



شناسایی عیب سایش سمبه از طریق تحلیل ارتعاشات موتور

سید اشکان موسویان^۱، غلامحسین نجفی^{۲*}، برات قبادیان^۳، سید مصطفی آقا میرسلیم^۴

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

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

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

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

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۴۸۲۹۲۳۲۲

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲ بهمن ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۳ بهمن ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

موتور درونسوز

عیب سایش سمبه

ارتعاشات موتور

تحلیل حوزه زمان

تحلیل حوزه بسامد

تحلیل حوزه زمان-بسامد

چکیده

در یک موتور درونسوز، سمبه‌ها همواره در معرض عیب سایش هستند. این عیب می‌تواند به استوانه و سمبه موتور آسیب جدی وارد کرده به طوری که عملکرد موتور را بشدت کاهش دهد. هدف از این مقاله بررسی اثرات عیب سایش سمبه بر روی ارتعاشات موتور به منظور استفاده از ارتعاشات برای شناسایی این عیب است. بدین منظور داده‌های ارتعاش افقی و عمودی موتور در حالات سالم و استوانه و سمبه ساییده اخذ شدند. در این پژوهش از تحلیل‌های حوزه زمان، حوزه بسامد و حوزه زمان-بسامد برای ارتعاشات موتور استفاده شد. در تحلیل حوزه زمان، دو متغیر ریشه میانگین مربعات و شاخص ضربه از داده‌های ارتعاش استخراج شدند. برای تحلیل‌های بسامد و زمان-بسامد، به ترتیب روش‌های تبدیل سریع فوری و تبدیل فوری زمان-کوتاه به کار گرفته شد. همچنین در تحلیل حوزه زمان-بسامد، از دو ویژگی میانگین و انرژی ارتعاش استفاده شد. نتایج نشان داد که عیب سایش سمبه ارتعاشات چشمگیری را در جهات افقی و عمودی موتور ایجاد می‌کند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، عیب سایش سمبه ارتعاشات قابل توجهی را در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز در جهت افقی ایجاد کرد، در حالیکه برای ارتعاشات عمودی موتور، محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز تحت تأثیر قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که با ارتعاشات موتور می‌توان عیب سایش سمبه را شناسایی کرد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

یکی از عیوب مخرب در انواع سمبه‌ها، عیب سایش^۱ است. در اثر این عیب، میان سطوح لغزنده جوش‌های محلی^۲ رخ می‌دهد. عیب سایش سمبه به دلیل اهمیت به سزای خود در موتورها، همواره مورد توجه طراحان سمبه قرار گرفته است و کارخانجات موتورسازی هرگونه اقدامی برای جلوگیری از وقوع آن انجام می‌دهند [۱، ۲].

عوامل بسیاری در ایجاد عیب سایش سمبه دخالت دارند. برخی از این عوامل عبارتند از دما، تنش وارده به سمبه، لایه روانکار، لقی میان سطوح، مقدار استوانه‌ای بودن استوانه، تغییر شکل حرارتی، حرکت ثانویه سمبه، نیروهای جانبی، شکل سطوح و خواص فیزیکی مواد [۳].

در حال حاضر مقالات زیادی بر روی ارائه راهکارهایی به منظور جلوگیری از وقوع عیب سایش سمبه در موتورهای درونسوز انجام شده است. به طور مثال یی^۳ و همکاران [۱] به بررسی تجربی عیب سایش سمبه و تحلیل سازوکار آن پرداختند. همچنین آن‌ها تأثیر سمبه با همبسته آلومینیوم نوع A390 بدون پوشش و با پوشش‌های مختلف را بر روی سازوکار عیب سایش بررسی کردند. چو^۴ و همکاران [۴] اثرات سختی سطح و پوشش‌ها را بر روی رفتار سایشی سطوح سمبه بررسی کردند. آن‌ها ذکر کردند که اصلاح سختی سطح و استفاده از پوشش برای محافظت از سطوح لغزنده، دو راه برای کاهش اصطکاک و مقدار سایش سمبه است. سینق^۵ و همکاران [۵] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عیب قفل شدگی سمبه^۶ پرداختند.

در این میان، یکی از معضلات اصلی غیر از مسئله چگونگی جلوگیری از وقوع عیب سایش سمبه، شناسایی و تشخیص آن است. روشی که هم اکنون در آزمایشگاه‌های موتور رایج است، استفاده از نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ است. این روش در عین حال که معیار خوبی برای عیب سایش سمبه است، ولی دارای محدودیت‌هایی است. موسویان و همکاران [۶] دقت متغیر نرخ گازهای ناشی را در تشخیص عیب سایش سمبه بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که این روش سریع، دقیق و همواره قابل اطمینان نیست. در این راستا، تاکنون پیرامون شناسایی و تشخیص عیب سایش سمبه در موتورهای درونسوز، تحقیق‌های اندکی انجام شده است. جعفری و همکاران [۷] روشی برای تشخیص عیب سایش سمبه توسط انتشار صوت ارائه کردند. آن‌ها ذکر کردند که این روش می‌تواند عیب سایش سمبه را تشخیص دهد. موسویان و همکاران [۳] طی پژوهشی به تشخیص عیب سایش سمبه با استفاده از متغیرهای عملکردی و روش منطق حالتی

پرداختند. آن‌ها از متغیرهای نرخ گازهای ناشی، سرعت، گشتاور و قدرت موتور به طور همزمان برای تشخیص عیب سایش سمبه استفاده کردند.

یکی از روش‌های کاربردی و قابل اطمینان برای تشخیص عیب سایش سمبه استفاده از تحلیل ارتعاشات موتور است که تاکنون در هیچ پژوهشی انجام نشده است. در تحلیل ارتعاش، دامنه ارتعاشات موتور معیاری از سلامت آن است. اگر عیبی در موتور رخ دهد، رفتار ارتعاشی آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به علاوه هر عیب در موتور علائم ارتعاشی مخصوص به خود را ایجاد می‌کند که با شناسایی آن‌ها می‌توان آن عیب را تشخیص داد. به این ترتیب می‌توان با تحلیل ارتعاشات موتور به عیب آن پی برد [۸].

این مقاله سعی دارد تا در پژوهشی نو با استفاده از تحلیل ارتعاشات موتور، مشخصه‌های ارتعاشی عیب سایش سمبه را به دست آورد. در این صورت می‌توان از روش ارائه شده برای تشخیص عیب سایش سمبه در موتورها استفاده کرد همانطور که هم اکنون از حسگر کوبش^۷ که یک حسگر ارتعاش سنج است، برای تشخیص عیب کوبش در موتورها استفاده می‌شود.

فرضیه ای که در پژوهش حاضر مطرح است چنین است که چون عیب سایش سمبه در ابتدا با برخورد سمبه به استوانه شروع می‌شود، پس ارتعاشات می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. همچنین وقتی استوانه و سمبه ساییده می‌شوند، چون عملکرد لایه روغن در ناحیه استوانه و سمبه ضعیف شده و حرکت سمبه درون استوانه از حالت طبیعی خارج می‌شود، ارتعاش نیز می‌تواند تغییر می‌کند. بنابراین تشخیص عیب سایش سمبه توسط ارتعاشات امکان‌پذیر^۸ است.

در ادامه مقاله، مواد و روش‌ها شامل روش آزمون و روش‌های تحلیل در بخش ۲ ذکر می‌شوند. در بخش ۳ نتایج به دست آمده از ارتعاشات افقی و عمودی به طور جداگانه ارائه و بررسی می‌شوند. در انتها، نتیجه‌گیری از این پژوهش در بخش ۴ آورده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش آزمون

در این تحقیق از یک موتور اشتعال-جرقه‌ای، چهار استوانه خطی و چهار زمانه استفاده شد. جدول ۱ مشخصات فنی موتور تحت آزمون را نشان می‌دهد.

برای جمع آوری داده‌های ارتعاش موتور، از دو حسگر شتاب سنج برای اندازه‌گیری ارتعاشات عمودی و افقی موتور استفاده شد. محل نصب این حسگرها بر روی بدنه موتور و روبروی دیواره استوانه شماره ۳ (استوانه هدف) در سمت فشاری بود زیرا اغلب سمت فشاری به عیب سایش سمبه مستعد تر است. دلیل انتخاب استوانه شماره ۳ به

¹ Scuffing

² Local welds

³ Ye

⁴ Cho

⁵ Singh

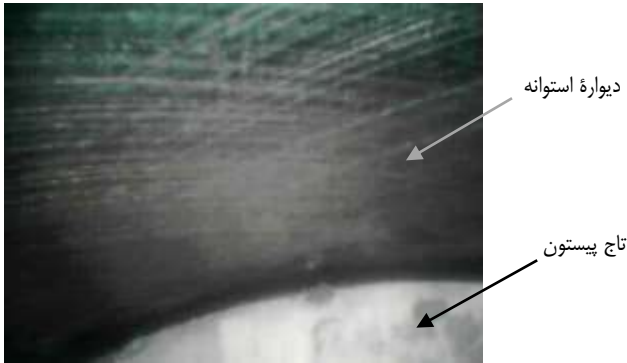
⁶ Piston seizing

⁷ Knock sensor

⁸ Feasible

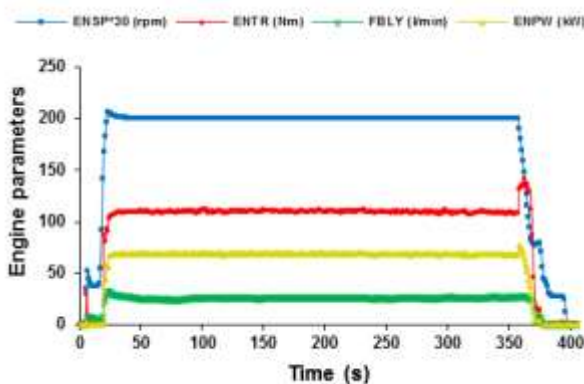
۲-۱-۱- حالت اول آزمون

در ابتدا این رویه بر روی موتور در وضعیت سالم اجرا شد. بدین صورت که پیش از آزمون، از سلامت قطعات مختلف موتور بویژه استوانه و سمبه‌های آن اطمینان حاصل شد. برای تأیید سلامت استوانه و سمبه‌ها، از آندوسکوپ استفاده شد. شکل ۲ به طور نمونه تصویر استوانه شماره ۳ را در وضعیت سالم نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویر آندوسکوپ استوانه شماره ۳ در حالت سالم

موتور سالم پس از تجهیز شدن به ابزارها و تجهیزات کنترل موتور، تحت آزمون قرار گرفت. پس از اتمام آزمون، نمونه روغن از موتور گرفته شد و وضعیت استوانه‌ها به خصوص استوانه هدف (استوانه شماره ۳) توسط آندوسکوپ دوباره بررسی شد. دیده شد که پس از آزمون، استوانه و سمبه، مانند قبل در وضعیت سلامت هستند. بنابراین داده‌هایی که در حالت اول آزمون برداشته شد، وابسته به حالت سالم موتوراند و می‌توانند به عنوان مرجعی برای بررسی‌های بعدی استفاده شوند. شکل ۳ نمودار متغیرهای عملکردی موتور را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که متغیر نرخ گازهای ناشی محفظه لنگ در محدوده ۲۶ لیتر بر دقیقه است. لازم به ذکر است که مدت زمان این آزمون، ۴۰۵ ثانیه بود.



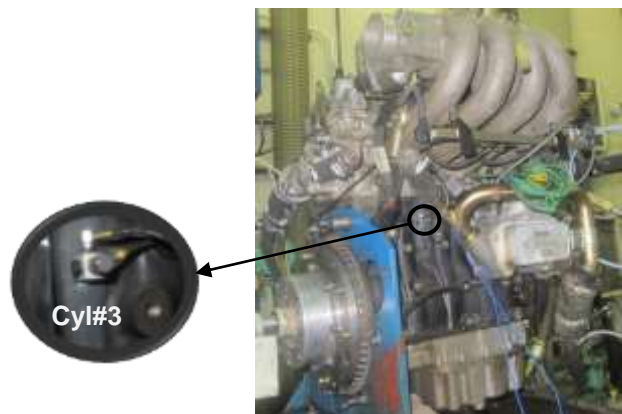
شکل ۳: نمودار متغیرهای موتوری در حالت سالم

عنوان استوانه هدف این بود که اولاً فضای مناسب تری برای نصب حسگرهای شتاب سنج برای این استوانه نسبت به استوانه‌های دیگر وجود داشت ثانیاً امکان نصب حسگرهای شتاب سنج در نزدیک ترین نقطه ممکن به سمبه (بر روی دیواره خارجی بوش استوانه) وجود داشت. نرخ داده برداری برای اخذ علامت‌ها، ۵۰ کیلوهرتز انتخاب شد. به علاوه برای جمع آوری داده‌های موتوری، از تجهیزات اتاق آزمون استفاده شد. در این پژوهش قبل از هر آزمون، روغن موتور تعویض شده و پس از هر آزمون یک نمونه روغن از موتور گرفته شد. دلیل این امر، مشاهده اثرات عیب سایش سمبه بر روی ذرات روغن است. شکل ۱ موتور تحت آزمون و حسگرهای شتاب‌سنج را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات فنی موتور تحت آزمایش

۴	تعداد استوانه
۱۶	تعداد سوپاپ
۷۸	قطر استوانه (میلیمتر)
۸۵	طول جابجایی (میلیمتر)
۱,۶۵	حجم جابجایی (لیتر)
۶۰۰ / ۸۳	قدرت بیشینه (کیلووات) / سرعت دورانی (دور بر دقیقه)
۳۵۰۰-۴۵۰۰ / ۱۴۶	گشتاور بیشینه (نیوتن متر) / سرعت دورانی (دور بر دقیقه)
۱۱,۵	نسبت تراکم

برای انجام آزمون‌ها، رویه ای بدین شرح طراحی شد:
 (۱) بردن دور موتور طی حدوداً ۱۰ ثانیه از حالت خاموش به دور بیشینه توان تحت بیشینه بارگذاری
 (۲) نگهداشتن موتور در وضعیت مذکور یعنی سرعت بیشینه توان و بیشینه بارگذاری
 (۳) خاموش کردن موتور طی مدت ۳۰ ثانیه



شکل ۱: موتور و حسگرهای شتاب سنج

جدول ۲ نتیجه تحلیل روغن برای حالت اول آزمون را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود مقدار ذرات موجود در روغن طبیعی بوده که حاکی از سلامت موتور است.



شکل ۵: علائم عیب سایش در استوانه و سمبه شماره ۳

شکل ۵ نشان می‌دهد که عیب رخ داده در موتور وابسته به مراحل ابتدایی عیب سایش سمبه است. با شناسایی این شدت از عیب، می‌توان از پیشرفت آن و بروز خرابی‌های وسیعتر جلوگیری کرد. شکل ۶ نمودار متغیرهای موتوری را طی حالت دوم آزمون نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود نرخ گازهای نشتی به مقدار تقریباً ۱۲۸ لیتر بر دقیقه رسیده است که بیانگر بروز عیب سایش در استوانه و سمبه است. لازم به ذکر است که مدت زمان این آزمون، ۲۵۶ ثانیه بود.

جدول ۲: تحلیل روغن برای حالت سالم موتور

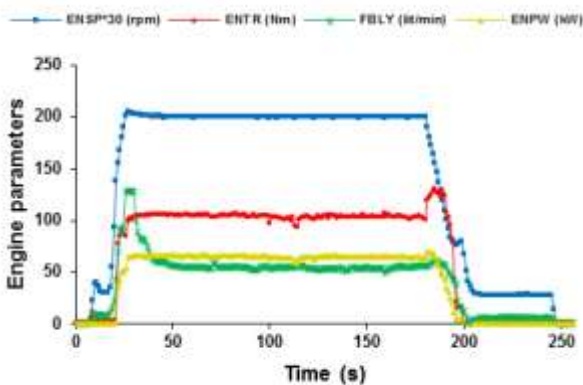
مقدار (ppm)	عنصر
۱۸/۷	Fe
۰/۱	Cr
۲/۸	Al
۱/۷	Cu
۲/۷	Pb
۰/۳	Ni
۶۴	Mo

۲-۱-۲- حالت دوم آزمون

یکی از عوامل ایجاد کننده عیب سایش سمبه در موتور، وجود ذرات ساینده در روغن است. در این مرحله از آزمون، برای به وجود آوردن عمدی عیب سایش سمبه، مقدار ۶ گرم پودر سیلیسیوم از مسیر شمع در استوانه هدف (استوانه شماره ۳) ریخته شد و سپس با روغن آغشته گشت. لازم به ذکر است که قطر ذرات سیلیسیوم استفاده شده در این پژوهش، در محدوده ۷ تا ۱۰۰ میکرون بود. سپس موتور مطابق با رویه مذکور تحت آزمون قرار گرفت. ریختن پودر سیلیسیوم باعث افزایش نرخ سایش در ناحیه میان استوانه و سمبه می‌شود تا وقوع عیب سایش سمبه محتمل تر شود. پس از اتمام آزمون، نمونه روغن از موتور گرفته شد و وضعیت استوانه هدف توسط آندوسکوپ مشاهده شد. مشاهده انجام شده حاکی از آن بود که عیب سایش در استوانه و سمبه موتور رخ داده است (شکل ۴).



شکل ۴: تصویر آندوسکوپ استوانه شماره ۳ در حالت معیوب



شکل ۶: نمودار متغیرهای موتوری در حالت استوانه و سمبه ساییده

شکل ۵ استوانه و سمبه شماره ۳ را پس از باز کردن موتور نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، علائم سایش به وضوح قابل ملاحظه هستند.

علامت‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد، اطلاعات زمانی از بین می‌رود بدین معنا که در حوزه بسامد، تنها وضوح بسامدی وجود دارد. هنگامی که به علامت‌های حوزه بسامد نگاه شود، غیر ممکن است که زمان وقوع رویدادی خاص دیده شود. اگر یک علامت در طول زمان تغییرات زیادی نداشته باشد (علامت‌های ایستا^۳)، محدودیت مذکور اشکالی را ایجاد نمی‌کند. اما اکثر علامت‌های ناشی از سامانه‌های مکانیکی مانند ارتعاشات موتور ماهیت ناپایستا^۴ دارند. در این مورد، تبدیل فوریه نمی‌تواند به طور موثر رویدادهای درون علامت را تشخیص دهد [۹]. البته این امر بدان معنی نیست که نباید از تبدیل فوریه برای علامت‌های ناپایستا استفاده کرد. این امر بستگی به هدف تحلیل دارد.

یکی از روش‌هایی که نقص تبدیل فوریه را اصلاح می‌کند، تبدیل فوریه زمان-کوتاه است که توسط دنیس گابور^۵ توسعه یافت. تبدیل فوریه زمان-کوتاه علامت را به یک تابع دو بعدی از زمان و بسامد نگاشت می‌کند [۹]. به بیان ساده تر، این روش علامت را به تعدادی پنجره زمان ثابت شکسته و محتوای بسامدی هر یک را به دست می‌آورد. بدین ترتیب، اطلاعات زمانی و بسامدی همزمان ایجاد می‌شود. رابطه ریاضی تبدیل فوریه زمان-کوتاه به شکل زیر است [۱۰]:

$$STFT_x^w(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

که در آن $x(t)$ علامت در حوزه زمان، w تابع پنجره، f متغیر بسامدی و τ متغیر زمانی است. تبدیل فوریه زمان-کوتاه همان تبدیل فوریه پنجره شده است که با شروع از ابتدای علامت، تابع پنجره در علامت ضرب شده و سپس تبدیل فوریه این علامت پنجره شده محاسبه می‌شود. در گام بعد، پنجره به مقدار τ انتقال یافته و روند قبل مجدداً تکرار می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج وابسته به ارتعاشات موتور طی حالت‌های اول و دوم آزمون ذکر شده بررسی می‌شوند در ابتدا ارتعاشات افقی و سپس ارتعاشات عمودی موتور تحلیل می‌شوند.

۳-۱- ارتعاشات افقی موتور

شکل ۷ علامت ارتعاش افقی موتور در حالت سالم و معیوب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اختلاف در طول دو علامت به دلیل اختلاف در مدت زمان دو آزمون است. همانطور که پیشتر ذکر شد،

نتیجه وابسته به تحلیل روغن در حالت دوم آزمون در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود عیب سایش سمیه منجر به افزایش قابل توجه در مقدار تمامی عناصر روغن شده است به طور مثال عنصر آهن و آلومینیوم به ترتیب در حدود ۱۰۷ و ۲۴۶ درصد افزایش داشته‌اند.

جدول ۳: تحلیل روغن برای حالت استوانه و سمیه ساییده

عنصر	مقدار (ppm)
Fe	۳۸۸
Cr	۰.۳
Al	۹.۷
Cu	۳
Pb	۱۰.۹
Ni	۱.۱
Mo	۶۸

۲-۲- تبدیل فوریه^۱

توسط علامت‌های حوزه زمان، می‌توان رفتار کلی علامت را به دست آورد مانند دامنه علامت، انرژی و غیره. این حوزه برای مقایسه ابتدایی میان علامت‌ها بسیار مناسب است ولی به منظور دریافت اطلاعات جزئی و مهم تر، علامت‌ها باید به حوزه‌های دیگر انتقال یابند تا اطلاعات نهفته آن‌ها نمایان شود. لازم به ذکر است که تمامی اطلاعات کلی و جزئی در درون علامت‌های حوزه زمان وجود دارد ولی تنها اطلاعات کلی قابل دسترس است. با استفاده از تحلیل‌های دیگر می‌توان به اطلاعات نهفته دست یافت. یکی از این اطلاعات مهم محتوای بسامدی علامت است. تبدیل فوریه یکی از روش‌های شناخته شده و مفید برای به دست آوردن محتوای بسامدی علامت‌هاست. در این روش، علامت به یکسری متغیرهای سینوسی با بسامدهای مختلف شکسته می‌شود. از جنبه ریاضی، انتقال علامت‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد توسط معادله زیر انجام می‌شود [۹]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

که $x(t)$ علامت در حوزه زمان و $X(f)$ علامت در حوزه بسامد است. همچنین t زمان و f بسامد است.

۲-۳- تبدیل فوریه زمان-کوتاه^۲

برای به دست آوردن بسامدهای موجود در یک علامت، تبدیل فوریه روشی مناسب است. اما این روش محدودیت‌هایی نیز دارد. در انتقال

³ Stationary signals

⁴ Non-stationary

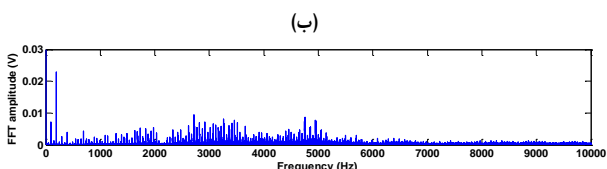
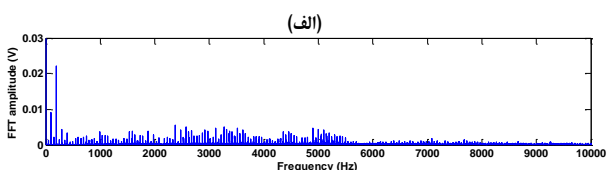
⁵ Denis Gabor

¹ Fourier transform (FT)

² Short-time Fourier transform (STFT)

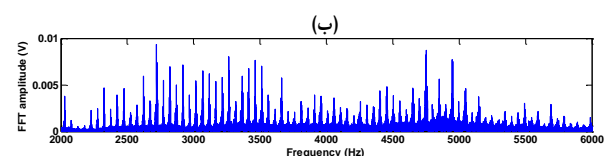
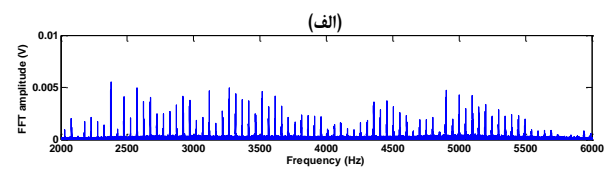
افزایشی ۲۶،۴ درصدی نسبت به حالت سالم مشاهده می‌شود. این نتایج حاکی از آن است که در اثر وقوع عیب سایش سمبه، انرژی و مشخصه ضربه‌ای ارتعاشات افقی موتور افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل آسیب دیدگی سطوح استوانه و سمبه و در نتیجه افزایش لقی^۳ باشد.

در گام بعدی، داده‌های ارتعاش افقی موتور توسط روش تبدیل سریع فوریه از حوزه زمان به حوزه بسامد منتقل شدند. این کار باعث می‌شود که بسامد ارتعاشات ناشی از عیب سایش سمبه به دست آید. شکل ۸ داده‌های ارتعاش افقی موتور در حوزه بسامد را برای حالات سالم و معیوب موتور نشان می‌دهد.



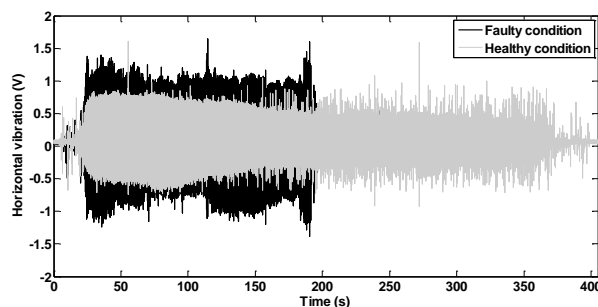
شکل ۸: طیف ارتعاشات افقی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

در شکل ۸ دیده می‌شود که در اثر عیب سایش سمبه، ارتعاشات در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز افزایش یافته‌اند. به منظور تأیید این موضوع، داده‌های ارتعاش شکل ۸ در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز رسم شده‌اند (شکل ۹). در این شکل اختلاف میان ارتعاشات دو حالت موتور به وضوح مشخص است. بنابراین دیده می‌شود که عیب سایش سمبه باعث افزایش ارتعاشات افقی موتور در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز می‌شود. پس این محدوده بسامدی می‌تواند برای تشخیص این عیب به کار رود.



شکل ۹: طیف ارتعاشات افقی موتور در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز برای حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

مدت زمان حالت اول آزمون ۴۰۵ ثانیه ولی مدت زمان حالت دوم آزمون ۲۵۶ ثانیه بود. چون علامت‌ها بر حسب زمان رسم شده‌اند، ملاحظه می‌شود که طول علامت وابسته به حالت دوم آزمون کوچکتر از حالت اول آزمون است. به طور بصری دیده می‌شود که دامنه ارتعاش موتور در حالتی که استوانه و سمبه دچار عیب سایش شده‌اند، به طور قابل توجهی بیشتر از حالت سالم موتور است.



شکل ۷: ارتعاش افقی موتور در حالات سالم و معیوب

در تحلیل نخست که به تحلیل حوزه زمان موسوم است، دو متغیر ریشه میانگین مربعات^۱ و شاخص ضربه^۲ از علامت‌های نشان داده شده در شکل ۷، استخراج شدند [۱۱، ۱۲]. رابطه این دو متغیر به شرح زیر است [۱۳]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (3)$$

$$impulse.factor = \frac{\max(|x_i|)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|} \quad (4)$$

در معادلات قبل، x_i یک داده ارتعاشی و N تعداد کل داده‌های ارتعاشی در طول یک علامت است.

جدول ۴ مقایسه‌ای میان مقدار دو متغیر ریشه میانگین مربعات و شاخص ضربه برای حالات سالم و معیوب موتور نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقادیر ریشه میانگین مربعات و شاخص ضربه برای ارتعاشات افقی

حالات سالم و معیوب موتور		
حالت موتور	ریشه میانگین مربعات	شاخص ضربه
سالم	۰،۱۱	۱۰،۸۴
عیب سایش سمبه در استوانه ۳	۰،۱۷	۱۳،۷

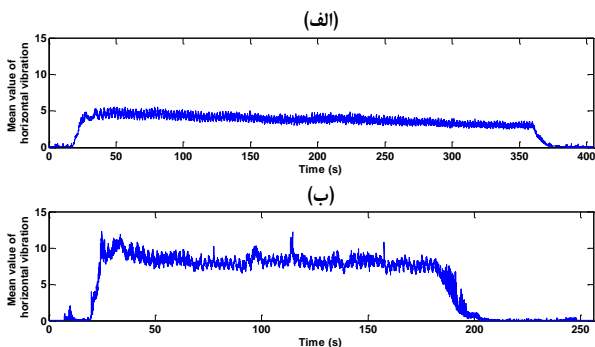
با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که مقدار متغیر ریشه میانگین مربعات برای زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، به مقدار ۵۴،۵ درصد افزایش یافته است. همچنین برای متغیر شاخص ضربه،

¹ Root mean square (RMS)

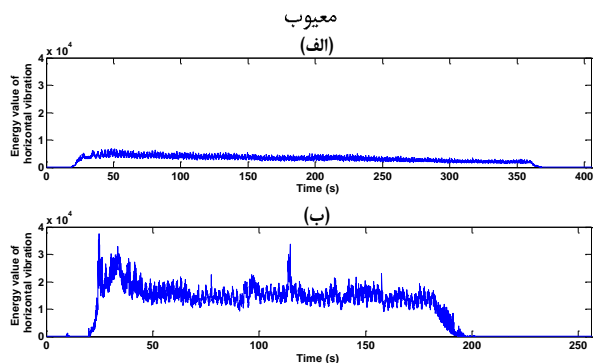
² Impulse factor

³ Clearance

همانطور که از شکل ۱۲ دیده می‌شود، مقدار انرژی ارتعاشات موتور در زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، به طور قابل توجهی بیشتر از حالت سالم است به طوری که در بیشینه خود به مقدار ۳۷۳۹۰ ولت^۲ می‌رسد که در مقایسه با حالت سالم به مقدار تقریباً ۴۵۹ درصد افزایش یافته است. همچنین در شکل ۱۲(ب) ملاحظه می‌شود که بزرگترین پیک در ابتدای آزمون رخ داده است. این امر بیانگر وقوع عیب سایش سمبه در ابتدای آزمون است. همچنین دیده می‌شود که پس از وقوع این عیب، مقدار انرژی ارتعاشات افقی موتور همچنان به طور قوی به مقدار بیش از ۱۰۰۰۰ ولت^۲، باقی مانده است.



شکل ۱۱: ویژگی میانگین ارتعاشات افقی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب



شکل ۱۲: ویژگی انرژی ارتعاشات افقی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

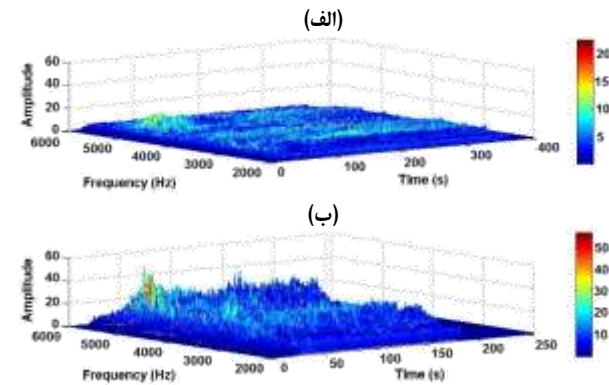
تحلیل‌های فوق نشان می‌دهد که عیب سایش سمبه می‌تواند تأثیر به‌سزایی را در میانگین و انرژی ارتعاشات افقی موتور در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز داشته باشد. بنابراین می‌توان از این دو ویژگی به منظور شناسایی عیب سایش سمبه در موتور بهره برد.

۳-۲- ارتعاشات عمودی موتور

در بخش قبل دیده شد که توسط تحلیل ارتعاشات افقی موتور می‌توان عیب سایش سمبه را شناسایی کرد. حال در این بخش، تأثیر عیب سایش سمبه بر ارتعاشات عمودی موتور بررسی می‌شود تا اینکه بتوان از ارتعاشات عمودی نیز در شناسایی عیب سایش سمبه استفاده کرد.

شکل ۱۳ داده‌های ارتعاش عمودی موتور در حالت سالم و معیوب را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که دامنه ارتعاش در زمانی که موتور

در گام بعدی، تحلیل حوزه زمان-بسامد توسط روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه انجام شد. با استفاده از این تحلیل، وضوح زمانی و بسامدی به طور همزمان حاصل می‌شود. شکل ۱۰ تحلیل زمان-بسامد برای ارتعاشات افقی حالات سالم و معیوب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که چون عیب سایش سمبه در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز ظاهر شد، نمودارهای شکل ۱۰ در این محدوده بسامدی ترسیم شدند.



شکل ۱۰: ارتعاشات افقی موتور در حوزه زمان-بسامد در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز برای حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

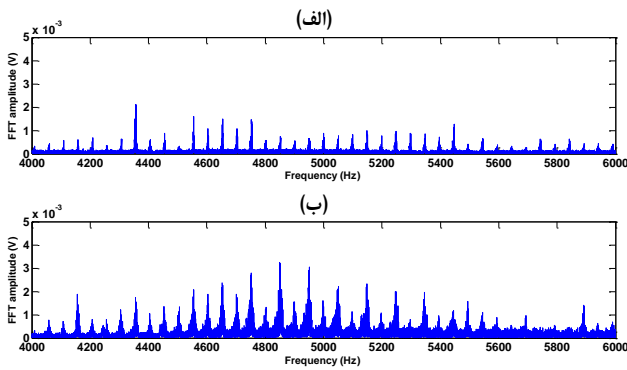
با توجه به شکل ۱۰، بیشینه دامنه ارتعاش برای حالت سالم ۲۲،۴۳ ولت بود در حالیکه این مقدار برای حالت معیوب به ۵۶،۶۶ ولت رسیده است بدین معنا که دامنه ارتعاشات افقی در زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، به مقدار تقریباً ۱۵۳ درصد افزایش یافته است. این مقدار بیانگر تأثیر شدید عیب سایش سمبه بر روی ارتعاش افقی موتور است.

یکی از ویژگی‌های کاربردی در تحلیل ارتعاش، به دست آوردن مقدار میانگین ارتعاشات است. با استخراج این ویژگی می‌توان تأثیر عیب سایش سمبه را از جنبه دیگر مشاهده کرد. برای این کار مقدار میانگین ارتعاشات افقی موتور برای محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز محاسبه شد. شکل ۱۱ مقدار میانگین ارتعاشات افقی موتور را برای حالات سالم و معیوب نشان می‌دهد. تأکید می‌شود که نمودارهای رسم شده در شکل ۱۱ وابسته به محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز است.

در شکل ۱۱ دیده می‌شود که بیشینه میانگین ارتعاش افقی موتور در حالت سالم به ۵،۵ ولت رسیده است اما زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، مقدار میانگین ارتعاش افقی تا ۱۲،۲۹ ولت افزایش یافته است.

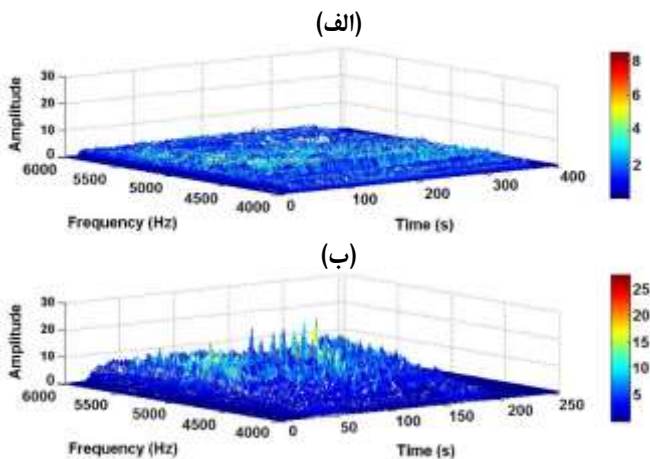
یکی دیگر از ویژگی‌های شناخته شده در تحلیل ارتعاش، انرژی ارتعاش است. در این پژوهش، مقدار انرژی ارتعاشات افقی موتور در کل محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز محاسبه شد. شکل ۱۲ مقدار این ویژگی را برای حالات سالم و معیوب موتور نشان می‌دهد.

در شکل ۱۵ به وضوح دیده می‌شود که عیب سایش سمبه، ارتعاشات عمودی موتور را در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز افزایش داده است. بنابراین این محدوده بسامدی می‌تواند برای تشخیص عیب سایش سمبه به کار رود.



شکل ۱۵. طیف ارتعاشات عمودی موتور در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز برای حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

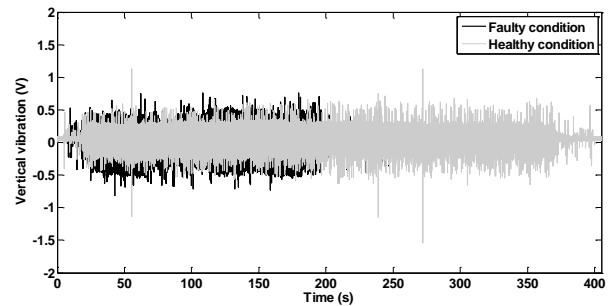
شکل ۱۶ تحلیل حوزه زمان-بسامد ارتعاشات عمودی موتور برای حالات سالم و معیوب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که چون عیب سایش سمبه در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز ظاهر شد، نمودارهای شکل ۱۶ در این محدوده بسامدی ترسیم شدند. با توجه به شکل ۱۶ دیده می‌شود که ارتعاشات عمودی موتور در اثر عیب سایش سمبه به طور قابل توجهی افزایش یافته است به طوری که در بیشینه مقدار، به ۲۷،۵۹ ولت رسیده است در حالی که برای حالت سالم، بیشینه دامنه ارتعاش ۸،۵ ولت است.



شکل ۱۶: ارتعاشات عمودی موتور در حوزه زمان-بسامد در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز برای حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

شکل ۱۷ مقدار میانگین ارتعاشات عمودی موتور را برای حالات سالم و معیوب نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نمودارهای رسم شده در شکل ۱۱ وابسته به محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز است.

عیب سایش سمبه دارد، بیشتر از حالت سالم موتور است. این نتیجه با بررسی داده‌های ارتعاش افقی موتور نیز به دست آمد.



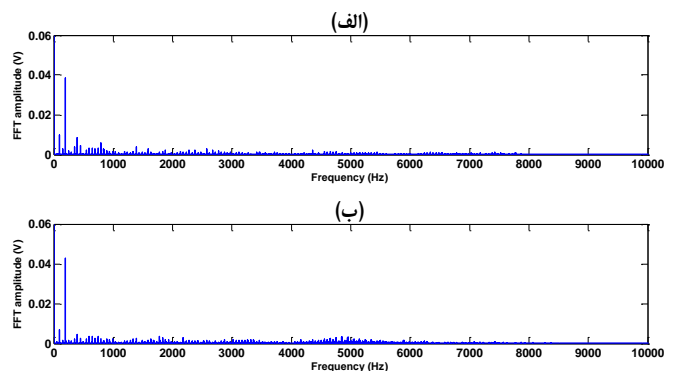
شکل ۱۳: ارتعاش عمودی موتور در حالات سالم و معیوب به منظور مشاهده بهتر اختلاف میان علامت‌های وابسته به حالات سالم و معیوب، ویژگی‌های ریشه میانگین مربعات و شاخص ضربه استخراج شدند. جدول ۵ مقادیر این ویژگی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقادیر ریشه میانگین مربعات و شاخص ضربه برای ارتعاشات

حالت موتور	عمودی حالات سالم و معیوب موتور	
	ریشه میانگین مربعات	شاخص ضربه
سالم	۰،۰۹	۹،۵۱
عیب سایش سمبه در استوانه ۳	۰،۱	۸،۷۹

با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که مقدار متغیر ریشه میانگین مربعات برای زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، به مقدار ۱۱،۱ درصد افزایش یافته است. همچنین برای متغیر شاخص ضربه، کاهش ۷،۵ درصدی نسبت به حالت سالم مشاهده می‌شود. بنابراین دیده می‌شود که عیب سایش سمبه بر روی انرژی و رفتار ضربه ای ارتعاشات عمودی موتور نیز تأثیر می‌گذارد.

در شکل ۱۴ تحلیل حوزه بسامد ارتعاشات عمودی موتور برای حالات سالم و معیوب نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که در اثر عیب سایش سمبه، محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز تحت تأثیر قرار گرفته است. این امر در شکل ۱۵ که وابسته به طیف ارتعاشات عمودی در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز است، مشخص است.



شکل ۱۴: طیف ارتعاشات عمودی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

بعد، با ثابت شدن سرعت موتور، مقدار انرژی کاهش یافته و در محدوده ۲۰۰۰ ولت^۲ باقی مانده است. این روند نشان می‌دهد که عیب سایش سمبه در ابتدای آزمون و در زمانی که سرعت موتور در حال افزایش است، رخ داده است. به همین دلیل است که با ثابت شدن سرعت موتور، انرژی ارتعاش همچنان در سطح بسیار قویتری نسبت به انرژی ارتعاش حالت سالم باقی مانده است. اما کاهش مقدار انرژی پس از ثانیه ۳۴ ام به دلیل تطبیق سطوح استوانه و سمبه پس از وقوع عیب سایش است بدین معنا که پس از وقوع عیب سایش، آبنندی میان استوانه و سمبه تا حد کمی باز می‌گردد ولی وضعیت استوانه و سمبه از حالت طبیعی خارج شده است [۳]. همچنین در شکل ۱۸ (ب) دیده می‌شود که در زمان ۱۱۴٫۶ ثانیه افزایش ناگهانی در انرژی ارتعاش عمودی موتور رخ داده است. این جهش شدید و ناگهانی در شکل ۱۷ (ب) نیز ملاحظه شد که محتمل‌ترین دلیل آن ضربه سمبه و شدت گرفتن عیب سایش سمبه است.

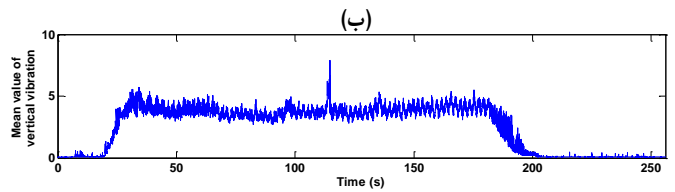
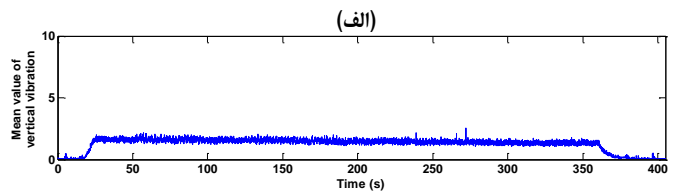
تحلیل‌های فوق نشان می‌دهد که عیب سایش سمبه می‌تواند تأثیر به‌سزایی را در میانگین و انرژی ارتعاشات عمودی موتور در محدوده ۴ تا ۶ کیلوهرتز داشته باشد. بنابراین می‌توان این دو ویژگی را برای شناسایی عیب سایش سمبه در موتور استفاده کرد.

جدول ۶ مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از ارتعاشات افقی و عمودی را در این تحقیق نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این جدول به نحوی تنظیم شده که مقدار افزایش متغیرهای ارتعاشی را در اثر عیب سایش سمبه نسبت به حالت سالم بر حسب درصد بیان می‌کند.

جدول ۶ مقایسه نتایج ارتعاشات افقی و عمودی موتور

تحلیل حوزه زمان			
شاخص ضربه	ریشه میانگین مربعات		
۲۶٫۴٪	۵۴٫۵٪	ارتعاش افقی	
۷٫۵٪	۱۱٫۱٪	ارتعاش عمودی	
تحلیل حوزه بسامد			
انرژی	میانگین	بیشینه دامنه	
۴۵۹٪	۱۲۳٫۵٪	۱۵۳٪	ارتعاش افقی
۱۱۹۲٪	۲۱۶٪	۲۲۴٫۶٪	ارتعاش عمودی

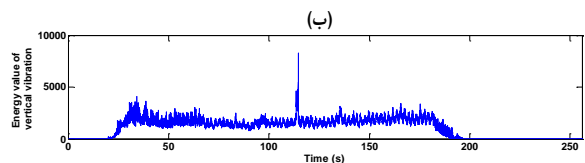
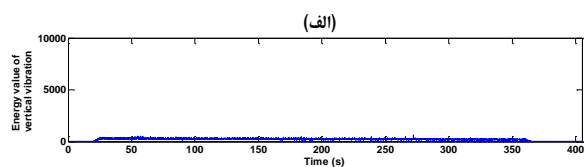
با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌شود که در نتیجه عیب سایش سمبه، مشخصه‌های ارتعاشی موتور در حوزه زمان برای راستای افقی بیشتر از راستای عمودی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اما با بررسی ارتعاشات موتور در حوزه بسامد دیده می‌شود که ارتعاشات عمودی در اثر عیب سایش سمبه نسبت به حالت سالم موتور افزایش چشمگیرتری داشته است بدین معنا که مشخصه‌های ارتعاشی موتور در حوزه بسامد برای راستای عمودی بیشتر از راستای افقی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان ذکر کرد که هر دو ارتعاشات افقی و عمودی موتور می‌توانند عیب سایش سمبه



شکل ۱۷: ویژگی میانگین ارتعاشات عمودی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

در شکل ۱۷ دیده می‌شود که بیشینه میانگین ارتعاش عمودی موتور در حالت سالم به ۲٫۵ ولت رسیده است اما زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، مقدار میانگین ارتعاش عمودی تا ۷٫۹ ولت افزایش یافته است بدین معنا که ارتعاش عمودی موتور در حالت استوانه و سمبه ساییده به مقدار ۲۱۶ درصد افزایش یافته است. همچنین در شکل ۱۷ دیده می‌شود که بیشینه مقدار میانگین ارتعاش عمودی موتور در زمان ۱۱۴٫۶ ثانیه رخ داده است. با توجه به شکل ۶ در زمان ۱۱۴٫۶ ثانیه، گشتاور به مقدار ۱۲ درصد کاهش یافته است. این علائم می‌تواند بیانگر ضربه و کشیده شدن سمبه بر روی دیواره استوانه و در نتیجه شدت گرفتن عیب سایش سمبه باشد.

شکل ۱۸ مقدار انرژی ارتعاشات عمودی را برای حالات سالم و معیوب موتور در محدوده ۴ تا ۶ کیلوهرتز نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: ویژگی انرژی ارتعاشات عمودی موتور در حالات: (الف) سالم، (ب) معیوب

در شکل ۱۸ دیده می‌شود که بیشینه مقدار انرژی ارتعاش برای حالت سالم ۶۳۹ ولت^۲ است در حالی که برای حالت معیوب موتور به ۸۲۶۴ ولت^۲ رسیده است بدین معنا که زمانی که موتور عیب سایش سمبه دارد، افزایش ۱۱۹۲ درصدی در ارتعاشات عمودی موتور ایجاد شده است. همچنین در شکل ۱۸ (ب) دیده می‌شود که در ابتدای آزمون همزمان با افزایش سرعت، انرژی ارتعاشات عمودی نیز افزایش یافته تا در زمان ۳۴ ثانیه به مقدار ۴۱۳۳ ولت^۲ رسیده است. از این زمان به

[2] A. Dyson, Scuffing-a review, Tribology International, Vol. 8, pp. 77-87, 1975

[3] S.A. Moosavian, G.H. Najafi, B. Ghobadian, S.M. Mirsalim, S.M. Jafari, M. Mehrabivaghar, Piston scuffing fault detection in an internal combustion engine using performance parameters and Fuzzy logic, The Journal of Engine Research, Vol. 31, pp. 11-20, 2013.

[4] 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.

[5] O. Singh, Y. Umbarkar, T. Sreenivasulu, E. Vetrivendan, M. Kannan, Y. Babu, Piston seizure investigation: Experiments, modeling and future challenges, Engineering Failure Analysis, Vol. 28, pp. 302-310, 2013.

[6] S.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 8th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, Iran, 2014.

[7] 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.

[8] S.A. Moosavian, G.H. Najafi, B. Ghobadian, S.M. Jafari, B. Sakhaei, M. Khazaei, Fault diagnosis in engine spark plug by vibration analysis using neural network, The Journal of Engine Research, Vol. 28, pp. 21-29, 2012.

[9] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi, Wavelet toolbox, The MathWorks Inc., Natick, MA, 1996.

[10] G. K. Sharma, A. Kumar, C. Babu Rao, T. Jayakumar, B. Raj, Short time Fourier transform analysis for understanding frequency dependent attenuation in austenitic stainless steel, NDT & E International, Vol. 53, pp. 1-7, 2013.

[11] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery, Expert Systems with Applications, Vol. 35, pp. 1593-1600, 2008.

[12] M. Khazaei, H. Ahmadi, M. Omid, A. Banakar, A. Moosavian, Feature-level fusion based on wavelet transform and artificial neural network for fault diagnosis of planetary gearbox using acoustic and vibration signals, Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 55, pp. 323-330, 2013.

[13] A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaeefar, M. Khazaei, Comparison of two classifiers; K-nearest neighbor and artificial neural network, for fault diagnosis on a main engine journal-bearing, Shock and Vibration, Vol. 20, pp. 263-272, 2013.

را به خوبی تشخیص دهند با این تفاوت که کارایی ارتعاشات افقی در حوزه زمان و ارتعاشات عمودی در حوزه بسامد بیشتر است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله هدف شناسایی عیب سایش سمبه با استفاده از تحلیل ارتعاشات افقی و عمودی موتور است. بدین منظور داده‌های ارتعاش افقی و عمودی موتور توسط دو حسگر شتاب سنج طی دو آزمون اخذ شدند. آزمون اول بر روی موتور سالم انجام شد. آزمون دوم طوری طراحی و اجرا شد که موتور با عیب سایش سمبه معیوب شود. در این پژوهش، تحلیل‌های حوزه زمان، بسامد و زمان-بسامد استفاده شدند. نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه عیب سایش سمبه بر روی ارتعاشات افقی و عمودی موتور بود. همچنین با مقایسه میان نتایج تحلیل زمان و تحلیل زمان-بسامد، ملاحظه شد که تأثیر عیب سایش سمبه بر روی ارتعاشات موتور در تحلیل زمان-بسامد نمایان تر بود. به علاوه، در تحلیل زمان-بسامد، بسامد ارتعاشات ناشی از عیب سایش سمبه نیز به دست آمد که در تحلیل زمان این امر غیر ممکن بود. همچنین مزیتی که تحلیل زمان-بسامد بر تحلیل بسامد داشت این بود که نه تنها بسامد ارتعاش ناشی از عیب سایش سمبه به دست آمد، بلکه زمان وقوع و شدت گرفتن این عیب نیز مشاهده شد. نتایج نشان داد که عیب سایش سمبه در محدوده بسامدی ۲ تا ۶ کیلوهرتز از ارتعاشات افقی و در محدوده بسامدی ۴ تا ۶ کیلوهرتز از ارتعاشات عمودی ظاهر شد. همچنین نتایج نشان داد که ویژگی‌های میانگین و انحرافی ارتعاشات توانستند عیب سایش سمبه را در موتور شناسایی کنند. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از ارتعاشات موتور روشی قابل اطمینان و مؤثر برای تشخیص عیب سایش سمبه است.

تشکر و قدرانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو) به موجب حمایت‌های مالی از این پژوهش اعلام می‌دارند. همچنین از آقای شرقی مدیریت ارشد آزمایشگاه‌های موتور شرکت اییکو به دلیل حمایت‌های بی‌دریغ، آقای دکتر سید محمد جعفری به دلیل راهنمایی‌های علمی و فنی و نیز آقای پاداش تکنسین آزمایشگاه به منظور همکاری‌های همه جانبه خود کمال تشکر و سپاس را دارد.

مراجع

[1] Z. Ye, C. Zhang, Y. Wang, H. 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