



فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineerresearch.ir



تشخیص عیب سایش سمبه در یک موتور درونسوز با استفاده از متغیرهای عملکردی و منطق فازی

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

^۱دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، a.moosavian@modares.ac.ir

^۲دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، g.najafi@modares.ac.ir

^۳دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، gjobadib@modares.ac.ir

^۴دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

^۵دانشگاه صنعتی شریف و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، sm_jafari@ip-co.com

^۶شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، m_mehrabi@ip-co.com

نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۴۸۲۹۲۳۳۲

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۳
پذیرش: ۰۵ تیر ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:
عیب سایش سمبه
موتور درونسوز
متغیرهای عملکردی موتور
منطق فازی

عیب سایش سمبه یکی از عیوب مخرب در انواع موتورهای درونسوز است. عوامل مختلفی در به وجود آوردن این عیب دخیل هستند که از مهمترین آنها می‌توان به از بین رفتن لایه روانکار میان سمبه و استوانه اشاره کرد. در این مقاله با هدف تشخیص این عیب، روشی هوشمند بر پایه منطق فازی و استفاده از متغیرهای عملکردی موتور ارائه شده است. بدین منظور طی آزمونی، چهار متغیر سرعت دورانی، گشتاور، قدرت موتور و نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ اندازه‌گیری شدند. سپس سامانه منطق فازی برای تشخیص هوشمند عیب سایش سمبه ایجاد شد. نتایج آزمون نشان داد که عیب سایش سمبه موجب افزایش کاهش سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور به ترتیب به بیش از ۱۰۰ دور بر دقیقه (د.د.د.)، ۲۵ نیوتن‌متر و ۱۶ کیلووات شد. به علاوه با وقوع این عیب، افزایشی شدید و ناگهانی در متغیر نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ نیز رخ داد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از الگوی تغییرات در متغیرهای عملکردی موتور و به کارگیری آنها در سامانه منطق فازی، روش مناسبی را برای تشخیص عیب سایش سمبه ایجاد می‌کند.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

بسیار اندکی در سطح دنیا وجود دارد. بنابراین مطالعه در این زمینه، جدید است. بی^{۱۴} و همکاران عیب سایش سمبه و تحلیل سازوکار آن را به صورت تجربی بررسی کردند. در این تحقیق ذکر شد که عیب سایش، یکی از خرابی‌های اصلی تأثیرگذار بر روی طول عمر موتورهاست. به منظور ایجاد این عیب، یک دستگاه طراحی و ساخته شد که حرکت سمبه درون استوانه را شبیه‌سازی می‌کرد. توسط این دستگاه، تأثیر سمبه با همبسته آلومینیوم نوع A390 بدون پوشش و با پوشش‌های مختلف بر روی سازوکار عیب سایش بررسی شد. پوشش‌های استفاده شده شامل روکش نیکل-فسفر با ۴ درصد حجمی ذرات نیترا ت بور، روکش قلع و روکش پلیمر مرکب با تقریباً ۱۵ درصد حجمی ذرات گرافیت بودند. در این تحقیق تأثیر سختی سطوح دامن سمبه و استوانه در پدیده سایش با استفاده از ریزنگاری و ویژگی‌های ریخت‌شناسی^{۱۵} نیز مطالعه شدند [۴]. ونگ^{۱۶} و همکاران مقاومت سطوح مختلف سمبه در مقابل عیب سایش را بررسی کردند. در این تحقیق مقاومت سایشی سمبه‌ها با تغییر سختی سطوح و نیز استفاده از پوشش‌های مختلف مطالعه شد. مطالعات آزمایشی شامل سه پوشش با دو سختی مختلف برای سمبه در مقابل سطوح استوانه ساخته شده از سه همبسته مختلف آلومینیوم و چدن بود. در این تحقیق ذکر شد که سطح تماس، خواص مکانیکی و شیمیایی مواد استوانه، سختی سطح سمبه و پوشش‌ها عوامل اصلی تأثیرگذار در برابر سایش می‌باشند [۱۴]. چو^{۱۷} و همکاران اثرات سختی سطح و پوشش‌ها را بر روی رفتار سایشی سطوح سمبه بررسی کردند. در این تحقیق ذکر شد که دو راه برای کاهش اصطکاک و مقدار سایش سمبه وجود دارد که یکی اصلاح سختی سطح و دیگری استفاده از پوشش برای محافظت از سطوح لغزنده است. برای بررسی اثر سختی، سطوح با سه سختی مختلف و برای بررسی اثر پوشش‌ها از دو پوشش گرافیت و کربن شبه الماس^{۱۸} استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک پوشش گرافیتی کمتر از پوشش کربن شبه‌الماس 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 [۱۵]. سینق^{۱۹} و همکاران عیب قفل‌شدگی سمبه^{۲۰} به صورت تجربی و شبیه‌سازی را بررسی کردند. لازم به ذکر است که عیب قفل‌شدگی درجه پیشرفت‌تری از عیب سایش است که تحت آن حرکت قطعات لغزنده به موجب اصطکاک شدید میان سطوح، متوقف می‌شود [۳]. نتایج این تحقیق نشان دادند که دماهای کاری گرم و کاهش چشمگیر در ضخامت فیلم روغن، پدیده قفل‌شدگی را تشدید

امروزه کارخانه‌های پیشرفته موتورسازی با ارائه آخرین دستاوردهای خود در جلب رضایت مشتریان 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 اولویت‌های کارخانه‌ها، مسئله قابلیت اطمینان^۱، دوام^۲ و طول عمر موتور است. علیرغم پیشرفت‌ها و سازوکار و قطعات جدیدتر در موتورها، 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 سمبه‌ها همواره با تنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی، نیروهای فراوان، اصطکاک، دماهای گرم و مواد خورنده مواجه‌اند. این موارد موجب می‌شوند تا سمبه‌ها که از اجزا کلیدی در موتورها هستند، بسیار مستعد به خرابی شوند.

عیب سایش^۳ جزء عیوب مخرب در انواع سمبه هاست. این عیب به آسیب شدیدی گفته می‌شود که میان سطوح لغزنده جوش‌های محلی^۴ رخ دهد [۲]. عیب سایش سمبه^۵ به دلیل اهمیت به سزای خود در موتورها، همواره مورد توجه طراحان سمبه قرار گرفته و کارخانجات موتورسازی هرگونه اقدامی برای جلوگیری از وقوع آن انجام می‌دهند [۳].

عوامل بسیاری در تشکیل این در یک موتور دخالت دارند. این عوامل عبارتند از دما، تنش، لایه روانکار، اصطکاک، لقی میان سطوح^۶، استوانه‌ای بودن استوانه^۷، تغییر شکل حرارتی^۸، بار، سرعت لغزش، حرکت ثانویه سمبه^۹، نیروهای جانبی، محیط کاری، شکل سطوح، خواص فیزیکی مواد نظیر سختی^{۱۰}، زبری^{۱۱} و ناهمواری‌ها، استحکام، حد خستگی، حد سیلان و غیره، و در نهایت خواص شیمیایی مواد نظیر پیوندها، نقطه ذوب، نیروهای هم‌چسبی^{۱۲}، نیروهای دگرچسبی^{۱۳}، تمایل به دگرچسبی، واکنش پذیری و غیره [۳-۱۳].

در حال حاضر تحقیقات پیرامون عیب سایش سمبه بیشتر به سمت شناخت این پدیده و ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از آن سوق دارد. اما در زمینه تشخیص این عیب در موتورهای درونسوز، تحقیقات

- 1 Reliability
- 2 Durability
- 3 Scuffing fault
- 4 Local welds
- 5 Piston scuffing fault
- 6 Clearance
- 7 Cylindricity
- 8 Thermal expansion
- 9 Secondary motion
- 10 Stiffness
- 11 Roughness
- 12 Cohesive forces
- 13 Adhesive forces

14 Ye

15 Morphology

16 Wang

17 Cho

18 Diamond-like carbon (DLC)

19 Singh

20 Piston seizing

واژه‌های زبانی تبدیل می‌شوند. برای ایجاد پایگاه قواعد فازی، بر پایه دانش شخص خبره و نیز آزمایش‌ها، یکسری قوانین فازی متشکل از گزاره‌های اگر-آنگاه تعریف می‌شود. در قوانین فازی، پس از کلمات اگر و آنگاه، به ترتیب شرائط و نتیجه ذکر می‌شوند. این شرائط و نتیجه، واژه‌های زبانی‌اند که بیانگر متغیرهای ورودی و خروجی هستند. بخش استنتاج فازی واحدی است که استدلال فازی را بر روی قوانین فازی انجام داده و یک نتیجه را ایجاد می‌کند. این نتیجه که یک مقدار فازی است، در واحد غیر فازی‌سازی به یک مقدار عددی تبدیل می‌شود [۱۹]. برای اطلاعات بیشتر، به [۲۰] رجوع شود. در این تحقیق، از نرم افزار MATLAB 7.6.0 برای تحلیل داده‌ها و نیز تشکیل سامانه منطق فازی استفاده شد.

۳ روشی آزمون

برای پیشبرد آزمایش‌ها، از یک موتور نو که مشخصات فنی آن در جدول ۱ ذکر شده است، استفاده شد. در این تحقیق از آزمون ویژه‌ای که توسط شرکت FEV پیشنهاد شده است [۲۱]، استفاده شد تا موتور به طور طبیعی دچار عیب سایش سمبه شود. به دلیل اینکه عیب سایش سمبه در شرائط سخت کاری موتور اتفاق می‌افتد، رویه این آزمون به نحوی طراحی شد تا موتور در چنین شرائطی قرار گیرد.

این رویه شامل سه مرحله به شرح زیر بود:

- ۱) موتور طی حدوداً ۳۰ ثانیه از حالت خاموش به دور بیشینه توان خود تحت بیشینه بارگذاری رسید.
 - ۲) موتور به مدت تقریباً ۱۲۰ دقیقه در وضعیت مذکور یعنی سرعت بیشینه توان و بیشینه بارگذاری باقی ماند.
 - ۳) موتور طی مدت ۴۰ ثانیه خاموش شد.
- در مدت زمان آزمون، متغیرهای موتور شامل سرعت دورانی، گشتاور، قدرت و نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ به طور همزمان اندازه‌گیری شدند.

اما نویسندگان اذعان کردند که هنوز خلایق در مدلسازی فیزیکی این عیب وجود داشته و تئوری‌های بیشتری برای درک بهتر این مکانیزم پیچیده لازم است [۱۶]. جعفری^۱ و همکاران به بررسی توانایی روش انتشار صوت برای تشخیص عیب سایش سمبه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ریشه مجموع مربعات و انرژی مطلق سیگنال‌های انتشار صوت می‌تواند دو شاخص مناسب برای تشخیص عیب سایش سمبه باشد [۱۷]. موسویان^۲ و همکاران دقت و توانایی متغیر نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ را در تشخیص عیب سایش سمبه بررسی کردند. در این تحقیق، متغیر نرخ گازهای ناشی به‌عنوان یک شاخص برای تشخیص زمان وقوع عیب سایش سمبه استفاده شد. نتایج نشان داد که برای تشخیص به‌موقع و دقیق این عیب، استفاده از این متغیر به تنهایی کافی نیست [۱۸].

همانطور که در پژوهش‌های پیشین دیده شد، تاکنون روشی هوشمند برای تشخیص این عیب در موتورهای درونسوز ارائه نشده است. لذا این مقاله، در پژوهشی نو، به ارائه چنین روشی می‌پردازد. با توجه به نتایج تحقیق موسویان و همکاران [۱۸]، در مقاله حاضر علاوه بر متغیر نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ، از سه متغیر دیگر موتور به نام‌های سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور برای تشخیص عیب سایش سمبه استفاده شده است. به‌علاوه به‌منظور هوشمندسازی تشخیص این عیب و کاهش خطاهای انسانی، از روش منطق فازی استفاده شده است که جنبه دیگری از نوآوری این تحقیق است. در ادامه مقاله، در بخش ۲، ابتدا توضیح مختصری برای منطق فازی ارائه خواهد شد. سپس در بخش ۳، روش آزمون انجام شده در این تحقیق تشریح می‌شود. پس از آن، در بخش ۴، نتایج و بحث ذکر خواهد شد که خود به دو قسمت نتایج مربوط به آزمون تجربی و نتایج بدست آمده از سامانه منطق فازی تقسیم می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری از این تحقیق، در بخش ۵ بیان می‌شود.

۲ منطق فازی

سامانه منطق فازی از طریق تبدیل دانش افراد خبره به واژه‌های زبانی، از این اطلاعات برای حل مسائل مختلف مانند تصمیم‌گیری و پایش استفاده می‌کند. منطق فازی یک سامانه پایه قانون^۳ است که نظریه مجموعه فازی را با قابلیت استنتاج انسانی ترکیب می‌کند. منطق فازی از چهار بخش فازی‌سازها^۴، پایگاه قواعد فازی^۵، استنتاج فازی^۶ و غیر فازی‌سازی^۷ تشکیل می‌شود. در واحد فازی‌سازها، ورودی‌ها که شامل مقادیر عددی‌اند، با استفاده از توابع تعلق به

جدول ۱: مشخصات فنی موتور تحت آزمون

۴	تعداد استوانه
۱۶	تعداد دریچه
۷۸	قطر استوانه (میلیمتر)
۸۵	طول جابجایی (میلیمتر)
۱,۶۵۰	حجم جابجایی (لیتر)
۶۰۰۰ / ۸۳	قدرت بیشینه (کیلووات) / سرعت دورانی (د.د.)
۳۵۰۰-۴۵۰۰ / ۱۴۶	گشتاور بیشینه (نیوتن متر) / سرعت دورانی (د.د.)
۱۱,۵	نسبت تراکم

¹ Jafari

² Moosavian

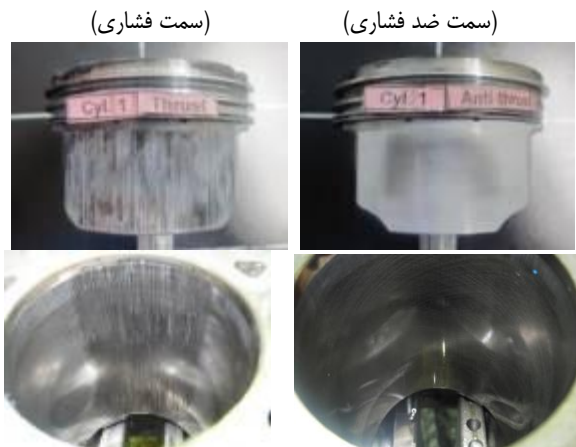
³ Rule-based

⁴ Fuzzifiers

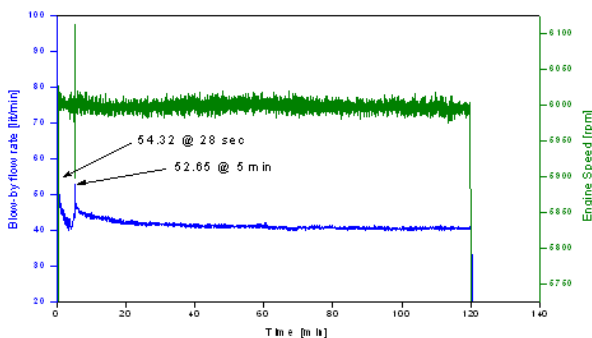
⁵ Fuzzy rule base

⁶ Fuzzy inference

⁷ Defuzzification



شکل ۱: استوانه و سمبه شماره ۱ موتور در اثر عیب سایش سمبه



شکل ۲: نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و سرعت دورانی موتور در طی آزمون

پیشتر گفته شد که در این مرحله، موتور به طور ناگهانی از دور ۰ تا ۶۰۰۰ د.د.د. برده شد. بنابراین افزایش اولیه ناشی از افزایش شدید و ناگهانی در سرعت دورانی موتور بود [۱۸]. اما افزایش دوم در نرخ گازهای نشتی که در دقیقه پنجم از آزمون اتفاق افتاد، نشان دهنده وقوع عیب سایش سمبه در موتور است. علت ایجاد این عیب تفاوت در انبساط حجمی استوانه و سمبه بود زیرا به دلیل افزایش شدید سرعت در ابتدای آزمون، دمای سمبه‌ها به شدت افزایش یافتند ولی هنوز استوانه‌ها به دلیل دمای سیال خنک‌کاری، آنقدر گرم نبودند. در این شرایط انبساط حجمی سمبه‌ها بیشتر از استوانه‌ها بود و به موجب آن، لقی میان استوانه و سمبه بیش از پیش کم شد و سمبه به دیواره استوانه نزدیک‌تر گشت. به دلیل وجود نیروهای بزرگ سمت فشاری استوانه در این سرعت، فشار زیادی از سوی سمبه به لایه روغن میان سمبه و استوانه وارد آمده است. این نیروهای دینامیکی شدید و نیز دماهای گرم در این ناحیه، باعث از بین رفتن لایه روغن و تماس فلز با فلز رخ شده است. در نتیجه عیب سایش سمبه رخ داده است.

با نگاه به نمودار سرعت دورانی موتور در شکل ۲ که با دقت ± 1 د.د.د. اندازه‌گیری شده است، دیده می‌شود که کاهش شدیدی (بیش از ۱۰۰ د.د.د.) در دقیقه ۵ رخ داده است که با افزایش در نرخ

تجهیزاتی که در این آزمایش استفاده شد عبارت بودند از:

- لگام ترمز
 - نرم‌افزار و سخت‌افزارهای خوانش و پایش موتور
 - دستگاه اندازه‌گیری نرخ و فشار گازهای نشتی محفظه لنگ
 - سامانه سرمایش و گرمایش
 - تجهیزات پایش دما و فشار سیال خنک‌کاری و روانکاری موتور
- پس از انجام این آزمون، موتور باز شده و استوانه و سمبه‌های آن بررسی شدند. دیده شد که در استوانه و سمبه اول، سایش سمبه اتفاق افتاد. شکل (۱) تصویر استوانه و سمبه اول این موتور را در سمت فشاری و ضد فشاری نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود عیب سایش، اثرات مخربی در سمت فشاری این استوانه و سمبه گذاشته و سطوح آن‌ها را به کلی از بین برده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که درجه خفیف‌تری از عیب سایش در سمت ضد فشاری رخ داده است. لازم به ذکر است که به دلیل وجود نیروهای جانبی و تنش‌های قویتر، اغلب سمت فشاری آسیب بیشتری می‌بیند. اما در بعضی مواقع مشاهده شده که علائم شدیدی از عیب سایش در سمت ضد فشاری نیز رخ داده است [۱۷]. این امر بیشتر به دلیل گرمای زیاد این ناحیه است، زیرا در برخی موتورها، چند راهه خروجی در سمت ضد فشاری قرار دارد.

۴ نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا اثرات عیب سایش سمبه بر روی متغیرهای اندازه‌گیری شده، بحث می‌شود. سپس به شرح سامانه منطق فازی برای تشخیص این عیب پرداخته خواهد شد.

۴-۱ نتایج آزمون تجربی

پس از بررسی داده‌ها، مشخص شد که این عیب در مرحله دوم از آزمون رخ داد. این کار با بررسی متغیر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ انجام شد زیرا یکی از معیارهای اصلی برای تشخیص عیب سایش سمبه در موتورها، افزایش شدید و ناگهانی این متغیر است [۱۸]. به منظور اندازه‌گیری متغیر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، از دستگاه اندازه‌گیری گازهای نشتی محفظه لنگ از نوع فشار تفاضلی با دقت ۱٪، محدوده کاری ۳ تا ۱۵۰ لیتر بر دقیقه و محدوده دمایی ۱۰- تا ۵۵ درجه سانتیگراد استفاده شد. شکل (۲) نمودار مربوط به متغیر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ را به همراه سرعت دورانی موتور در طی آزمون نشان می‌دهد. همانطور که ذکر شد، سرعت دورانی موتور بلافاصله بعد از روشن شدن، به دور حداکثر توان موتور یعنی ۶۰۰۰ د.د.د. برده شد. در این شکل دیده می‌شود که متغیر نرخ گازهای نشتی دو بار 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.

با توجه به این شکل دیده می‌شود که در زمان وقوع عیب سایش سمبه، قدرت موتور دچار کاهش شدیدی شد و به مقدار ۵۶,۰۳ کیلووات رسید. این موتور، مقدار قدرت ۵۶,۰۳ کیلووات را در سرعت دورانی تقریباً ۵۱۷۰ د.د.د. تولید کرد. پس می‌توان گفت که تأثیر عیب سایش بر روی قدرت این موتور، معادل کاهش ۸۳۰ د.د.د. در سرعت موتور بود. دیده می‌شود که این عیب برای موتور بسیار تأثیرگذار و مخرب می‌باشد به طوی که موتور آسیب دیده باید تحت تعمیرات اساسی قرار گیرد.

۴-۲) طراحی سامانه منطق فازی

برای ایجاد سامانه منطق فازی، چهار متغیر نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور به عنوان ورودی به این سامانه انتخاب شدند زیرا همانطور که در بخش (۴-۱) نشان داده شد، عیب سایش سمبه تأثیر چشمگیری را بر روی این متغیرها داشت. خروجی سامانه هوشمند فازی نیز وضعیت موتور در نظر گرفته شد که به سه دسته سالم، هشدار و وقوع عیب سایش سمبه تقسیم‌بندی شد. در این تحقیق، از روش استدلال مدانی^۱ در مرحله استنتاج فازی استفاده شد.

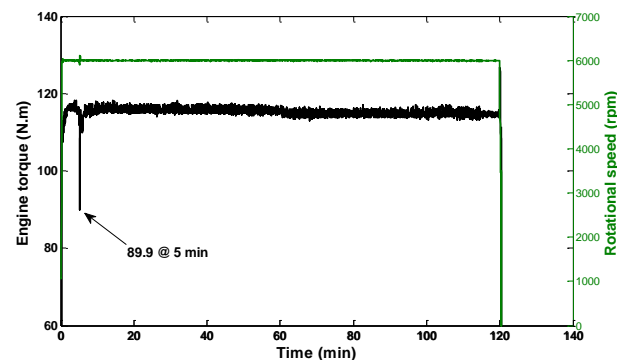
به منظور پوشش دادن شرایط کاری مختلف موتور، برای هر کدام از ورودی‌ها سه محدوده کاهش شدید، تغییر طبیعی و افزایش شدید در نظر گرفته شد. مقادیر عددی این محدوده‌ها طبق نظر افراد با تجربه و خیره و نیز توسط داده‌های واقعی از آزمون موتور مرجع انتخاب شد. در این آزمون، یک موتور سالم و مشابه در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د. تحت آزمایش قرار گرفت تا محدوده مجاز تغییرات متغیرهای موتوری بدست آید. براساس اطلاعات بدست آمده، این محدوده‌ها بر حسب درصد، برای هر یک از ورودی‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این جدول، هرگاه تغییرات نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ موتور بین ۱۰٪+ تا ۱۰٪- بود نتیجه می‌گیریم این تغییرات طبیعی است. اما اگر تغییرات بالاتر از ۱۰٪+ بود (نامگذاری شده با واژه افزایش شدید)، این وضعیت موتور طبیعی ناست. در این حالت یکی از دلایل اصلی می‌تواند عیب سایش سمبه باشد که باید توسط سه متغیر دیگر نیز تأیید شود.

پس از مشخص نمودن محدوده‌ها، توابع تعلق برای هر یک از ورودی‌ها ایجاد شد. شکل این توابع برای تمامی ورودی‌ها، در ابتدا و انتها به صورت دوزنقه‌ای و در وسط به شکل مثلثی انتخاب شد. همچنین توابع تعلق برای خروجی، مثلثی شکل در نظر گرفته شد. شکل (۵) توابع تعلق برای ورودی‌ها را نشان می‌دهد. توابع تعلق برای خروجی نیز در شکل (۶) نشان داده شده است.

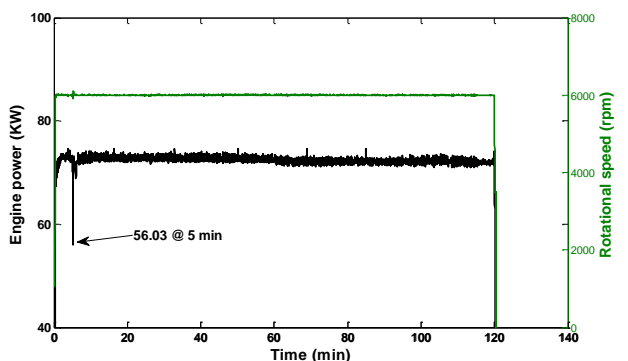
گازهای نشتی محفظه لنگ مقارن است. پیشتر ذکر شد که در این لحظه از آزمون، عیب سایش سمبه رخ داد. پس دیده می‌شود که عیب سایش سمبه منجر به افت شدید در سرعت دورانی موتور شده است. این امر بدین دلیل است که با انتقال مواد استوانه و سمبه به یکدیگر و دگرچسبی میان این سطوح بوجود آمده است. در نتیجه جوش‌های محلی میان لایه‌های دو سطح ایجاد شده است. در این شرایط اصطکاک و چسبندگی میان دو سطح به قدری زیاد است که باعث کاهش شدید در سرعت دورانی موتور شده است.

نمودار گشتاور موتور به همراه سرعت دورانی در شکل (۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این متغیر با دقت $\pm 0.5\%$ اندازه‌گیری شد. در این شکل دیده می‌شود که در دقیقه پنجم، تغییر چشمگیری در گشتاور موتور رخ داده است. این لحظه مقارن است با زمانی است که عیب سایش سمبه اتفاق افتاد. ملاحظه می‌شود که در اثر این رخداد، گشتاور موتور به طور قابل توجهی افت کرد و به مقدار ۸۹,۹ نیوتن‌متر رسید. دلیل این کاهش شدید، افزایش ناگهانی اصطکاک میان استوانه و سمبه است.

شکل (۴) نمودار قدرت موتور بر حسب زمان را در این آزمون نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار گشتاور موتور در طی آزمون

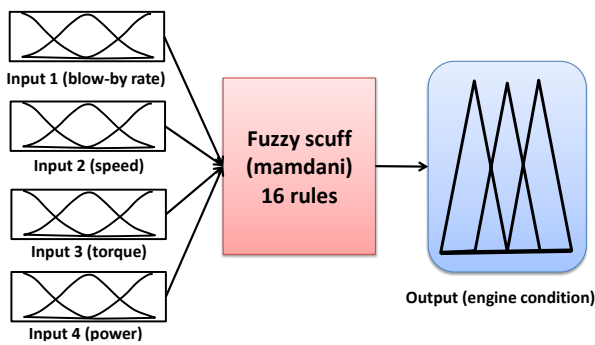


شکل ۴: نمودار قدرت موتور در طی آزمون

در مرحله استنتاج، یکسری قوانین فازی به صورت اگر-آنگاه ایجاد شد. تعداد ۱۶ قانون براساس آزمون‌های تجربی و تجربه شخص خبره تنظیم شدند. به عنوان مثال ۵ قانون در زیر آورده شده است:

- 1) If (Blow_by is normal_change) and (Engine_speed is normal_change) and (Engine_torque is normal_change) and (Engine_power is normal_change) then (Engine_condition is healthy)
- 2) If (Blow_by is normal_change) and (Engine_speed is not normal_change) and (Engine_torque is normal_change) and (Engine_power is normal_change) then (Engine_condition is warning)
- 3) If (Blow_by is high_increase) and (Engine_speed is high_increase) and (Engine_torque is high_increase) and (Engine_power is high_increase) then (Engine_condition is healthy)
- 4) If (Blow_by is high_increase) and (Engine_speed is high_reduction) and (Engine_torque is high_reduction) and (Engine_power is high_reduction) then (Engine_condition is piston_scuffing_occurence)
- 5) If (Blow_by is high_increase) and (Engine_speed is high_reduction) and (Engine_torque is normal_change) and (Engine_power is normal_change) then (Engine_condition is piston_scuffing_occurence)

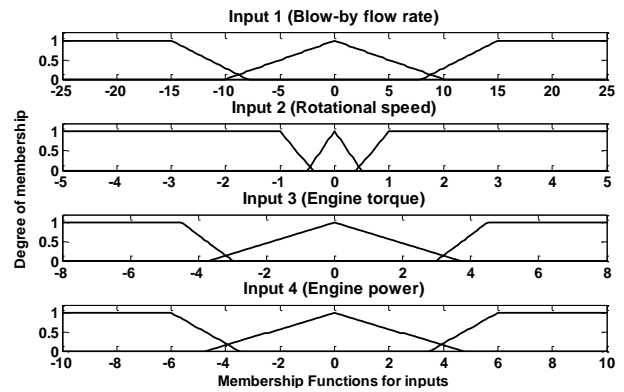
در این مرحله، ساختار سامانه منطق فازی ایجاد شد. شکل (۷) این ساختار را نشان می‌دهد.



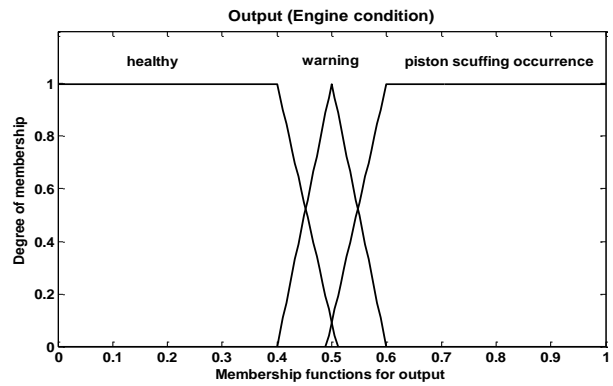
شکل ۷: سامانه منطق فازی ایجاد شده

جدول ۲: محدوده‌های کاهش شدید، تغییر طبیعی و افزایش شدید برای ورودی‌ها بر حسب درصد

محدوده‌ها		ورودی‌ها	
کاهش شدید	تغییر طبیعی	افزایش شدید	ورودی‌ها
تا -۱۰٪	±۱۰٪	تا +۱۰٪	ورودی ۱ (نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ)
تا -۰/۵٪	±۰/۵٪	تا +۰/۵٪	ورودی ۲ (سرعت دورانی)
تا -۳/۷٪	±۳/۷٪	تا +۳/۷٪	ورودی ۳ (گشتاور موتور)
تا -۴/۷٪	±۴/۷٪	تا +۴/۷٪	ورودی ۴ (قدرت موتور)



شکل ۵: توابع تعلق ورودی‌ها

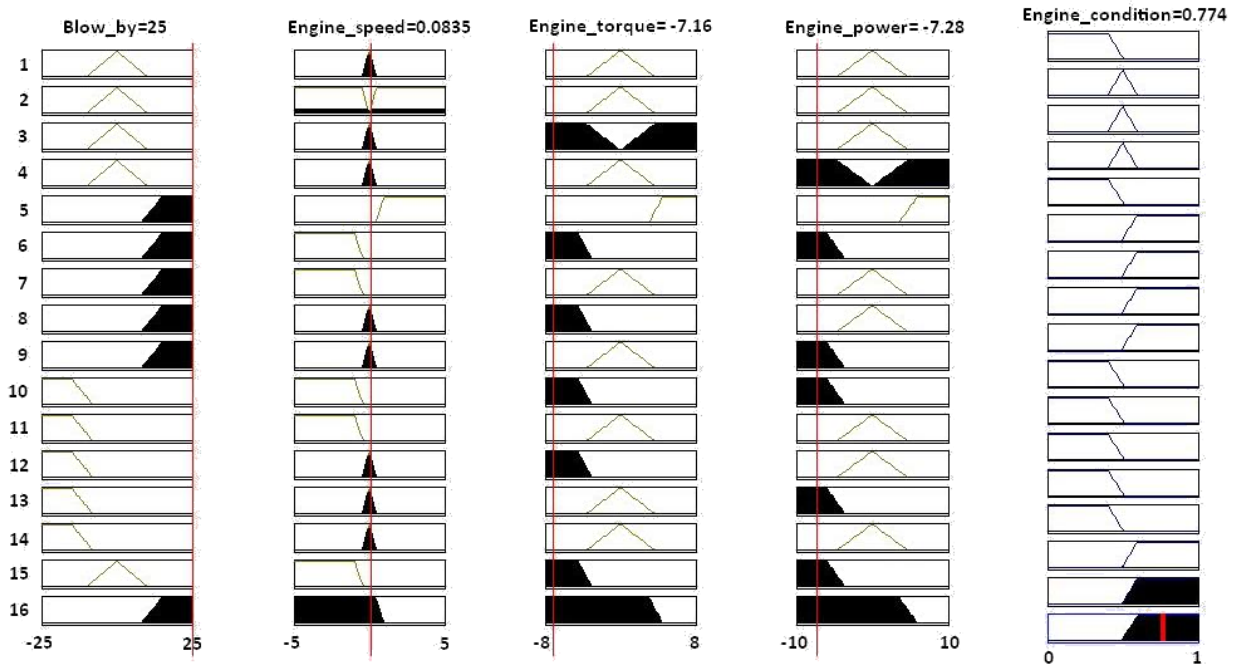


شکل ۶: توابع تعلق خروجی

شکل (۹) خروجی سامانه منطق فازی را براساس دو ورودی نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و سرعت دورانی نشان می‌دهد. مقادیر برای دو ورودی دیگر ثابت و برابر صفر درصد در نظر گرفته شده است. در این شکل به طور مثال اگر مقدار ورودی اول و دوم به ترتیب ۲۰٪ و ۳٪ باشد، سامانه منطق فازی مقدار ۰.۸ را در خروجی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵)، این مقدار بیانگر وقوع عیب سایش سمبه است.

خروجی سامانه منطق فازی براساس دو ورودی نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و گشتاور موتور در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر برای دو ورودی دیگر ثابت و برابر صفر درصد در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱) خروجی سامانه منطق فازی را بر پایه دو ورودی نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و قدرت موتور نشان می‌دهد. مقادیر برای دو ورودی دیگر ثابت و برابر صفر درصد در نظر گرفته شده است.

پس از تشکیل ساختار سامانه هوشمند فازی، باید توانایی و دقت آن در تشخیص عیب سایش سمبه مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این کار، باید مقادیر واقعی از ورودی‌ها به سامانه هوشمند داده شود تا این سامانه مقدار خروجی را بدست آورد. لازم به ذکر است که مقدار خروجی یک عدد حقیقی است که در نهایت می‌تواند به یک واژه زبانی تبدیل شود. در این تحقیق، واژه‌های زبانی همان وضعیت موتور می‌باشد که عبارت است از سالم، هشدار و وقوع عیب سایش سمبه. برای ارزیابی این سامانه، به طور مثال مقادیر حقیقی ۲۵٪، ۰.۸۳۵٪، ۷.۱۶۲٪ و ۷.۲۷۵٪ برای نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، سرعت دورانی، گشتاور و قدرت موتور، به عنوان ورودی به سامانه داده شدند. گفتمنی است که این مقادیر از آزمون واقعی موتور بدست آمده‌اند. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، مقدار ۰.۷۷۴ برای خروجی بدست آمده که با توجه به محدوده تعریف شده در قسمت توابع تعلق برای خروجی در شکل (۶)، بیانگر وقوع عیب سایش سمبه در موتور است. بنابراین سامانه هوشمند فازی ارائه شده، توانست توسط متغیر عملکردی موتور، رخداد عیب سایش سمبه را تشخیص دهد.



شکل ۸: مرورگر قوانین سامانه هوشمند منطق فازی

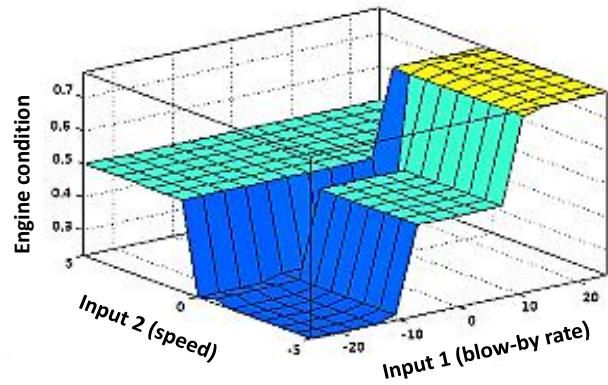
می‌گذارد. لذا استفاده از این متغیرها در تشخیص این عیب بسیار مناسب است. سامانه منطق فازی با چهار ورودی، یک خروجی و ۱۶ قانون فازی طراحی شد. نتایج نشان دادند که این سامانه قادر است عیب سایش سمبه را با اطمینان در یک موتور درونسوز تشخیص دهد. پس می‌توان به منظور حذف عوامل انسانی و جلوگیری از خطاهای انسانی در تشخیص عیب سایش سمبه، این سامانه هوشمند را در آزمایشگاه‌های موتور بکار برد. همچنین می‌توان با توسعه و تجاری‌سازی این سامانه، خودروها را به یک سامانه هوشمند تشخیص عیب سایش سمبه مجهز کرد. در نهایت، نتایج و دستاوردهای این تحقیق می‌تواند برای پژوهش‌های آینده در زمینه عیب‌یابی هوشمند موتورهای درونسوز نیز مفید باشد.

تشکر و قدردانی

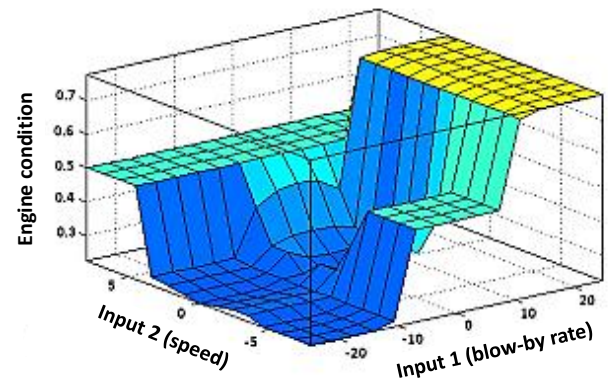
نویسندگان از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) به پاس حمایت‌های همه‌جانبه خود از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

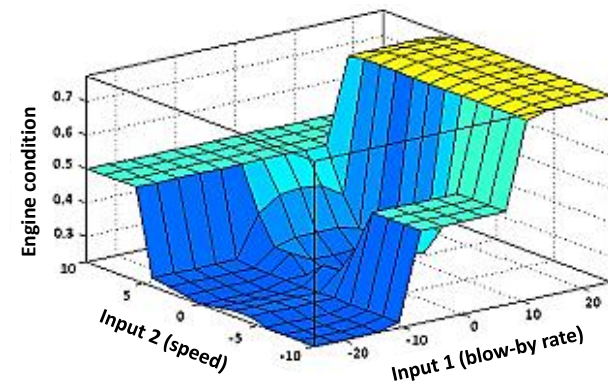
- [1] Piston damages - Recognizing and rectifying, MSI Motor Service International, 2004
- [2] Conference on Lubrication and Wear, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, 1957
- [3] A. Dyson, Scuffing - A review, Tribology International, Vol. 8, pp. 77-87, 1975
- [4] Z. Ye, C. Zhang, Y. Wang, H.S. Cheng, S. Tung, Q.J Wang, X. He, An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses, Wear, Vol. 257, pp. 8-31, 2004
- [5] A. Dyson, The failure of elastohydrodynamic lubrication of circumferentially ground discs, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 190, pp. 699-711, 1976
- [6] P. Rohatgi, B. Pai, Effect of microstructure and mechanical properties on the seizure resistance of cast aluminium alloys, Wear, Vol. 28, pp. 353-367, 1974
- [7] H. Block, Theoretical study of temperature rise at surface of actually contact under oiliness lubricating conditions, in Proceedings of the General Discussion on Lubrication and Lubricants, London, pp. 222-235, 1937
- [8] S. Lee, H. Cheng, Scuffing theory modeling and experimental correlations, Journal of Tribology, Vol. 113, pp. 327-334, 1991
- [9] M. Shen, H.S. Cheng, P.C. Stair, Scuffing failure in heavily loaded slow speed conformal sliding contacts, Journal of Tribology, Vol. 113, pp. 182-191, 1991



شکل ۹: تشخیص وضعیت موتور بر اساس ورودی‌های نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و سرعت دورانی



شکل ۱۰: تشخیص وضعیت موتور بر اساس ورودی‌های نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و گشتاور موتور



شکل ۱۱: تشخیص وضعیت موتور بر اساس ورودی‌های نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ و قدرت موتور

۵ نتیجه گیری

در این تحقیق با هدف تشخیص عیب سایش سمبه، آزمونی ویژه بر روی یک موتور درونسوز انجام شد. متغیرهای عملکردی موتور نظیر سرعت دورانی، گشتاور، قدرت موتور و نرخ گازهای نشتی محفظه لنگ، طی آزمون اندازه‌گیری شده و به عنوان ورودی به سامانه منطق فازی برای تشخیص عیب داده شدند. نتایج آزمون نشان داد که عیب سایش سمبه تأثیرات قابل توجهی را بر روی متغیرهای مذکور

- [17] S.M. Jafari, H. Mehdigholi, M. Behzad, Piston scuffing detection by acoustic emission method, *The Journal of Engine Research*, Vol. 24, pp. 21-28, 2011
- [18] A. Moosavian, G.H. Najafi, B. Ghobadian, S.M. Jafari, M. Mehrabivaghar, M. Khazaei, Accuracy study of blow-by flow rate parameter in piston scuffing detection, presented at the 8th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Iran, 2014
- [19] M. Celik, R. Bayir, Fault detection in internal combustion engines using fuzzy logic, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 221, pp. 579-587, 2007
- [20] G.J. Klir, B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic*, Vol. 4: Prentice Hall New Jersey, 1995
- [21] FEV Test Procedure, Hot Piston Scuff Test, FEV company, 2004
- [10] M. Cocks, Interaction of sliding metal surfaces, *Journal of Applied Physics*, Vol. 33, pp. 2152-2161, 1962
- [11] A.S. Reddy, B.N. Bai, K.S.S. Murthy, S.K. Biswas, Wear and seizure of binary Al-Si alloys, *Wear*, Vol. 171, pp. 115-127, 1994
- [12] A.S. Reddy, B.N. Bai, K.S.S. Murthy, S.K. Biswas, Mechanism of seizure of aluminium-silicon alloys dry sliding against steel, *Wear*, Vol. 181, pp. 658-667, 1995
- [13] X. He, Experimental and analytical investigation of the seizure process in Al-Si alloy/steel tribocontacts, Northwestern University, 1998
- [14] Y. Wang, C. Yao, G.C. Barber, B. Zhou, Q. Zou, Scuffing resistance of coated piston skirts run against cylinder bores, *Wear*, Vol. 259, pp. 1041-1047, 2005
- [15] D.H. Cho, S.A. Lee, Y.Z. Lee, The effects of surface roughness and coatings on the tribological behavior of the surfaces of a piston skirt, *Tribology Transactions*, Vol. 53, pp. 137-144, 2009.
- [16] O. Singh, Y. Umbarkar, T. Sreenivasulu, E. Vetrivendan, M. Kannan, Y.R. Babu, Piston seizure investigation: Experiments, modeling and future challenges, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 28, pp. 302-31, 2013



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Piston scuffing fault detection in an internal combustion engine using performance parameters and Fuzzy logic

S.A. Moosavian¹, G.H. Najafi^{2*}, B. Ghobadian³, S.M. Mirsalim⁴, S.M. Jafari⁵, M. Mehrabivaghar⁶

¹Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, a.moosavian@modares.ac.ir

²Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, g.najafi@modares.ac.ir

³Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ghobadib@modares.ac.ir

⁴Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

⁵Sharif University of Technology, and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, sm_jafari@ip-co.com

⁶Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, m_mehrabi@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-48292322

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 May 2014

Accepted: 26 June 2014

Keywords:

Piston scuffing fault

Internal combustion engine

Engine performance parameters

Fuzzy logic

ABSTRACT

Piston scuffing is one of destructive faults in internal combustion (IC) engines. There are different causes to make this fault that the lack of the lubricant is the most important one among them. Due to its destruction power, its detection has always been noticed by engine producers. In this paper, with the purpose of this fault detection, a method based on Fuzzy logic and the use of engine performance parameters has been proposed. For this reason, 4 parameters including the rotational speed, the torque, the engine power and the blow-by flow rate were measured. Afterward, the Fuzzy logic system was developed for the piston scuffing fault detection. Experimental results showed that the piston scuffing fault caused the rotational speed, the torque and the engine power reduced more than 100 rpm, 25 Nm and 16 kW, respectively. In addition, a great and instant increase occurred in the blow-by flow rate. Results also demonstrated that the use of the changing pattern in engine performance parameters and applying them in the Fuzzy logic system made an appropriate procedure for the piston scuffing fault detection.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.