

بررسی تجربی اثر عیب سایش گرم پیستون بر روی پارامترهای عملکردی موتور

سید اشکان موسویان^۱، غلامحسن نجفی^{۲*}، برات قبادیان^۳، سید مصطفی آقا میرسلیم^۴، سید محمد جعفری^۵، مجتبی محرابی وقار^۶

* نویسنده مسئول: g.najafi@modares.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

عیب سایش گرم پیستون، موتور درونسوز، پارامترهای عملکردی موتور، آزمون سایش گرم پیستون

عیب سایش گرم پیستون یکی از عیوب مخرب در انواع موتورهای درونسوز است. عوامل مختلفی در ایجاد این عیب دخیل هستند که از مهمترین آنها می‌توان به کمبود لایه روانکار میان پیستون و سیلندر اشاره کرد. هدف از این مقاله بررسی کمی اثرات عیب سایش گرم پیستون بر روی پارامترهای عملکردی موتور است که به نوبه خود تحقیق جدیدی در حوزه موتورهای درونسوز می‌باشد. بدین منظور طی یک آزمون سایش گرم، پارامترهایی مانند نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ، سرعت دورانی، گشتاور، قدرت موتور و فشار محفظه لنگ اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد این عیب موجب کاهش سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور به میزان بیش از ۱۰۰ دور بر دقیقه، ۲۵ نیوتن متر و ۱۶ کیلووات شد. علاوه بر اثراتی که عیب سایش گرم بر روی پارامترهای مذکور داشت، با وقوع این عیب، افزایش شدید و ناگهانی در پارامترهای نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ و فشار محفظه لنگ رخ داد.

۱- دانشجوی دوره دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)

۵- کارشناس، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)

۶- کارشناس، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)

۱- مقدمه

امروزه کارخانه‌های پیشرفته موتورسازی به منظور جلب رضایت مشتریان، با ارائه آخرین دستاوردهای خود با یکدیگر رقابت می‌کنند. نمونه‌هایی از این پیشرفت‌ها عبارتند از قدرت خروجی بالاتر به ازاء سوخت مصرفی کمتر، وزن ویژه کمتر، رعایت استانداردهای آلاینده‌گی و غیره. در این میان، یکی از مهمترین اولویت کارخانه‌ها، مسئله قابلیت اطمینان^۱، دوام^۲ و طول عمر موتور است. علیرغم پیشرفت‌های صورت گرفته در موتور، مسئله ایجاد عیوب هنوز به عنوان یک معضل اساسی مطرح است [۱]. این امر به دلیل قرار داشتن قطعات در شرایط سخت کاری است. به طور مثال پیستون‌ها همواره با تنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی، نیروهای فراوان، اصطکاک، دماهای بالا و مواد خورنده مواجه‌اند. این امر موجب می‌شود تا پیستون‌ها که از اجزا کلیدی در موتورها هستند، بسیار مستعد به خرابی شوند به طوری که در حال حاضر عیوب فراوانی در پیستون‌ها شناسایی شده است. این عیوب شامل خرابی‌های وارده بر تاج پیستون^۳، سر پیستون^۴ و دامن پیستون^۵ است. عیب سایش گرم پیستون^۶ جزو عیوب مخربی است که ممکن است برای هر پیستونی رخ دهد. در صورت وقوع این عیب، سیلندر و پیستون دچار آسیب شدید شده و موتور نیاز به تعمیرات اساسی دارد. بنابراین پرداختن به این عیب به منظور تضمین سلامت و افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر موتور لازم و ضروری است.

یی و همکاران [۲] به بررسی تجربی عیب سایش گرم پیستون و تحلیل سازوکار آن پرداختند. در این تحقیق ذکر

شد که عیب سایش گرم، یکی از خرابی‌های اصلی و تأثیرگذار بر روی طول عمر موتورهاست. به منظور ایجاد این عیب و شبیه‌سازی حرکت پیستون درون سیلندر، یک دستگاه طراحی و ساخته شد. در این تحقیق، تأثیر آلیاژ آلومینیوم نوع A390 بدون پوشش و با پوشش‌های مختلف بر روی سازوکار عیب سایش گرم بررسی شد. پوشش‌های استفاده شده شامل روکش نیکل-فسفر با ۴ درصد حجمی ذرات نیترا ت بور، روکش قلع و روکش پلیمر کامپوزیت با تقریباً ۱۵ درصد حجمی ذرات گرافیت بود. همچنین در این تحقیق تأثیر سختی سطوح دامن پیستون و سیلندر در پدیده سایش گرم با استفاده از ریزنگاری و ویژگی‌های ریخت شناسی^۷ نیز مطالعه شد. ونگ و همکاران [۳] به بررسی مقاومت سطوح مختلف پیستون در مقابل عیب سایش گرم پرداختند. در این تحقیق مقاومت سایشی پیستون‌ها با تغییر سختی سطوح و نیز استفاده از پوشش‌های مختلف مطالعه شد. مطالعات آزمایشی شامل سه پوشش با دو سختی مختلف برای پیستون در برابر سطوح سیلندر ساخته شده از سه آلیاژ مختلف آلومینیوم و چدن بود. در این تحقیق ذکر شد که سطح تماس، خواص مکانیکی و شیمیایی مواد سیلندر، سختی سطح پیستون و پوشش‌ها عوامل اصلی و مؤثر در برابر سایش گرم می‌باشند. چوو و همکاران [۴] اثرات سختی سطح و پوشش‌ها را بر روی رفتار سایشی سطوح پیستون بررسی کردند. در این تحقیق ذکر شد که دو راه برای کاهش اصطکاک و مقدار سایش پیستون وجود دارد که یکی اصلاح سختی سطح و دیگری استفاده از پوشش برای محافظت از سطوح لغزنده می‌باشد. برای بررسی اثر سختی، سطوح با سه سختی مختلف و برای بررسی اثر پوشش‌ها از دو پوشش گرافیت و کربن شبه

- 1- Reliability
- 2- Durability
- 3- Piston crown
- 4- Piston head
- 5- Piston skirt
- 6- Piston scuffing

7- Morphology

به قطعات لغزنده است بدین معنا که هرگاه دو قطعه مکانیکی روی یکدیگر بلغزند، احتمال وقوع عیب سایش گرم میان آن‌ها وجود دارد. از قطعات مستعد به عیب سایش گرم می‌توان به سیلندر و پیستون و چرخنده‌ها اشاره کرد. در این میان، عیب سایش گرم پیستون به دلیل اهمیت به سزای خود در موتورها، همواره مورد توجه طراحان پیستون بوده و کارخانه‌های موتورسازی هرگونه اقدامی جهت جلوگیری از وقوع آن انجام می‌دهند [۶].

عوامل بسیاری در تشکیل عیب سایش گرم پیستون دخالت دارند. این عوامل عبارتند از دما، تنش، لایه روانکار، اصطکاک، لقی میان سطوح^۴، استوانه‌ای بودن سیلندر^۵، تغییر شکل حرارتی^۶، بار، سرعت لغزش، حرکت ثانویه پیستون^۷، نیروهای جانبی، محیط کاری، شکل سطوح، خواص فیزیکی مواد نظیر سختی^۸، زبری^۹ و ناهمواری‌ها، استحکام، حد خستگی، حد سیلان و غیره، و در نهایت خواص شیمیایی مواد نظیر پیوندها، نقطه ذوب، نیروهای هم‌چسبی^{۱۰}، نیروهای دگرچسبی^{۱۱}، تمایل به دگرچسبی، واکنش پذیری و غیره [۲، ۶، ۸-۱۶]

عیب سایش گرم پیستون دارای سازوکار پیچیده‌ای است که تاکنون توسط محققان زیادی بررسی شده است [۲، ۳، ۱۷، ۱۸] اما به منظور روشن تر شدن نحوه به وجود آمدن عیب سایش گرم، در ادامه روند تشکیل این عیب تشریح می‌شود:

اساساً عیب سایش گرم پیستون با تماس فلز با فلز^{۱۲} (تماس پیستون با سیلندر) آغاز می‌شود. این وضعیت زمانی رخ می‌دهد که روانکاری مرزی بوده یا لایه روانکار به هر

الماس^۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک پوشش گرافیتی کمتر از پوشش کربن شبه الماس بود، اما پوشش گرافیتی در محافظت از سطوح در مقابل سایش مؤثر نبود. همچنین پوشش کربن شبه الماس عملکرد بهتری نسبت به پوشش گرافیتی داشت. سینق و همکاران [۵] به بررسی عیب قفل‌شدگی^۲ پیستون به صورت تجربی و شبیه سازی پرداختند. لازم به ذکر است که عیب قفل‌شدگی درجه پیشرفت تری از عیب سایش گرم است که تحت آن حرکت قطعات لغزنده به موجب اصطکاک شدید، متوقف می‌شود [۶]. نتایج تحقیق [۵] نشان داد که دماهای کاری بالا و کاهش چشمگیر در ضخامت فیلم روغن، پدیده قفل‌شدگی را تشدید می‌کنند. نویسندگان اذعان کردند که هنوز خلأی در مدل‌سازی فیزیکی این عیب وجود داشته و تئوری‌های بیشتری برای درک بهتر این مکانیزم پیچیده لازم است.

با توجه به پژوهش‌های قبلی، تاکنون اثرات عیب سایش گرم پیستون بر روی موتور در هیچ تحقیقی بررسی نشده است. لذا در مقاله حاضر، این کار با بررسی جامع و دقیق پارامترهای عملکردی موتور در زمان وقوع عیب سایش گرم پیستون انجام می‌شود که به نوبه خود، پژوهشی جدید است. همچنین نتایجی که در این تحقیق بدست آمده‌اند، نوین و کاربردی می‌باشد. پارامترهای بررسی شده در این تحقیق عبارتند از نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ، سرعت دورانی، گشتاور، قدرت موتور و فشار محفظه لنگ.

۲- عیب سایش گرم پیستون

در تعریف استاندارد، عیب سایش گرم به آسیب شدیدی گفته می‌شود که میان سطوح لغزنده جوش‌های محلی^۳ رخ دهد [۷]. عیب سایش گرم جزء عیوب مربوط

4- Clearance
5- Cylindricity
6- Thermal expansion
7- Secondary motion
8- Stiffness
9- Roughness
10- Cohesive forces
11- Adhesive forces
12- Metal-to-metal contact

1- Diamond-like carbon (DLC)
2- Piston seizing
3- Local welds

مواد جدیدی تشکیل می‌شود. در نتیجه این فرآیند، لایه‌های سخت تر روی سطوح ایجاد شده و در طرف مقابل، به دلیل کنده شدن مواد از روی سطوح، سوراخ و چاله‌هایی به وجود می‌آید. این لایه‌های اضافی و چاله‌های تشکیل شده روی سطوح، زبری آن‌ها را افزایش می‌دهد. فرآیند مذکور به دلیل افزایش زبری و تشکیل لایه‌های سخت و تیزتر در مرحله قبل، با نرخ سایش بیشتر تکرار می‌شود بدین معنا که هر بار، شدت آسیب بیشتر می‌گردد. به همین دلیل، عیب سایش گرم با نرخ فزاینده شدیدتر می‌شود.

۳- روش آزمون

برای پیشبرد آزمایش‌ها، از یک موتور EF7/NA نو که مشخصات فنی آن در جدول (۱) ذکر شده است، استفاده شد.

در این تحقیق با طراحی و اجرای آزمون ویژه‌ای به نام آزمون سایش گرم پیستون که توسط شرکت FEV پیشنهاد شد [۱۹]، موتور به طور طبیعی دچار عیب سایش گرم پیستون شد. به دلیل اینکه عیب سایش گرم پیستون در شرایط سخت کاری موتور اتفاق می‌افتد، رویه این آزمون به نحوی طراحی شد تا موتور در چنین شرایطی قرار گیرد. این رویه شامل سه مرحله زیر بود:

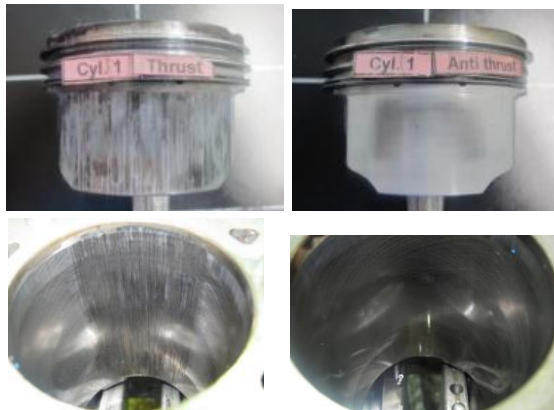
- (۱) موتور طی حدوداً ۳۰ ثانیه از حالت خاموش به دور پیشینه توان خود تحت پیشینه بارگذاری رسید.
- (۲) موتور به مدت تقریباً ۱۲۰ دقیقه در وضعیت مذکور یعنی سرعت پیشینه توان و پیشینه بارگذاری باقی ماند.
- (۳) موتور طی مدت ۴۰ ثانیه خاموش شد.

در مدت زمان آزمون، پارامترهای عملکردی موتور شامل سرعت دورانی، گشتاور، قدرت، نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ و فشار محفظه لنگ به طور همزمان اندازه-

دلیلی از ناحیه میان این دو سطح از بین برود. این تماس حتی در مقیاس‌های ریز^۱ موجب افزایش شدید اصطکاک و دما می‌شود. افزایش دما موجب می‌گردد که استحکام مواد کاهش یابد. این امر می‌تواند با ضعف‌های ساختاری در سیلندر و پیستون تشدید شود. نمونه‌هایی از ضعف‌های ساختاری که به خطای طراحی و ساخت مربوط است عبارتند از گوشه‌های تیز، سوراخ‌های ریز موجود در سطوح، زبری در مقیاس ریز، جنس مواد و غیره. تحت این شرایط خواص ماده مانند حد سیلان، حد خستگی و تنش‌های مجاز نسبت به حالت طبیعی کاهش می‌یابد. حال با وارد آمدن تنش‌های شدید که به دلیل وجود نیروهای جانبی، نیروهای لغزشی و نیز نیروهای اضافی در نتیجه افزایش اصطکاک به وجود می‌آیند، جریانات پلاستیک^۲ در لایه‌ها و زیر لایه‌ها ایجاد می‌شود بدین معنا که مواد بالاخص مواد سطحی‌تر دچار تغییر شکل پلاستیک^۳ می‌شوند. با توجه به تنش‌های مجاز کاهش یافته، مواد می‌توانند به سادگی از جای خود کنده شوند. به دلیل تغییر شکل پلاستیک مواد، نیروهای هم‌چسبی در آن‌ها کاهش یافته و از طرف مقابل، نیروهای دگرچسبی میان دو سطح لغزنده (سیلندر و پیستون) ایجاد می‌شود. این نیروها به حدی اند که موجب می‌شوند مواد در یک مقیاس بزرگ از روی سطوح کنده شده و به سطح مقابل منتقل شوند. این انتقال به دلیل همان نیروی دگرچسبی است که میان مواد دو سطح به وجود می‌آید. لازم به ذکر است که انتقال ماده برای هر دو سطح اتفاق می‌افتد. بنابراین توجه شود که در عیب سایش گرم، انتقال دو جانبه مواد^۴ رخ می‌دهد [۲]. با چسبیدن مواد به یکدیگر، ممکن است واکنش‌های شیمیایی میان آن‌ها نیز برقرار شود. در این حالت پیوند میان مواد محکم‌تر شده و

1- Micro scales
2- Plastic flow
3- Plastic deformation
4- Mutual material transfer

دلیل گرمای زیاد این ناحیه است، زیرا در برخی موتورها، چندراهه خروجی در سمت ضد فشاری قرار دارد.



سمت فشاری

سمت ضد فشاری

شکل (۱) سیلندر و پیستون شماره ۱ موتور در اثر عیب سایش گرم

پیستون

۴- نتایج و بحث

در این قسمت اثرات عیب سایش گرم پیستون بر روی پارامترهای موتور به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. بدین منظور به ترتیب پارامترهای نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، سرعت دورانی، گشتاور، قدرت موتور و فشار محفظه لنگ به طور جداگانه بررسی می‌شوند.

۴-۱- نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ

پس از بررسی داده‌های اخذ شده، مشخص شد که این عیب در مرحله دوم از آزمون رخ داد. این کار با بررسی پارامتر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ انجام شد زیرا یکی از معیارهای اصلی برای تشخیص عیب سایش گرم پیستون در موتورها، افزایش شدید و ناگهانی این پارامتر است [۲۱].

به منظور اندازه‌گیری پارامتر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، از دستگاه اندازه‌گیری گازهای نشتی محفظه لنگ^۱ از نوع فشار تفاضلی^۲ با دقت ۱٪، محدوده کاری ۳ تا ۱۵۰ لیتر بر دقیقه و محدوده دمایی ۱۰- تا ۵۵ درجه سانتیگراد استفاده شد.

گیری شدند. تجهیزاتی که در این آزمایش استفاده شد عبارت بودند از:

- لگام ترمز
- نرم‌افزار و سخت‌افزارهای خوانش و کنترل موتور
- دستگاه اندازه‌گیری نرخ و فشار گازهای نشتی محفظه لنگ
- سامانه سرمایش و گرمایش
- تجهیزات کنترل دما و فشار سیال خنک‌کاری و روانکاری موتور

جدول (۱) مشخصات فنی موتور تحت آزمون

| | |
|--|-----------------|
| تعداد سیلندر | ۴ |
| تعداد سوپاپ | ۱۶ |
| قطر سیلندر (میلیمتر) | ۷۸ |
| طول جابجایی (میلیمتر) | ۸۵ |
| حجم جابجایی (لیتر) | ۱/۶۵۰ |
| قدرت بیشینه (کیلووات) / سرعت دورانی (دور بر دقیقه) | ۶۰۰۰ / ۸۳ |
| گشتاور بیشینه (نیوتن متر) / سرعت دورانی (دور بر دقیقه) | ۳۵۰۰-۴۵۰۰ / ۱۴۶ |
| نسبت تراکم | ۱۱/۵ |

پس از انجام این آزمون، موتور باز شده و سیلندر و پیستون‌های آن بررسی شدند. دیده شد که در سیلندر و پیستون شماره ۱، سایش گرم اتفاق افتاد. شکل (۱) تصویر سیلندر و پیستون شماره ۱ این موتور را در سمت فشاری و ضد فشاری نشان می‌دهد.

همانطور که دیده می‌شود عیب سایش گرم، اثرات مخربی در سمت فشاری این سیلندر و پیستون گذاشته و سطوح آن‌ها را به کلی از بین برده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که درجه خفیف‌تری از عیب سایش گرم در سمت ضد فشاری رخ داده است. لازم به ذکر است که به دلیل وجود نیروهای جانبی و تنش‌های بالاتر، اغلب سمت فشاری آسیب بیشتری می‌بیند. اما در بعضی مواقع مشاهده شده که علائم شدیدی از عیب سایش گرم در سمت ضد فشاری نیز رخ داده است [۲۰]. این امر بیشتر به

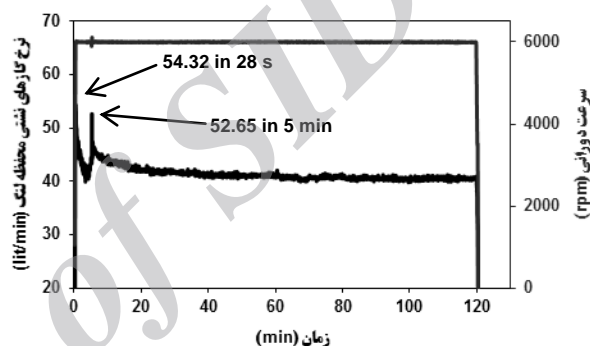
1- Blow-by meter

2- Differential pressure

انجام شد، پس افزایش در نرخ گازهای نشتی نیز به طور ناگهانی رخ داد. بنابراین می توان گفت که افزایش اولیه در نرخ گازهای نشتی به موجب افزایش ناگهانی دور موتور بوده و ارتباطی به عیب سایش گرم نداشت [۲۱]. همچنین دیده می شود که پس از افزایش شدید دور، نرخ گازهای نشتی با شیب زیادی افت کرد. افزایش دوم در نرخ گازهای نشتی که در دقیقه پنجم از آزمون اتفاق افتاد مربوط به مرحله دوم از آزمون بود، جایی که موتور در سخت ترین شرایط کاری خود قرار داشت. لازم به ذکر است که احتمال وقوع عیب سایش گرم در این مرحله بیشتر است چرا که به دلیل افزایش شدید سرعت، دمای پیستون ها به شدت افزایش می یابد ولی هنوز سیلندرها به دلیل دمای سیال خنک کاری، آنقدر گرم نیستند. در این شرایط انبساط حجمی پیستون ها بیشتر از سیلندرها بوده و به موجب آن، لقی میان سیلندر و پیستون بیش از پیش کم می شود و احتمال نزدیک شدن پیستون به دیواره سیلندر افزایش می یابد. به دلیل وجود نیروهای سمت فشاری سیلندر در این سرعت، فشار زیادی از سوی پیستون به فیلم روغن میان پیستون و سیلندر وارد می آید. این نیروهای دینامیکی شدید و نیز دماهای بالا در این ناحیه باعث از بین رفتن لایه روغن شده و تماس فلز با فلز رخ می دهد بدین معنا که شرایط برای وقوع عیب سایش گرم محیا می شود. پس از ایجاد عیب سایش گرم، به دلیل خوردگی و از بین رفتن لایه های سیلندر و پیستون، آبیندی محفظه احتراق کاهش یافته و گازها می توانند به سادگی از فضای میان سیلندر و پیستون عبور کرده و خود را به محفظه لنگ برسانند. بنابراین افزایش دوم در نرخ گازهای نشتی نشان دهنده وقوع عیب سایش گرم در موتور می باشد. با توجه به شکل ۲ دیده می شود که عیب سایش گرم پیستون باعث شد که نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ به مقدار ۵۲/۶۵ لیتر بر دقیقه برسد. همچنین در این شکل دیده می شود که پس از وقوع عیب سایش، مقدار نرخ گازهای نشتی تا محدوده ۴۰

اساس کار این دستگاه، استفاده از روش اندازه گیری اختلاف فشار^۱ است. گازهای نشتی که از محفظه لنگ موتور وارد لوله دستگاه می شوند، در بین راه از یک دهانه تنگ^۲ عبور می کنند. این امر باعث ایجاد اختلاف فشار در دو سر دهانه شده که توسط حسگر تفاضلی فشار^۳ اندازه گیری می شود. در نهایت، دبی گازهای نشتی از این اختلاف به دست می آید.

شکل (۲) نمودار مربوط به پارامتر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ را به همراه سرعت دورانی موتور در طول آزمون نشان می دهد.

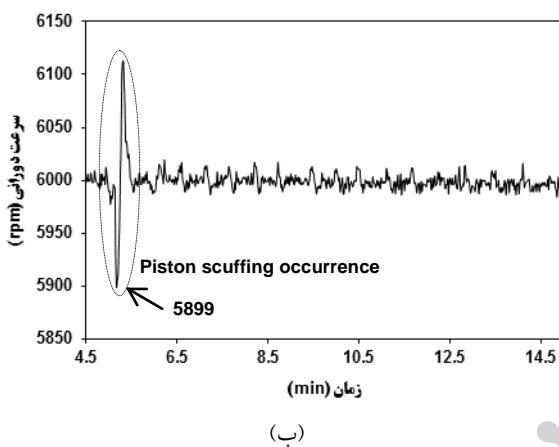
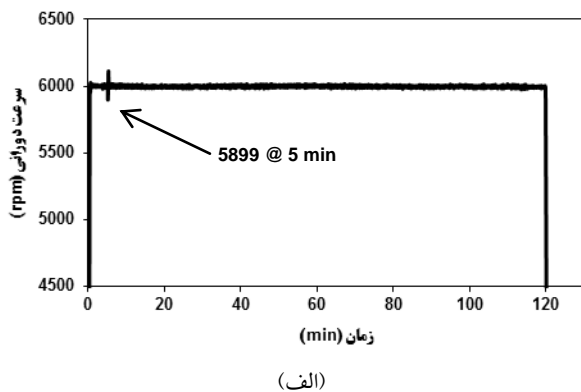


شکل (۲) نمودار پارامتر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و سرعت دورانی موتور در طول آزمون

در این شکل دیده می شود که پارامتر نرخ گازهای نشتی دو دفعه به طور شدید افزایش یافت. اولین افزایش ناگهانی در ۲۸ ثانیه پس از شروع آزمون رخ داد یعنی این افزایش مربوط به مرحله اول از آزمون بود. پیشتر گفته شد که در این مرحله، موتور به طور ناگهانی از دور ۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برده شد. این افزایش بدین دلیل است که برای بالا بردن سرعت دورانی موتور، لازم است که سوخت و هوای بیشتری مصرف شود یعنی مقدار گازهای موجود در سیلندر و مقدار گازهای حاصل از احتراق بیشتر می شود. در نتیجه میزان گازهایی که از فضای میان سیلندر و پیستون نشت می کنند نیز به مراتب افزایش می یابد. در این آزمون، چون این تغییرات در مدت زمانی کوتاه

1- Differential pressure measurement procedure
2- Orifice
3- Differential pressure sensor

بود. این امر به دلیل تشکیل جوش‌های محلی بر روی سطوح سیلندر و پیستون می‌باشد.



شکل (۳) (الف) سرعت دورانی موتور (الف) طول آزمون، (ب) زمان وقوع عیب سایش گرم پیستون

در شکل ۳ (الف) دیده می‌شود که پس از کاهش ناگهانی، یک افزایش در سرعت دورانی موتور رخ داد. این امر بدین دلیل است که دینامومتر متصل به موتور برای اصلاح سرعت دورانی، باری معادل کمبود سرعت دورانی (تقریباً ۱۰۰ دور بر دقیقه) را از روی موتور برداشت تا دور به ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برسد. اما به دلیل شکسته شدن جوش-ها و کاهش اصطکاک، سرعت موتور از ۶۰۰۰ دور بر دقیقه منحرف شد. البته پس از مدت زمانی اندک دینامومتر توانست این انحراف را اصلاح کند. این مورد مانند آن بود که گویی مانعی که بر سر راه سرعت موتور بود، به طور ناگهانی برداشته شود. مسلماً در این حالت سرعت موتور از مقدار مطلوب منحرف می‌شود. با نگاهی دقیق‌تر به نمودار

لیتر بر دقیقه کاهش یافته و در طول آزمون در این بازه باقی مانده است. این امر بدین دلیل است که در ابتدا با وقوع عیب سایش گرم، مواد از روی سطوح سیلندر و پیستون کنده می‌شوند. این امر موجب از بین رفتن آبیندی میان سیلندر و پیستون و نفوذ گازهای محفظه احتراق به محفظه لنگ می‌شود. به همین دلیل است که یک افزایش شدید و ناگهانی در پارامتر نرخ گازهای نشتی در ابتدای وقوع عیب سایش گرم رخ می‌دهد. اما پس از آن به دلیل اینکه پیستون بر روی سیلندر در حال کشیده شدن است، مواد کنده شده می‌توانند به سطوح سیلندر و پیستون جوش خورده و تا حدی باعث آبیندی شوند. اما در این وضعیت آبیندی استاندارد موتور از بین رفته و سطوح سیلندر و پیستون صدمه دیده‌اند (شکل ۱). به همین دلیل است که پس از وقوع عیب سایش گرم، مقدار پارامتر نرخ گازهای نشتی در محدوده زیادی باقی مانده است.

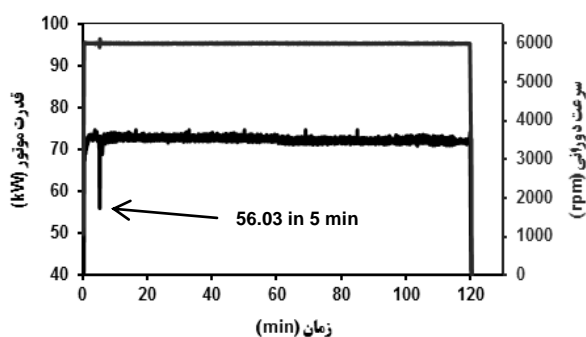
۴-۲- سرعت دورانی موتور

در این قسمت پارامتر سرعت دورانی موتور در زمان عیب سایش گرم به طور دقیق بررسی می‌شود. در این آزمون، ابتدا سرعت دورانی موتور در مدت زمانی کوتاه پس از روشن شدن، به سرعت بیشینه توان می‌رسد. سپس به مدت تقریباً ۱۲۰ دقیقه در این سرعت و تحت بیشینه بارگذاری قرار گرفته و در نهایت موتور خاموش می‌شود. شکل ۳ (الف) نمودار سرعت دورانی موتور را بر حسب مدت زمان آزمون نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، سرعت دورانی پس از مدت زمان کوتاهی به ۶۰۰۰ دور بر دقیقه رسید و از آن به بعد موتور وارد مرحله دوم آزمون شد. دیده می‌شود که در دقیقه پنجم آزمون، افت شدیدی در سرعت موتور (بیش از ۱۰۰ دور بر دقیقه) رخ داد. این زمان مقارن با زمانی است که در نرخ گازهای نشتی افزایش شدیدی ایجاد شد. بنابراین می‌توان گفت که این افت قابل توجه در سرعت موتور، ناشی از عیب سایش گرم پیستون

رسید. دلیل این کاهش شدید، افزایش ناگهانی اصطکاک می‌باشد. به علاوه پس از وقوع عیب سایش گرم، گشتاور نیز مانند سرعت دورانی دچار نوسانات شدیدی شد که نشان‌دهنده خارج شدن موتور از حالت طبیعی است. پس می‌توان گفت که عیب سایش گرم پیستون تأثیر مخربی بر روی گشتاور موتور داشته است.

۴-۴- قدرت موتور

شکل (۵) نمودار قدرت موتور بر حسب زمان را در این آزمون نشان می‌دهد.



شکل (۵) قدرت موتور در طول آزمون سایش گرم پیستون

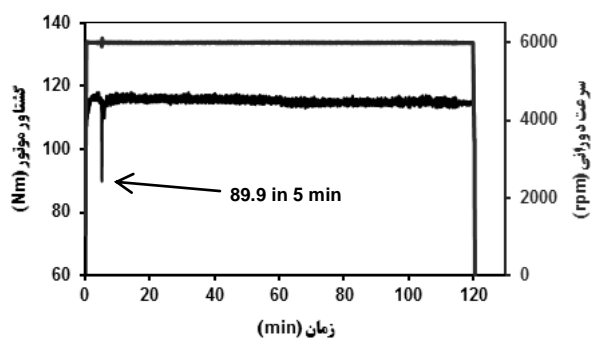
با توجه به این شکل دیده می‌شود که پس از گذشت ۵ دقیقه از آزمون، قدرت موتور دچار کاهش شدیدی شد و به مقدار ۵۶/۰۳ کیلووات رسید. این لحظه همان زمانی است که عیب سایش گرم پیستون در موتور اتفاق افتاد. کاهش در قدرت به این دلیل است که چون سرعت دورانی و گشتاور موتور در اثر این عیب کاهش یافتند، در نتیجه قدرت موتور نیز کاهش یافت زیرا قدرت موتور با سرعت و گشتاور نسبت مستقیم دارد. توجه شود که مقدار قدرت ۵۶/۰۳ کیلووات برای این موتور، در سرعت دورانی تقریباً ۵۱۷۰ دور بر دقیقه تولید می‌شود. پس می‌توان گفت که تأثیر عیب سایش گرم بر روی قدرت موتور، معادل کاهش ۸۳۰ دور بر دقیقه در سرعت موتور بود. نوسانات در قدرت موتور پس از وقوع عیب سایش گرم نیز افزایش یافت که نشانگر افت قابل توجه در عملکرد موتور است. مسلماً موتور تحت چنین نوساناتی

سرعت دورانی موتور، دیده می‌شود که پس از وقوع عیب سایش گرم، تغییرات در سرعت دورانی بسیار شدید شد بدین معنا که انحراف سرعت موتور از مقدار مطلوب ۶۰۰۰ دور بر دقیقه، افزایش یافت به طوری که این انحراف به بیش از ۱۰ دور بر دقیقه رسید. شکل ۳ (ب) نوسانات سرعت را طی ۱۰ دقیقه و پس از وقوع عیب سایش گرم پیستون در مقیاسی بزرگ‌تر نشان می‌دهد. گفتنی است که در وضعیت طبیعی، مقدار انحراف از سرعت دورانی برای تجهیزات استفاده شده باید کمتر از ۱۰ دور بر دقیقه باشد.

در مجموع دیده می‌شود که عیب سایش گرم پیستون در ابتدا منجر به کاهش چشمگیری در سرعت موتور شده، سپس نوسانات شدیدی را در آن ایجاد می‌کند که منجر به کاهش عملکرد موتور می‌شود. به علاوه میل لنگ موتور ممکن است در اثر این کاهش ناگهانی و شدید سرعت موتور آسیب ببیند.

۴-۳- گشتاور موتور

نمودار گشتاور موتور به همراه سرعت دورانی در شکل (۴) آورده شده است.



شکل (۴) گشتاور موتور در طی آزمون سایش گرم پیستون

در این شکل دیده می‌شود که در دقیقه پنجم، تغییر چشمگیری در گشتاور موتور رخ داده است. این لحظه مقارن است با زمانی که عیب سایش گرم پیستون اتفاق افتاد. ملاحظه می‌شود که در اثر این رخداد، گشتاور موتور به طور قابل توجهی افت کرد و به مقدار ۸۹/۹ نیوتن‌متر

بسیار کوتاه از ۱/۷۴ کیلو پاسکال به مقدار ۲/۷۵ کیلو پاسکال (تقریباً ۶۰ درصد افزایش) رسید.

با توجه به این آزمون، می توان ذکر کرد که به موجب افزایش سریع سرعت موتور، دمای پیستون‌ها به‌طور سریع به بیشینه مقدار خود می‌رسد اما در این مدت زمان کوتاه، دمای سیلندرها به اندازه کافی بالا نرفته است. این امر منجر می‌شود که پیستون‌ها بیشترین انبساط حجمی را داشته در صورتی که هنوز سیلندرها به‌طور کامل منبسط نشده‌اند. این تفاوت در میزان انبساط حجمی باعث می‌شود که لقی میان سیلندر و پیستون بیش از پیش کم شده و پیستون با سیلندر تماس پیدا کند و عیب سایش گرم بوجود آید. بنابراین می‌توان گفت که دلیل اصلی وقوع عیب سایش گرم در این آزمون، کم شدن لقی به دلیل تفاوت در انبساط حجمی سیلندر و پیستون بوده است.

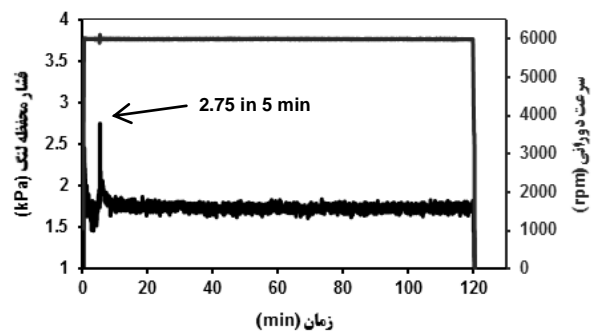
از این آزمون می‌توان نتیجه گرفت در شرایطی که اختلاف انبساط‌های حجمی سیلندر و پیستون دلیل اصلی ایجاد سایش گرم است، سیلندر و پیستونی مستعدتر به این عیب هستند که به راهگاه ورودی آب نزدیکترین باشند. همچنانکه در این تحقیق دیده شد که سیلندر و پیستون شماره ۱ دچار عیب سایش گرم شدند، چون سیال خنک ابتدا از سیلندر ۱ عبور می‌کرد. در این شرایط انبساط حجمی این سیلندر کمتر از سیلندره‌های دیگر بود یعنی لقی میان سیلندر و پیستون کمتر شده و شرایط برای تشکیل عیب سایش گرم در این سیلندر مساعدتر شد.

در مجموع دیده شد که عیب سایش گرم پیستون می‌تواند تأثیرات قابل توجهی را بر روی پارامترهای عملکردی موتور بگذارد و موجب افت شدید در عملکرد موتور شود. در این حالت، موتور آسیب دیده از شرایط طبیعی خود خارج شده و نیاز به تعمیرات اساسی دارد که به نوبه خود هزینه‌های هنگفتی را بر جای می‌گذارد. بنابراین با توجه به

در قدرت نمی‌تواند کارا باشد و نیاز به تعمیرات اساسی دارد تا این عیب بر طرف شود.

۴-۵- فشار محفظه لنگ

گازهایی که از محفظه احتراق بالای پیستون از طریق شیار رینگ‌ها به درون محفظه لنگ نفوذ می‌کنند فشاری را در این ناحیه ایجاد می‌کنند. هرچه مقدار و فشار گازهای ناشی در موتور کمتر باشد، برای سلامت موتور بهتر است. فشار بالای این گازها باعث خرابی آبندهای موتور شده و در این شرایط آلایندگی موتور نیز افزایش می‌یابد. اینجاست که نقش رینگ‌های کمپرسی در جلوگیری از نشت گازها نمایان می‌شود. همانطور که ذکر شد در اثر وقوع عیب سایش گرم پیستون، به دلیل از بین رفتن آبنندی میان سیلندر و پیستون، گازهای محفظه احتراق می‌توانند به سادگی از میان سیلندر و پیستون عبور کرده و به محفظه لنگ برسند. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که در اثر وقوع این عیب، فشار محفظه لنگ نیز افزایش یابد. شکل (۶) صحت این گفته را در غالب داده‌های تجربی بر گرفته از این آزمون نشان می‌دهد.



شکل (۶) فشار محفظه لنگ موتور در طول آزمون سایش گرم پیستون همانطور که دیده می‌شود فشار در ابتدای آزمون به دلیل افزایش شدید سرعت دورانی زیاد شد اما پس از پایدار شدن سرعت، کاهش یافت. در اثر عیب سایش گرم پیستون، این فشار به شدت افزایش یافت و در مدت زمانی

کرد. در زمینه تشخیص این عیب، پیشنهاد می‌شود از آزمون‌های غیر مخرب مانند تحلیل ارتعاش و روغن استفاده شود.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به پاس حمایت‌های همه‌جانبه خود از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع:

- [1] Piston Damages—Recognizing and Rectifying, MSI Motor Service International, 2004.
- [2] Ye Z., Zhang C., Wang Y., Cheng H.S., Tung S., Wang Q.J., He X., An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses, *Wear*, 257, 2004, pp. 8-31.
- [3] Wang Y., Yao C., Barber G.C., Zhou B., Zou, Q., Scuffing resistance of coated piston skirts run against cylinder bores, *Wear*, 259, 2005, pp. 1041-1047.
- [4] Cho D.H., Lee S.A., Lee Y.Z., The effects of surface roughness and coatings on the tribological behavior of the surfaces of a piston skirt, *Tribology Transactions*, 53, 2009, pp. 137-144.
- [5] Singh O., Umbarkar Y., Sreenivasulu T., Vetrivendan E., Kannan M., Babu Y.R., Piston seizure investigation: Experiments, modeling and future challenges, *Engineering Failure Analysis*, 28, 2013, pp. 302-310.
- [6] Dyson A., Scuffing—a review, *Tribology International*, 8, 1975, pp. 77-87.
- [7] Conference on Lubrication and Wear, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, 1957.
- [8] Dyson A., The failure of elastohydrodynamic lubrication of circumferentially ground discs, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 190, 1976, pp. 699-711.
- [9] Rohatgi P., Pai B., Effect of microstructure and mechanical properties on the seizure resistance of cast aluminium alloys, *Wear*, 28, 1974, pp. 353-367.
- [10] Block H., *Theoretical study of temperature rise at surface of actually contact under oiliness*

این ضرورت، باید تحقیقات پیرامون این عیب افزایش یافته تا هر چه بیشتر بتوان از وقوع آن جلوگیری کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که سامانه‌ای برای تشخیص عیب سایش گرم پیستون ایجاد شود تا بتوان در زمان‌های ابتدایی وقوع این عیب، آن را شناسایی کرده و اقدامات اصلاحی به منظور جلوگیری از پیشرفت آن صورت گیرد. بنابراین با توجه به خلاهای موجود در این زمینه، لازم است که تحقیقات به سمت تشخیص این عیب نیز سوق داده شوند.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با هدف بررسی کمی اثرات عیب سایش گرم پیستون بر روی موتور، آزمونی ویژه به منظور بوجود آوردن عیب سایش گرم در یک موتور انجام شد. پارامترهای عملکردی موتور نظیر سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور در مدت زمان آزمون اندازه‌گیری شده و تغییرات آن‌ها در اثر عیب سایش گرم پیستون به طور کامل بررسی شدند. نتایج آزمون نشان داد که عیب سایش گرم پیستون موجب کاهش چشمگیری در سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور شد. از طرف دیگر، این عیب باعث افزایش شدیدی در نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ و فشار محفظه لنگ شد. با توجه به نتایج، تفاوت در انبساط حجمی سیلندر و پیستون نقش به‌سزایی را در وقوع عیب سایش گرم پیستون داشت. در مجموع، با توجه به اثرات مخرب و قابل توجه عیب سایش گرم پیستون که در تحقیق حاضر نشان داده شد، لازم است تا پژوهش‌های بیشتری در زمینه جلوگیری و تشخیص این عیب در موتورها انجام شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود با آزمایش‌های دقیق بر روی مقاومت مواد سازنده سیلندر و پیستون در برابر عیب سایش گرم، استفاده از پوشش‌های مختلف و نیز بهبود طراحی قطعات، بتوان هر چه بیشتر از وقوع این عیب جلوگیری

- lubricating conditions*, 1937, 222-235, in Proceedings of the General Discussion on Lubrication and Lubricants, London, England.
- [11] Lee S., Cheng H., Scuffing theory modeling and experimental correlations, *Journal of Tribology*, 113, 1991, pp. 327-334.
- [12] Shen M., Cheng H.S., Stair P.C., Scuffing failure in heavily loaded slow speed conformal sliding contacts, *Journal of Tribology*, 113, 1991, pp. 182-191.
- [13] Cocks M., Interaction of sliding metal surfaces, *Journal of Applied Physics*, 33, 1962, pp. 2152-2161.
- [14] Reddy A.S., Bai B.N., Murthy K.S.S., Biswas S.K., Wear and seizure of binary Al-Si alloys, *Wear*, 171, 1994, pp. 115-127.
- [15] Reddy A.S., Bai B.N., Murthy K.S.S., Biswas S.K., Mechanism of seizure of aluminium-silicon alloys dry sliding against steel, *Wear*, 181, 1995, pp. 658-667.
- [16] He X., *Experimental and Analytical Investigation of the Seizure Process in Al-Si Alloy/Steel Tribocontacts*, Northwestern University, 1998.
- [17] Jang J.H., Joo B.D., Lee J.H., Moon Y.H., Effect of hardness of the piston ring coating on the wear characteristics of rubbing surfaces, *Metals and Materials International*, 15, 2009, pp. 903-908.
- [18] Nikas G., Sayles, R., Effects of debris particles in sliding/rolling elastohydrodynamic contacts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 212, 1998, pp. 333-343.
- [19] FEV Test Procedure, Hot Piston Scuff Test, FEV company.
- [۲۰] جعفری س، مهدیقلی ه، بهزاد م، تشخیص عیب سایش سیمه با استفاده از روش انتشار صدا، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، شماره ۲۴، سال ۱۳۹۰، جلد ۲۴، صفحات ۲۱-۲۸.
- [۲۱] موسویان ا، نجفی غ، قبادیان ب، جعفری س، خزایی م، بررسی دقت پارامتر نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ در تشخیص عیب سایش پیستون، هشتمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز و نفت، تهران، ایران، سال ۱۳۹۲.