

بهبود عیب‌یابی یاتاقان به وسیله تبدیل بسته موجک

محمد رضا قاسمی^۱، حمید سعیدی سورک^{ب*}

^۱ ایران، یزد، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^ب ایران، یزد، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی برق، ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشیار.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: saeedi@yazd.ac.ir

چکیده

با توجه به کاربرد فراوان یاتاقان‌ها در صنعت و اهمیت تشخیص زودهنگام خرابی آن‌ها در مراحل ابتدایی خرابی جهت جلوگیری از هرگونه ایجاد خسارت، در این مقاله سعی شده است یکی از روش‌های مورد استفاده برای تشخیص خرابی اجزای یاتاقان‌ها با استفاده از پردازش صورت گرفته بر روی سیگنال ارتعاشی یاتاقان‌ها به وسیله تبدیل بسته موجک مورد بررسی قرار داده شود و در ادامه آن اشکالات روش مطرح شده بررسی و روش اصلاحی مطرح گردد. در ادامه با آزمایش این روش بر روی سیگنال‌های ارتعاشی یاتاقان‌ها و بررسی تاثیر انواع موجک جهت به کار بردن در تبدیل بسته موجک، دقت هر یک از موجک‌ها در تشخیص صحیح وضعیت یاتاقان آزمایش شده و با یکدیگر مقایسه کردند و در انتها روش اصلاحی بیان شده که بر پایه تبدیل موجک می‌باشد با روش دیگری که مبنی بر کر توگرام و اعمال فیلتر میان‌گذر بر روس سیگنال ارتعاشی یاتاقان جهت تشخیص عیب یاتاقان می‌باشد مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: یاتاقان، عیب‌یابی، تبدیل بسته موجک، طیف پوش

۱- مقدمه

یاتاقان‌ها از رایج‌ترین اجزای مکانیکی هستند که تقریباً در انواع ماشین‌های دوار حضور داشته و از اهمیت بالایی نیز برخوردارند. خرابی یاتاقان یکی از مهمترین دلایل خرابی در ماشین آلات دوار است و چنین خرابی می‌تواند منجر به خسارت‌های سنگین شود. به منظور جلوگیری از وقوع این نوع خرابی‌ها تکنیک‌های مختلف نظارت بر وضعیت یاتاقان توسعه داده شده است [۱]. روش‌های تشخیص عیب یاتاقان می‌تواند به طور کلی مبتنی بر زمان، فرکانس و بر اساس زمان-فرکانس باشد. مقالات فراوانی در تشخیص خطاهای یاتاقان با استفاده از تحلیل سیگنال صوتی [۲]، سیگنال جریان موتور [۳] و سیگنال ارتعاش وجود دارد در میان آن‌ها، تجزیه و تحلیل سیگنال ارتعاش به دلیل مزیت ذاتی آن در آشکار کردن خرابی یاتاقان، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۴][۵][۶][۷] ولی همواره یک مشکل در عیب‌یابی از سیگنال ارتعاشی وجود دارد. طیف یک یاتاقان معیوب همواره دارای هارمونیک‌های دامنه در فرکانس‌های مشخصه یاتاقان می‌باشد اما سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده با فرکانس‌های مختلفی از محیط و تجهیز ترکیب شده است که این موضوع بررسی هارمونیک‌های دامنه در فرکانس‌های مشخصه به خصوص برای یاتاقان‌هایی که خرابی

آن‌ها در مراحل ابتدایی خود می‌باشد را با مشکل روبه‌رو می‌کند در نتیجه نویززدایی از سیگنال‌های ارتعاشی و بررسی انواع روش‌های آن اهمیت پیدا می‌کند.

بررسی سیگنال ارتعاشی در حوزه زمان-فرکانس یکی از موثرترین روش‌ها برای بررسی و نویززدایی سیگنال می‌باشد. روش‌های موثری برای بررسی سیگنال در حوزه زمان-فرکانس جهت تشخیص خرابی یاتاقان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند: تبدیل فوریه زمان کوتاه^۱، تبدیل موجک^۲، تبدیل پیوسته^۳، تبدیل بسته موجک^۴ و تبدیل موجک تجربی^۵. در این میان انواع روش‌های تبدیل موجک به دلیل انعطاف پذیری خود به عنوان یکی از گسترده‌ترین ابزار در زمینه پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبدیل بسته موجک تعمیم تبدیل موجک می‌باشد که قابلیت‌های آن از جمله ویژگی این تبدیل در تجزیه سیگنال و درخت تجزیه حاصل شده از آن، امکان حذف نویز از سیگنال را به نحو مطلوبی مهیا می‌کند [۸] که در ادامه جهت پردازش سیگنال ارتعاشی و عیب-یابی از یاتاقان مورد استفاده قرار گرفته است.

آنتونی [۷] در پژوهشی با رسم کرتوگرام^۶ سیگنال و استفاده از آن جهت محاسبه یک فیلتر میان‌گذر، طیف پوش سیگنال ارتعاشی را پس از فیلتر کردن آن جهت تشخیص خرابی مورد بررسی قرار داده است. از سوی دیگر نیکولائو و آنتونیادیس [۹] در پژوهشی دیگر به بررسی عیب‌یابی یاتاقان با استفاده از تبدیل بسته موجک می‌پردازند و با تجزیه سیگنال در سطح مشخصی و انجام پردازش بر روی سیگنال و نویززدایی از آن وضعیت یاتاقان تشخیص داده می‌شود. در این مقاله سعی بر آن است که روش نیکولائو و آنتونیادیس که مبنی بر تبدیل بسته موجک است را بررسی کرده و اشکالات آن مطرح و روش اصلاحی مناسبی پیشنهاد شود و در ادامه روش اصلاحی گفته شده با موجک‌های مختلفی آزمایش می‌شود. همچنین دقت دو پژوهش مذکور که جهت عیب‌یابی یاتاقان هر کدام از یک روش مختلف زمان-فرکانس در پردازش سیگنال ارتعاشی استفاده کرده‌اند با یکدیگر مقایسه گردند. یکی دیگر از مزیت-های روش اصلاحی گفته شده که در بخشی از آن، از روش موجود در [۷] استفاده گردید است می‌توان به تشخیص عیب یاتاقان بدون بررسی هارمونیک‌ها در فرکانس مشخصه و مداخله نیروی انسانی اشاره کرد.

در ادامه، بخش‌های این مقاله بدین صورت تدوین یافته‌اند: در بخش دوم فرکانس‌های مشخصه یاتاقان را معرفی کرده و محاسبه هر یک از این فرکانس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم مروری بر تبدیل بسته موجک و تئوری‌های حاکم بر آن شده است. نحوه عیب‌یابی از سیگنال ارتعاشی یاتاقان‌ها به کمک تبدیل بسته موجک و تشریح یکی از روش‌های استفاده شده این زمینه در بخش چهارم انجام شده است. در ادامه این بخش به اشکالات موجود در این روش اشاره شده و راهکاری جهت تصحیح این اشکالات بیان گردیده است. در بخش پنجم نیز با توجه به روش پیشنهادی بیان شده در بخش چهارم، سیگنال ارتعاشی دریافتی از تعدادی یاتاقان آنالیز و عیوب احتمالی آن با موجک‌های مختلف استخراج شد. در انتها نیز روش اصلاحی مبتنی بر تبدیل موجک با روش موجود در [۷] مقایسه گردید.

۲- فرکانس‌های مشخصه یاتاقان

یک ماشین دارای یاتاقان که با سرعت معینی کار می‌کند را در نظر بگیرید. اگر یک عیب در یکی از اجزای یاتاقان ایجاد شود طیف ارتعاش یاتاقان تغییر می‌کند و فرکانس‌های تولید شده ناشی از عیوب یاتاقان‌ها را فرکانس‌های عیب یاتاقان یا فرکانس‌های مشخصه یاتاقان می‌نامند که به طور کلی به صورت f_{fault} نمایش داده می‌شود و هر جزء یاتاقان دارای یک فرکانس مشخصه است. در یک یاتاقان معیوب دامنه طیف پوش آن در فرکانس مشخصه و هارمونیک‌های آن به دلیل افزایش انرژی ارتعاشی به صورت پیک رخ خواهد داد. بررسی دامنه فرکانس‌های مشخصه در طیف پوش سیگنال ارتعاشی ثبت شده به تشخیص عیب و جزء معیوب کمک می‌-

^۱ Short-time fourier transform (STFT)

^۲ Wavelet transform (WT)

^۳ Continuous wavelet transform (CWT)

^۴ Wavelet packet transform (WPT)

^۵ Empirical wavelet transform (EWT)

^۶ Kurtogram

کند. وجود عیب در اجزای یاتاقان مانند حلقه داخلی، حلقه بیرونی، ساچمه و قفسه، فرکانس مشخصه‌ای را ایجاد می‌کند که از نظر تئوری از معادلات زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

الف) فرکانس گذر ساچمه بر روی حلقه داخلی^۱ (BPFI): از این فرکانس برای تشخیص عیب حلقه داخلی استفاده می‌شود.

$$BPFI = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (1)$$

ب) فرکانس گذر ساچمه بر روی حلقه بیرونی^۲ (BPFO): از این فرکانس برای تشخیص عیب حلقه بیرونی استفاده می‌شود.

$$BPFO = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (2)$$

ج) فرکانس چرخش ساچمه^۳ (BSF): از این فرکانس برای تشخیص عیب ساچمه یاتاقان استفاده می‌شود.

$$BSF = \frac{D}{2d} \left[\left(1 + \frac{d}{D} \cos \varphi\right)^2\right] \quad (3)$$

د) فرکانس دنباله اساسی^۴ (FTF): این فرکانس برای تشخیص عیب قفسه یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (4)$$

که در روابط فوق d قطر ساچمه یاتاقان، D قطر گام یاتاقان، f_r فرکانس چرخش شفت، n تعداد ساچمه یاتاقان و φ زاویه تماسی یاتاقان می‌باشد. فرض بر این است که ساچمه‌ها هیچگونه حرکت لغزشی نداشته و تنها دارای حرکت غلتشی خالص باشند، اما در واقعیت اندکی لغزش وجود دارد که در صورت در نظر گرفتن این لغزش فرکانس‌های مشخصه اندکی تغییر می‌کنند [۱۱]، اما بیشتر به سرعت شفت و نوع یاتاقان بستگی دارد.

۳- تبدیل بسته موجک

موجک‌ها مجموعه‌ای از توابع ریاضی‌اند که برای تجزیه سیگنال‌های پیوسته و گسسته به مولفه‌های فرکانسی خود براساس دو عمل اصلی انتقال و مقیاس به کار می‌روند که در این تبدیل، رزولوشن هر مولفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است. به طور کلی تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه محلی سازی بهتری را دارا است. تبدیل بسته موجک در واقع تعمیم تبدیل موجک می‌باشد که در هر سطح آن ضرائب جزئی و ضرائب تقریب به دو قسمت تقسیم می‌شوند. در تبدیل بسته موجک در هر مرحله ضرائب به دو قسمت تقسیم می‌شوند و پس از تقسیم، یک بردار تقریب و یک بردار ضرائب به دست می‌آید. تجزیه سیگنال به صورت متوالی در هر دو قسمت فرکانس بالا و پایین تکرار می‌شود تا به مجموعه‌های بعدی تجزیه برسد. هر مولفه در درخت تبدیل بسته موجک، یک مولفه فیلتر شده است. به طوری که پهنای باند این فیلترها با افزایش سطح تجزیه، کاهش می‌یابد. همچنین کل درخت نیز به منزله یک بانک فیلتر در نظر گرفته می‌شود. در بالای درخت تجزیه وضوح زمانی نسبت به وضوح فرکانسی مناسب‌تر و در پایین درخت تجزیه وضوح فرکانسی نسبت به وضوح زمانی مناسب است. کتابخانه تبدیل بسته موجک $W_{j,n,k}(t)$ مجموعه‌ای از رابطه‌ی (۵) می‌باشد که از توالی روابط (۶) به دست می‌آید [۱۲].

$$W_{j,n,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} W_n(2^{-j}t - k) \quad n \in N, \quad j, k \in Z \quad (5)$$

$$W_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h(k) W_n(2t - k)$$

^۱ Ball pass frequency Inner race

^۲ Ball pass frequency outer race

^۳ Ball spin frequency

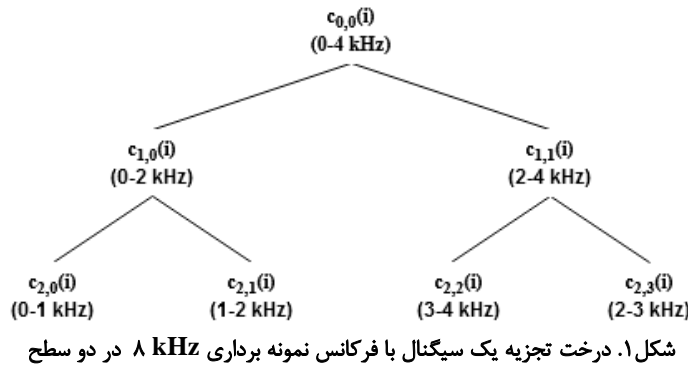
^۴ Fundamental train frequency

$$W_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g(k)W_n(2t-k) \quad (۶)$$

همانطور که از رابطه (۵) مشخص است بسته موجک دارای سه اندیس j ، k و n می‌باشد که به ترتیب اندیس‌های مقیاس، جابه‌جایی و نوسان نامیده می‌شوند و موجک‌های $W_n(t)$ از روابط (۶) به دست می‌آید. در رابطه (۶) $h(k)$ فیلتر پایین‌گذر و $g(k)$ فیلتری بالا‌گذر است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (۷)$$

شکل (۱) یک نمونه از یک درخت بسته موجک از یک سیگنال با فرکانس نمونه برداری ۸ kHz می‌باشد که در دو سطح تجزیه شده است. هر گره از درخت بسته موجک به صورت بردار $c_{j,n}(i)$ نمایش داده می‌شود که j بیانگر سطح تجزیه و n موقعیت گره در سطح تجزیه است. در هر سطح تجزیه j ، تعداد 2^j گره وجود دارد که مقدار n برای نام گذاری گره‌ها برابر $n = 0, \dots, 2^j - 1$ است. طول بردار $c_{j,n}(i)$ برابر با $N/2^j$ است که مقدار N برابر با طول بردار اولیه (بردار در سطح 0 تجزیه) می‌باشد. با تنظیم تمام ضرایب موجود در سطح j به سطح صفر و با پیاده‌سازی معکوس درخت بسته موجک از هر بردار $c_{j,n}(i)$ یک سیگنال بازسازی شده $R_{j,n}$ به طول N را می‌توان به دست آورد.



۴- عیب‌یابی یاتاقان

۴-۱ عیب‌یابی یاتاقان با استفاده از تبدیل بسته موجک [۹]

یک خطای موضعی روی یاتاقان ضربه‌های دوره‌ای متوالی ایجاد می‌کند که اندازه و دوره تکرار آن توسط سرعت چرخش شفت، نوع خطا و هندسه یاتاقان تعیین می‌شود. هدف روش پیشنهادی جداسازی اطلاعات فرکانس‌های مربوط به خرابی با سایر فرکانس‌های موجود در سیگنال ارتعاشی ثبت شده از یاتاقان و با انتخاب یک بخش مشخص از محدوده فرکانسی سیگنال، که اطلاعاتی در مورد خرابی را دارا است، می‌باشد. همانطور که در بخش قبل به آن اشاره شد در سطح j از تجزیه تعداد 2^j بردار $c_{j,n}(i)$ وجود دارد که $n = 0, 1, \dots, 2^j - 1$ و $i = 1, 2, \dots, I$ است که هر بردار بیانگر محدوده فرکانسی مشخصی از سیگنال می‌باشد و پهنای هر بازه فرکانسی از بردارهای تجزیه که با f_j نشان داده می‌شود با توجه به رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$f_j = \frac{f_s}{2^{j+1}} \quad (۸)$$

معمولا وجود حداقل دو الی سه هارمونیک از فرکانس مشخصه یاتاقان در طیف فرکانسی آن می‌تواند نشان دهنده وجود خرابی در یاتاقان باشد در نتیجه پهنای بازه فرکانسی هر بردار باید از حداقل از سه برابر فرکانس مشخصه یاتاقان بزرگتر باشد یعنی $f_j > 3f_{fault}$ که در نتیجه سطح تجزیه مناسب در درخت تجزیه از رابطه (۹) محاسبه می‌شود که البته به صورت تجربی سطح تجزیه ۳ یا ۴ برای رسم درخت تجزیه مناسب می‌باشد.

$$j < \log_2 \left(\frac{f_s}{3f_{fault}} \right) - 1 \quad (۹)$$

در تجزیه و تحلیل سیگنال ارتعاشی یاتاقان تمامی اجزای یاتاقان‌ها و فرکانس‌های مشخصه یاتاقان را جهت عیب‌یابی مورد بررسی قرار می‌دهیم در نتیجه پهنای بازه فرکانسی بردار باید از ۳ برابر هر کدام از فرکانس‌های مشخصه یاتاقان بزرگتر باشد بنابراین پیشنهاد می‌گردد که بزرگترین فرکانس مشخصه یاتاقان که همواره برابر با BPF_I می‌باشد مدنظر قرار گرفته شود که f_j برابر با $f_j > 3f_{fault}$ می‌شود و رابطه (۹) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$j < \log_2 \left(\frac{f_s}{3BPF_I} \right) - 1 \quad (10)$$

اگر همه بردارهای $c_{j,n}(i)$ حفظ شوند، سیگنال اصلی را می‌توان به طور کامل بازسازی کرد. با این حال، با توجه به روش عیب‌یابی پیشنهادی، تنها بخشی از سیگنال که حاوی اطلاعات لازم جهت تشخیص عیب در یاتاقان است، باید حفظ شود. برای تخمین اطلاعات مفید موجود در هر بردار $c_{j,n}(i)$ چندین معیار وجود دارد که معمولاً بر اساس توابع هزینه است، مانند تعداد ضرایب بردار بالای یک آستانه، آنتروپی یا لگاریتم انرژی و... در این روش عیب‌یابی، برای تشخیص خطا از انرژی ضرایب بالای یک آستانه به عنوان معیاری برای انتخاب بهترین بردار استفاده می‌شوند. در ادامه برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها مطابق [۹] به صورت زیر عمل می‌شود:

مرحله ۱: سیگنال ارتعاشی S را با توجه به رابطه (۱۰) در j سطح تجزیه کرده که در نتیجه آن تعداد 2^j بردار $c_{j,n}(i)$ حاصل

می‌شود.

مرحله ۲: با توجه به رابطه (۱۱) و (۱۲) میانگین m و انحراف معیار استاندارد σ را برای تمامی ضرائب موجود در سطح j محاسبه می‌کنیم. از آنجا که نشانه‌های خرابی یاتاقان در مراحل ابتدایی در فرکانس‌های بالا قابل مشاهده می‌باشد لذا تجزیه و تحلیل سیگنال در فرکانس‌های پایین برای تشخیص زود هنگام یاتاقان مناسب نمی‌باشد در نتیجه از بررسی بردار ۰ سطح نهایی تجزیه خودداری می‌کنیم. این بردار برای بررسی عیب‌هایی که در فرکانس‌های پایین نمایان می‌شوند مانند نابالانسی جرمی روتور یا ناهمراستایی روتور مناسب می‌باشد.

$$m = \frac{1}{I(2^j - 1)} \sum_{n=1}^{2^j-1} \sum_{i=1}^I |c_{j,n}(i)| \quad (11)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{I(2^j - 1)} \sum_{n=1}^{2^j-1} \sum_{i=1}^I (|c_{j,n}(i)| - m)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

مرحله ۳: با استفاده از آستانه‌گذاری سخت مقادیر ضرائب هر بردار را با توجه به رابطه (۱۳) بازنویسی می‌کنیم به نحوی که با

توجه به مقدار m و σ محاسبه شده در مرحله قبل مقدار آستانه را به صورت $t_{hr} = m + \sigma$ تعریف می‌کنیم و مقادیر بازنویسی شده بردارها را به صورت $C_{j,n}(i)$ تعریف می‌کنیم.

$$|c_{j,n}(i)| \leq t_{hr} \rightarrow c_{j,n}(i) = 0 \quad (13)$$

مرحله ۴: بردار انرژی $E_j(n)$ را با توجه به مقادیر بازنویسی شده بردارها و از رابطه (۱۴) محاسبه کرده و بردار w ام را به نحوی

که $E_j(w) = \text{Max}(E_j(n))$ باشد، به دست می‌آوریم.

$$E_j(n) = \sum_{i=1, \dots, I} C_{j,n}(i)^2 \quad (14)$$

مرحله ۵: در ادامه تحلیل تنها برای بردارهایی ادامه پیدا می‌کند که در رابطه (۱۵) صدق کند که در این رابطه اندازه K_{dif} بین

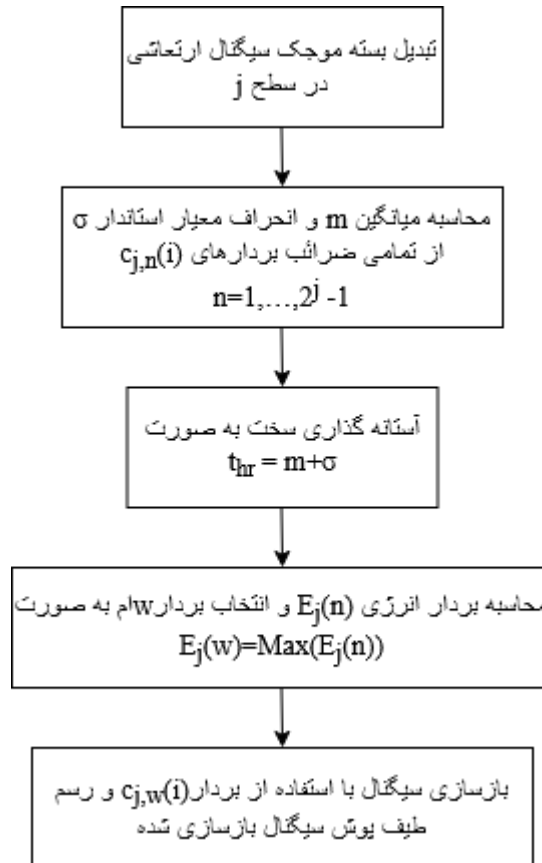
۱/۵ الی ۲ می‌باشد و این پارامتر به نوعی، یک پارامتر کنترلی می‌باشد به نحوی که مقدار آن باید به گونه ای انتخاب شود که بردار $E_j(n)$ یکتا و $n = w$ باشد، اما در صورت یکتا نبودن مقدار آن به ازای K_{dif} مختلف، تجزیه را یک سطح دیگر ادامه داده و مجدداً مراحل ۱ تا ۵ را تکرار کرده تا در سطح نهایی تجزیه که برابر با j_f است $E_{j_f}(n)$ یکتا باشد سپس بردار $c_{j_f,w}(i)$ به عنوان بردار مناسب جهت عیب‌یابی یاتاقان مورد پردازش قرار می‌گیرد.

$$E_j(n) > \frac{E_j(w)}{K_{dif}} \quad (15)$$

مرحله ۶: در سطح نهایی تجزیه بردار $P_{j_f, w}(i) = c_{j_f, w}(i)^2$ را محاسبه کرده در ادامه درخت تجزیه‌ای تشکیل می‌دهیم که در j سطح، تجزیه شده و مقدار بردار w در سطح تجزیه j برابر با بردار $P_{j_f, w}(i)$ و مقادیر سایر بردارهای آن برابر با صفر می‌باشد. با استفاده از معکوس تبدیل بسته موجک سیگنال S را بازسازی کرده و سیگنال R حاصل می‌شود. در ادامه با بررسی طیف پوش سیگنال بازسازی شده R به بررسی خرابی یاتاقان‌ها پرداخته و با بررسی چندین موجک مختلف برای تبدیل بسته موجک، به این نکته می‌پردازیم که هر یک از موجک‌های مختلف چه تاثیری در تشخیص خرابی یاتاقان‌ها دارند و در بین موجک‌های مورد بررسی در این مقاله کدام موجک در تشخیص وضعیت یاتاقان عملکرد مناسب‌تری را دارا است.

۲-۴ روش اصلاحی بخش ۱-۴

عیب‌یابی به روش گفته شده در ۴-۱ همواره ممکن است برای تمامی سیگنال‌های ارتعاشی صدق نکند و دلیل آن شرط گفته شده در مرحله ۵ می‌باشد، ممکن است در سطح تجزیه یکسان، چند بردار انرژی مقادیر نزدیک به یکدیگر را دارا باشند در نتیجه به ازای K_{dif} مختلف و حتی افزایش سطح تجزیه، تعداد بیشتر از یک $E_j(n)$ برای رابطه (۱۵) برقرار باشد و هرگز بردار یکتای $E_j(n)$ خواسته شده در مرحله ۵ را به دست نیاوریم، لذا برای رفع این مشکل می‌توان برداری که دارای بیشترین انرژی است را بدون استفاده از پارامتر کنترلی K_{dif} ، به عنوان بردار مناسب جهت ادامه روند عیب‌یابی یاتاقان در نظر گرفت که نتیجه به صورت $E_j(n) = E_j(w) = \text{Max}(E_j(n))$ به دست خواهد آمد.



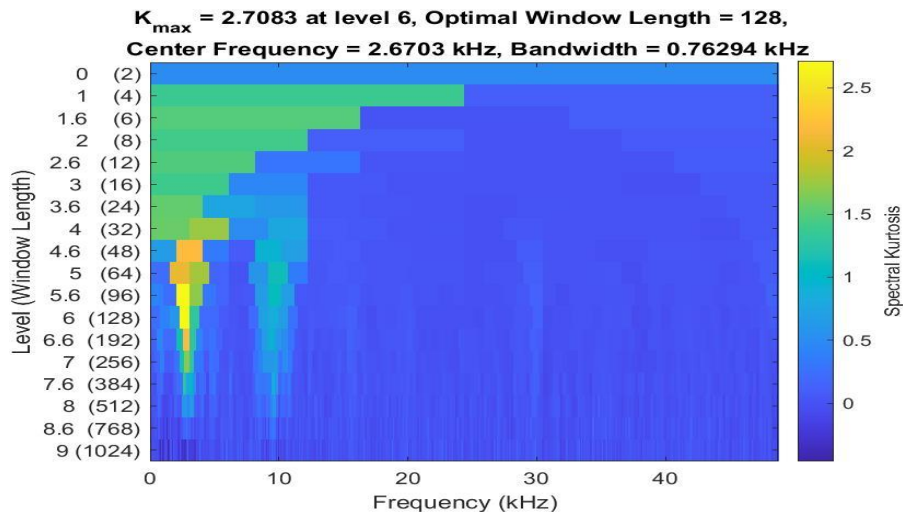
شکل ۲. دیاگرام روش اصلاحی تشخیص خرابی با استفاده از تبدیل بسته موجک

موضوع دیگری نیز که در ادامه می‌توان به آن اشاره کرد این است تشخیص وضعیت یاتاقان‌ها بدون بررسی هارمونیک‌های فرکانس‌های مشخصه نیز امکان پذیر است بدین صورت که اگر Amp_{BPFI} اندازه دامنه در $BPFI$ و Amp_{BPFO} اندازه دامنه در $BPFO$ باشد وضعیت یاتاقان به صورت زیر می‌باشد [۷].

- $\log\left(\frac{Amp_{BPFI}}{Amp_{BPFO}}\right) \leq -1.5$ یاتاقان دارای حلقه خارجی معیوب می‌باشد.
- $-1.5 < \log\left(\frac{Amp_{BPFI}}{Amp_{BPFO}}\right) \leq 0.5$ یاتاقان سالم می‌باشد.
- $0.5 < \log\left(\frac{Amp_{BPFI}}{Amp_{BPFO}}\right)$ یاتاقان دارای حلقه داخلی معیوب می‌باشد.

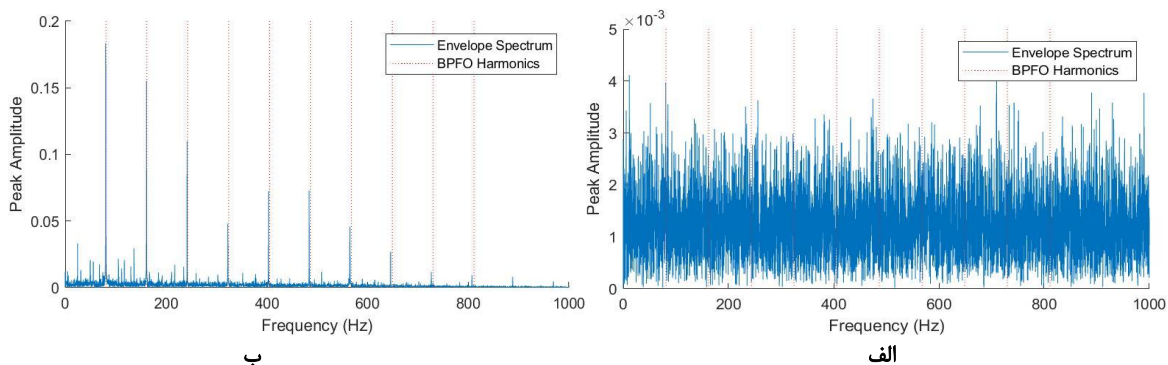
۳-۴ تشخیص خرابی یاتاقان با استفاده از روش [۷]

در این روش جهت نوپزدایی از سیگنال و عیب‌یابی از یاتاقان نیازمند به طراحی یک فیلتر میان‌گذر می‌باشیم با رسم کرتوگرام سیگنال، مشخصه‌های لازم برای طراحی فیلتر میان‌گذر به دست آورده می‌شود. شکل (۳) کرتوگرام رسم شده یک سیگنال نوعی با استفاده از Matlab را نشان می‌دهد که دو مشخصه از فیلتر میان‌گذر شامل: فرکانس مرکزی برابر با ۲/۶۷۰۳ kHz و پهنای باند فیلتر برابر با ۰/۷۶۲۹۴ kHz نمایش داده است، با استفاده از این دو مشخصه فرکانس بالا و فرکانس پایین فیلتر میان‌گذر محاسبه می‌گردد.



شکل ۳. کرتوگرام سیگنال ارتعاشی یاتاقان

در ادامه با محاسبه فرکانس بالا و فرکانس پایین، فیلتر میان‌گذری را طراحی کرده و بر سیگنال ارتعاشی اعمال می‌کنیم با رسم طیف پوش سیگنال فیلتر شده، هارمونیک‌ها در فرکانس BPFO نمایان می‌شوند که نشان از معیوب بودن حلقه خارجی یاتاقان می‌باشد.

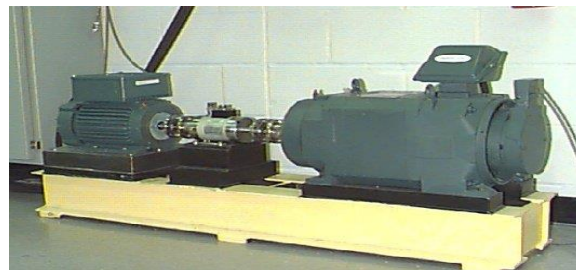


شکل ۴. الف. طیف پوش سیگنال ارتعاشی قبل از اعمال فیلتر میان‌گذر

ب. طیف پوش سیگنال ارتعاشی بعد از اعمال فیلتر میان‌گذر

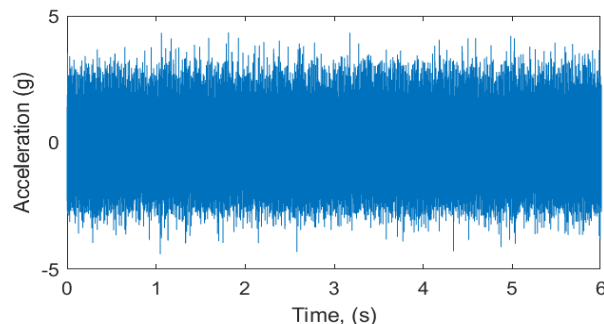
۵- آزمایشات

در این بخش تشخیص خرابی یاتاقان‌ها را که در بخش قبل توضیح داده شد بررسی می‌کنیم. بخشی از سیگنال‌های ارتعاشی که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته می‌شود از مجموعه آزمایشگاهی ارائه شده توسط وب سایت $CWRU^1$ گرفته شده‌اند [۱۳]. این مجموعه از داده‌ها همواره در پژوهش‌های مختلف در مورد تشخیص خرابی یاتاقان‌ها توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است. تصویر سیستم آزمایشگاهی که داده‌های یاتاقان با آن ثبت شده است مطابق شکل (۵) می‌باشد. از اجزای اصلی آن می‌توان به موتور القایی دارای ۲ اسب بخار به عنوان محرک اصلی، کوپلینگ و دینامومتر اشاره کرد که این سیستم با استفاده از انکودر در سرعت‌های مختلف قابل کارکرد می‌باشد. داده‌های ارتعاشی با استفاده از شتاب‌سنج‌هایی که با پایه‌های مغناطیسی به محفظه موتور متصل شده بودند و با استفاده از یک دستگاه ثبت داده ۱۶ کانالی DAT جمع‌آوری و در محیط Matlab پردازش شدند. شتاب‌سنج‌ها در موقعیت ساعت ۱۲ هم در انتهای محرک و هم در انتهای فن محفظه موتور قرار گرفتند. یاتاقان مورد استفاده در این مجموعه داده ارتعاشی از نوع SKF 6205-2RS JEM بوده که عیوب ایجاد شده در یاتاقان‌ها به کمک ماشین‌کاری الکتریکی ایجاد شده‌اند. بخش دیگری از سیگنال‌های ارتعاشی بررسی شده داده‌های قرار داده ایجاد متعلق به سایت Matlab بوده که در آن داده‌های ثبت شده از یاتاقان‌ها به صورت یک فایل شامل سیگنال ارتعاشی، سرعت چرخش شفت، فرکانس‌های مشخصه یاتاقان، فرکانس نمونه برداری می‌باشد [۱۴].



شکل ۵. سیستم آزمایشگاهی CWRU

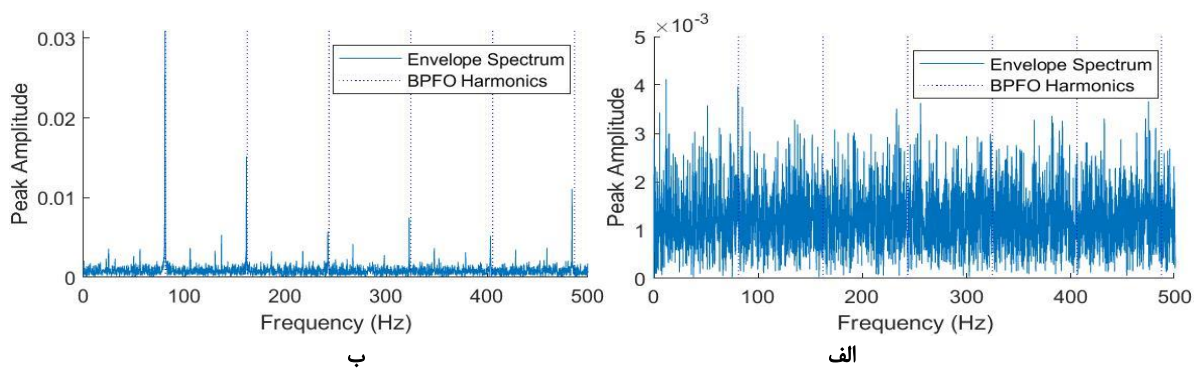
شکل (۶) سیگنال ارتعاشی یک یاتاقان دارای سرعت کاری ۱۵۰۰RPM و فرکانس نمونه‌برداری $f_s=97656\text{Hz}$ که $BPFO=81/125\text{Hz}$ است را نشان می‌دهد.



شکل ۶. سیگنال ارتعاشی یاتاقان

طیف پوش سیگنال قبل از انجام پردازش‌های گفته شده در بخش ۴ به صورت شکل (۷) الف می‌باشد و شکل (۷) ب طیف پوش سیگنال را پس پردازش به وسیله تبدیل بسته موجک که با استفاده از موجک db2 در ۳ سطح تجزیه گردیده و سپس بر اساس بردار $p=2$ بازسازی شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در مقایسه این دو طیف قابل مشاهده است بعد از پردازش به وسیله تبدیل بسته موجک، وجود هارمونیک‌های دامنه بر روی BPFO به خوبی قابل نمایان است و همانطور که در قبل به آن اشاره شده وجود حداقل ۲ الی ۳ هارمونیک از یکی از فرکانس‌های مشخصه یاتاقان می‌تواند نشان‌دهنده وجود خرابی باشد که هر فرکانس مشخصه نیز بیانگر یک نوع خرابی می‌باشد. پس وجود هارمونیک‌های دامنه در BPFO، می‌تواند نشان‌دهنده خرابی حلقه خارجی باشد.

¹ Case Western Reserve University



شکل ۷. الف. طیف پوش سیگنال ارتعاشی یک یاتاقان دارای حلقه خارجی معیوب قبل از پردازش سیگنال توسط تبدیل بسته موجک
ب. طیف پوش سیگنال ارتعاشی یک یاتاقان دارای حلقه خارجی معیوب پس از پردازش سیگنال توسط تبدیل بسته موجک

در ادامه ۷۶ سیگنال ارتعاشی ثبت شده از انواع یاتاقان‌ها شامل ۷ سیگنال ارتعاشی از یاتاقان سالم، ۳۵ سیگنال ارتعاشی از یاتاقان دارای حلقه داخلی معیوب و ۳۴ سیگنال ارتعاشی از یاتاقان دارای حلقه خارجی معیوب را با توجه به روش گفته شده و استفاده از چهار نوع موجک مختلف مورد بررسی قرار داده شد و درصد دقت هر یک از موجک‌ها در تشخیص وضعیت یاتاقان محاسبه گردید که نتایج حاصل شده در جدول زیر مشاهده می‌شود. نتایج جدول (۱) حاکی از آن است که موجک‌های بررسی شده دارای اختلاف جزئی در تشخیص وضعیت یاتاقان می‌باشند و موجک $fk8$ به نسبت سه موجک دیگر دقت تقریباً بالاتری را در تشخیص خرابی یاتاقان از خود نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول (۲) مشاهده می‌شود که تشخیص خرابی به استفاده از تبدیل موجک نتایج نسبتاً بهتری را در مقایسه با روش [۷] دارا است.

جدول ۱. دقت انواع موجک استفاده شده در تبدیل بسته موجک جهت تشخیص وضعیت یاتاقان

موجک	db2	sym5	coif5	fk8
درصد تشخیص	٪۸۴.۲	٪۸۶.۸	٪۸۵.۵	٪۸۸.۱

جدول ۲. بررسی دو روش عیب‌یابی یاتاقان

روش عیب‌یابی	موجک ($fk8$)	Kurtogram
درصد تشخیص	٪۸۸.۱	٪۸۲.۹

۶- نتیجه‌گیری

یاتاقان‌ها از پرکاربرترین تجهیزات در صنعت می‌باشند که همانطور که به آن اشاره شد تشخیص به موقع خرابی باعث جلوگیری از ایجاد خسارت می‌گردد. روش‌های متفاوتی جهت نویززدایی از سیگنال ارتعاشی یاتاقان به منظور تشخیص وضعیت یاتاقان وجود دارد که این مقاله از تبدیل بسته موجک استفاده گردیده شد. با بررسی انواع موجک و دقت هر یک از آن‌ها در عیب‌یابی یاتاقان این نکته مشهود گشت که به طور کلی دقت موجک‌های بررسی شده در تشخیص خرابی یاتاقان اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند ولی موجک $fk8$ به نسبت دیگر موجک‌های بررسی شده در تشخیص وضعیت یاتاقان‌ها مناسب‌تر بود. همچنین بررسی و مقایسه روش اصلاحی تبدیل بسته موجک گفته شده و روش مبنی کرتوگرام و فیلتر میان‌گذر جهت نویززدایی و تشخیص وضعیت یاتاقان، حاکی از آن بود که با وجود نزدیک بودن دقت تشخیص وضعیت یاتاقان در دو روش، روش اصلاحی بسته موجک عملکرد بهتری از خود نشان داده

است. نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره کرد حجم محاسبات استفاده شده در دو روش می‌باشد که محاسبات انجام شده با استفاده از تبدیل بسته موجک نسبت به روش دیگر از حجم کمتری برخوردار بوده و در عین حال سادگی پیاده‌سازی این روش کمک شایانی را به کاربر می‌کند.

مراجع

1. Sh. Patidar, P. Kummar soni, "An overview on vibration analysis techniques for the diagnosis of rolling element bearing faults," *International journal of engineering trends and technology (IJETT)*, pp. 1804-1809, 2013
2. Y. He, X. Zhang, MI Friswell, "Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission," *Journal of Vibration and Acoustics*, pp. 061012-10 - 061012-1, 2009.
3. V.F. Pires, M. Kadivonga, J.F. Martins, A.J. Pires, "Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis," *Measurement*, pp. 942-948, 2013.
4. P.K. Kankar, S. C. Sharma, S.P. Harsha, "Fault diagnosis of ball bearings using continuous wavelet transform," *Applied Soft Computing*, pp. 2300-2312, 2011.
5. Q. Liu, F. Chen, Z. Zhou, Q. Wei, "Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Wavelet Package Transform and Ensemble Empirical mode Decomposition," *Advances in mechanical Engineering*, pp. 1-6, 2013.
6. V. Purushotham, S. Narayanan, Suryanarayana A.N. Prasad, "Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and hidden Markov model based fault recognition," *NDT & E International*, pp. 654-664, 2005
7. J. Antoni, "Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 108-124, 2007.
8. Wang D, Miao Q, Fan X, Huang HZ, "Rolling element bearing fault detection using an improved combination of Hilbert and wavelet transforms," *Mechanical Science and Technology*, pp. 3292-3301, 2009.
9. N. G. Nikolaou, I. A. Antoniadis, "Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets," *NDT&E International 35*, pp. 197-205, 2002.
10. R. B. Randall and J. Antoni, "Rolling element bearing diagnostics—a tutorial," *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 485-520, 2011.
11. H. Prasad, The effect of cage and roller slip on the measured defect frequency response of rolling element bearings, ASLE Transactions, Delhi, 1987.
12. B. Liu, "Selection of wavelet packet basis for rotating machinery fault diagnosis," *Journal of sound and Vibration*, pp. 567-582, 2005.
13. <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter/download-data-file>
14. <https://github.com/mathworks/RollingElementBearingFaultDiagnosis-Data-36>