مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 95-102

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مقایسه تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای و تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته در تشخیص عیب شکستگی میله روتور

فرزانه صباغیان بیدگلی[1]، جواد پشتان[2*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114 ، jposhtan@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 اسفند 1395

پذیرش: 12 فروردین 1396

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال

تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته

تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

عیب شکستگی میله روتور

چکیده

یکی از روش‌های رایج تشخیص عیب ماشین‌های دوار، تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال است که پردازش سیگنال یک جزء جدایی ناپذیر آن محسوب می‌شود. پردازش سیگنال داده‌های خام را به ویژگی‌های مفیدی برای انجام عملیات تشخیص عیب تبدیل می‌کند. این ویژگی‌ها بایستی مستقل از شرایط کاری نرمال ماشین و نویز خارجی باشند و تنها به عیوب ماشین حساس باشند. از این‌رو ارائه روش‌های پردازشی کاراتر به‌منظور دستیابی به ویژگی‌های مفیدتر از سیگنال و در نتیجه تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تر عیب، مورد توجه محققان قرار گرفته است. این پروژه روش‌های تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته و تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای را برای دستیابی به باندهای فرکانسی باریک و استخراج فرکانس لحظه‌ای و حذف نویز موجک بسته‌ای را برای حذف نویز سیگنال اولیه، به سیگنال ارتعاشی مربوط به عیب میله شکسته روتور اعمال می‌کند تا به ویژگی‌های مفیدتری از سیگنال ارتعاشی برای انجام مراحل بعدی تشخیص عیب دست یابد. مقایسه طیف دامنه تبدیل هیلبرت و فرکانس لحظه‌ای آشکارسازی شده توسط روش‌های تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته و تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای، برتری روش دوم را در آشکارسازی فرکانس‌های مربوط به عیب نشان می‌دهد.

Comparison of wavelet packet based Hilbert transform and improved Hilbert-Huang transform in fault detection of broken rotor bar

Farzaneh Sabbaghian Bidgoli, Javad Poshtan*

Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, jposhtanm@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2017
Accepted 01 April 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Broken rotor bar
Wavelet packet based Hilbert transform
Hilbert-Huang Transform
Signal-based fault detection

ABSTRACT

Signal processing has a key role in signal based fault diagnosis in rotating machinery for finding beneficial discriminating features. The task of Signal processing is conversion of the raw data into beneficial features to facilitate the diagnostic operations. The features should be robust regarding noise and working condition of the machine and simultaneously sensitive to the machine defects. Therefore, assignment of more efficient analyzing techniques in order to achieve more beneficial features of the signal and faster and more accurate fault detection is taken into consideration by researchers. In order to find such features, the current research first applies wavelet packet denoising and then applies wavelet packet based Hilbert transform as well as improved Hilbert-Huang transform separately to decompose vibration signal into narrow frequency bands in order to extract instantaneous frequencies. The findings show that the wavelet packet based Hilbert transform generates better results in comparison to the improved Hilbert-Huang transform in detecting frequencies of the broken rotor bar fault.

1- مقدمه

در طول عملکرد ماشین‌های دوار، خاصیت دینامیک ذاتی و تحریکات خارجی، مخصوصاً تحت شرایط کاری متغیر با زمان، اغلب به سیگنال‌های غیرایستا منجر می‌شود. این سیگنال‌های غیرایستا حاوی اطلاعاتی درباره وضعیت سلامت ماشین هستند. بنابراین درصورت اعمال روش‌های پردازشی مناسب به این سیگنال‌ها، می‌توان ویژگی‌های مهم عیب را که در کشف و تشخیص عیب استفاده می‌شوند، استخراج کرد. از آن‌جایی که اکثر روش‌های مرسوم پردازش سیگنال، با فرض ایستا بودن است، این روش‌ها می‌توانند آنالیز برحسب میانگین آماری را تنها در یکی از دو حوزه زمان یا فرکانس انجام دهند، و نمی‌توانند ویژگی‌های محلی را هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه فرکانس به‌طور همزمان آشکار کنند. از طرف دیگر ویژگی‌های آماری سیگنال‌های غیرایستا، با زمان تغییر می‌کند. بنابراین در کاربردهای مهندسی اعمال چنین روش‌هایی برای آنالیز سیگنال‌های غیرایستا نامناسب است. لذا در تشخیص عیب ماشین‌آلات، توسعه روش‌های پردازش سیگنال، برای استخراج ویژگی‌های متغیر با زمان از سیگنال‌های غیرایستا، بسیار اهمیت یافته و آنالیز زمان- فرکانس به‌عنوان یک روش مؤثر برای حل این مشکلات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Sabbaghian Bidgoli, J. Poshtan, Comparison of wavelet packet based Hilbert transform and improved Hilbert-Huang transform in fault detection of broken rotor bar, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 95-102, 2017 (in Persian)

مورد توجه قرار گرفته است [1].

از جمله سیگنال‌هایی که در تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرند، سیگنال‌های ارتعاشی هستند که اطلاعات مفیدی از وضعیت ماشین‌های دوار ارائه می‌دهند، و با استفاده از آن‌ها می‌توان انواع مختلفی از عیوب را آشکار کرد. از این‌رو روش های پردازش سیگنال مبتنی بر ارتعاش، یکی از ابزارهای پایه‌ای برای تشخیص عیب ماشین‌آلات دوار به شمار می‌روند. به‌طوری که هنوز هم توسعه و فراگیری روش‌های مؤثر پردازش سیگنال که قادر به استخراج مشخصات کلیدی عیوب از سیگنال‌های ارتعاشی باشند، یک چالش محسوب می‌شود [2].

در میان ماشین‌آلات دوار، موتورهای القایی به‌واسطه قابلیت اطمینان و عملکرد بالا، نقش مهمی در بسیاری از صنایع بازی می‌کنند. این موتورها علی‌رغم قابلیت اطمینان بالا، در معرض برخی عیوب قرار می‌گیرند، که می‌توان با اعمال به موقع روش‌های پایش وضعیت این عیوب را رفع و از پیشرفت آن‌ها جلوگیری کرد. عیوب رایج موتور شامل عیوب روتور، استاتور، بیرینگ و دنده‌ها می‌شود. در این مقاله عیب میله شکسته روتور[1] مورد بررسی قرار گرفته، به‌طوری‌که سیگنال ارتعاشی این عیب از سیستم آزمایشگاهی استخراج شده و عملیات استخراج ویژگی روی آن انجام می‌شود.

در سال 2010 مرجع [3] در تشخیص عیب شکستگی میله روتور موتور القایی تحت شرایطی که نرخ نمونه‌برداری پایین است، برای استخراج ویژگی از تبدیل موجک بسته‌ای ایستا[2] استفاده کرده و نشان می‌دهد که در حالت استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای ایستا، علاوه‌بر این‌که نرخ نمونه‌برداری پایین بر عملکرد تشخیص عیب تاثیر منفی نمی‌گذارد، از نظر محاسبات و پیاده‌سازی نیز به هزینه کمتری نیاز دارد. همچنین [4]، عیب شکستگی میله روتور موتور القایی الکتروپمپ را با استفاده از سیگنال ارتعاشی حالت ماندگار و در حالتی که موتور با سرعت پایین در حال کار است، مورد بررسی قرار داده و از ویژگی‌های حوزه فرکانس که به‌شدت به لغزش موتور وابسته است، برای تشخیص عیب استفاده می‌کند. در این روش علاوه بر این‌که ماهیت غیرایستایی سیگنال ارتعاش نادیده گرفته می‌شود، تشخیص عیب در حالت‌هایی که بار موتور کم بوده و در نتیجه لغزش موتور کم است، با شکست مواجه می‌شود. در همان سال مرجع [5]، به بررسی عیب شکستگی میله روتور موتورالقایی با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از سنسورهای ممز[3] پرداخت. سیگنال‌های حاصل از روتور در حالت بدون بار و تحت بار با استفاده از طیف سیگنال ارتعاشی و آنالیز تبدیل فوریه سریع مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات ویژگی‌هایی همچون گشتاور، سرعت، نویز و ارتعاش تحت بارهای مختلف با توجه به تغییر لغزش موتور تحلیل شد که در این حالت نیز کاستی‌های کار قبلی به چشم می‌خورد. در همان سال [6] به مروری بر کاربرد روش تجزیه حالت تجربی در تشخیص عیب ماشین‌آلات دوار پرداخت. در سال 2014، مرجع [7] یک آنالیز زمان-فرکانس از سیگنال ارتعاشی در جهت محوری و شعاعی هسته برای تشخیص عیب شکستگی میله روتور ارائه کرد، به‌طوری که ابتدا از آنالیز حوزه فرکانس برای جدا کردن حالت معیوب و سالم و سپس از تبدیل موجک گسسته[4] برای بررسی دقیق‌تر مورد مشکوک استفاده کرد. اما چالشی که وجود داشت نزدیکی مؤلفه فرکانسی عیب میله شکسته به مؤلفه فرکانسی اصلی موتور در حالت کار در بار کم بود، که تشخیص عیب را در مرحله اول که در حوزه فرکانس انجام می‌شد، با مشکل مواجه می‌کرد. در همان سال [8] از سیگنال‌های ارتعاشی و روش‌های رایج تبدیل هیلبرت[5] و تبدیل موجک پیوسته[6] برای تشخیص عیوب مختلفی استفاده کرده و نتایج حاصل را برای یافتن فرکانس‌های عیوب مربوطه مقایسه کرد. نتایج مقایسه حاکی از آن بود که اگر چه تبدیل موجک پیوسته تفکیک زمانی بهتری در ناحیه فرکانس بالا بدست می‌دهد، نمی تواند ضربه-هایی که فاصله زمانی بین آن‌ها بسیار کم است را جدا کند و در این زمینه تبدیل هیلبرت نسبت به تبدیل موجک پیوسته بهتر عمل می‌کند. از طرف دیگر تبدیل موجک پیوسته به زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارد و در مقابل تبدیل هیلبرت نیازمند یک روش پیش‌پردازش نظیر تجزیه حالت تجربی[7] می‌باشد. بنابراین هرکدام نسبت به دیگری مزایا و معایبی دارد که نمی‌تواند بر دیگری ترجیح داده شود. در همان سال [9] مروری بر روش‌های مؤثر تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال ارتعاشی و صوتی انجام داد. در سال 2015 [10] به مرور تشخیص عیب مبتنی بر مدل، مبتنی بر سیگنال و تشخیص عیب مقاوم پرداخت و انواع روش‌های موجود در این زمینه را مورد بررسی قرار داد. در سال 2016 [11] روش تبدیل موجک گسسته[8] را بر روی ارتعاشات حالت گذرای موتور القایی در حالت شکستگی میله روتور تحت بارهای مختلف اعمال کرد. تفاوت آن با کارهای قبلی تشخیص عیب میله شکسته با شدت‌های مختلف و در بارهای مکانیکی مختلف و با استفاده از ارتعاشات در سه جهت موازی با محور روتور، عمود بر محور روتور و در جهت شعاعی بود. که در جهت موازی با محور روتور بهترین نتیجه را در دسته‌بندی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه[9] بدست آورد. اما این مرجع پس از اعمال تبدیل موجک گسسته، سیگنال مربوط به باند فرکانسی 0 تا 200Hz را انتخاب کرده و سپس روی آن سایر مراحل تشخیص عیب را انجام می‌دهد، درحالیکه برای عیب میله شکسته مخصوصاً در حالت شدت‌های کم و عیوب تازه متولد، مؤلفه‌های فرکانسی با توجه به دور موتور می‌توانند تا هفت برابر حاصلضرب دور موتور در فرکانس لغزش وجود داشته باشند. بنابراین فقط استفاده از این باند فرکانسی در صحت و کیفیت تشخیص عیب اختلال ایجاد می‌کند. در همان سال [12] به مطالعه انواع عیوب روتور در سیستم روتور-بیرینگ با استفاده از روش‌های تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک پیوسته و تبدیل هیلبرت-هوانگ پرداخت و نتایج آن‌ها را مقایسه کرد. در همان سال [13] به تشخیص عیب سیستم روتور- بیرینگ با روش تجزیه حالت تجربی و نگاشت فضای خود-صفر[10] پرداخت. در سال 2017 [14] برای پردازش سیگنال‌های چندمؤلفه‌ای روش جدیدی پیشنهاد کرد که در آن تجزیه حالت تجربی را با تبدیل موجک ترکیب کرده و اصلاحاتی در تبدیل هیلبرت برای دستیابی به فرکانس لحظه‌ای ایجاد می‌کند. درنهایت نتایج روش پیشنهادی را با روش‌های تجزیه حالت تجربی و تجزیه حالت تجربی دسته‌ای مقایسه کرده و شایستگی روش پیشنهادی در تشخیص عیب سایش محلی روتور را نشان می‌دهد.

در این مقاله سیگنال ارتعاشی مربوط به عیب میله شکسته روتور از یک سیستم الکتروپمپ آزمایشگاهی جمع‌آوری شده و دو روش تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته و تبدیل هیلبرت مبتنی‌بر تبدیل موجک بسته‌ای[11] برای استخراج مؤلفه‌های فرکانسی متناظر با عیب میله شکسته استفاده می‌شوند. بدین صورت که ابتدا عملیات حذف نویز توسط تبدیل موجک بسته‌ای روی

[1] Broken Rotor Bar (BRB)
[2] Stationary Wavelet Packet Transform
[3] Microelectromechanical systems(MEMS)
[4] Discrete Wavelet Transform
[5] Hilbert Transform (HT)
[6] Continuous Wavelet Transform (CWT)
[7] Empirical Mode Decomposition (EMD)
[8] Discrete Wavelet Transform (DWT)
[9] Nearest Neighborhood
[10] Self-zero space projection
[11] Wavelet Packet Based Hilbert Transform (WPHT)

سیگنال ارتعاشی انجام شده و سپس فرکانس لحظه‌ای سیگنال حذف نویز شده با استفاده از روش تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته و تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای به‌طور جداگانه استخراج می‌شود. در نهایت طیف دامنه تبدیل هیلبرت و دقت در استخراج مؤلفه‌های فرکانسی این دو روش مقایسه شده و برتری روش تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای در استخراج مؤلفه‌های فرکانسی متناظر با عیب میله شکسته روتور ثابت می‌شود. با این روش‌ها از یک سو مؤلفه‌های فرکانسی مربوط به عیوب تازه متولد که به‌دلیل دامنه کم به آسانی آشکار نمی‌شوند و یا مؤلفه‌های فرکانسی عیب میله شکسته که در بارهای کم در مؤلفه‌های اصلی حاصل از خاصیت دورانی سیستم گم می‌شوند، آشکارسازی شده و از سوی دیگر خاصیت غیرایستایی سیگنال ارتعاشی در آنالیزها لحاظ می‌شود و نتایج قابل اطمینان‌تر و مقاوم‌تری حاصل می‌شود.

2- حذف نویز موجک بسته‌ای

حذف نویز مبتنی بر موجک براساس قانون آنالیز چند تفکیکی است. با استفاده از تجزیه موجک چند سطحی، ضرایب جزئیات[1] و تقریب[2] بدست می‌آیند. گراسمن [15] ثابت کرد که واریانس و دامنه جزئیات نویز سفید در سطوح مختلف، با افزایش سطح تجزیه کاهش می‌یابد در حالی که دامنه و واریانس تبدیل موجک سیگنال مورد پردازش ارتباطی با تغییر مقیاس ندارند. براساس این ویژگی، با تنظیم مناسب ضرایب موجک، نویز می‌تواند ضعیف شده و یا حتی حذف شود.

فرایند حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای[3] در سه مرحله انجام می‌شود. این سه مرحله به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

تجزیه سیگنال: انتخاب یک پایه موجک و انتخاب سطح N و محاسبه تجزیه موجک بسته‌ای سیگنال در سطح N.

آستانه‌گذاری ضرایب جزئیات: انتخاب یک آستانه و اعمال آستانه‌گذاری نرم تنها به ضرایب جزئیات.

بازسازی سیگنال: محاسبه بازسازی موجک توسط ضرایب تقریب اصلی سطح آخر و ضرایب جزئیات اصلاح شده سطح آخر.

درکل این روش عملکرد بسیار خوبی روی نویز گوسی داشته و اغلب توانایی کاهش بهینه نویز را دارد [16].

3- تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته

روش شناخته شده تبدیل هیلبرت-هوانگ اساساً براساس کانولوشن سیگنال $x(t)$ با $1/t$ تعریف می‌شود و می‌تواند به ویژگی‌های محلی $x(t)$ تاکید کند. (رابطه(1))

$$y(t) = \frac{P}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t)}{t-\tau}\, d\tau \tag{1}$$

که P مقدار اساسی کوشی است. با کوپل کردن $x(t)$ و $y(t)$، سیگنال تحلیلی $z(t)$ به‌صورت رابطه (2) بیان می‌شود:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\varphi(t)} \tag{2}$$

که در رابطه (2)، $a(t)$ و $\varphi(t)$ بصورت رابطه (3) تعریف می‌شوند:

$$a(t) = [x(t)^2 + y(t)^2]^{1/2} \quad , \quad \varphi(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \tag{3}$$

$a(t)$ دامنه لحظه‌ای $x(t)$ است که می‌تواند چگونگی تغییر انرژی $x(t)$ با زمان را بازتاب کند، و $\varphi(t)$ فاز لحظه‌ای $x(t)$ است.

یک ویژگی مهم تبدیل هیلبرت این است که اگر سیگنال $x(t)$ تک مؤلفه‌ای باشد، مشتق زمانی فاز لحظه‌ای $\varphi(t)$، مفهوم فیزیکی فرکانس لحظه‌ای $\omega(t)$ از سیگنال $x(t)$ خواهد بود. (رابطه(4))

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \tag{4}$$

اما در کاربردهای عملی، کمتر سیگنال تک مؤلفه‌ای وجود دارد و بیش‌تر سیگنال‌ها چندمؤلفه‌ای هستند. این موضوع از اعمال گسترده مفهوم مهم فرکانس لحظه‌ای جلوگیری می‌کند. برای کاربردی کردن فرکانس لحظه‌ای، هوانگ و همکارانش تبدیل هیلبرت را بر توابع حالت ذاتی[4] حاصل از تجزیه حالت تجربی اعمال کردند. تبدیل هیلبرت مبتنی بر روش تجزیه حالت تجربی تبدیل هیلبرت-هوانگ نامیده می‌شود.

در این روش می‌توان فرکانس و دامنه لحظه‌ای را بنابر روابط (3) و (4) به‌دست آورد. پس از انجام تبدیل هیلبرت روی هرمؤلفه توابع حالت ذاتی سیگنال به‌صورت رابطه (5) بیان می‌شود:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{n} a_j(t)\exp\left(i\int \omega_i(t)dt\right) \tag{5}$$

توزیع زمان- فرکانس سه‌بعدی به‌عنوان طیف هیلبرت-هوانگ $H(f,t)$ شناخته می‌شود، که در آن f فرکانس لحظه‌ای بوده و با فرکانس فوریه متفاوت است [17].

به‌علاوه تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته براساس تجزیه حالت تجربی دسته‌ای[5] انجام می‌شود. بدین صورت که تبدیل هیلبرت بر روی توابع حالت ذاتی حاصل از تجزیه حالت تجربی دسته‌ای اعمال شده و طیف هیلبرت-هوانگ سیگنال تولید می‌شود. درنهایت بنابر طیف هیلبرت- هوانگ، عیوب ماشین‌آلات دوار استخراج می‌شود.

4- تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

تبدیل موجک به‌عنوان یک ابزار مدرن برای پردازش سیگنال، در حوزه‌های مختلف توجه زیادی را هم در آنالیز تئوری و هم درکاربردهای مهندسی به خود معطوف کرده است. تبدیل موجک می‌تواند برای آنالیز چند مقیاسی یک سیگنال از طریق تاخیر[6] و برگردان[7] استفاده شود و بنابراین قادر به استخراج مؤثر ویژگی هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس می‌باشد. در نتیجه تبدیل موجک به‌طور موفقیت‌آمیز برای پایش وضعیت و تشخیص عیب تجهیزات الکترومکانیکی اعمال شده است. یک عیب تبدیل موجک این است که تفکیک فرکانسی در زیرباند فرکانس بالا، که اغلب مشخصه‌های معیوب در آن قرار دارند، نسبتاً ضعیف است. برای رفع این مشکل تبدیل موجک بسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است. تبدیل موجک بسته‌ای فضای فرکانسی را به بخش‌های مختلف تقسیم می‌کند و منجر به مکان‌یابی زمان- فرکانس بهتر سیگنال می‌شود. در سال‌های اخیر تبدیل موجک بسته‌ای به‌عنوان یک روش مشهور در حوزه پایش وضعیت و تشخیص عیب استفاده شده است [18]. تبدیل موجک بسته‌ای می‌تواند اطلاعات بخش جزئیات سیگنال در منطقه فرکانس بالا را نیز تجزیه کند. برای انجام تبدیل موجک بسته‌ای یک سیگنال در یک سطح معین (مثلاً سطح 3)، توابع به‌صورت رابطه (6) تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2}\sum_k h(k)u_n(2t-k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2}\sum_k g(k)u_n(2t-k) \end{cases} \tag{6}$$

[1] detail
[2] approximate
[3] Wavelet Packet Transform (WPT)
[4] Intrinsic mode function(IMF)
[5] Ensemble Empirical mode decomposition
[6] dilation
[7] translation

که $u_0(t) = \varphi(t)$ و $u_1(t) = \psi(t)$ می‌باشد. به‌طور متناظر، سیگنال به صورت رابطه (7) تجزیه می‌شود:

$$\begin{cases} d_{j+1,2n} = \sum_m h(m-2k)d_{j,n} \\ d_{j+1,2n+1} = \sum_m g(m-2k)d_{j,n} \end{cases} \quad (7)$$

که $d_{j,n}$ ضرایب موجک سطح j و زیر باند n، $d_{j+1,2n}$ و $d_{j+1,2n+1}$ ضرایب در سطح $j+1$ و به ترتیب زیرباندهای $2n$ و $2n+1$ هستند، و m تعداد ضرایب موجک است. همان‌طور که در "شکل 1" نشان داده شده است، یک تبدیل موجک بسته‌ای سه سطحی، هشت زیرباند تولید می‌کند و هر زیر باند 1/8 اطلاعات فرکانسی را به‌طور موفق پوشش می‌دهد [19].

در کاربرد عملی، تجزیه موجک بسته‌ای تعداد زیادی پایه ایجاد می‌کند که می‌توان از میان آن‌ها بهترین بیان را با توجه به هدف تجزیه جست‌وجو کرد. این کار با یافتن بهترین درخت[1] براساس یک معیار آنتروپی قابل انجام است [20].

پس از اعمال تبدیل موجک بسته‌ای، با اعمال تبدیل هیلبرت به هریک از ضرایب حاصل از تبدیل موجک می‌توان به فرکانس‌های لحظه‌ای دست یافت. در واقع در این الگوریتم برای رسیدن به سیگنال تک مؤلفه‌ای از تبدیل موجک بسته‌ای استفاده شده است. به این الگوریتم تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای گفته می‌شود.

5- سیستم آزمایشگاهی

برای نمایش اثربخشی روش پیشنهادی، سیگنال ارتعاشی بدنه موتور القایی یک الکتروپمپ، که تصویر آن را در "شکل 2" مشاهده می‌کنید، استخراج می‌شود. این موتورالقایی یک موتور 2 قطب 3 کیلووات 50Hz ساخت شرکت موتوژن است که به یک پمپ گریز از مرکز 3 مرحله‌ای مدل WKL32/3 ساخت شرکت پمپیران با حداکثر ارتفاع خروجی 74 متر کوپل شده است.

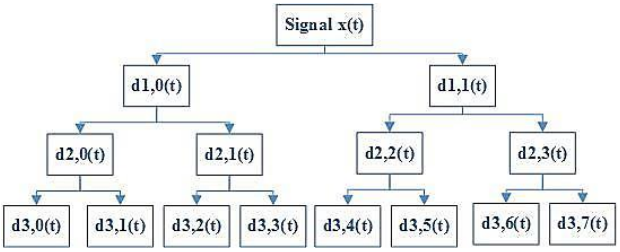

Fig.1 Illustration of wavelet packet transform[19]

شکل 1 نمایش تبدیل موجک بسته‌ای [19]

Fig.2 Experimental setup

شکل 2 سیستم آزمایشگاهی

داده ارتعاشی با استفاده از یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک ساخت شرکت CTC به نام AC192-1D (رنج دینامیک ± 80 g و حساسیت 100 mv/g)، در جهت شعاعی و عمود بر محور روتور و در محلی نزدیک به محفظه بیرینگ در طول 5 ثانیه در حالت بار کامل و با فرکانس نمونه‌برداری 1kHz جمع‌آوری شده است. لازم به ذکر است که از آن‌جایی که در ماشین‌هایی که بطور افقی به یکدیگر متصل می‌شوند، منطقه بار در قسمت پایینی محفظه بیرینگ قرار می‌گیرد، سنسور در منطقه پایینی محفظه بیرینگ نصب شده تا ارتعاشات با کیفیت‌تری حاصل شود. برای جمع‌آوری و انتقال این داده‌ها به کامپیوتر از کارت جمع‌آوری داده PCI-1711 ساخت شرکت اَدونتک[2] استفاده شده است. داده‌برداری در دو حالت سالم و عیب میله شکسته انجام می‌شود. برای ایجاد عیب میله شکسته، حفره‌ای به عمق 5 میلی‌متر روی یکی از میله‌های روتور با استفاده از دریل ایجاد شده است. سیگنال ارتعاشی و تبدیل فوریه آن برای حالات سالم و عیب میله شکسته در بار کامل به ترتیب در "شکل‌های 3 و 4" قابل مشاهده است.

با توجه به "شکل‌های 3 و 4" در می‌یابیم که با اعمال عیب میله شکسته، دامنه هارمونیک‌های اصلی کاهش یافته و باندهای کناری نسبت به هارمونیک اصلی رشد کرده‌اند. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رفت، سرعت در حالت عیب میله شکسته از 48.52Hz به 48.22Hz کاهش یافته است.

هارمونیک‌های طیف تبدیل فوریه سیگنال ارتعاشی حالت معیوب (با وجود رشد هارمونیک‌های مربوط به عیب) نسبت به سایر هارمونیک‌ها (مخصوصاً برای عیوب تازه متولد) بسیار کوچک بوده و برای موتور متصل به پمپ، در نویز عملی و فرکانس‌های مربوط به پمپ و هارمونیک‌هایش گم می‌شوند.

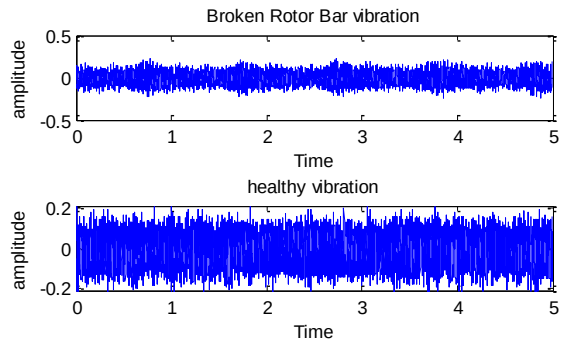

Fig.3 vibration signal of healthy and broken rotor bar states

شکل 3 سیگنال ارتعاشی حالت سالم و حالت عیب میله شکسته

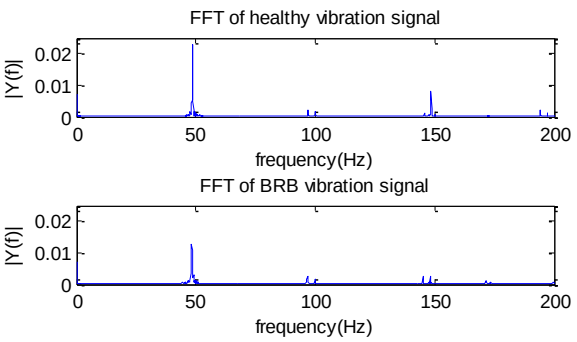

Fig.4 FFT of healthy and broken rotor bar states

شکل 4 تبدیل فوریه حالات سالم و عیب میله شکسته

[1] Best tree

[2] Advantech

6- آنالیز سیگنال ارتعاشی میله شکسته روتور

در سیگنال ارتعاشی مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با عیب میله شکسته وجود دارد. در زمینه استخراج ویژگی، کارایی هر الگوریتم به این‌که با چه صحتی می‌تواند این مؤلفه‌ها را آشکار کند بستگی دارد. مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با عیب میله شکسته می‌تواند از روابط (8) و (9) حاصل شود.

$$f_{BRB} = f_m \pm 2ksf \quad (8)$$

$$s = \frac{(2f - Pf_m)}{2f} \quad (9)$$

که f فرکانس جریان استاتور، P تعداد قطب‌های موتورالقایی و f_m سرعت چرخشی موتور است [21].

در یک سطح جدی از عیب، این هارمونیک‌ها در طیف فرکانسی قابل مشاهده هستند. اما برای یک عیب تازه متولد، که هارمونیک‌های متناظر با عیب ضعیف هستند (مانند آنچه که در این مقاله مورد بحث است)، با توجه به "شکل 4" به‌دلیل وجود پیک‌های قوی‌تر در طیف فرکانسی، کشف هارمونیک‌های مرتبط با عیب میله شکسته روتور کار دشواری است. از این رو یافتن راه‌حلی برای جداسازی مؤلفه‌های مرتبط با عیب می‌تواند راهگشا باشد.

6-1- اعمال حذف نویز موجک بسته‌ای

حذف نویز موجک بسته‌ای یک روش موفق حذف نویز است که آستانه‌گذاری را روی ضرایب موجک بسته‌ای اعمال می‌کند. درحال حاضر هیچ دستورالعمل مشترکی برای چگونگی انتخاب پایه موجک مناسب و سطح تجزیه WT وجود ندارد.

دومین مشکل اساسی به انتخاب آستانه و چگونگی انجام آستانه‌گذاری مربوط می‌شود. برخلاف تنوع و تعداد زیاد استراتژی‌های انتخاب آستانه که در کارهای اخیر ارائه شده، انتخاب آستانه برای مواردی که از سیگنال مورد پردازش هیچ اطلاعات پیشینی وجود ندارد، هنوز یک موضوع باز است [16].

بنابراین برای حذف نویز سیگنال‌های آزمایشگاهی میزان حذف نویز نامعلوم بوده و احتمال این‌که در اثر حذف نویز اطلاعات سیگنال اصلی نیز از بین برود وجود خواهد داشت. برای مقابله با این مشکلات، در این پژوهش چهار نوع پایه موجک ، سه روش انتخاب آستانه و سه نوع معیار برای ارزیابی عملکرد آستانه‌گذاری برگرفته از [22] استفاده شد. پایه‌های موجک شامل dmey، bior3.7، db4 و sym4 بوده و روش‌های انتخاب آستانه شامل رگرسور[1] ، هیورسور[2]، اسکیوتی ولوگ[3] و مینی‌ماکسی[4] می‌شود. در واقع سیگنال ارتعاشی طی برنامه‌ای برای هر روش انتخاب آستانه، با تمامی پایه‌های موجک حذف نویز شده و نتیجه عملکرد آن در حذف نویز با استفاده از معیارهای نسبت سیگنال به اصل[5](SIR)، درصد ریشه میانگین مربعات تفاضل[6] (PRD) و حداکثر خطا ارزیابی شد. نتیجه ارزیابی نیز بر اساس بیشترین SIR، کمترین میزان PRD و کمترین میزان حداکثر خطا، اعلام شد. با بررسی نتایج به‌دست آمده، بهترین SIR برای sym4 و رگرسور ، بهترین PRD برای dmey و رگرسور و بهترین حداکثر خطا برای sym4 و رگرسور به‌دست آمد. در این فرایند با توجه به مرجع [22] در واقع محتاطانه‌ترین حذف نویز اعمال می‌شود.

"شکل 5" سیگنال حذف نویز شده و طیف فوریه آن را برای یک حذف نویز موجک بسته‌ای 4 سطحی با معیار عملکرد SIR نشان می‌دهد.

[1] rigrsure
[2] heursure
[3] sqtwolog
[4] minimaxi
[5] Signal to inferencee ratio
[6] Percentage root mean square difference

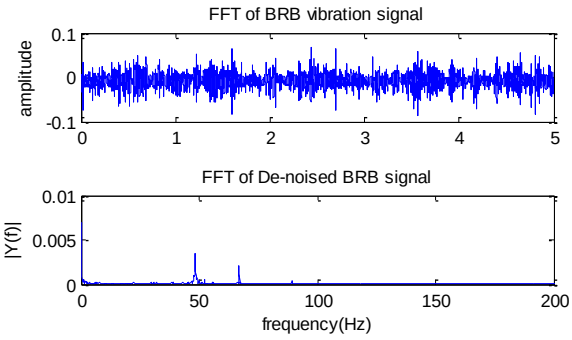

Fig.5 De-noised Broken Rotor Bar signal

شکل 5 سیگنال حذف نویز شده میله شکسته روتور

6-2- اعمال تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته

در این مرحله به سیگنال حذف نویز شده تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته اعمال می‌شود. بنابر [23] در اکثر موارد اضافه کردن نویزی با دامنه 0.2 برابر انحراف معیار داده اصلی و تعداد تلاش N=512 پیشنهاد می‌شود. توابع حالت ذاتی حاصل از تجزیه حالت تجربی دسته‌ای در "شکل 6" قابل مشاهده هستند. "شکل 6" نشان می‌دهد که الگوریتم در جهت جداسازی مؤلفه‌های سیگنال از یکدیگر و ایجاد سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای عمل کرده و در واقع مؤلفه‌های فرکانسی نهفته در سیگنال را تفکیک کرده است. پس از محاسبه فرکانس‌های لحظه‌ای از آن‌ها میانگین‌گیری شده و میانگین ده فرکانس لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته در جدول1 نشان داده شده است.

"شکل 7" طیف دامنه تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته را نشان می‌دهد. با توجه به این طیف، جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی به‌خوبی انجام نشده است.

الگوریتم این روش را در فلوچارت "شکل8" مشاهده می‌کنید.

6-3- اعمال تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

در این حالت به سیگنال حذف نویزشده تبدیل موجک بسته‌ای اعمال می‌شود. پس از مقایسه اسپکتروم WPT سیگنال ارتعاشی در موجک مادرهای مختلف، تابع موجک مادر مِیِر[7] به‌دلیل ایجاد بیشترین میزان تفکیک فرکانسی انتخاب شد. بنابراین WPT اعمال شده دارای سطح 4 و تابع موجک مادر مِیِر می‌باشد. ضرایب حاصل از تجزیه تبدیل موجک بسته‌ای در "شکل 8" نشان داده شده است. با توجه به "شکل 9" ملاحظه می‌شود که همان‌طور که از این الگوریتم انتظار می‌رفت، سیگنال به باندهای فرکانسی مختلفی تجزیه شده و در هر سیگنال مؤلفه‌های فرکانسی خاصی ظاهر می‌شود تا برای اعمال تبدیل هیلبرت آماده شود.

سپس به این ضرایب تبدیل هیلبرت اعمال شده و فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل می‌شوند. پس از محاسبه فرکانس‌های لحظه‌ای، از آن‌ها میانگین‌گیری شده و میانگین فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای در جدول 2 نشان داده شده است.

"شکل 10" نشان می‌دهد که جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی با استفاده از این روش بسیار بهتر از تبدیل هیلبرت- هوانگ پیشرفته است و دقت بیش‌تری را در آشکارسازی مؤلفه‌های فرکانسی فراهم می‌کند. همچنین با توجه به "شکل 10" فرکانس چرخشی موتور با دامنه بیشتر نسبت به سایر مؤلفه‌ها به وضوح آشکارسازی شده است.

[7] Meyer

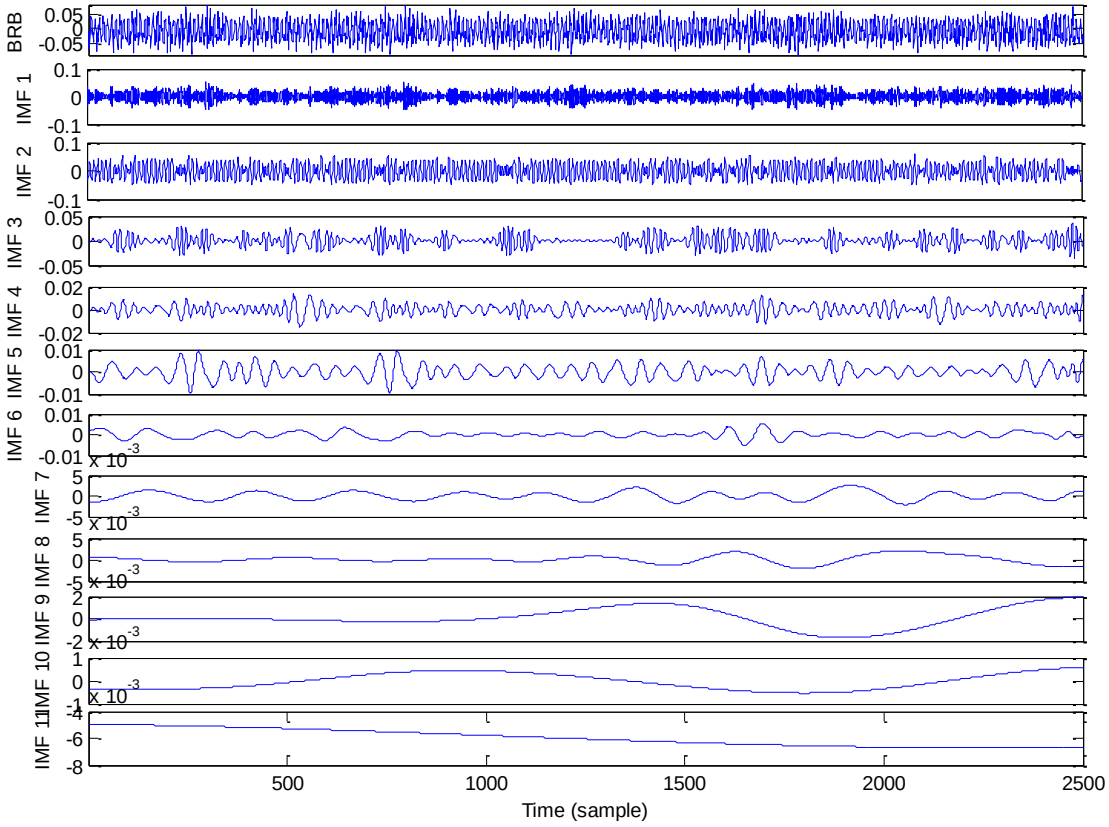

Fig.6 Ensemble Empirical Mode Decomposition of Broken Rotor Bar signal

شکل 6 تجزیه حالت تجربی دسته‌ای سیگنال میله شکسته روتور

جدول 1 فرکانس‌های لحظه‌ای هر تابع حالت ذاتی حاصل از تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته

Table1 Instantaneous frequency of each IMF resulting from Improve Hilbert-Huang Transform

تابع حالت ذاتی	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
فرکانس لحظه‌ای	148.4	55.61	32.60	21.17	10.17	4.98	2.37	39.54	1.18	0.38

جدول 2 فرکانس لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

Table2 Instantaneous frequency of each coefficient resulting from Wavelet Packet based Hilbert Transform

تابع حالت ذاتی	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4	WPT5	WPT6	WPT7	WPT8	WPT9	WPT10	WPT11	WPT12	WPT13	WPT14	WPT15	WPT16
فرکانس لحظه‌ای	162.00	179.20	147.59	135.35	212.79	191.58	220.99	232.58	88.40	69.00	97.38	114.95	45.39	48.40	162.56	178.18

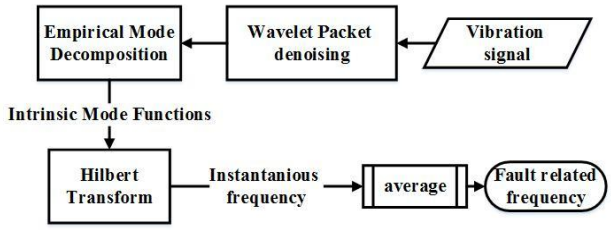

Fig.8 flowchart of Hilbert-Huang Transform

شکل 8 فلوچارت تبدیل هیلبرت-هوانگ

فلوچارت این روش را در "شکل 11" مشاهده می‌کنید.

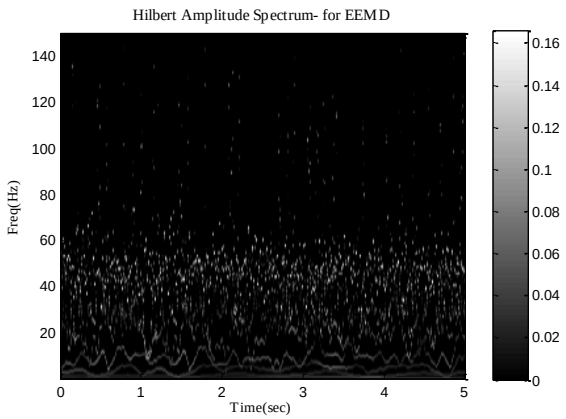

Fig.7 improved Hilbert-Huang amplitude spectrum

شکل 7 طیف دامنه هیلبرت-هوانگ پیشرفته

7- بحث و نتیجه‌گیری

پس از محاسبه هارمونیک‌های مرتبط با عیب میله شکسته با استفاده از روابط

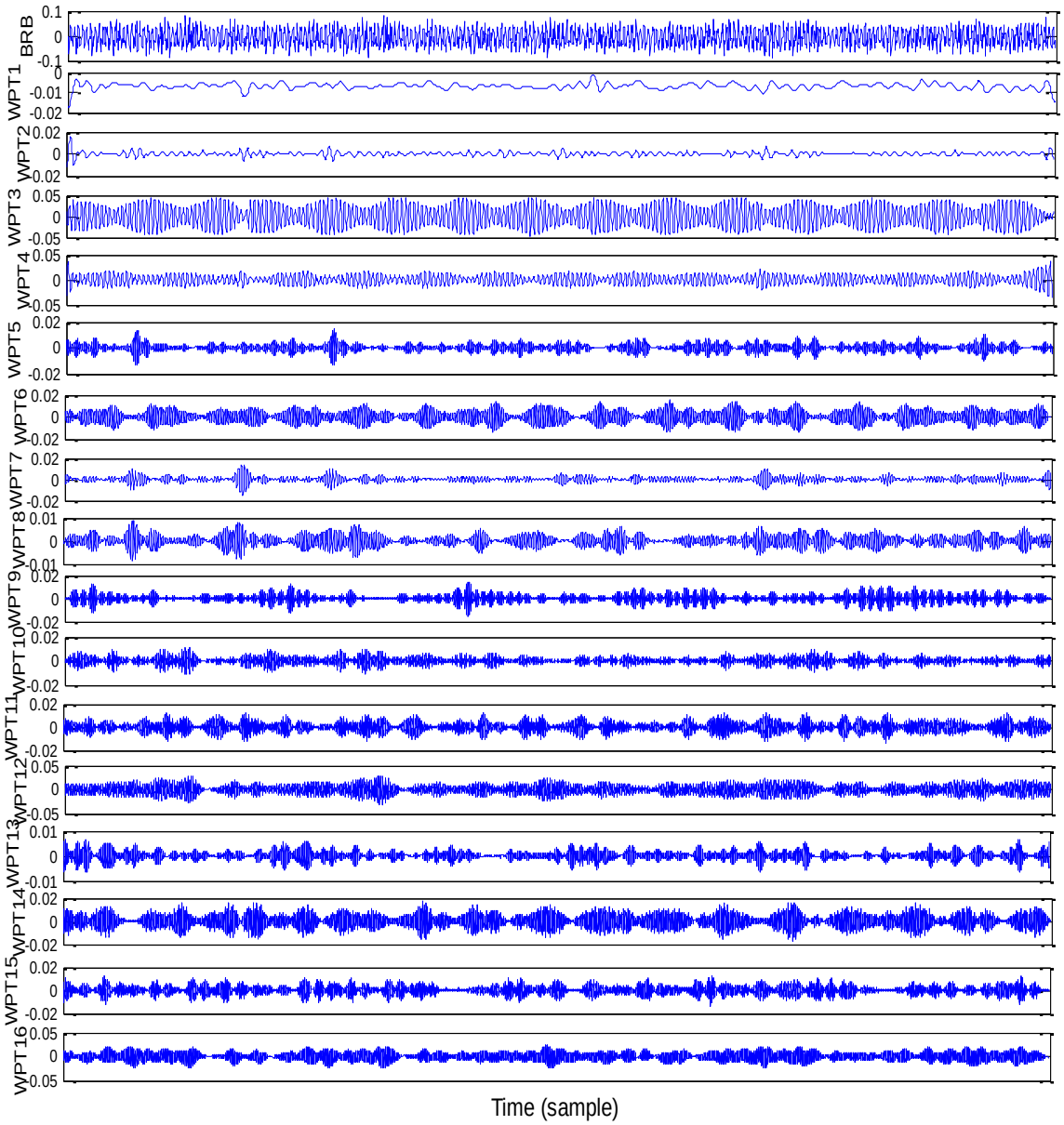

Fig.9 Wavelet Packet Transform decomposition of Broken Rotor Bar signal

شکل 9 تجزیه تبدیل موجک بسته‌ای سیگنال میله شکسته روتور

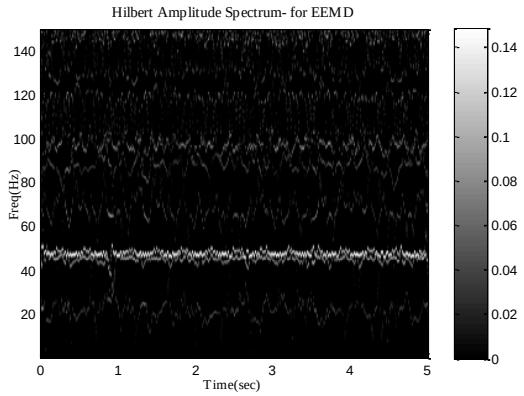

Fig.10 Hilbert amplitude spectrum for Wavelet Packet based Hilbert Transform

شکل 10 طیف دامنه تبدیل هیلبرت برای تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک

8 و 9 برای $k = 1,..,100$، حدود 17 هارمونیک با فاصله کمتر از یک نسبت به فرکانس‌های جدول 2 و دو هارمونیک با فاصله نزدیک به صفر حاصل شد. خطای میان هارمونیک‌های مربوط به عیب و میانگین فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای (فرکانس‌های معرف عیب) در جدول 3 قابل مشاهده است. همچنین 7 هارمونیک با فاصله کمتر از یک نسبت به فرکانس‌های جدول 1 حاصل شد که خطای میان هارمونیک‌های مربوط به عیب و میانگین فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته (فرکانس‌های معرف عیب) در جدول 4 قابل مشاهده است.

با توجه به جدول‌های 3 و 4 تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای در یافتن فرکانس‌های معرف عیب مؤثرتر عمل کرده است. همچنین میانگین خطاهای جدول 3 نسبت به جدول 4 کمتر است. بنابراین تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای هم از نظر تعداد فرکانس‌های آشکارسازی شده مرتبط با عیب و هم از نظر دقت این آشکارسازی موفق‌تر عمل می‌کند.

Table3 Errors between fault related harmonics and instantaneous frequencies resulting from Wavelet Packet based Hilbert Transform

جدول 3 خطای میان هارمونیک‌های مربوط به عیب و فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

K (شماره هارمونیک)	1	8	15	29	36	42	50	60	70	80
خطا	0.28	0.098	0.52	0.77	0.01	0.14	0.32	0.36	0.62	0.36

Table4 Errors between fault related harmonics and instantaneous frequencies resulting from Improved Hilbert-Huang Transform

جدول 4 خطای میان هارمونیک‌های مربوط به عیب و فرکانس‌های لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت-هوانگ پیشرفته

K (شماره هارمونیک)	12	14	15	18	25	27	32
خطا	0.9	0.36	0.15	0.14	0.53	0.11	0.34

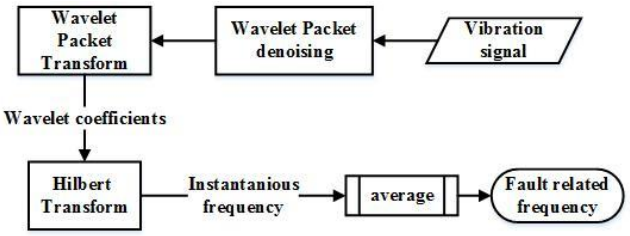

Fig.11 flowchart of Wavelet Packet based Hilbert Transform

شکل 11 فلوچارت تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای

از طرف دیگر با مقایسه طیف دامنه تبدیل هیلبرت برای هریک از الگوریتم‌ها، مشاهده می‌شود که الگوریتم تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای در جداسازی فرکانسی و آشکارسازی مؤلفه‌های فرکانسی نزدیک به هم تواناتر است. بایستی توجه شود که یک الگوریتم دقیق‌تر منجر به ورودی غنی‌تر به بخش دسته‌بندی و جداسازی عیوب در بحث تشخیص عیب خواهد شد.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل هیلبرت مبتنی بر تبدیل موجک بسته‌ای در آشکارسازی مؤلفه‌های فرکانسی موفق‌تر بوده و صحت بیش‌تر و خطای کمتری دارد. اهمیت این صحت مخصوصاً درحالت عیب نازک شدگی میله روتور، که منجر به مؤلفه‌های فرکانسی ضعیف‌تری می‌شود، بیش‌تر آشکار می‌شود.

8- مراجع

[1] Z. Feng, M. Liang, F. Chu, Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, Vol. 38, No. 1, pp. 165–205, 2013.

[2] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, Vol. 23, No. 4, pp. 1327–1338, 2009.

[3] H. Keskes, A. Braham, Z. Lachiri, Broken rotor bar diagnosis in induction machines through stationary wavelet packet transform and multiclass wavelet SVM, *Electric Power System Research* , Vol. 97, pp. 151–157, 2013.

[4] Ž. Kanovi, D. Mati, Z. Jeli, M. Rapai, B. Jakovljevi, M. Kapetina, Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Using Vibration Analysis – A Case Study, *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013 9th IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 64–68, 2013.

[5] Maruthi.G.S, Vishwanath Hegde, An experimental investigation on broken rotor bar in three phase induction motor by vibration signature analysis using mems accelerometer, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 1–7, 2013.

[6] Y. Lei, N. Li, J. Lin, S. Wang, A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, Vol. 35, No. 12, pp. 108–126, 2013.

[7] A. D. T. Rosario Miceli, Y. Gritli, Vibration signature analysis for monitoring rotor broken bar in double squirrel cage induction motors based on wavelet analysis, *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 1625–1641, 2014.

[8] P. Konar, P. Chattopadhyay, Multi-class fault diagnosis of induction motor using Hilbert and Wavelet Transform, *Applied Soft Computing*, Vol. 30, pp. 341–352, 2015.

[9] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, C. M. Travieso, Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals, *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems*, Vol. 44, No. 5, pp. 642–652, 2014.

[10] Z. Gao, C. Cecati, S. X. Ding, A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques-part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 6, pp. 3757–3767, 2015.

[11] Jose Rangel-Magdaleno, Hayde Peregrina-Barreto, Juan Ramirez-Cortes, Roberto Morales-Caporal, and Israel Cruz-Vega, Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT, *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 3530464, 11 pages, 2016.

[12] N. H. Chandra, A. S. Sekhar, Fault detection in rotor bearing systems using time frequency techniques, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, Vol. 72–73, pp. 105–133, 2016.

[13] F. Jiang, Z. Zhu, W. Li, G. Zhou, G. Chen, Fault identification of rotor-bearing system based on ensemble empirical mode decomposition and self-zero space projection analysis, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 14, pp. 3321–3331, 2014.

[14] J. Zheng, H. Pan, S. Yang, J. Cheng, Adaptive parameterless empirical wavelet transform based time-frequency analysis method and its application to rotor rubbing fault diagnosis, *Signal Processing*, Vol. 130, pp. 305–314, 2017.

[15] A. Grossmann, Wavelet transform and edge detection, in: S. Albeverio, et al. (Eds.), *Stochastic Processes in Physics and Engineering*, D. Reidel Publishing Company, 1988, pp. 149–157.

[16] H. Qiu, J. Lee, J. Lin, G. Yu, Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, No. 4–5, pp. 1066–1090, 2006.

[17] Z. K. Peng, P. W. Tse, F. L. Chu, A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, Vol. 19, No. 5, pp. 974–988, 2005.

[18] R. Zhou, W. Bao, N. Li, X. Huang, D. R. Yu, Mechanical equipment fault diagnosis based on redundant second generation wavelet packet transform, *Digital Signal Processing: A Review Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 276–288, 2010.

[19] R. Yan, R. X. Gao, X. Chen, Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications, *Signal Processing*, Vol. 96, No. part a, pp. 1–15, 2014.

[20] Help/wpdec, MATLAB R2010a., 2010.

[21] A. Sadoughi, M. Ebrahimi, M. Moallem, S.Sadri, Intelligent diagnosis of brokehn bars in induction motors based on new features in vibration spectrum, *Journal of Power Electronics*,Vol.8, No.3, pp. 228-238, 2008.

[22] P. Karthikeyan, M. Murugappan, S. Yaacob, ECG signal denoising using wavelet thresholding techniques in human stress assessment, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 4, No. 2, pp. 306-319, 2012.

[23] Z. Wu, N. E. Huang, ensemble empirical mode decomposition, *Advances in Adaptive Data Analysis.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–41, 2009.