



تشخیص ترک جداره استوانه‌های لکوموتیوهای دیزل آلستوم به کمک تبدیل موجک و فوریه

سعید غلامی نیا^{۱*}، منصور رفیعیان^۲، حمیدرضا ابوطالبی^۳

^۱ مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، Gholaminia@gmail.com

^۲ مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، Rafeeyan@yazd.ac.ir

^۳ مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، Habutalebi@yazd.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۷۳۰۹۶۳۰۳

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۲ آذر ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۴ بهمن ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

لکوموتیو آلستوم

نگهداری و تعمیرات (نت)

تبدیل فوریه زمان - کوتاه

تبدیل موجک

پایش وضعیت

چکیده

با توجه به سهم مهم و وسیع حمل و نقل راه آهن و قیمت گران ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده در این بخش، استفاده از روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات (نت)، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. تحقیق حاضر به صورت تجربی و با همکاری مجموعه کارخانجات تعمیرات لکوموتیو بافق انجام گرفته است. در این تحقیق توانایی تحلیل ارتعاشی، برای یافتن جداره استوانه ترکدار لکوموتیوهای دیزل آلستوم فعال در خطوط راه‌آهن ایران بحث و بررسی شد. هدف آن است که با نصب حسگرهای شتاب‌سنج بر دیواره خارجی موتور لکوموتیو و پردازش و تحلیل علامت‌های دریافتی، جداره استوانه معیوب شناسایی شود. با توجه به طبیعت ناپیوستگی علامت‌های ثبت شده، برای پردازش علامت‌ها از تبدیل فوریه زمان-کوتاه و تبدیل موجک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که هر دوی این تبدیل‌ها در جداسازی جداره استوانه معیوب از سالم کارآمد اند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی کنونی باشند. از جمله فواید جایگزینی این روش با روش‌های کنونی، کاهش زمان تعمیرات، کاهش هزینه‌های جاری، کاهش مدت زمان توقف موتور در بخش تعمیرات، افزایش بهره‌وری و تشخیص بهنگام و قابل اطمینان را می‌توان نام برد. در صورت عدم تشخیص بهنگام و کامل شدن ترک جداره استوانه، خرابی‌های جبران‌ناپذیری به بار خواهد آمد. این خرابی‌ها گاه‌تا‌گاه به حدی است که موتور به طور کامل از رده خارج می‌شود.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

پایش وضعیت، فرایندی برای پایش هرگونه تغییر رخ داده در وضعیت ماشین‌ها و قطعات آن‌ها به منظور رصد عیوب داخلی آنهاست. در این میان پایش وضعیت ماشین‌های رفت و برگشتی^۱ بسیار دشوارتر از ماشین‌های دوار است [۱]. روش‌های متداول پایش وضعیت موتورهای دیزل، اندازه‌گیری فشار، اندازه‌گیری ارتعاشات، اندازه‌گیری دما و آنالیز روغن هستند. در میان این روش‌ها، اندازه‌گیری ارتعاشات، روش غالب است [۲]. تکنیک‌های دیگر، تنها اطلاعات محدودی در مورد عیبی خاص به دست می‌دهند. برای مثال روش اندازه‌گیری فشار استوانه تنها به عیب در احتراق حساس است [۳].

ابتدایی‌ترین شکل تعمیرات و نگهداری موتور، تعمیر پس از وقوع خرابی است. در این نوع تعمیرات، موتور زمانی تعمیر می‌شود که یا از کار بایستد و یا عیب واضحی از خود بروز دهد. این نوع تعمیرات برنامه‌ریزی نشده، معمولاً باعث آسیب‌های جدی به موتور می‌شود چرا که بخش معیوب به اجزای متصل به خود نیز آسیب وارد می‌کند. بنابراین قطعات بیشتری باید تعویض شوند. روش دیگر تعمیرات و نگهداری، تعمیرات دوره‌ای است. در این روش تعمیرات به صورت دوره‌ای و بدون در نظر گرفتن وضعیت سلامت قطعه صورت می‌گیرد. غالباً در این نوع تعمیرات، بخش‌های مهم و بحرانی که هنوز در وضعیت خوبی هستند، تعویض می‌شوند. بنابر محدودیت‌ها و معایب دو روش ذکر شده، صنایع رو به روش‌های بهینه‌تر آوردند. روش‌هایی که بتواند هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، خرابی‌ها و مدت زمان خواب موتور به علت تعمیرات را کاهش دهد. این روش‌ها، نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت^۲ نام دارند که هدف اصلی آن‌ها جلوگیری از تعمیرات غیر ضروری است. در این روش‌ها تعمیرات تنها زمانی انجام می‌شود که شواهدی از رفتار غیرعادی در سامانه وجود داشته باشد [۴]. این روش نیازمند شیوه‌های قابل اطمینان پایش وضعیت^۳ است که نه تنها قادر به تعیین وضعیت جاری اند، بلکه پیش‌بینی‌های معقولی از عمر مفید ماشین نیز بدهند [۵]. بدین ترتیب صنایع می‌توانند از هدر رفتن منابع مالی و جانی خود، به دلیل خرابی‌های غیرمنتظره جلوگیری کنند.

تاکنون در زمینه پایش وضعیت موتورهای دیزل پژوهش‌های درخور توجه بسیاری انجام شده است؛ اما به جرأت می‌توان ادعا کرد که با وجود تلاش‌های صورت گرفته، تاکنون پژوهشی کارآمد و قابل استناد برای تعیین ترک در جداره استوانه موتورهای دیزل از طریق تحلیل ارتعاشی، انجام نشده است. نزدیکترین پژوهش‌های انجام شده به قرار زیر هستند:

جونز و لی^۴ [۶] در سال ۲۰۰۰ طی مقاله‌ای به مرور روش‌های پایش وضعیت موتورهای دیزل پرداخته‌اند و پایش ارتعاشات را از اصلی‌ترین روش‌های «نت» در سامانه‌های مکانیکی معرفی کرده‌اند. آن‌ها متغیرهای ارتعاشی را شامل شتاب، سرعت، جابجایی و تنش دانسته و از میان این متغیرها، اندازه‌گیری شتاب به وسیله شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک را به دلایل دقت، وزن کم، مقاومت دمایی خوب و محدوده پاسخ بسامدی وسیع، مناسب‌تر و محبوب‌تر در بین محققین دانسته‌اند. در این مقاله آمده است که ارتعاشات می‌توانند بر راحتی در محیط صنعتی اندازه‌گیری شوند؛ که این از جمله مزایای پایش ارتعاشات است.

برانکو و همکاران^۵ [۷] در سال ۲۰۰۲ تحقیقی بر روی جداره استوانه‌های معیوب موتورهای دیزل کشتی انجام دادند. آن‌ها ترک‌های درون جداره استوانه‌ها را از دیدگاه جنس جداره استوانه بررسی کردند و بر محل‌های مستعدتر نسبت به ایجاد ترک در جداره استوانه‌ها از دیدگاه میکروسکوپی و تمرکز تنش، تمرکز کرده و جنس بهتری را برای جداره استوانه‌های مورد استفاده در این نوع موتورها، پیشنهاد دادند.

هرمازا و همکاران^۶ [۸] در سال ۲۰۰۹ به بررسی خرابی جداره استوانه‌های یک موتور دیزل پرداخته و با تحلیل‌های مختلفی علل خرابی جداره استوانه‌ها را بررسی کردند تا به عواملی که موجب خرابی جداره استوانه‌های این نوع موتور می‌شوند دست یابند. محور اصلی کار آن‌ها تغییر جنس جداره استوانه با توجه به این عوامل بوده است. کلینچایم و همکاران^۷ [۹] در سال ۲۰۰۹ پایش وضعیت یک موتور بنزینی کوچک چهارزمانه با استفاده از علامت‌های ارتعاشی پرداختند. آن‌ها از این علامت‌ها برای پایش فاصله مجاز سوپاپ‌های ورود سوخت و خروج دود استفاده کرده‌اند. آن‌ها ضمن تأکید بر کارآمد بودن روش معرفی شده، آن را قابل گسترش برای موتورهای پیچیده‌تر و بزرگتر دانسته‌اند. پایش فرایند احتراق نیز از جمله دیگر کارهای موفقیت‌آمیز این مقاله بوده است.

جیمائیز و همکاران^۸ [۱۰] در سال ۲۰۰۹ خرابی استوانه یک موتور دیزل چهارزمانه مربوط به نیروگاه برق را مطالعه نمودند. در این موتور، سمبه و جداره استوانه شماره ۴ موتور دچار شکست شده بود و بلبرینگ‌های میل‌لنگ نیز صدمه دیده بودند. در این پژوهش خواص مکانیکی جداره استوانه و سمبه، از جمله خواص کشش و سختی برینل محاسبه شده‌اند و الگویی بر اساس اجزای محدود نیز برای نشان دادن محل‌هایی که بیشترین نیرو بر جداره استوانه وارد می‌شوند، در این مقاله آورده شده است.

4 Jones & li

5 Branco

6 Hormaza

7 Klinchaeam

8 Jiménez

1 Reciprocating

2 Condition based monitoring

3 Condition monitoring

داخل و با آب خنک کننده موتور نیز از قسمت بیرونی در تماس است. سمبه درون جداره استوانه قرار دارد و درون آن در حرکت است.

جدول ۱- مشخصات کلی موتور لکوموتیو دیزل آلستوم [۱۲]

نام	مقدار در موتور RK 215
تعداد استوانه	۱۶
توان بیشینه (کیلووات)	۳۱۶۰
سرعت موتور (دور بر دقیقه)	۱۰۰۰
قطر جداره استوانه (میلیمتر)	۲۱۵
حجم موتور (لیتر)	۱۶۰
نسبت تراکم	۱۳٫۴
نوع قرارگیری جداره استوانه‌ها	خورجینی
ابعاد موتور (میلیمتر)	$۲۲۲۵ \times ۱۸۷۴ \times ۴۳۰۰$
وزن (کیلوگرم)	۱۷۹۰۰
توان لیتری (کیلووات بر لیتر)	۱۹٫۸

در صورت عدم تشخیص درست و به موقع و کامل شدن ترک، خسارات وارده به اندازه‌ای خواهند بود که ممکن است سبب توقف دائم و از رده خارج شدن لکوموتیو شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از یک جداره استوانه ترک خورده را نشان می‌دهد. بخش بحرانی جداره استوانه، قسمت بالایی آن است که شرایط دمایی و فشار در بغرنجترین حالت خود است.

ترک خوردن جداره استوانه‌ها می‌تواند به علت‌های متفاوتی از جمله: خنک کاری ضعیف، نصب نادرست، وجود جسم خارجی در فضای احتراق و یا در اثر فرسایش و خوردگی جداره استوانه رخ دهد. ترک خوردن جداره استوانه باعث نفوذ گازهای پرفشار حاصل از احتراق به آب خنک کننده اطراف جداره استوانه می‌شود. این اتفاق موجب بالا رفتن دمای آب خنک کننده موتور می‌شود. با رسیدن دمای آب خنک کننده به فراتر از حد مجاز (حد مجاز حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد است)، سامانه عیب‌یابی خودکار لکوموتیو اخطار شماره ۴۳ که مربوط به بالا رفتن دمای آب خنک کننده موتور است را نشان خواهد داد. این اخطار به همراه دیده شدن حباب‌های هوا در مخزن آب خنک کننده موتور، نشان از وجود ترک در حداقل یکی از ۱۶ جداره استوانه لکوموتیو است.

در حال حاضر شناسایی جداره استوانه معیوب به صورت کاملاً سنتی انجام می‌شود. بدین صورت که میله‌های تزریق سوخت استوانه‌ها به صورت تک تک قطع می‌شود. به عبارت دیگر یک استوانه از ۱۶ استوانه از مدار خارج می‌شود (برای آنکه در جداره استوانه این استوانه احتراق انجام نشود). لکوموتیو روشن می‌شود و تحت بار گذاشته می‌شود. در صورتی که دمای آب خنک کننده از حد مجاز بالا نرود، جداره استوانه معیوب مربوط به همان استوانه است که از مدار خارج شده بود. در غیر این صورت همین مراحل برای استوانه بعدی تکرار می‌شود.

مختاری و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ طی مقاله‌ای شاخص تاجی را متغیری کارا برای پیدا کردن استوانه معیوب در لکوموتیوهای دیزل، معرفی کردند. آن‌ها برای این مهم از علامت‌های سرعت استفاده کردند. علیرغم دستیابی آن‌ها به نتایج نسبتاً خوب، مناسب بودن این روش برای تحلیل علامت‌های نالیستا هنوز مورد پرسش است. همچنین این روش قابلیت اطمینان بالایی از خود نشان نداده است. هدف از تحقیق حاضر ارائه روشی بر مبنای پردازش علامت‌های ارتعاشی سطح بیرونی موتور لکوموتیو است که قادر به تشخیص ترک رخ داده در جداره استوانه موتور باشد. از آنجا که الگوی بروز این عیب تاکنون معرفی نشده است، در این تحقیق دو روش مفید از بین روش‌های پردازش علامت که در این خصوص کارایی دارند، استفاده و بررسی شدند. هدف از این کار یافتن روشی جایگزین برای روش‌های سنتی و وقت‌گیر کنونی است. در دورنمای دیگر، این روش می‌تواند به صورت دوره‌ای و با فواصل زمانی مناسب برای بررسی سالم یا معیوب بودن جداره استوانه، وارد بازرسی‌های دوره‌ای شود. بدین ترتیب می‌توان از تعمیرات پیش‌بینی نشده و توقف لکوموتیو، به دلیل معیوب شدن جداره استوانه‌های آن جلوگیری کرد.

تمامی مراحل پژوهش حاضر در بخش تعمیرات "مجموعه کارخانجات تعمیرات لکوموتیو بافق" و در محیط کارگاهی، نه آزمایشگاهی، انجام شده است. این موضوع مهمترین ویژگی پژوهش حاضر است. از این نظر نتایج این پژوهش به طور کامل در مجموعه تعمیراتی قابل پیاده‌سازی است. دیگر برتری تحقیق حاضر ارائه روشی غیرمخرب، سریع و قابل اطمینان در ترک‌سنجی جداره استوانه‌های موتورهای دیزل نسبت به روش‌های سنتی کنونی است. همچنین این روش قابلیت اطمینان بسیار بالاتری نسبت به روش آورده شده در مرجع ۱۱ که تنها به بررسی شاخص تاجی پرداخته است، دارد. از جمله دیگر فواید این طرح، کاهش زمان تعمیرات، کاهش هزینه‌های جاری، کاهش مدت زمان خواب موتور در بخش تعمیرات، افزایش بهره‌وری و تشخیص به موقع است.

۲- شرح مسأله

در حال حاضر حدود ۴۵ لکوموتیو دیزل آلستوم در خطوط راه‌آهن ایران فعال هستند. مشخصات کلی موتور این دسته از لکوموتیوها در جدول ۱ آورده شده است. انواع خانواده این موتور بصورت ۸، ۱۲ و ۱۶ استوانه است و مورد مصرف آن در صنایع راه آهن، دریایی و نیروگاه می‌باشد. در شرکت ملی حفاری نیز نوع ۶ استوانه‌ای آن را به تعداد ۶ دستگاه در کاربرد صنعتی و در سرم‌سازی کرج یک دستگاه از آن در کاربرد نیروگاه بهره‌برداری شده است [۱۲]. ترک خوردن جداره استوانه یکی از خرابی‌های شایع در لکوموتیوهای دیزل آلستوم فعال در خطوط ریلی ایران است.

جداره استوانه در واقع استوانه‌ای تو خالی است که درون دیواره استوانه موتور قرار می‌گیرد و با گازهای داغ و پرفشار حاصل از احتراق، از

از جمله روش‌های مناسب و شناخته شده برای علامت‌های ناپایستا تبدیل فوریه زمان-کوتاه^۲ و تبدیل موجک^۳ هستند که تاکنون کاربردهای بسیاری از آن‌ها در مقاصد عیب‌یابی ماشین‌ها گزارش شده است [۱۴]. در تحقیق حاضر نیز این دو روش برای پردازش داده‌های جمع‌آوری شده از موتور لکوموتیو استفاده شده است و کارایی هر یک از آن‌ها در بحث جاری بررسی می‌شود.

۳-۱- تبدیل فوریه زمان-کوتاه

تبدیل فوریه علامت را از حوزه زمان به حوزه بسامد انتقال می‌دهد. با استفاده از تبدیل فوریه، می‌توان تمام علامت‌های متناوب پیچیده را به مجموعه‌ای از موج‌های سینوسی تبدیل کرد [۱۶]. این تبدیل از انتگرال‌گیری بر روی تمام محدوده زمان استفاده می‌کند؛ در نتیجه ممکن است اطلاعات زمانی علامت از دست برود و یا غیر قابل استخراج شود. برای برطرف کردن این مشکل تبدیل فوریه زمان-کوتاه معرفی شد [۱۷].

این تبدیل به علت مفهوم ساده و در عین حال قدرتمند پشت آن بسیار رایج و محبوب است. ایده اساسی تبدیل فوریه زمان کوتاه در حقیقت تبدیل علامت به چند بخش مساوی است که این بخش‌ها با یکدیگر مقداری همپوشانی زمانی دارند (با استفاده از روش‌های پنجره‌گذاری). به عبارت دیگر این تبدیل از یک پنجره با عرض ثابت، برای تحلیل علامت و به منظور دخالت دادن اطلاعات زمانی بهره می‌گیرد. فرض می‌شود که در مدت زمان پنجره‌گذاری، علامت تغییرات چندانی نداشته باشد و بتوان آن را ایستا^۴ در نظر گرفت. سپس تبدیل فوریه^۵ گسسته بر روی بخش‌های زمانی کوچکی که با پنجره گذاری به دست آمدند، اعمال می‌شود. مجموع تمام این طیف‌ها، نمایشی است از اینکه طیف علامت، چگونه با زمان تغییر می‌کند و طیف‌نگاره^۶ نامیده می‌شود. بدین ترتیب علامت از حوزه زمان به حوزه زمان-بسامد منتقل می‌شود [۱۸]. تحلیل فوریه زمان-کوتاه، نمایی بر پایه زمان، بسامد و دامنه تبدیل فوریه، از علامت ارائه می‌کند.

تبدیل فوریه زمان-کوتاه علامت $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\text{STFT}_x(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)W(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

ω بیانگر بسامد در تابع پنجره $W(t)$ است. مکان این تابع روی محور زمان با τ تغییر می‌کند. مهمترین محدودیت تبدیل فوریه زمان-کوتاه، ثابت بودن پهناي پنجره مورد استفاده است. بدین

شود تا هنگامی که جداره استوانه معیوب شناسایی شود. گفتنی است که هر بار تکرار این روش حدوداً یک شیف‌ت کاری زمان می‌برد.



شکل ۱: نمونه‌ای از یک جداره استوانه تکرار

۳-۲- روش‌های پردازش علامت‌های ارتعاشی

روش‌های پردازشی بسیاری برای تشخیص عیوب ماشین‌آلات معرفی شده‌اند اما تعداد محدودی از آن‌ها در بحث عیب‌یابی ماشین‌های دیزل استفاده شده‌اند. دلیل اصلی این موضوع، پیچیدگی علامت‌های گسیلی از موتور دیزل است. از جمله دلایل پیچیدگی این علامت‌ها تحریک‌های ضربه‌ای موتور به دلیل احتراق‌های پی‌درپی، خواص انتقالی متغیر با زمان و ناپایستایی^۱ بودن علامت‌های گسیلی است [۱۳]. اطلاعات بسیار مهمی برای ویژگی‌های عیب از این علامت‌ها قابل استخراج است؛ به شرطی که روش‌های پردازشی مناسب به کار گرفته شود.

مشخصه‌های آماری علامت‌های ناپایستا با زمان تغییر می‌کنند. این در حالی است که بیشتر روش‌های پردازش علامت سنتی با فرض ایستا بودن علامت و با میانگین‌گیری از مشخصه‌های آماری در حوزه زمان یا بسامد، عمل می‌کنند. بنابراین این روش‌ها مناسب تحلیل علامت‌های ناپایستا برای مقاصد مهندسی نیستند. از این رو میل به استفاده از روش‌هایی که قادر به استخراج ویژگی‌های متغیر با زمان علامت‌های ناپایستا باشند، به یک عامل مهم در بحث عیب‌یابی ماشین‌آلات تبدیل شد [۱۴]. به طور کلی روش‌هایی مناسب پردازش علامت‌های ناپایستا هستند که قادر باشند علامت را به طور همزمان، هم در حوزه زمان و هم در حوزه بسامد تحلیل کنند. هدف اصلی تحلیل زمان-بسامد، معین کردن تابعی است که چگالی انرژی علامت را به طور همزمان در حوزه زمان و بسامد توصیف کند [۱۵].

² Short Time Fourier Transform (STFT)

³ Wavelet transform

⁴ Stationary

⁵ Discrete Fourier transform

⁶ Spectrogram

¹ Non-stationary

از متداولترین روش‌های نمایش این تبدیل مقیاس‌نگاره^۶ است که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است.

در تحلیل فوریه^۷ زمان-کوتاه از پنجره‌گیری ثابت، هم نسبت به زمان و هم نسبت به بسامد استفاده می‌شود. این در حالی است که در تحلیل موجک از پنجره‌گیری متغیر بهره گرفته می‌شود که پیشرفته‌ترین تکنیک پنجره‌گیری است. این مهمترین مزیت تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. در مواردی که داده‌ها دارای پهنای باند وسیع با خصوصیات گذرا باشند، اغلب بهتر است که با افزایش بسامد، وضوح دقت بسامدی کاهش و در مقابل، وضوح دقت زمانی افزایش یابد تا بتوان وقایع گذرا را بهتر مکان‌یابی کرد [۲۰]. بدین ترتیب تحلیل موجک امکان استفاده از بازه‌های زمانی بزرگ‌تر در داده‌های با بسامد پایین و نیز استفاده از محدوده‌های کوچک‌تر زمانی در بسامدهای بالا، به منظور رسیدن به وضوح بیشتر را فراهم می‌آورد.

شاید بتوان بزرگترین اشکال تبدیل موجک را حساسیت به انتخاب تابع موجک مادر و مقدار مقیاس دانست. برای تعیین تابع موجک مادر و مقدار مقیاس مناسب، در هر کاربرد، نیاز به آزمون و خطاهای بسیار است. در بحث پایش وضعیت باید تا حد امکان تابع موجک مادر و مقدار مقیاس به گونه‌ای انتخاب شوند که هم از محاسبات غیر ضروری کاسته شود و هم گویای وضعیت بخش مورد پایش باشد.

هر عملیاتی به منظور پردازش علامت در رایانه با داده‌های واقعی سر و کار دارد و در نتیجه بایستی از علامت‌های گسسته استفاده کند. پرسش رایجی که پیش می‌آید این است که پس واقعاً چه چیزی در موجک پیوسته، پیوسته است؛ در حالی که داده‌ها گسسته هستند؛ و چه تفاوتی بین موجک پیوسته و موجک گسسته وجود دارد. در پاسخ باید به این نکته اشاره کرد که بر خلاف موجک گسسته، موجک پیوسته بر روی همه مقیاس‌ها (از مقیاس مربوط به علامت اصلی تا هر مقیاس بیشینه‌ای که نیازهای مورد نظر تحلیل با جزئیات را برآورده نماید و در حد توان محاسباتی پردازشگر باشد) عمل می‌کند. همچنین موجک پیوسته از نظر جابجایی زمانی نیز پیوسته است؛ یعنی موجک مورد استفاده در تحلیل، به آهستگی در خلال محاسبات بر روی تمام دامنه تابع تحلیل جابجا می‌شود [۲۱].

برای دستیابی به نتایج بهتر در تحلیل موجک، خانواده‌های موجک بسیاری تاکنون معرفی شده‌اند. برخی از محبوب‌ترین انواع آن‌ها، موجک هرمیتین^۷، موجک مرلت^۸، موجک دابوچیز^۹، موجک سیملت^{۱۰} و موجک هار^{۱۱} هستند.

ترتیب در صورت انتخاب پنجره‌ای با پهنای زیاد، وضوح بسامدی خوب اما وضوح زمانی نامناسب به دست خواهد آمد و بالعکس. بنابراین در عمل باید چندین پنجره با پهنای مختلف برای رسیدن به وضوح مورد نیاز، مقایسه شوند. با این وجود، این تبدیل از جنبه‌های بسیاری ابزاری ایده‌آل در حوزه زمان-بسامد محسوب می‌شود. مهمترین ویژگی مثبت این تبدیل، ساختار ممتاز طیف‌نگاره آن است که درک شهودی بسیار خوبی از علامت، بر اساس طیف بسامدی آن ارائه می‌کند. از این نظر طیف‌نگاره یک ابزار بصری مناسب و گاه در برخی کاربردها بی‌نظیر محسوب می‌شود.

۳-۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک در حال حاضر به عنوان روشی کارآمد در پردازش علامت‌های ارتعاشی و عیب‌یابی ماشین‌ها، بسیار استفاده می‌شود. از تحلیل موجک در موارد بسیاری می‌توان استفاده کرد. از آن جمله می‌توان به صافی کردن داده‌ها به منظور بررسی محدوده خاصی از بسامد و یا رفع اختلالات علامت^۱، تحلیل گذرا^۲، تحلیل زمان-بسامد، تحلیل غیر ایستا^۳، یافتن ناپوستگی^۴، فشرده کردن داده‌ها، شناسایی سامانه و تشخیص عیوب سامانه اشاره کرد [۱۹]. گرچه تاریخچه نظریه موجک به چند دهه پیش برمی‌گردد اما به کارگیری این روش در بحث عیب‌یابی ماشین‌ها، نسبتاً نوین محسوب می‌شود. روش کنونی موجک از تلاش‌های استفان مالات^۵ در سال ۱۹۸۸ گرفته شده است. این تبدیل از توابع موجک به جای توابع سینوسی استفاده می‌کند. یک علامت با تغییرات سریع توسط یک موجک نامنظم بهتر از یک موج سینوسی نرم تحلیل می‌شود. در تحقیق حاضر از تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است. تبدیل پیوسته موجک برابر با مجموع حاصل ضرب علامت در نسخه مقیاس شده و جابجا شده تابع پایه موجک (موجک مادر) بر روی همه زمان‌ها است. این تبدیل برای علامت $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$(W_{\psi} f)(b, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{s}\right) dt \quad (2)$$

که s مؤلفه مقیاس، b شیفت زمانی، t زمان و ψ تابعی از موجک مادر است.

همان‌طور که در تحلیل فوریه، علامت به مجموعه‌ای از موج‌های سینوسی با بسامدهای متفاوت تقسیم می‌شود، در تحلیل موجک نیز به طریق مشابه، علامت به مجموعی از نسخه‌های مقیاس شده و جابجا شده از موجک مادر تبدیل می‌گردد. موجک مادر در حقیقت همان تابع هسته تبدیل موجک است [۲۰]. تحلیل موجک، نمایی بر پایه زمان، مقیاس و دامنه تبدیل موجک، از علامت ارائه می‌کند. یکی

⁶ Scalogram

⁷ Hermitian wavelet

⁸ Morlet wavelet

⁹ Daubechies wavelet

¹⁰ Symlet wavelet

¹¹ Haar wavelet

¹ Denoise

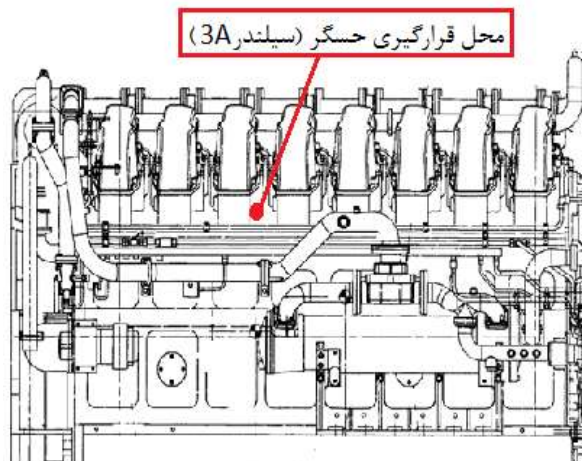
² Transient Analysis

³ Non-Stationary Analysis

⁴ Discontinuity Detection

⁵ Stephane Mallat

محل‌های مختلف، قسمت نشیمنگاه جداره استوانه روی بدنه موتور (فضای کوچکی بین بستار و بدنه موتور)، به عنوان مناسب‌ترین نقطه انتخاب شد. این محل، تنها محل قابل دسترس جداره استوانه از دیواره خارجی موتور است. در شکل ۲ نمایی از محل قرارگیری حسگر بر روی موتور و در شکل ۳ نمایی از کاربرد در حین انجام عملیات داده‌برداری، آورده شده است.



شکل ۲: محل قرارگیری حسگر بر روی موتور



شکل ۳: محل شتابسنج و داده‌برداری از جداره با سنديگ ۹۰۴

مشخصات و شرایط داده‌برداری در جدول ۳ آورده شده‌اند. تمامی داده‌برداری‌های آورده شده در این تحقیق مربوط به لکوموتیو آلتوم شماره ۲۴۰ خطوط ریلی ایران است. برای اطمینان از تکرارپذیری داده‌برداری، از جداره استوانه معیوب ۳ مرحله و با فواصل زمانی حدود ۳۰ دقیقه داده‌برداری شده است. در هر مرحله نیز داده‌برداری ۵ بار تکرار شده است تا داده‌ها قابل اطمینان باشند. همچنین، مطالعه مشابهی بر روی دو جداره استوانه معیوب دیگر نیز انجام شده است که به دلیل ارائه نتایج مشابه، آورده نشده‌اند. علاوه بر داده‌برداری از این سه مورد به عنوان لکوموتیوهای معیوب، داده‌برداری‌های دیگری از لکوموتیوهای سالم یا به عبارت بهتر لکوموتیوهایی که فاقد عیب ترک جداره استوانه بودند، نیز انجام شده است. این داده‌برداری‌ها به منظور

معیار انتخاب تابع مادر برای تبدیل موجک به کار برده شده در این تحقیق، سادگی تحلیل و وضوح نتایج حاصل از آن بوده است. از این رو و طبق بررسی نویسندگان، موجک مرلت مختلط^۱ بهترین انتخاب برای مسأله حاضر است. توضیحات بیشتر در مورد تبدیل موجک در مرجع [۲۲] آمده است.

۴- نحوه داده‌برداری و تجهیزات و نرم‌افزارهای مورد استفاده

جمع‌آوری داده‌های ارتعاشی با نصب حسگرهای شتابسنج پیزوالکتریک به محل قابل دسترس هر جداره استوانه (بین بدنه موتور و بستار) انجام شده است. شتابسنج متداول‌ترین حسگر مورد استفاده در پایش وضعیت ماشین‌هاست. از جمله مزایای شتابسنج، سختی بی اندازه آن، اندازه کوچک، پاسخ بسامدی وسیع و محدوده وسیع دینامیکی برای اندازه‌گیری است. منظور از محدوده وسیع دینامیکی آن است که می‌تواند ارتعاش‌های بسیار کوچک را دریافت کند و در ارتعاش‌های بسیار بزرگ نیز خراب نشود [۱۶]. در این پژوهش از حسگر شتابسنج L14 شرکت سنديگ^۲ استفاده شده است. مشخصات این شتابسنج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات حسگر شتابسنج L14 شرکت سنديگ [۲۳]

پاسخ بسامدی، % ± 5 (هرتز)	۲~ ۵۰۰۰
محدوده دمایی (درجه سانتیگراد)	-۲۰~ +۱۰۰
جنس محفظه	استیل ضد زنگ
وزن (گرم)	۲۲

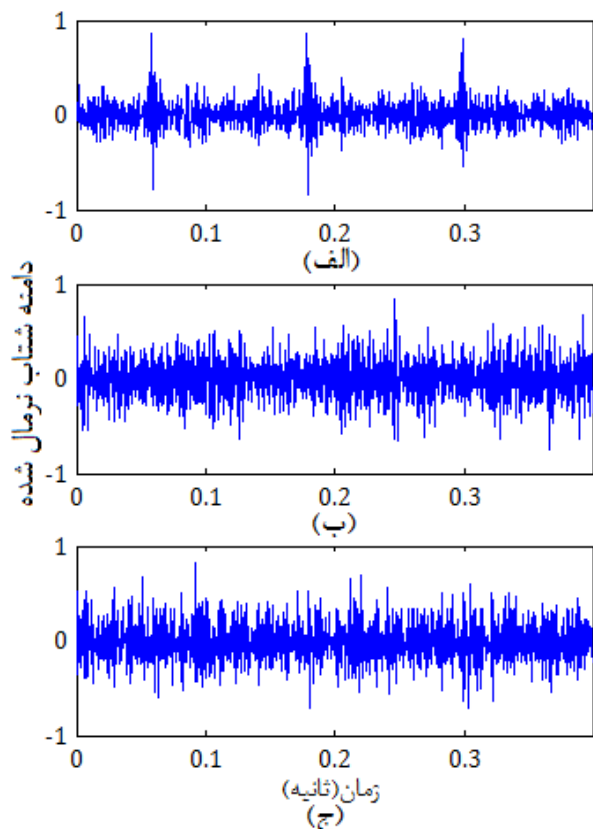
در انتخاب محل نصب حسگر ارتعاش‌سنج برای داده‌برداری، عوامل مختلفی از جمله صحیح و قابل اطمینان بودن علامت دریافتی و راحتی نصب حسگرها بسیار مورد توجه بوده است. منظور از صحیح و قابل اطمینان بودن آن است که با وجود پیچیدگی‌های خاص علامت‌های گسیلی از موتوری با این ابعاد و همچنین تأثیر ارتعاش بخش‌های دیگر موتور بر علامت دریافتی توسط حسگر، باز سهم عمده ارتعاش گرفته‌شده مربوط به همان بخش مورد نظر، یعنی جداره استوانه استوانه باشد. به عبارت دیگر محل انتخاب شده باید به گونه‌ای باشد که ارتعاشات جداره استوانه، ارتعاش غالب در آن محل باشد و دامنه ارتعاشات جداره استوانه نسبت به ارتعاشات دیگر بخش‌های درگیر با آن تا حد امکان بالاتر باشد.

از طرف دیگر، ضروری است که نصب حسگر در محل مورد نظر به دور از هرگونه پیچیدگی خاص باشد. به گونه‌ای که فرد داده‌بردار ضمن اطمینان از نصب صحیح حسگر به صورت چشمی، با دشواری خاصی برای نصب آن روبرو نشود. بدین ترتیب و پس از آزمایش

¹ Complex morlet wavelet

² Sendig

استوانه ریز است و نسبت به حالت جداره استوانه دارای ترک، مدت زمان بیشتری طول می کشد تا علائم وجود ترک در جداره استوانه (بالا رفتن دمای آب خنک کننده موتور و اعلام اختلال سامانه عیب-یابی خودکار لکوموتیو) خود را نشان دهند.



شکل ۴: علامت‌های خام ارتعاشی جداره استوانه: الف) جداره استوانه سالم، ب) جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک، ج) جداره استوانه ترکدار

به دلیل عدم دسترسی به سطح داخلی جداره استوانه و همچنین عدم امکان سوار کردن جداره استوانه معیوب بر روی موتور لکوموتیو، به علت خطر بالای این کار، نمی‌توان برآورد دقیقی از طول یا وضعیت ترک در این مرحله داشت. اما با توجه به اینکه طبق تاریخچه ثبت شده در سامانه تعمیرات، کوچکترین ترکی که خود را به صورت قابل تشخیص نمایان ساخته (باعث بالا رفتن سریع دمای آب خنک کننده موتور شده است) حدود ۶۰ میلی‌متر بوده است، می‌توان گفت که احتمالاً طول ترک در این مرحله باید کمتر از این حدود باشد. تشخیص جداره استوانه معیوب با روش سنتی در این مرحله بسیار دشوار است. جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک پس از چند ساعت کارکرد موتور، بر اثر رشد ترک به حالت جداره استوانه دارای ترک تبدیل می‌شود که حالت بحرانی‌ای محسوب می‌شود. در این حالت باید جداره استوانه معیوب را به سرعت تشخیص داده و تعویض کرد؛ چراکه در صورت کامل شدن ترک و جدا شدن جداره استوانه از نشیمنگاه آن، صدمات جبران‌ناپذیری به موتور وارد خواهد شد.

مقایسه بین حالت معیوب با مجموعه بیشتری از حالات سالم بوده است. به این ترتیب جداره استوانه معیوب، علاوه بر حالت سالم خود، با مجموعه‌ای از جداره استوانه‌های سالم مقایسه شد تا اطمینان بیشتری حاصل شود.

جدول ۳- مشخصات و شرایط داده‌برداری

۱۰۰۰ Hz	بسامد داده برداری
۱۰۰۰ دور بر دقیقه	دور موتور
۰,۴ ثانیه	مدت زمان داده‌برداری
۲۴۰	شماره لکوموتیو
A۳	شماره جداره استوانه مورد آزمایش
۳۵ °C	شرایط دمایی و هوایی

از دستگاه تحلیل گر ارتعاشی دو ورودی قابل حمل سندیک ۱۹۰۴ نیز برای ثبت داده‌های حسگر استفاده شده است. این دستگاه ساخت کشور چین است. مهمترین مزیت این دستگاه، قابل حمل بودن و راحتی استفاده از آن برای موضوع مورد بحث این تحقیق است. دستگاه‌های سری ۹۰۰ این شرکت ویژه پایش وضعیت ماشین‌های صنعتی ساخته شده‌اند. تعدادی از مهمترین پایش‌های انجام شده توسط این مجموعه از دستگاه‌ها در تارنمای این شرکت قابل دسترس است [۲۴].

از نرم‌افزار MCME3.0 برای انتقال داده‌های ثبت شده در دستگاه سندیک به رایانه استفاده شده است. وظیفه اصلی این نرم افزار، مدیریت اطلاعات تحلیل‌گرهای ارتعاشی شرکت سندیک و ایجاد ارتباط بین این دستگاه‌ها و رایانه است؛ گرچه قابلیت‌های پردازشی محدودی نیز برای آن در نظر گرفته شده است. برای پردازش و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار متلب^۲ و ویرایش ۲۰۱۳ بهره گرفته شده است. با توجه به شناخته شده بودن این نرم‌افزار و قابلیت‌های بالقوه آن، از توضیح در مورد آن صرف‌نظر شده است.

۵- پردازش و تحلیل علامت‌های ارتعاشی

علامت‌های ثبت شده، در سه حالت جداره استوانه سالم، جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک خوردن و جداره استوانه دارای ترک در شکل ۴ آورده شده‌اند. در شکل ۵ نمایی از جداره استوانه ترکدار (پس از پیاده سازی) و جداره استوانه سالم جایگزین آن (پیش از جایگزینی) آورده شده است. طول ترک جداره استوانه دارای ترک پس از پیاده‌سازی حدود ۱۶۰ میلی‌متر بوده است.

جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک، نامی است که نویسندگان مقاله برای حالتی مابین جداره استوانه سالم و جداره استوانه دارای ترک در نظر گرفته‌اند و منظور از این نامگذاری آن است که ترک جداره

¹ Sendig 904

² MATLAB

روی شکل ۱۲۰ میلی ثانیه است. داده برداری در دور موتور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است و در هر دو دور موتور یک بار احتراق انجام می‌شود، بنابراین زمان هر احتراق کامل ۱۲۰ میلی ثانیه خواهد بود. با توجه به برابری این زمان‌ها و اینکه بیشترین دامنه ارتعاش جداره استوانه، زمان وقوع احتراق است [۱۰]؛ می‌توان این نواحی را مربوط به وقوع احتراق در جداره استوانه دانست.

در شکل ۶ (ب) که مربوط به تبدیل فوریه زمان - کوتاه مراحل اولیه ترک است، این نواحی با دامنه کمتر، نمایان شده‌اند. این کاهش دامنه را می‌توان به دلیل فرار انرژی حاصل از احتراق، از ترک موجود در جداره استوانه دانست. منظور از فرار انرژی این است که پس از انجام احتراق، مقداری از انرژی حاصله، در عوض آنکه صرف پایین راندن سمبه شود، از ترک موجود در جداره استوانه به داخل آب خنک کننده موتور نشت می‌کند. نتیجه آنکه دمای آبی که وظیفه خنک کاری جداره استوانه را بر عهده دارد، بالا می‌رود. این به نوبه خود موجب افزایش سرعت رشد ترک می‌شود. از طرف دیگر به دلیل در گردش بودن آب در کل موتور، پس از گذشت مدت زمانی نه چندان زیاد، دمای کل مخزن آب بالا رفته و ممکن است در اثر تضعیف سامانه خنک کاری باز هم عیوب دیگری در موتور ایجاد شود.

تفاوت دیگر شکل ۶ (ب) با شکل ۶ (الف)، افزایش دامنه تبدیل فوریه زمان - کوتاه در حدود بسامدی ۲۹۰ هرتز است. این نواحی به صورت نواری روشن تر نسبت به باقی نواحی قابل تشخیص است. متوسط دامنه این نوار روشن، حدود ۲,۵ واحد با حالت بدون ترک (شکل ۶ (الف)) اختلاف دارد. با توجه به ثابت بودن تمامی شرایط داده برداری به جز وجود ترک، نسبت به حالت قبل، می‌توان افزایش دامنه در این بسامد را ناشی از وجود ترک دانست. برای درک بهتر، به این نوار با پیکان روی شکل ۶ (ب) اشاره شده است.

شکل ۶ (پ) مربوط به تبدیل فوریه زمان - کوتاه جداره استوانه ترکیدار است. مقایسه شکل ۶ (ب) با شکل ۶ (پ)، تأثیر رشد ترک بر تحلیل انجام شده را نشان می‌دهد. در این شکل نیز احتراق‌ها خود را به طور قابل تشخیصی نشان نداده‌اند. اما در این حالت دامنه تبدیل فوریه زمان - کوتاه در حدود بسامدی ۲۹۰ هرتز افزایش محسوسی نسبت به حالت قبل داشته است. در این حالت دامنه این نوار حدود ۶,۵ واحد با حالت بدون ترک (شکل ۶ (الف)) و حدود ۴ واحد با حالت مراحل ابتدایی ترک (شکل ۶ (ب)) اختلاف دارد. می‌توان اینگونه تعبیر کرد که افزایش طول ترک در جداره استوانه با افزایش دامنه ارتعاشات در حدود بسامدی ۲۹۰ هرتز خود را نمایان ساخته است.

در شکل ۷ اینبار تبدیل مویک بر علامت‌های شکل ۴ اعمال شده است. برای نمایش این تبدیل از مقیاس‌های ۱ تا ۶۴ مویک مُرت استفاده شده است. شبیه آنچه در مورد تبدیل فوریه زمان - کوتاه گفته شد، در این تبدیل نیز در حالت جداره استوانه سالم، شکل ۷ (الف)، احتراق‌ها با همان فواصل زمانی قابل تشخیص هستند. برای درک

حالت جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک از دو جنبه حائز اهمیت است. اول اینکه، برای بررسی تأثیر رشد طول ترک بر علامت دریافتی از جداره استوانه تحلیل شده است. دوم و مهمتر اینکه اگر قرار بر آن باشد که عیبی تشخیص داده شود، بهتر است در همان مراحل ابتدایی تشخیص داده شود تا خطرپذیری کار تا حد امکان کاهش یابد. بنابراین بهتر است تا هنگامی که ترک ایجاد شده در جداره استوانه رشد چندانی پیدا نکرده، نسبت به تشخیص و تعویض آن اقدام شود و این مهمترین مزیت روش‌های نوین پایش وضعیت در مقایسه با روش‌های سنتی است.



(الف)

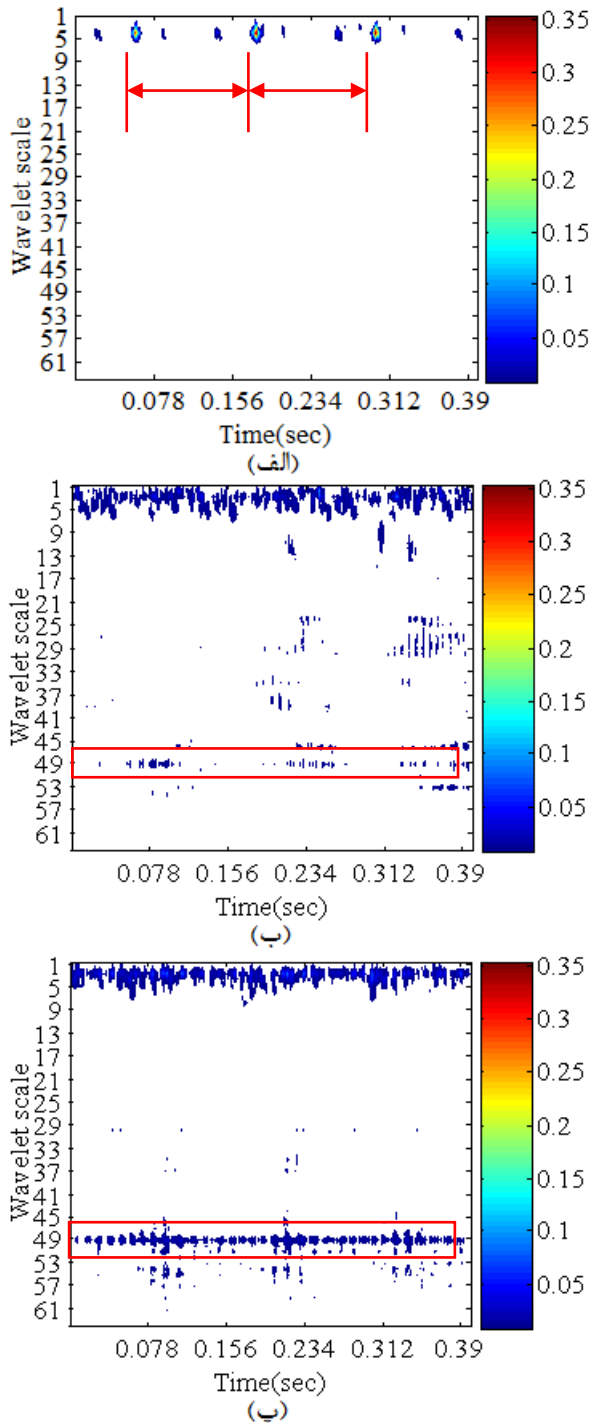


(ب)

شکل ۵: الف) جداره استوانه معیوب لکوموتیو ۲۴۰، ب) جداره استوانه سالم جایگزین

تبدیل فوریه زمان کوتاه بر هر سه علامت شکل ۴ اعمال شده و نتایج در شکل ۶ آورده شده‌اند. برای این تحلیل از پنجره‌هایی با طول ۱۲۸ داده و هم‌پوشانی ۱۲۰ داده، استفاده شده است.

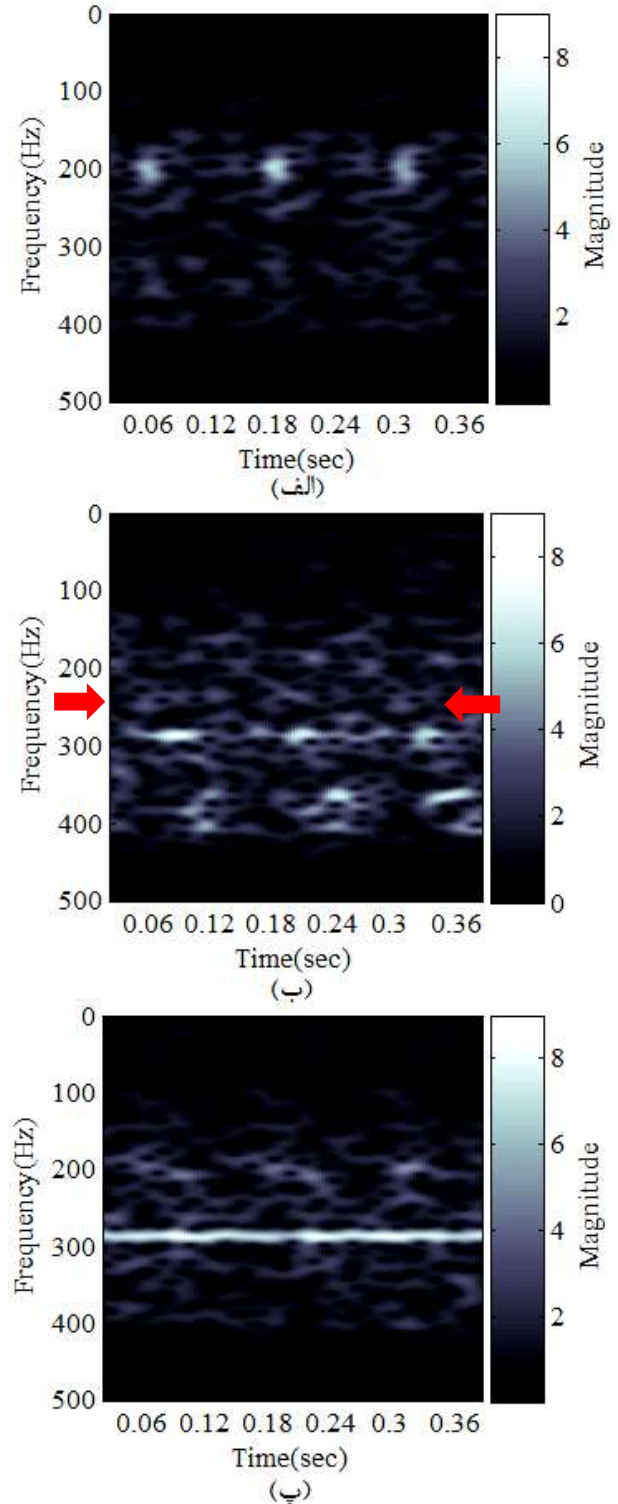
با دقت در شکل ۶ (الف) در حدود بسامدی ۲۰۰ هرتز سه ناحیه روشن تر قابل تشخیص است (غلظت رنگ‌ها بیانگر دامنه تبدیل فوریه زمان - کوتاه است). دامنه این نقاط حدود ۵ واحد تبدیل فوریه زمان - کوتاه، بیشتر از نواحی اطراف است. فاصله زمانی این ناحیه‌ها



شکل ۷: تبدیل موجک: الف) جداره استوانه سالم، ب) جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک، پ) جداره استوانه ترکدار

تمامی تحلیل‌های گفته شده مربوط به تبدیل فوریه زمان- کوتاه، درمورد تبدیل موجک هم صادق است با این تفاوت که در این تبدیل، مؤلفه مقیاس جایگزین بسامد شده است. مقایسه شکل‌های ۷ (ب) و (پ) با شکل ۷ (الف) نشان از تفاوت در مقیاس ۴۹ تبدیل موجک دارد. در این مقیاس در حالت سالم، شکل ۷ (الف)، ضرایب موجک صفر هستند. یعنی در حالت سالم، در این مقیاس، تبدیل موجک ضریبی ندارد. در حالت ۷ (ب) در مقیاس ۴۹ ضرایب موجک به

بهتر این فواصل بر روی شکل مشخص شده‌اند. این در حالی است که این فواصل، به دلیل فرار انرژی از ترک، در حالت‌های مراحل ابتدایی ترک و جداره استوانه ترکدار (شکل‌های ۷ (ب) و (پ)) آنچنان قابل تشخیص نیستند.



شکل ۸: تبدیل فوریه زمان کوتاه: الف) جداره استوانه سالم، ب) جداره استوانه در مراحل ابتدایی ترک، پ) جداره استوانه ترکدار

شود. این در حالی است که طبق بررسی و اطلاع نویسندگان، هیچ-کدام از دستگاه‌های تحلیل ارتعاشی حاضر از تبدیل موجک پشتیبانی نمی‌کنند. دلیل این موضوع شاید همان وجود موجک‌های بسیار و مناسب بودن هر خانواده موجک برای یک نوع عیب باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر امکان تشخیص جداره استوانه معیوب با روش تحلیل ارتعاشی، به صورت تجربی بررسی شد تا در صورت کارآمد بودن، به عنوان روشی جایگزین روش‌های سنتی و وقت‌گیر کنونی در بحث تعیین جداره استوانه معیوب لکوموتیوهای آلتستوم، استفاده شود. برای تحلیل علامت‌های ارتعاشی از تبدیل‌های فوریه زمان- کوتاه و تبدیل موجک استفاده شد. هر دو این تبدیل‌ها نتایج مناسب و قابل قبولی در این بحث، ارائه کردند و وجود ترک در جداره استوانه را با وضوح قابل تشخیص ارائه کردند. گرچه از نظر نویسندگان علیرغم تمامی مزیت‌ها و برتری‌های گزارش شده از تبدیل موجک در تحقیقات و مقالات مختلف، در بحث خاص این تحقیق، تبدیل فوریه زمان- کوتاه به دلایل گفته شده در بخش قبل، مناسب‌تر است. تبدیل فوریه زمان- کوتاه به دلیل سادگی محاسباتی و وضوح بیشتر در تشخیص وجود ترک در جداره استوانه خصوصاً در مراحل اولیه ترک، نسبت به تبدیل موجک پیشنهاد می‌شود. مهمترین مزایای جایگزینی روش حاضر به جای روش‌های سنتی کنونی، کاهش مدت زمان تعمیرات، کاهش هزینه‌های جاری، افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان بالای آن است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مدیران و کارکنان «مجموعه کارخانجات لکوموتیو بافق» به خاطر همکاری‌ها و حمایت‌هایشان از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند. باشد که این تحقیق زمینه‌ساز همکاری‌های بیشتر میان صنعت و دانشگاه شود.

مراجع

- [1] F. Al-Badour, M. Sunar, L. Cheded, Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 6, pp. 2083-2101, 2011
- [2] R.K Mobley, Handbook of condition monitoring techniques and methodology, Eds., London: Chapman & Hall, 1998
- [3] W. Wu, The Detection of Incipient Faults in Small Multi-Cylinder Diesel Engines Using Multiple Acoustic Emission Sensors, PhD Thesis, Mechanical Engineering, Queensland University of Technology, Queensland, 2013
- [4] A. K. S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics

صورت پراکنده خود را نمایان ساخته‌اند. متوسط دامنه ضرایب موجک در این مقیاس حدود $0,0012$ دامنه تبدیل موجک نسبت حالت جداره استوانه سالم، شکل ۷ (الف)، افزایش داشته‌اند. در حالت ۷ (پ) در مقیاس ۴۹ ضرایب موجک به صورت منسجم‌تر خود را نمایان ساخته‌اند. متوسط دامنه ضرایب موجک در این مقیاس حدود $0,015$ دامنه تبدیل موجک نسبت به حالت سالم، شکل ۷ (الف)، افزایش داشته است.

بدین ترتیب می‌توان از این مقیاس، به عنوان مقیاس بُروز عیب در بحث کنونی تعبیر کرد. در حالت مراحل اولیه ترک، ضرایب تبدیل موجک در این مقیاس با پراکندگی و گسستگی بیشتر نسبت به حالت ترکدار قابل مشاهده هستند. این مقیاس با یک کادر مستطیلی بر روی شکل‌های ۷ (الف) و (ب) نشان داده شده است. نتیجه آنکه ترک موجود در جداره استوانه با افزایش دامنه تبدیل موجک در مقیاس ۴۹ تابع مُرلت نمایان شده است و هر چه ترک موجود در جداره استوانه بزرگتر باشد پیوستگی و تراکم ضرایب موجک در این مقیاس بیشتر خواهد بود.

البته قابل ذکر است که در حالت‌های جداره استوانه معیوب، میزان اغتشاشات در حدود مقیاسی ۱ تا ۵ نیز افزایش قابل توجه داشته است. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت: تبدیل‌های فوریه زمان کوتاه و موجک در تمیز دادن علامت‌های جداره استوانه‌های سالم و معیوب بسیار کارآمد هستند و از هر دو آن‌ها می‌توان برای شناسایی و حتی پیش‌بینی وجود ترک در جداره استوانه بهره برد. جایگزینی این روش، با روش‌های وقت‌گیر و هزینه‌بر کنونی می‌تواند گامی به سوی بهینه‌سازی و ارتقای روش‌های تعمیر در مرکز تعمیرات لکوموتیو بافق باشد.

اما آنچه که شاید سوال شود، این است که کدامیک از این روش‌ها بر دیگری اولویت دارد. در جواب این سوال و از مقایسه دو روش پردازشی به کار گرفته شده در تحقیق حاضر می‌توان نکات زیر را در مورد مزایا و معایب این دو روش در بحث حاضر، بیان کرد:

- تبدیل موجک وابستگی شدیدی به نوع تابع پایه انتخابی و مقیاس انتخابی دارد.
- زمان و پیچیدگی محاسباتی تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه زمان- کوتاه بسیار بیشتر است. گرچه با افزایش توان محاسباتی رایانه‌های امروزی، شاید این مورد را دیگر نتوان به عنوان محدودیت در نظر گرفت.
- بسیاری از ابزارهای تحلیل ارتعاشی جدید، دارای قابلیت تحلیل فوریه زمان- کوتاه هستند. بنابراین در صورت استفاده از این نوع دستگاه‌ها، فرد داده‌بردار در همان زمان داده‌برداری می‌تواند از سلامت یا معیوب بودن جداره استوانه آگاه یابد و نیازی به انتقال داده‌ها به رایانه برای تحلیل نیست. بدینگونه علاوه بر کاهش مدت زمان تشخیص عیب، از پیچیدگی‌های پایش وضعیت نیز کاسته می-

- [14] Z. Feng, M. Liang, F. Chu, Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 38, No. 1, pp. 165-205, 2013
- [15] L. Cohen, *Time-Frequency analysis*, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1995
- [16] V. Wowk, *Machinery Vibration*, pp. 32-42: Yazd University Publications, 2012
- [17] S. A. Dipak, *A Wavelet Packet Based Sifting Process and Its Application for Structural Health Monitoring*, MS Thesis, Worcester Polytechnic Institue, US, 2004
- [18] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck, *Discrete Time Signal Processing*, 2nd ed., New Jersey, US: Prentice Hall, 1999
- [19] A. Chakraborty, B. Basu, M. Mitra, Identification of modal parameters of a mdof system by modified L-P wavelet packets, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 295, No. 3-5, pp. 827-837, 2006
- [20] D. E. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components; Methods with Applications*, USA: John Wiley & Sons, 2007
- [21] R. Perera, D. Bueso-Inchausti, A unified approach for the static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 11, pp. 2728-2737, 10//, 2010
- [22] C. K. Chui, *An Introduction to Wavelets*: Acad.Press, 1992.
- [23] Sendig. *Accelerometers*, Accessed 1/31/2015; <http://sendig.com.cn/old/L14%20Accelerometer.html>
- [24] Sendig. *Successful fault diagnosis cases*, Accessed 24/12/2014, <http://www.sendig.com.cn/0326/en/OthersList.asp>
- implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 7, pp. 1483-1510, 2006
- [5] R.B. Randall, , *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*: Wiley, 2011
- [6] N. Jones, Y. H. Li, A review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines, *Tribotest*, Vol. 6, No. 3, pp. 267-291, 2000
- [7] C. M. Branco, V. Infante, A. Sousa e Brito, R. F. Martins, A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 4, pp. 403-421, 2002
- [8] W. Hormaza, L. Mateus, A. Maranon, Failure analysis of a cylinder sleeve from a turbocharged diesel engine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 5, pp. 1355-1365, 2009
- [9] S. Klinchaeam, P. Nivesrangsan, M. Lokitsangthong, Condition monitoring of a small four-stroke petrol engine using vibration signals, *KMITL Science and Technology Journal*, Vol. 9, pp. 9-17, 2009
- [10] F. J. Espadafor, J. B. Villanueva, M. T. García, E. C. Trujillo, Analysis of a diesel generator cylinder failure, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 17, No. 4, pp. 913-925, 2010
- [11] A. Mokhtary, V. Sarvestan, M. Rafeeyan, A. Khodaie, Vibration analysis and fault detection of faulty locomotives, in *Acoustic and vibration International Conference*, Iran, Tehran, 2012
- [12] C. Scheffer, P. Girdhar, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*: Elsevier, 2004
- [13] J. Antoni, J. Daniere, F. Guillet, Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. Part I - A methodology for condition monitoring, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 257, No. 5, pp. 815-837, 2002