موضوع در شکل ۱۸ بطور مشخص

چندراهه دود و پرخوران بعد از آماده‌سازی بر روی موتور هم‌بندی و موتور در اتاق آزمون نصب شد. اتاق آزمون برای کنترل سرعت و بار موتور، مجهز به دینامومتر از نوع جریان گردابی با ظرفیت توان حداکثر ۱۹۰ کیلووات است. همچنین تجهیزاتی برای خنک‌کاری دمای سیال خنک‌کاری و هوای ورودی موتور دارد. همه این مشخصات بوسیله حسگرها و دستگاه داده‌برداری با فرکانس ۱۰ هرتز قابلیت داده‌برداری و ذخیره‌سازی دارد. در این آزمون علاوه بر خوانش و کنترل مشخصه‌های عمومی موتور مانند سرعت، بار، دما و فشار روغن و سیال خنک‌کاری موتور، همه حسگرهای دمای نصب شده با فرکانس ۱۰ هرتز داده‌برداری شد.

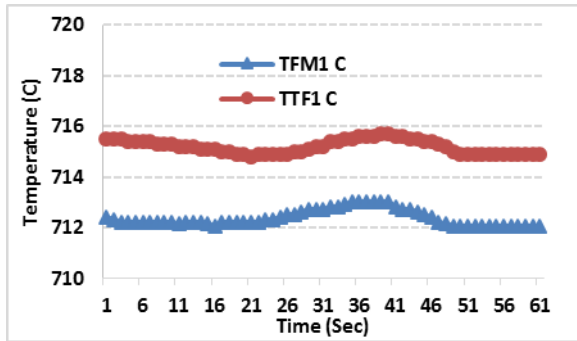
بمنظور تعیین روش آزمون، نخست باید عوامل موثر بر دمای لایه پرخوران را شناخت. این عوامل عبارتند از:

- بار (توان) موتور
  - سرعت (دور) موتور
  - دمای روغن
  - دمای سیال خنک‌کاری
  - دبی و موقعیت فن‌های خنک‌کاری چندراهه دود و پرخوران
- بررسی‌های پیشین توسط رضائی [۱۷] نشان می‌داد که بیشینه دمای اجزای مسیر دود در شرایط تمام بار بدست می‌آید. بنابراین در این مقاله، تاثیر عامل سرعت موتور در شرایط تمام بار بر روی دمای نقاط مختلف لایه پرخوران بررسی شده است. برای این منظور آزمون در دمای روغن و سیال خنک‌کاری ثابت (۹۰ درجه سلسیوس) و با دبی ثابت فن خنک‌کاری انجام شد. این شرایط مطابق رویه طراحان و توسعه‌دهندگان خودرو استاندارد بوده و به شرایط موتور در رانندگی جاده نزدیک‌تر می‌باشد. برای این منظور یک بار در شرایط تمام بار، موتور از دور ۳۰۰۰ د.د.د. تا ۵۵۰۰ د.د.د. با گام‌های ۵۰۰ د.د.د. جاروب شد. بار دیگر این آزمون در شرایط نیمه بار با ۵۰ درصد گشتودگی درپچه گاز تکرار گردید. در شکل ۱۶ موتور در اتاق آزمون و موقعیت فن‌های خنک‌کاری نشان داده شده است.

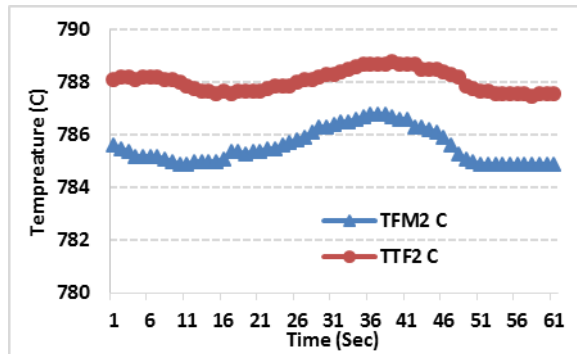
## نتایج آزمون

در شکل ۱۷ نمودار نتایج آزمون در شرایط تمام بار و در سرعت‌های مختلف آورده شده است. در این مرحله از آزمون بار ثابت بوده و سرعت متغیر است. شکل ۱۷-الف دمای چندراهه دود و پرخوران و شکل ۱۷-ب دمای گازهای خروجی در راهگاه‌های چندراهه می‌باشد. شکل ۱۷-ج دمای گازهای خروجی در خروجی چندراهه و بالادست محفظه پرخوران می‌باشد. محل نصب حساسه‌ها قبلاً در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

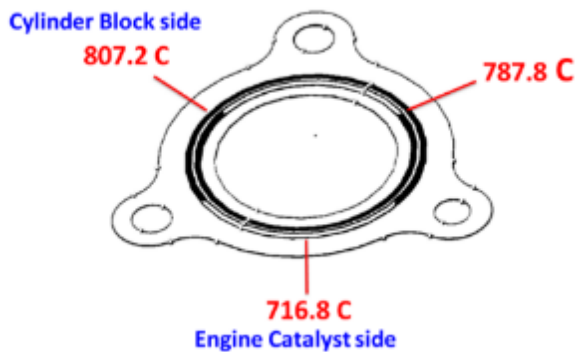
دماهای رسم شده مربوط به چند راهه دود و پرخوران (شکل ۱۷-الف) از دمای گاز در راهگاه‌های خروجی چند راهه دود تبعیت دارد چرا که گازهای خروجی عامل افزایش دما می‌باشد. اما علت تغییرات در دمای



الف: دمای زوج حسگرهای TFM1 و TTF1 در شرایط تمام بار



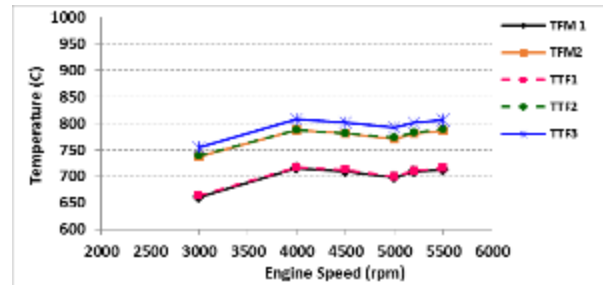
ب: دمای زوج حسگرهای TFM2 و TTF2 در شرایط تمام بار  
شکل ۱۸. دمای دو طرف لایه پرخوران در دور ۵۵۰۰ د.د. تمام بار



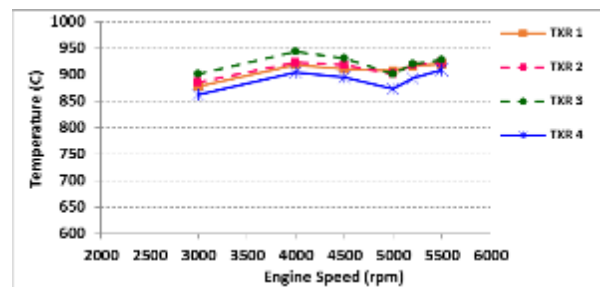
شکل ۱۹. دمای بیشینه نقاط مشخص شده لایه پرخوران در دور ۴۰۰۰ د.د.د.

شکل ۱۹ نشان می‌دهد که بیشینه دمای لایه پرخوران حدود ۸۰۷ درجه سلسیوس است که در سرعت ۴۰۰۰ د.د. تمام بار بدست می‌آید. از آنجا که سمت واکنشگر دود موتور در معرض بیشترین جریان باد فن خنک‌کاری است کمترین دمای کاری را دارد و از این رو سمت بدنه موتور<sup>۱</sup> بیشترین دما را دارد. نکته دیگر این است که برخلاف انتظار، دمای بیشینه لایه پرخوران در شرایط بیشینه توان موتور (۵۵۰۰ د.د.د) نبوده و در ۴۰۰۰ د.د. تمام بار می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز پیش بینی می‌شد به علت افزایش سرعت سیال در دورهای بالا و به طبع آن

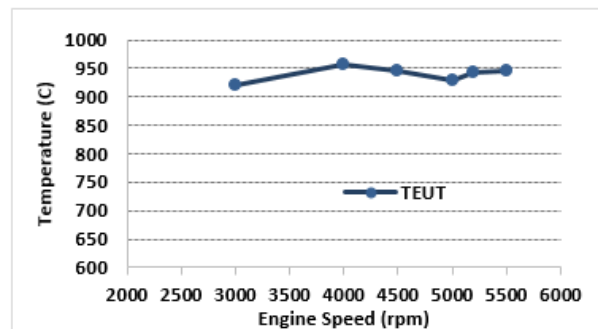
در دور ۵۵۰۰ د.د.د. نشان داده شده است. لازم به ذکر است داده برداری پس از پایا شدن نتایج انجام شده است. دمایی دو طرف لایه پرخوران در نقطه حداکثر سه درجه سلسیوس با هم اختلاف دارند.



الف: دمای حسگرهای چندراهه دود و پرخوران در شرایط تمام بار



ب: دمای گاز در راهگاه‌های خروجی چندراهه دود

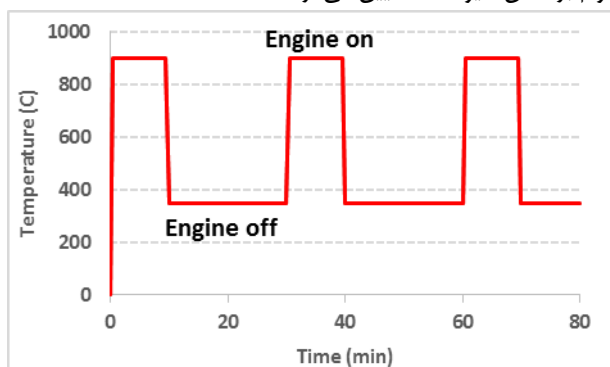


ج: دمای گاز در خروجی چندراهه دود و بالادست پرخوران  
شکل ۱۷. دمای نقاط مختلف چندراهه دود و پرخوران و گازهای خروجی

از آنجا که هر کدام از این زوج حسگرها در دو طرف لایه پرخوران و با فاصله ۱ میلی‌متر از آن می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که دمایی لایه پرخوران در محل این حسگرها، میانگینی از دما دو نقطه اطراف آن می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری نقطه سوم چندراهه دود به علت محدودیت فضای مناسب برای ماشینکاری و نصب حساسه ممکن نشد، از دمای متناظر پرخوران استفاده کرده و دمای بیشینه لایه پرخوران در سه نقطه مورد بررسی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این دمای بیشینه در شرایط ۴۰۰۰ د.د. تمام بار بدست می‌آید.

<sup>1</sup> Cylinder block

آن (موتور خاموش) کار می‌کند. تعداد سیکل مورد نیاز برای این آزمون دوام براساس شیوه نامه تعیین می‌گردد.



شکل ۲۱. رویه آزمون خستگی حرارتی- مکانیکی لایه پرخوران.

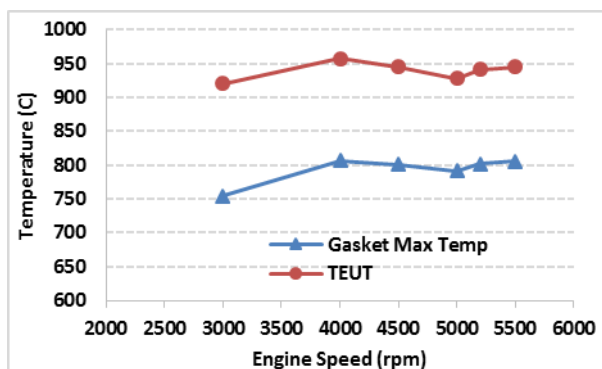
در هر ۵۰ ساعت از آزمون، نشی لایه پرخوران با اعمال فشار باد بر مسیر دود ارزیابی می‌شد تا اینکه در ساعت ۱۷۵ از آزمون، در محل لایه نشی بیش از مقادیر مجاز طراحی مشاهده شد که نشان دهنده خرابی لایه پرخوران بود. بنابراین لایه پرخوران باز شد و مورد ارزیابی قرار گرفت که اثرات نشی گاز آگزوز (بصورت رد عبور گاز) و تغییر شکل منحنی دایره مرکزی لایه به بیضی مشاهده شد. در شکل ۲۲ نمای لایه تخریب شده در آزمون دوام نشان داده شده است.



شکل ۲۲. تصویر لایه پرخوران در هنگام خرابی در آزمون دوام.

در بررسی های بعمل آمده عوامل مختلفی در وقوع این خرابی در آزمون دوام وجود دارد من جمله کیفیت ساخت چند راهه خروجی و محفظه پرخوران، مواد استفاده شده در ساخت و ... که با توجه به بررسی های بعمل آمده کارکرد در دمای بالا عامل اصلی خرابی می‌باشد که نشان دهنده صحت دمای اندازه گیری شده و شرایط آزمون استخراج شده بود. تاثیر دما بر خواص مکانیکی و خستگی آلیاژهای چدن بکار رفته در چند راهه دود، در محدوده دمای ۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس توسط اکستورم و جانسون [۱۸] بررسی شده است. نتایج حاکی از کاهش حدودا ۶۰ درصدی تنش تسلیم آلیاژ در دماهای بالا نسبت به دمای اتاق دارد. این موضوع در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطوح داخلی چند راهه دود و محفظه پرخوران، اختلاف بیشینه دمایی لایه پرخوران در دوره های ۴۰۰۰ د.د.د و ۵۵۰۰ د.د.د در حدود یک درجه سلسیوس (جدول ۳) می‌باشد و بسیار به هم نزدیک می‌باشد. همچنین از آنجا که دمای قطعات درگیر متاثر از دمای گازهای خروجی می‌باشد شرایط دمایی لایه نیز با دمای گازهای خروجی که در شکل ۱۷-ج نیز نشان داده شده است مطابقت دارد. مقایسه بین نتایج بیشینه دمای لایه پرخوران و دمای TEUT در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰. تغییرات بیشینه دمایی لایه نسبت به دمای گازهای خروجی

دمای نقاط مشخص شده به روی لایه پرخوران بر اساس شکل ۱۹ برحسب دوره های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: دمای نقاط لایه پرخوران در دوره های مختلف در شرایط تمام بار

دور موتور	۱	۲	۳
۲۰۰۰	۶۲۰٫۹	۶۹۹٫۲	۷۱۳٫۸
۳۰۰۰	۶۶۱٫۷	۷۳۷٫۷	۷۵۴٫۹
۴۰۰۰	۷۱۶٫۸	۷۸۷٫۸	۸۰۷٫۲
۴۵۰۰	۷۱۰٫۳	۷۸۰٫۷	۸۰۱٫۲
۵۰۰۰	۶۹۸٫۹	۷۷۱٫۰	۷۹۱٫۳
۵۲۰۰	۷۰۹٫۴	۷۸۲٫۲	۸۰۱٫۷
۵۵۰۰	۷۱۳٫۷	۷۸۶٫۸	۸۰۶٫۲

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۳ بیشینه دما در لایه در دوره های ۴۰۰۰، ۴۵۰۰، ۵۲۰۰ و ۵۵۰۰ د.د.د بسیار به هم نزدیک می‌باشد و حداکثر اختلاف ۶ درجه سلسیوس می‌باشد.

مقایسه شکل های ۱۷-الف و ب نشان دهنده اختلاف حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس بین دمای گازهای خروجی و دیواره جامد پرخوران و چندراهه دود که در مسیر آن قرار دارند است.

بعد از بدست آوردن بیشینه دمای لایه پرخوران (نقطه ۴۰۰۰ د.د.د تمام بار)، آزمون دوام خستگی حرارتی- مکانیکی مطابق شکل ۲۱ برای این قطعه انجام می‌شود و چرخه های آزمون بصورت تکرارپذیر انجام می‌شود. روند آزمون بدینگونه می‌باشد که موتور بصورت تکرارپذیر بین بیشینه دمای چند راهه خروجی (۴۰۰۰ د.د.د تمام بار) و کمینه دمای

## نتیجه گیری

در این تحقیق دمای لایه پرخوران موتور از دور ۳۰۰۰ د.د تا ۵۵۰۰ د.د بصورت تمام بار بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. دمای لایه پرخوران به روش جدید و از روی نقاط نزدیک آن در دو قطعه مجاور (چندراهه دود و پرخوران) بدست آمد. از آنجا که دسترسی به لایه پرخوران و اندازه گیری مستقیم دمای آن کاری دشوار و یا غیرممکن می باشد این روش می تواند در ارزیابی حرارتی لایه پرخوران مفید باشد. سپس شرایط کاری بدست آمده برای پیشینه دمای لایه، در آزمون دوام خستگی این قطعه استفاده شد و پس از ۱۷۵ ساعت دچار نشستی و خرابی شد. خرابی لایه پرخوران در آزمون دوام خستگی آن نشان می داد که شرایط بدست آمده برای دمای پیشینه این قطعه صحیح می باشد.

با توجه به آزمون های انجام شده و بررسی های صورت گرفته بر روی داده ها، می توان نتایج زیر را حاصل نمود:

- پیشینه دمای لایه پرخوران حدود ۸۰۷ درجه سلسیوس بوده و در شرایط ۴۰۰۰ د.د تمام بار موتور بدست می آید.
- با وجود کاهش دمای گازهای اگزوز در دور ۵۵۰۰ د.د نسبت به دور ۴۰۰۰ د.د به علت افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطوح داخلی چند راهه در اثر افزایش سرعت گازهای خروجی، پیشینه دمایی لایه در دور ۵۵۰۰ د.د اختلاف ۱ درجه سلسیوس با دور ۴۰۰۰ د.د دارد.
- لایه پرخوران در سمت واکنشگر دود موتور کمترین دما و در سمت بدنه موتور بیشترین دما را دارد.
- دمای گازهای خروجی حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس بالاتر از دیواره جامد پرخوران و چندراهه دود است.

## مراجع و منابع

[۱] حامد بصیر، بررسی تجربی توزیع دما در محفظه پرخوران موتور احتراق داخلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، ۱۳۹۶.

[2] Sealing systems: Advanced Sealing Trends, concepts, and materials, Victor Reinz CO., [www.reinz.com](http://www.reinz.com).

[3] M. Chen, Y. Wang, W. Wu, J. Xin, Design of the Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine Based on a Transient Thermal Mechanical Analysis Approach, SAE 2014-01-2882.

[4] S. Sh. Alaviyoun and M. Ziabasharhagh, Experimental thermal survey of automotive turbocharger, International J of Engine Research 1-15, IMechE 2018.

[۵] حامد بصیر، سید شهاب الدین علویون، سید محمد جعفری، حبیب اله مهرجو، بررسی تجربی توزیع دما در پرخوران موتور احتراق داخلی با استفاده از دوربین حرارتی، مجله تحقیقات موتور ۵۰: صص ۳-۱۵، ۱۳۹۶.

[6] H. Aghaali, On-Engine Turbocharger Performance Considering Heat Transfer, Licentiate thesis Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2012.

[7] Li, X., Wang, W., Zou, X., Zhang, Z. et al., Simulation and Test Research for Integrated Exhaust Manifold and Hot End Durability, SAE Technical Paper 2017-01-2432, 2017.

[۸] مهدی رضائی، علی ذاکری، سعید عبدالملکی، بررسی حرارتی لایه سربیلندر چندلایه فلزی به روش تجربی، مجله تحقیقات موتور ۴۸: صص ۱۹-۲۵، ۱۳۹۶.

[9] Taner Gocmez and Udo Deuster, An Integral Engineering Solution for Design of Exhaust Manifolds, SAE 2009-01-1229, 2009.

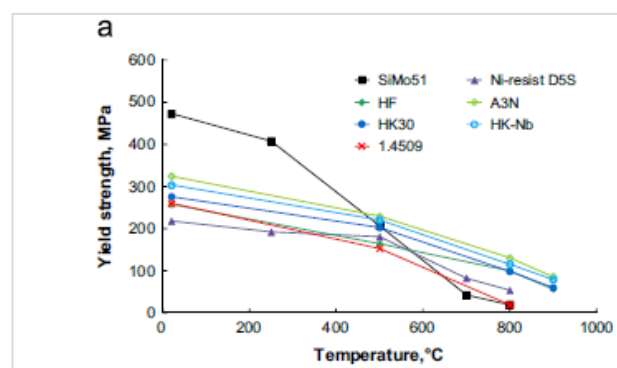
[10] Ming Chen, Yanjun Wang, Wenrui Wu, and Jun Xin, Design of the Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine Based on a Transient Thermal Mechanical Analysis Approach, SAE 2014-01-2882, 2014.

[11] Eroglu, S., Duman, I., Ergenc, A., and Yanarocak, R., "Thermal Analysis of Heavy Duty Engine Exhaust Manifold Using CFD, SAE Technical Paper 2016-01-0648, 2016.

[12] Liu Zhien, Xiaomin Wang, Zhang Yan, Xueni Li, and Yu Xu, Study on the Unsteady Heat Transfer of Engine Exhaust Manifold Based on the Analysis Method of Serial, SAE International 2014-01-1711, 2014.

[13] Mickaël Cormerais, Pascal Chesse, Jean-François Hetet, Turbocharger Heat Transfer Modeling Under Steady and Transient Conditions, International Journal of Thermodynamics, Vol. 12 (No. 4), pp. 193-202, 2009.

[14] Ibthisham A. Mohd\*, S. Rajoo and A. Nordin Darus, HEAT DISTRIBUTION STUDY ON



شکل ۲۳. تغییرات تنش تسلیم آلیاژهای با دما کاری اکستورم و جانسون

[۱۸]

## تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران- خودرو (ایپکو) انجام شده است و نویسندگان از مسئولین و پرسنل این شرکت بخصوص واحد آزمایشگاه آن، تقدیر و تشکر دارند.

Direct Injection Diesel Engine, SAE 2008-01-1326, 2008.

[۱۷] مهدی رضائی، گزارش بررسی اندازه‌گیری دمای چندراهه دود موتور XUM در آزمون‌های موتوری و خودروبی بمنظور کاربرد در آزمون دوام شوک حرارتی چندراهه دود، شرکت ایپکو، ۱۳۹۳.

[18] M. Ekström and S. Jonsson, High-temperature mechanical- and fatigue properties of cast alloys intended for use in exhaust manifolds, *Materials Science & Engineering, A* 616 (2014) 78-87, 2014

TURBOCHARGER TURBINE'S VOLUTE, *Jurnal Mekanikal*, No.35 , 63-81, 2012.

[15] Shyang Maw Lim, Flow and heat transfer in a turbocharger radial Turbine, Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics, SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2016.

[16] G. C. Mavropoulos, C. D. Rakopoulos and D. T. Hountalas, Experimental Assessment of Instantaneous Heat Transfer in the Combustion Chamber and Exhaust Manifold Walls of Air-Cooled



## Thermal Analysis of Turbocharger Steel Gasket via Experimental Test

A. Zakeri<sup>1</sup>, A. Adamieyan<sup>2\*</sup>, A. Mohammadi<sup>3</sup><sup>1</sup>Faculty of Mechanical engineering, Tehran Azad University, Central Unit, Tehran, Iran, [a\\_zakeri@ip-co.com](mailto:a_zakeri@ip-co.com)<sup>2</sup>Faculty of Mechanical engineering, Tehran Azad University, Central Unit, Tehran, Iran, [arm.adamian@iauctb.ac.ir](mailto:arm.adamian@iauctb.ac.ir)<sup>3</sup>Department of Mechanical engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran, [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

Article history:  
Received: 13 March 2019  
Accepted: 25 June 2019

Keywords:  
Turbocharger gasket  
Temperature survey  
Exhaust manifold

### ABSTRACT

Increasing the power (torque) of nowadays engines, along with reduction of fuel consumption and dimensions of them, cause to the use of turbocharged systems. Since turbo chargers are exposed to the exhaust hot gases and have a high operating speed, it is necessary to utilize high technology design and special materials with high cost. The temperature of the exhaust system with gasoline fuel sometimes reaches 950 degrees Celsius, and the change of operating points causes to its thermal fatigue. Hence, the thermal evaluation is one of the basic design activity for manufacturing and testing of turbo charger and its related parts, such as the turbo gasket. In this paper, a new method for evaluating the temperature of a gasket of a four-cylinder gasoline engine is presented. In this method, the temperature of the closest points to gasket is measured at the turbo housing and the exhaust manifold flange, and finally the temperature of the gasket is estimated using them. The results show that in this study, the maximum temperature of the gaskets is about 807 degrees Celsius, which is consistent with the results of analyzes and other turbo charger temperature measurements. Since the access to turbo charger gasket and direct measurements of its temperature is difficult or impossible, the proposed method can be useful in evaluating the temperature of the turbo charger gasket. Then, the measured temperature in the test of durability of thermal-mechanical fatigue was used and the obtained result was evaluated. The failure of gasket in this type of test could indicate the accuracy of the temperature.

