



حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوار به کمک تابع چگالی احتمال، اندازه شباهت و تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته

سعید نظامیوند چگینی^{۱*}، زهره کریمی راسته‌کناری^۲، احمد باقری^۱، بهمن احمدی^۳

- ۱- گروه دینامیک، کنترل و ارتعاشات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
- ۲- گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی- غیر دولتی احرار، رشت، ایران
- ۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:

بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی
تجزیه مود تجربی
تابع چگالی احتمال
عیب‌یابی یاتاقان
تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته

خلاصه: در این مقاله، روشی جدید برای حذف نویز از سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوار به منظور پایش وضعیت آن‌ها ارائه شده است. ابتدا، هر سیگنال ارتعاشی توسط روش تجزیه مود تجربی به مودهای تشکیل دهنده‌اش تجزیه شده است. سپس، به منظور تشخیص مودهای دارای نویز از مودهای بدون نویز، اندازه شباهت بین تابع چگالی احتمال سیگنال اصلی و مودهای آن محاسبه شده است. در نهایت، مودهای حاوی نویز توسط تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته بی‌نویز شده و سیگنال بی‌نویز شده بازسازی می‌شود. در این مطالعه، از روش بی‌نویزسازی پیشنهادی به منظور حذف نویز از سیگنال شبیه‌سازی و داده‌های واقعی متناظر با شرایط مختلف یاتاقان استفاده شده است. سرانجام، ویژگی کشیدگی و طیف پوش هر سیگنال بی‌نویز شده به ترتیب برای شناسایی حضور عیب و نوع آن محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تکنیک پیشنهادی قادر است کیفیت سیگنال‌های ارتعاشی را به نحو مطلوبی افزایش دهد به طوری که حساسیت فاکتور کشیدگی نسبت به حضور عیب در رینگ‌های داخلی و خارجی افزایش می‌یابد. همچنین، در طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده، فرکانس‌های عیوب نمایان شده و به راحتی می‌توان نوع عیب را تشخیص داد. نتایج نشان می‌دهند که تکنیک بی‌نویزسازی پیشنهادی در این مقاله بر روش‌های رایج بی‌نویزسازی بر پایه‌ی تجزیه مود تجربی برتری دارد.

۱- مقدمه

ویژگی‌های پرکاربرد در حوزه زمان در فرآیند عیب‌یابی می‌باشد که از آن می‌توان برای تعیین حضور عیب در یاتاقان بهره برد [۱]. مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های اکتسابی از یاتاقان سالم نزدیک به ۳ می‌باشد و برای سیگنال‌های دارای عیب، بزرگ‌تر از ۳ است. یکی از ویژگی‌های مهم و رایج در حوزه فرکانس، تحلیل طیف پوش سیگنال^۲ می‌باشد که از آن می‌توان برای تشخیص نوع عیب استفاده کرد [۲]. به عنوان مثال وقتی خرابی‌های کوچکی روی رینگ داخلی و رینگ خارجی یاتاقان‌ها ایجاد می‌شوند، پالس‌های ارتعاشی فرکانس بالایی ایجاد شده که به طور متناوب تکرار می‌شوند. این پالس‌های متناوب نشان‌دهنده فرکانس‌های مشخصه عیوب یاتاقان هستند که در طیف

سیستم‌های دوار یکی از اجزای کلیدی تجهیزات صنعتی همانند ژنراتورها، موتورها، کمپرسورها و... هستند. حضور عیب در این سیستم‌ها، باعث کاهش کارایی و در نهایت، توقف دائمی این تجهیزات در انجام فعالیت‌شان می‌شود. پیش‌پردازش، استخراج ویژگی، پس‌پردازش و شناسایی الگو چهار مرحله‌ی اصلی در روش‌های عیب‌یابی هوشمند سیگنال‌های ارتعاشی می‌باشند. در فرآیند استخراج ویژگی، اطلاعاتی استخراج می‌شوند که عیوب ایجاد شده در سیگنال را به بهترین وجه نمایش دهند. این ویژگی‌ها به دو گروه استخراج ویژگی در حوزه زمان و حوزه فرکانس دسته‌بندی می‌شوند. تابع آماری کشیدگی^۱ یکی از

1 Kurtosis

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeed.nezamivand@gmail.com

2 Envelope Spectrum Analysis



پوش سیگنال ظاهر می‌شوند. از طرفی در بیشتر موارد، سیگنال‌های به‌دست‌آمده توسط سنسورها با نویز همراه هستند. این نویزها پردازش سیگنال‌ها را با پیچیدگی روبرو می‌کنند و مانع استخراج ویژگی‌ها و اطلاعات مفید از آن‌ها می‌شوند. بنابراین، روشی برای بی‌نویزسازی سیگنال‌ها که بتواند اطلاعات غیرمرتبط را حذف نموده، کیفیت سیگنال‌ها را افزایش داده و بازسازی نماید، نقش اساسی در عیب‌یابی دقیق سیستم‌های دوار ایفا می‌کند.

روش تجزیه مود تجربی^۱ به عنوان یکی از روش‌های رایج در زمینه پردازش و عیب‌یابی سیگنال‌های ارتعاشی مورد استفاده بوده است. در این روش تجزیه، فرض می‌شود که سیگنال ترکیبی از چند مود نوسانی است که هر یک از این مودها می‌تواند فرکانس‌های متغیر نسبت به زمان داشته باشد. روش تجزیه مود تجربی بر خلاف روش تبدیل موجک^۲ و تبدیل فوریه سریع که از پایه‌های متعامد نظیر پایه‌های موجک مادر و توابع سینوس و کسینوس استفاده می‌کنند، سیگنال‌ها را بر اساس مشخصات محلی‌شان به مودهای مختلف تجزیه می‌کند [۳]. روش تجزیه مود تجربی بر پایه کاهش نویز به کمک تابع آستانه‌گذاری نرم^۳ و کلاسه‌بندی مودها بر اساس طبقه‌بند نایو بیز^۴، تکنیکی تطبیق‌پذیر و مقاوم برای بی‌نویزسازی و عیب‌یابی یاتاقان‌ها معرفی شده است [۴]. آل-رحیم و همکاران^۵ [۵] تکنیکی برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی یاتاقان‌های غلتشی بکار بردند که ترکیبی از تبدیل موجک پیوسته و تابع پایه‌ی موجک ضربه می‌باشد. آن‌ها پارامترهای شکل موجک ضربه را به کمک فاکتور کشیدگی تعیین کردند. لی و هی^۶ [۶] تکنیک آستانه‌گذاری بر پایه روش تجزیه مود تجربی را برای کاهش نسبت نویز به سیگنال‌های آکوستیک پیشنهاد کردند. آن‌ها ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با حالت‌های سالم و نامعلوم را با هم ترکیب نموده و به کمک تکنیک‌های آماری از این ویژگی‌های فشرده برای عیب‌یابی ماشین‌های دوار استفاده کردند. کوپزنیس و لافلین^۷ [۷] روش ترکیبی بر پایه‌ی تابع آستانه‌گذاری و تکنیک تجزیه مود تجربی به منظور بهبود فرآیند بی‌نویزسازی معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند

که روش تجزیه مود تجربی برای بی‌نویزسازی، در مقایسه با تبدیل موجک در شرایط نسبت نویز به سیگنال پایین و یا فرکانس نمونه برداری بالا، کارایی بهتری دارد. لیو و همکاران^۸ [۸] روش ترکیبی تجزیه مود تجربی- تبدیل موجک را پیشنهاد کردند. در این استراتژی کاهش نویز، پس از تجزیه سیگنال توسط روش تجزیه مود تجربی، مودهای فرکانس بالا به کمک رویکردهای بر پایه تبدیل موجک بی‌نویزسازی شدند. سپس، مودهای بی‌نویز شده با مودهای فرکانس پایین جمع شده و سیگنال ارتعاشی بازسازی شد. برای اولین بار دونوو و جانسون^۹ [۹] روش ترکیبی تبدیل موجک و آستانه‌گذاری نرم را برای بی‌نویزسازی به کار بردند. صدوقی و خادم [۱۰] تبدیل موجک گسسته^{۱۰}، تابع دونوو-جانسون و آستانه‌گذاری پارامتری را به عنوان روشی ترکیبی برای بی‌نویزسازی سیگنال ارتعاشی موتور جت معرفی کردند. در فرآیند حذف نویز، انتخاب نوع تابع موجک، تابع آستانه‌گذاری و روش محاسبه مقدار آستانه بر کیفیت سیگنال بی‌نویز شده اثرگذار هستند. به عبارت دیگر، یک انتخاب نامناسب در تابع موجک و روش‌های آستانه‌گذاری می‌تواند منجر به حذف بخشی از اطلاعات مربوط به عیب در سیگنال شود. در مرجع [۱۱]، تکنیک بی‌نویزسازی بهبودیافته بر پایه تجزیه مود تجربی برای سیگنال‌های ارتعاشی مربوط به یاتاقان‌ها معرفی شد. در این روش، ابتدا سیگنال به کمک تجزیه مود تجربی به مودهای نوسانی تجزیه شد. سپس، بر پایه انرژی هر مود، نقطه لغزش و نقطه بعد از آن که همان مودهای منفرد هستند، تعیین شدند. سپس، با اعمال آستانه‌گذاری بر مودهای منتخب، سیگنال بی‌نویز شده بازسازی شد. نویسندگان برای بررسی کارایی این روش از فاکتور کشیدگی و طیف پوش سیگنال به ترتیب برای تشخیص زود هنگام عیب و تعیین محل عیب استفاده کردند. در دسته دیگری از مطالعات، برای کاهش اثر نویز و رسیدن به نتایج مطلوب از بعضی تمهیدات مانند بکاربردن فیلتر کالمن استفاده شده است [۱۲]. نظامیوند چگینی و همکاران [۱۳] یک استراتژی جدید برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی به کمک روش جدید تبدیل تجربی موجک پیشنهاد کردند. آن‌ها با استخراج ویژگی‌هایی نظیر کشیدگی و طیف پوش، از تکنیک پیشنهادی به منظور تشخیص عیب یاتاقان‌ها در سرعت‌های دورانی مختلف استفاده نمودند. همچنین

- 1 Empirical Mode Decomposition (EMD)
- 2 Wavelet Transform (WT)
- 3 Soft Thresholding Function
- 4 Naïve Bayes
- 5 Al-Raheem et al.
- 6 Li and He
- 7 Kopsinis and McLaughlin

8 Liu et al.

9 Donoho and Johnstone

10 Discrete Wavelet Transform (DWT)

ارائه شده در این اینجا، بهبود تکنیک ارائه شده در [۱۶] توسط تابع آستانه گذاری بهبود یافته و تعیین مقدار مطلوب آستانه به منظور افزایش کیفیت اطلاعات سیگنال بی نویز شده می باشد به طوری که پس از بی نویز سازی داده های ارتعاشی، حساسیت فاکتوری نظیر مقدار کشیدگی به حضور عیب افزایش یابد. در تکنیک پیشنهادی، سیگنال های ارتعاشی به کمک رویکرد تجزیه مود تجربی پردازش شده و به مولفه های تشکیل دهنده اش تجزیه می شوند. در مرحله بعد، تابع چگالی احتمال^۲ سیگنال خام و هر کدام از مودهای آن محاسبه می شود. برای دسته بندی مودهای دارای نویز و مودهای بدون نویز، اندازه شباهت^۳ میان تابع چگالی احتمال سیگنال معیوب و هر کدام از مودهای به دست آمده تعیین می شود. در نهایت، با اعمال تابع آستانه گذاری بهبود یافته به مودهای دارای نویز، سیگنال بی نویز شده بازسازی می شود. برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی، از این روش حذف نویز برای عیب یابی یاتاقان ها استفاده شده است. برای این منظور، کاربرد تکنیک حذف نویز پیشنهادی را در دو مورد سیگنال شبیه سازی و سیگنال واقعی مورد بررسی قرار داده و از فاکتور کشیدگی و طیف پوش سیگنال بازسازی شده به ترتیب برای شناسایی حضور عیب و شناسایی نوع آن استفاده شده است.

۲- روش ها

۲-۱- انتخاب مودهای ذاتی دارای نویز

عموماً سیگنال های ارتعاشی آغشته به نویز هستند. نویز موجود در این سیگنال ها از منابع نامعلومی تولید می شوند که اطلاعاتی در خصوص این منابع در دسترس نمی باشد. به عبارت دیگر، در کاربردهای واقعی، دانش دقیقی در خصوص سیگنال های ارتعاشی بدون نویز وجود ندارد. از این رو، تا کنون در تحقیقات مختلف روش های بی نویز سازی مختلفی پیشنهاد شده اند که بدون داشتن دانش قبلی در خصوص سیگنال بدون نویز اصلی مبادرت به حذف نویز از داده ها می نمایند. در رویکرد بی نویز سازی استفاده شده در این مقاله، ابتدا هر سیگنال ارتعاشی به کمک روش تجزیه مود تجربی به مودهای تشکیل دهنده اش تجزیه می شوند. سپس، به منظور داشتن اطلاعاتی در خصوص نویز موجود در سیگنال، از فرآیندی برای تفکیک مولفه های دارای نویز و با معنی از مولفه های بدون نویز

نویسندگان در کار دیگری [۱۴]، با ترکیب روش تبدیل تجربی موجک و روش های رایج آستانه گذاری نظیر آستانه گذاری نرم، رویکردی به منظور حذف نویز سیگنال های ارتعاشی یاتاقان ها ارائه نموده اند. آن ها ابتدا داده های ارتعاشی را به کمک تبدیل تجربی موجک پردازش نموده و مولفه های دارای نویز را به کمک همبستگی متقابل انتخاب شده اند. سپس با بکارگیری روابط رایج در بی نویز سازی بر پایه ی تبدیل موجک گسسته، ایمپالس های ناشی از حضور عیب به خوبی در سیگنال بی نویز شده نمایان شده اند. در مرجع [۱۵]، روش ترکیبی هوشمند برای عیب یابی یاتاقان بر پایه بهبود روش انتخاب ویژگی ارزیابی جبران فاصله و ماشین بردار پشتیبان معرفی شد. همچنین، استراتژی جدیدی برای عیب یابی چند کلاسه یاتاقان ها ارائه شد. ابتدا، سیگنال های ارتعاشی به کمک تجزیه مود تجربی و تبدیل بسته ای موجک تجزیه شده و سپس روش انتخاب ویژگی ارزیابی جبران فاصله بهبود یافته برای انتخاب مناسب ترین ویژگی ها مورد استفاده قرار گرفت. کوماتی و همکاران [۱۶] هر سیگنال مربوط به قلب را به کمک روش تجزیه مود تجربی به مودهای تشکیل دهنده اش تجزیه نموده اند. سپس به منظور بررسی میزان شباهت هر مود با سیگنال اصلی و تشخیص مودهای دارای نویز از مودهای بدون نویز، از معیار واگرایی کولبک-لیبر استفاده کرده اند. در نهایت، مودهای دارای نویز به کمک تابع آستانه گذاری رایج نرم بی نویز شده اند.

در این مقاله، تکنیکی به منظور استخراج ویژگی هایی که نشان دهنده ی شرایط کاری یاتاقان از حیث سالم و معیوب بودن می باشند، ارائه شده است. برای نیل به این هدف، روشی پیشنهاد شده است که بر پایه ی بهبود بی نویز سازی سیگنال های ارتعاشی به کمک یک تابع آستانه گذاری بهبود یافته و تحلیل سیگنال های ارتعاشی بی نویز شده می باشد. تفاوت اساسی بین رویکرد معرفی شده در این مقاله نسبت به روش هایی نظیر تکنیک های ارائه شده در [۴، ۱۴ و ۱۶]، در نحوه پردازش سیگنال، فرآیند انتخاب مولفه های با معنی و دارای نویز و به کارگیری تابع آستانه گذاری بهبود یافته می باشد. به عنوان مثال همان طور که در بالا گفته شد، در [۱۴] از تبدیل تجربی موجک برای پردازش سیگنال استفاده شده و با انتخاب مولفه های دارای نویز به کمک همبستگی متقابل و اعمال توابع آستانه گذاری متداول، سیگنال بی نویز شده است. هدف اصلی از کار

2 Probability Density Function (PDF)

3 Similarity Measure

1 Komaty et al.

استفاده شده است.

تابع اندازه شباهت (رابطه (۱)) تعیین می‌شود. شاخص مرزی K_{rth} متناظر با شماره مود ذاتی بعد از مود ذاتی ماکزیمم می‌باشد. هنگامی که K_{rth} تعیین می‌شود، توابع مود ذاتی اول تا K_{rth} ام به عنوان موده‌های دارای نویز و مابقی توابع مود ذاتی به عنوان موده‌های بدون نویز در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲- بی‌نویزسازی با استفاده از تابع آستانه‌گذاری

بی‌نویزسازی به کمک تبدیل موجک بر این اساس استوار است که انرژی سیگنال و انرژی نویز همراه با آن، هر یک به شکل متفاوتی در ضرایب تبدیل موجک ظاهر خواهند شد. لذا می‌توان با شناسایی آن دسته از ضرایب تبدیل موجک که به نویز مربوط می‌شوند، مقادیر این ضرایب را کاهش داده و یا حتی برابر با صفر قرار داد. برای شناسایی ضرایب مربوط به نویز و نیز تعیین سطوح آستانه برای آن‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد. در این روش‌ها، ضرایب مربوط به نویز شناسایی شده و آن دسته از ضرایب که از حد مشخصی کم‌تر هستند، صفر می‌شوند که به این عمل اصطلاحاً آستانه‌گذاری گفته می‌شود. تابع آستانه‌گذاری سخت و نرم از جمله توابع رایجی هستند که جهت بی‌نویزسازی سیگنال‌ها استفاده می‌شوند که به ترتیب توسط معادلات (۴) و (۵) بیان می‌شوند [۹]:

$$\tilde{C}_j(t) = \begin{cases} C_j(t), & |C_j(t)| \geq T_j \\ 0, & |C_j(t)| < T_j \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{C}_j(t) = \begin{cases} C_j(t) - \text{sign}(C_j(t))T_j, & |C_j(t)| \geq T_j \\ 0, & |C_j(t)| < T_j \end{cases} \quad (5)$$

که $\tilde{C}_j(t)$ بی‌نویز شده‌ی $C_j(t)$ ، $\text{sign}(\cdot)$ تابع علامت و T_j مقدار آستانه متناظر با مولفه $\tilde{C}_j(t)$ هستند.

این توابع دارای معایبی هستند که استفاده از آن‌ها را محدود کرده است. در آستانه‌گذاری سخت، انحراف بین سیگنال بازسازی شده و سیگنال اصلی صفر می‌باشد. اما، این تابع در مقدار آستانه ناپیوسته

تابع چگالی احتمال^۱ در آمار و احتمالات به تابعی گفته می‌شود که توزیع آماری را به شکل انتگرالی نمایش می‌دهد. با محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال مربوط به موده‌های هر سیگنال، می‌توان اطلاعات موجود در سیگنال را آشکار نمود. عموماً تابع چگالی احتمال نویز موجود در سیگنال دارای توزیع نرمال گوسی می‌باشد [۱۷]. با محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه و میزان شباهت آن‌ها با سیگنال اصلی، می‌توان مولفه‌هایی که به سیگنال خام شبیه‌تر می‌باشند، را تعیین کرد.

در این پژوهش، برای متمایز کردن بین مولفه‌های دارای نویز از مولفه‌های بدون نویز، میزان شباهت بین چگالی احتمال هرتابع مود ذاتی با تابع چگالی احتمال مربوط به سیگنال دارای نویز به کمک اندازه شباهت محاسبه می‌شود. برای این منظور، از روابط زیر استفاده می‌شود [۴ و ۱۶]:

$$PDF \text{ similarity}(i) = distance(PDF(x(t)), PDF(IMF_i(t))) \quad (1)$$

که در آن

$$distance(P, Q) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (P(Z) - Q(Z))^2 dZ} \quad (2)$$

در روابط بالا، IMF_i مولفه ی i ام حاصل از تجزیه سیگنال می‌باشد. برای دسته‌بندی توابع مود ذاتی جهت اعمال فرآیند بی‌نویزسازی، شاخصی تحت عنوان شاخص مرزی معرفی می‌شود که توابع مود ذاتی دارای نویز را از موده‌های بدون نویز تفکیک کرده و آماده بی‌نویزسازی می‌کند [۴ و ۱۶]:

$$K_{rth} = \underset{1 \leq i \leq c}{\text{argmax}} \{ PDF \text{ similarity}(i) \} + 1 \quad (3)$$

در رابطه بالا، ابتدا شماره تابع مود ذاتی مربوط به مقدار ماکزیمم

1 Probability Density Function (PDF)

۳- رویکرد بی‌نویزسازی پیشنهادی

سیگنال $x(t)$ که دارای نویز $n(t)$ می‌باشد را می‌توان به صورت رابطه (۹) در نظر گرفت. این سیگنال به عنوان داده مطالعاتی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در کاربردهای واقعی، سیگنال بدون نویز $y(t)$ در دسترس نمی‌باشد و هدف رسیدن به رویکردی است که نویز $n(t)$ را تا حد امکان کاهش داده و سیگنال بی‌نویز بازسازی شده را استخراج نماید.

$$x(t) = y(t) + n(t) \quad (9)$$

مراحل پیاده‌سازی روش بی‌نویزسازی پیشنهادی در این مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- ابتدا سیگنال $x(t)$ توسط روش تجزیه مود تجربی به توابع مود ذاتی‌اش تجزیه می‌شود.
- ۲- تابع چگالی احتمال سیگنال و هر کدام از توابع مود ذاتی محاسبه می‌شوند.
- ۳- فاصله بین تابع چگالی احتمال سیگنال و هر یک از توابع مود ذاتی طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.
- ۴- در این مرحله، مناسب‌ترین تابع مود ذاتی مطابق رابطه (۳) تعیین و انتخاب می‌شود.
- ۵- در نهایت، مدهای دارای نویز به کمک تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته بی‌نویز می‌شوند و سیگنال مطابق رابطه (۱۰) بازسازی می‌شود:

$$\bar{y}(t) = \sum_{i \in \Omega_1} \overline{IMF}_i(t) + \sum_{k \in \Omega_2} IMF_k(t) + r_c(t) \quad (10)$$

که $\bar{y}(t)$ سیگنال بازسازی شده، Ω_1 و Ω_2 به ترتیب مجموعه مدهای دارای نویز و بدون نویز، $\overline{IMF}_i(t)$ مدهای بی‌نویز شده، $IMF_k(t)$ مدهای بدون نویز و $r_c(t)$ باقی‌مانده هستند.

- ۶- برای شناسایی حضور عیب در یاتاقان، فاکتور کشیدگی سیگنال بازسازی شده محاسبه می‌شود. اگر مقدار این فاکتور نزدیک به ۳ باشد، یاتاقان سالم می‌باشد. چنانچه مقدار کشیدگی از ۳ بزرگ‌تر

است که منجر به تولید نوساناتی محلی در سیگنال اصلی می‌شود. در آستانه‌گذاری نرم، پیوستگی بهبودیافته است، اما این تابع در مقدار آستانه مشتق‌پذیر نمی‌باشد. از طرفی، چون از ضرایب موجک، یک مقدار ثابت آستانه کم می‌شود، بین ضرایب سیگنال بازسازی شده و سیگنال اصلی انحراف وجود دارد. به منظور رفع این نقایص، تابع آستانه‌گذاری جدیدی پیشنهاد شده است که در آن محدودیت توابع آستانه‌گذاری سخت و نرم بهبود یافته است. فرم کلی این نوع تابع به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\widetilde{C}_j(t) = \begin{cases} C_j(t) - \text{sign}(C_j(t)) \alpha T_j, & |C_j(t)| \geq T_j \\ 0, & |C_j(t)| < T_j \end{cases} \quad (6)$$

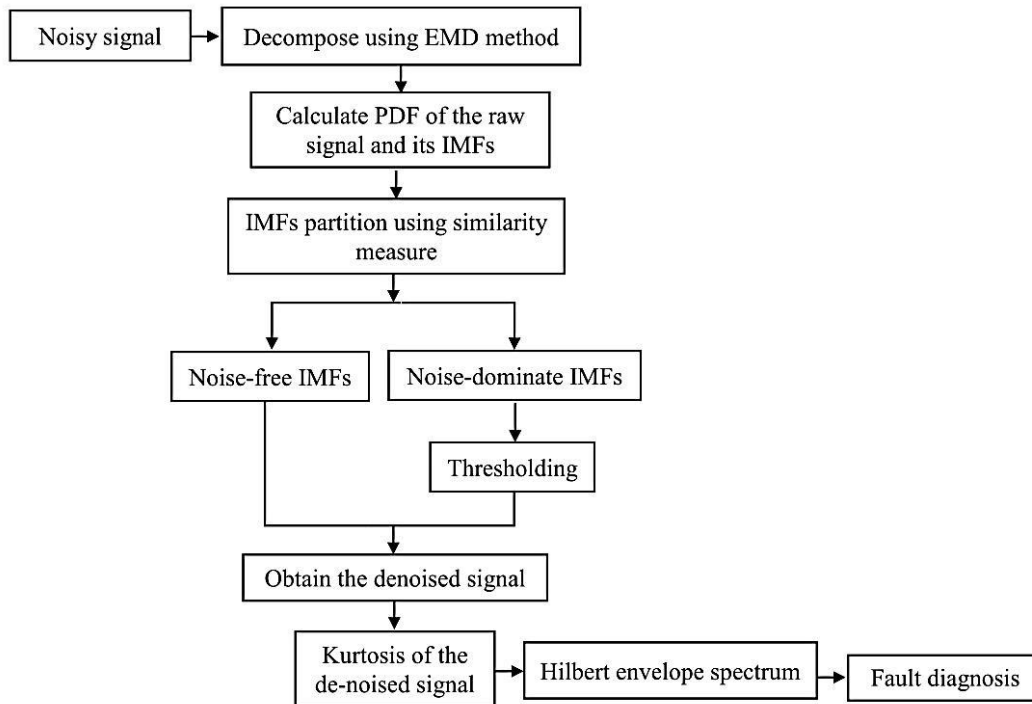
که α پارامتری است که مقدار آن در بازه [۰ و ۱] قرار دارد و به طور تجربی تعیین می‌شود. مهم‌ترین مسئله در تابع آستانه‌گذاری تخمین مقدار آستانه است. رابطه استفاده شده در این مقاله برای تخمین پارامتر آستانه به صورت زیر می‌باشد [۱۹ و ۹]:

$$T_j = K_j \sigma_j \sqrt{2 \ln N} \quad (7)$$

که K_j پارامتری است که به طور تجربی تعیین می‌شود. N طول سیگنال و σ_j انحراف معیار نویز مولفه j ام هستند. از آنجایی که نویز معمولاً در سیگنال حقیقی نامعلوم است، σ_j توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\text{median}|C_j(t)|}{0.6745}} \quad (8)$$

در این رابطه $C_j(t)$ ، تابع مود ذاتی j ام است. از آنجایی که نویز معمولاً در مولفه‌های با فرکانس بالا ظاهر می‌شود، این رابطه به طور تجربی و برای حذف نویزهای با فرکانس بالا به دست آمده است.



شکل ۱. فلوچارت روش بی‌نویزسازی پیشنهادی

Fig. 1. The flowchart of the proposed denoising method

جدول ۱. مقادیر فرکانس‌های رزونانسی f_i (Hz) و پارامترهای α_i در سیگنال شبیه‌سازی [۲۰]

Table 1. Resonant frequency values, f_i (Hz) and the parameters of α_i in the simulated signal [20]

f_i (Hz)	α_i	i
۵۰۰	۱۰۰	۱
۲۵۰۰	۵۰۰	۲
۴۰۰۰	۳۰۰	۳

سیگنال بدون نویز اصلی به سیگنال بازسازی شده شبیه‌تر باشد، تکنیک حذف نویز پیشنهادی با خطای کم‌تری مواجه می‌شود. لذا از فاکتور مقدار میانگین مربعات خطا^۱ برای ارزیابی نتایج این تکنیک بی‌نویزسازی استفاده شده است. سیگنال شبیه‌سازی مربوط به رینگ خارجی معیوب یاتاقان با نویز اضافه شده مطابق رابطه (۱۱) تعریف شده است [۲۰]:

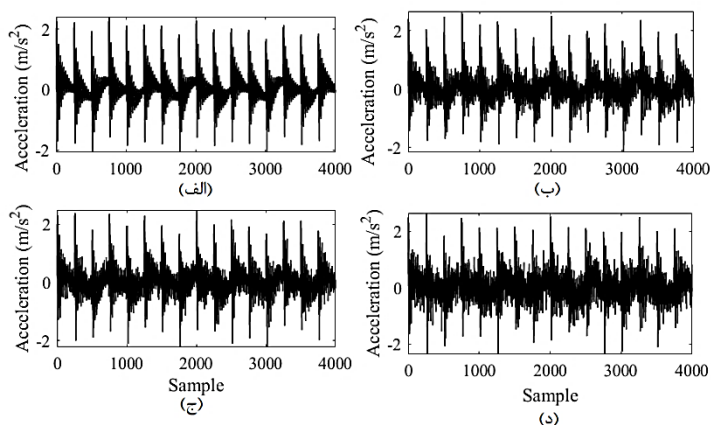
$$x(t) = A_1 e^{-\alpha_1 t} \sin(2\pi f_1 t) + 0.2 \sin(2\pi F_r t) + 0.1 \sin(2\pi(2F_r)t) + n(t) \quad (11)$$

1 Mean Square Error

باشد، عیبی در اجزای یاتاقان وجود دارد. -۷ برای تعیین نوع عیب در یاتاقان، طیف پوش سیگنال بازسازی شده محاسبه می‌شود. اگر فرکانس‌های مشخصه یکی از اجزای یاتاقان و هارمونیک‌های آن در طیف پوش ظاهر شوند، می‌توان نتیجه گرفت که عضو مورد نظر معیوب می‌باشد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان شده است.

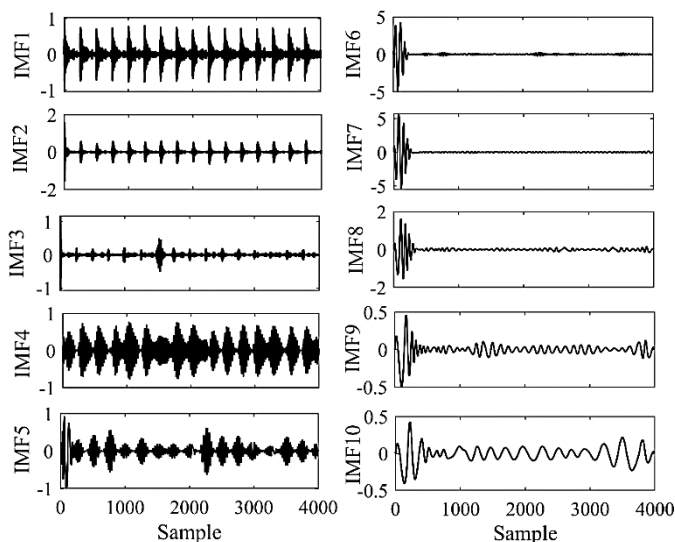
۴- کاربرد روش پیشنهادی برای سیگنال‌های شبیه‌سازی

در این بخش برای ارزیابی روش حذف نویز پیشنهادی، از سیگنال شبیه‌سازی استفاده شده است. در سیگنال شبیه‌سازی هر چقدر



شکل ۲. سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی: الف- بدون نویز ب- نویز با انحراف معیار برابر با ۰٫۱ ج- نویز با انحراف معیار برابر ۰٫۲ د- نویز با انحراف معیار برابر با ۰٫۳

Fig. 2. The simulated The simulated signal, (a) without noise, (b) noise with standard deviation of 0.1, (c) noise with standard deviation of 0.2, (d) noise with standard deviation of 0.3



شکل ۳. ۱۰ تابع مود ذاتی اول مربوط به سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱

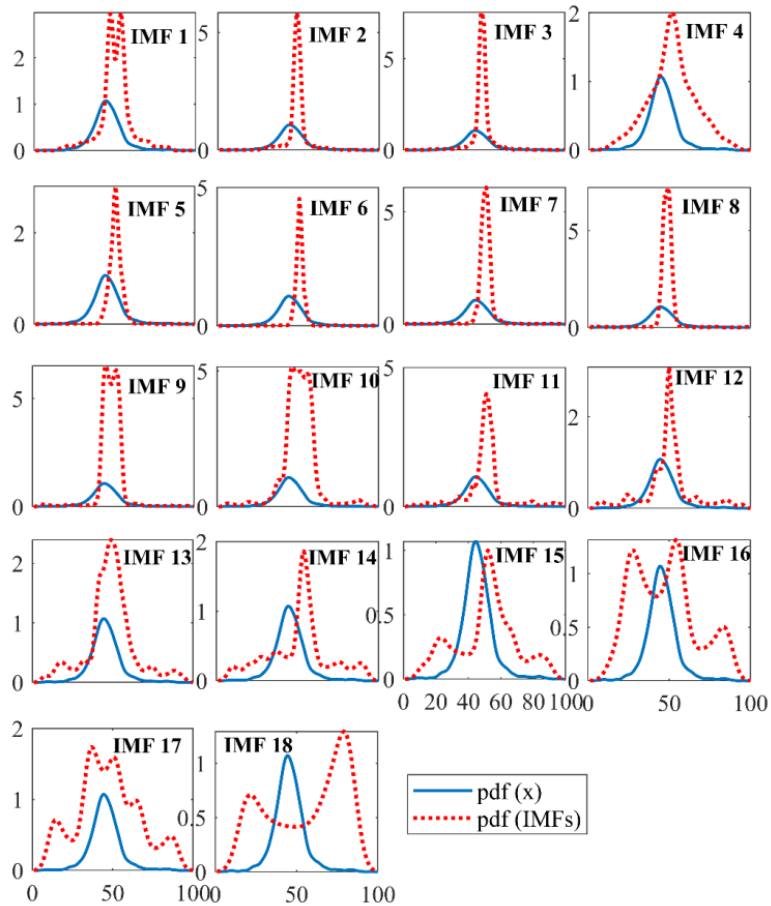
Fig. 3. The first ten IMFs corresponding to the noisy simulated vibration signal with noise with standard deviation of 0.1

می‌باشد. پارامترهای α_i متناظر با مقادیر f_i در جدول ۱ لیست شده‌اند. فرکانس مشخصه رینگ خارجی معیوب که مساوی ۵۰ Hz است. F_m فرکانس دورانی مساوی ۲۰ Hz و فرکانس نمونه‌برداری ۱۲۵۰۰ Hz می‌باشد سیگنال‌های ارتعاشی شبیه‌سازی بدون نویز و دارای نویز با انحراف معیارهای ۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۳ در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. به عنوان مثال، تعدادی از توابع مود ذاتی سیگنال شکل ۲-ب در شکل

$$t' = \text{mod}\left(t, \frac{1}{F_m}\right) \quad (12)$$

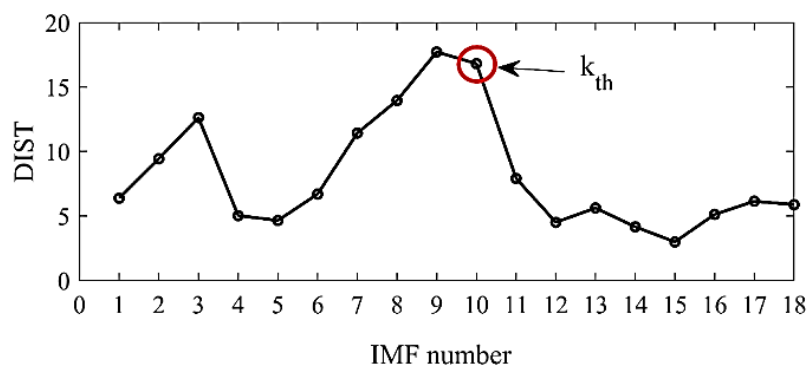
$$n(t) \sim N(0, 0.1) \quad (13)$$

در روابط بالا، $n(t)$ نویز تصادفی گوسی با توزیع میانگین صفر و انحراف معیار ۰٫۱ به سیگنال اضافه شده است. f_i فرکانس رزونانسی



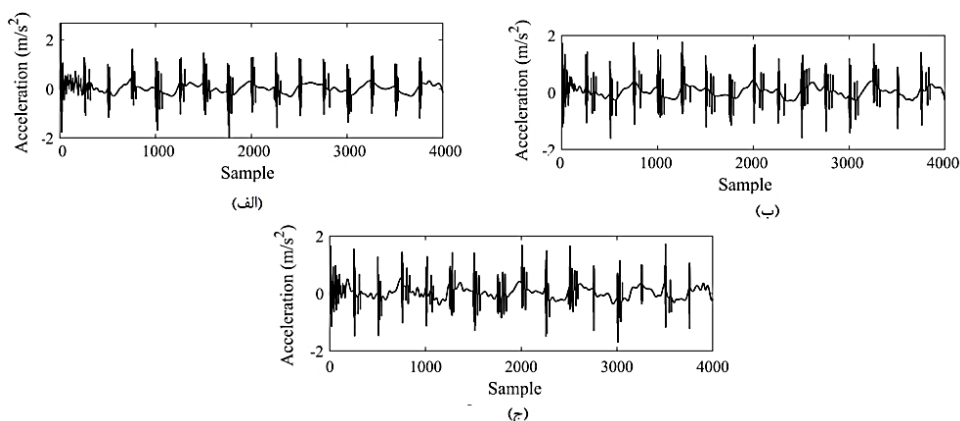
شکل ۴. تابع چگالی احتمال محاسبه شده برای سیگنال ارتعاشی شبیه سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱ و مولفه های آن

Fig. 4. Probability density function calculated for the simulated vibration signal having the noise with standard deviation of 0.1 and its IMFs

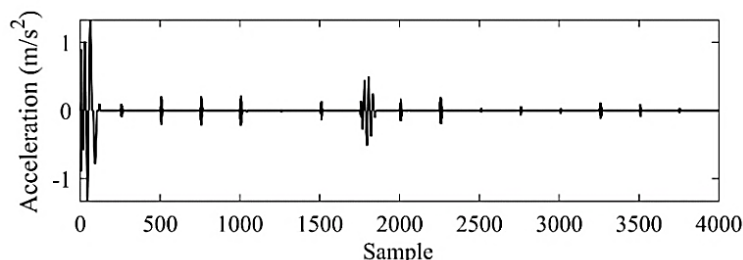


شکل ۵. نمودار اندازه شباهت بر حسب شماره مودها برای تعیین شاخص مربوط به سیگنال ارتعاشی شبیه سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱

Fig. 5. Similarity measure vs the mode number for determining the K_{th} index related to the simulated vibration signal having the noise with standard deviation of 0.1



شکل ۶. سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی الف- انحراف معیار نویز ۰٫۱ ب- انحراف معیار نویز ۰٫۲ ج- انحراف معیار نویز ۰٫۳
Fig. 6. The denoised simulated vibration signals by the proposed method, (a) standard deviation of 0.1, (b) standard deviation of 0.2, (c) standard deviation of 0.3



شکل ۷. سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویز شده توسط تکنیک معرفی شده در [۲۱]

Fig. 7. The denoised simulated vibration signal by the technique introduced in [21]

جدول ۲. مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال شبیه‌سازی

Table 2. Comparison of the value of the kurtosis value for the simulation signal

انحراف معیار نویز	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱	۶٫۲۴	۳۶٫۱۳	۸٫۱۹
۰٫۲	۵٫۴۶	۱۱۳٫۷۸	۷٫۷۶
۰٫۳	۵٫۰۲	۱۳۵٫۹۸	۷٫۰۸

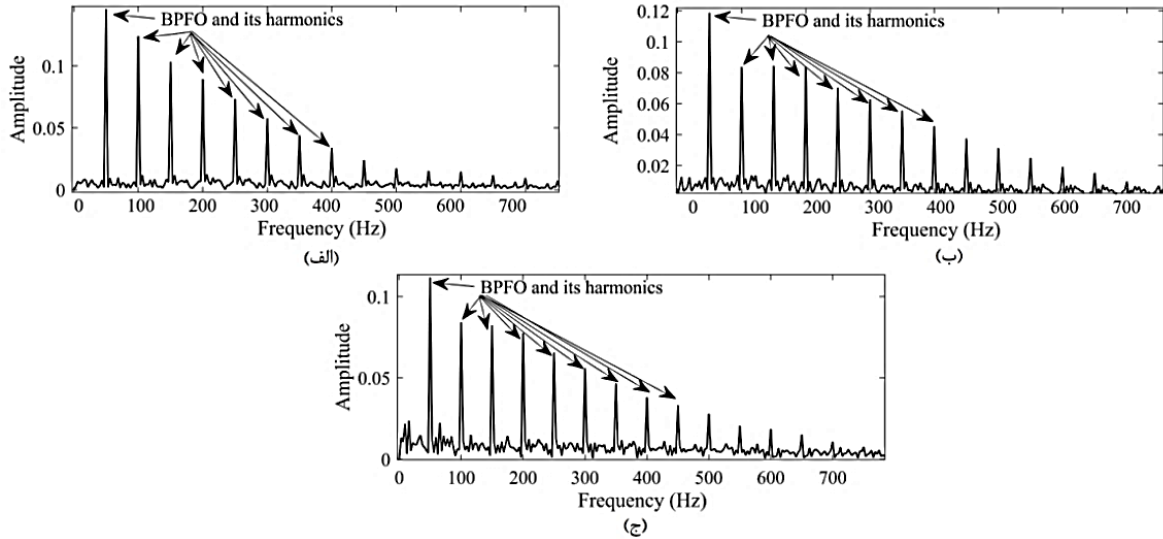
بعد از اولین ماکزیمم محلی که مود شماره نهم می‌باشد، مقدار اندازه شباهت روندی کاهشی دارد. همان‌طور که در زیر بخش ۲-۲ گفته شد، شاخص مرزی متناظر با مود بعد از این ماکزیمم محلی می‌باشد. در نتیجه شاخص مرزی به صورت $K_{th}=10$ در نظر گرفته می‌شود. در واقع، مودهای ۱ تا ۹ دارای نویز و مودهای ۱۰ تا ۱۸ بی‌نویز هستند. سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط تکنیک ارائه شده در این مقاله

۳ نشان داده شده‌اند. توابع چگالی احتمال این سیگنال و مودهای آن در شکل ۴ ارائه شده‌اند. همچنین، برای تعیین شاخص مرزی، اندازه شباهت بر حسب شماره مودهای سیگنال محاسبه شده و در شکل ۵ آمده است. همان‌طوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش شماره مودها، اندازه شباهت تابع چگالی احتمال سیگنال و مودها، به تدریج افزایش می‌یابد تا این که به اولین ماکزیمم محلی خود می‌رسد.

جدول ۳. مقایسه مقدار میانگین مربعات خطا برای سیگنال شبیه‌سازی

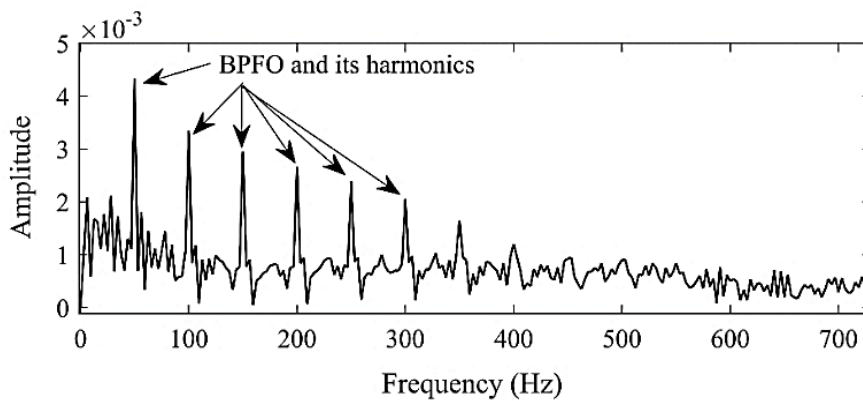
Table 3. Comparison of the mean squared error values for the simulation signal

انحراف معیار نویز	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱	۰٫۱۹	۰٫۱۱
۰٫۲	۰٫۲۱	۰٫۱۳
۰٫۳	۰٫۲۱	۰٫۱۵



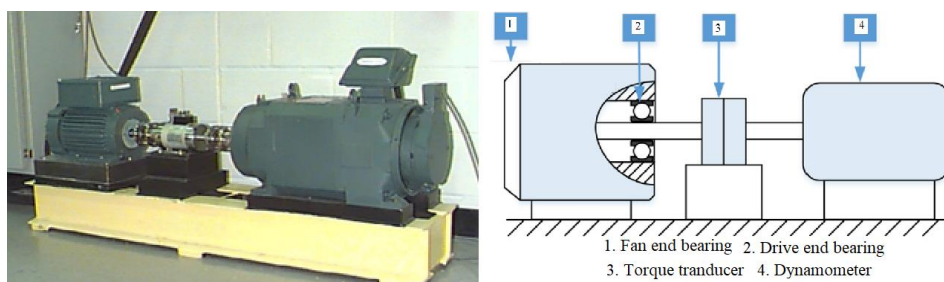
شکل ۸. طیف پوش سیگنال شبیه‌سازی بی‌نویز شده توسط تکنیک پیشنهادی الف- انحراف معیار نویز ۰٫۱ ب- انحراف معیار نویز ۰٫۲ ج- انحراف معیار نویز ۰٫۳

Fig 8. The envelope spectrum of the simulated signal denoised by the proposed technique, (a) standard deviation of 0.1, (b) standard deviation of 0.2, (c) standard deviation of 0.3



شکل ۹. طیف پوش سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویز شده توسط تکنیک ارائه شده در [۲۱]

Fig 9 The envelope spectrum of the simulated signal denoised by the technique introduced in [21]



شکل ۱۰. مجموعه آزمایشگاهی [۲۲]، تصویر واقعی مجموعه (در سمت چپ) و طرح شماتیک آن (در سمت راست)

Fig. 10. Experimental setup [22], Real image of the setup (left) and its schematic design (right)

جدول ۴. مشخصات یاتاقان غلتشی [۲۲]

Table 4. Specifications of roller bearings [22]

تعداد المان غلتشی	زاویه تماس	ضخامت	قطر متوسط	قطر خارجی	قطر داخلی
۹ عدد	صفر رادیان	۱۵ mm	۳۹ mm	۵۲ mm	۲۵ mm

در [۲۱] می‌باشد. بنابراین، تکنیک حذف نویز پیشنهادی قادر است سیگنال بی‌نویز شده را با تخمین خوبی به دست آورد. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی و روش معرفی شده در [۲۱] به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که فرکانس مشخصه عیب رینگ خارجی^۱ و هارمونیک‌های آن توسط تکنیک پیشنهادی با دامنه بالاتری در مقایسه با روش ارائه شده در [۲۱] پدیدار شده‌اند. بنابراین، می‌توان گفت که با بکارگیری تکنیک بی‌نویزسازی پیشنهادی، کیفیت سیگنال شبیه‌سازی افزایش پیدا کرده و به خوبی می‌توان نوع عیب را تشخیص داد.

۵- کاربرد روش پیشنهادی برای داده‌های واقعی

۵-۱- مجموعه آزمایشگاهی و داده‌های ارتعاشی

در این بخش از داده‌هایی استفاده شده است که توسط مجموعه آزمایشگاهی شکل ۱۰ اکتساب شده‌اند. این مجموعه شامل یک الکتروموتور (در سمت چپ) با توان ۲ hp، یک انکودر^۲ یا مبدل گشتاور (در مرکز) و تجهیزات کنترل الکترونیکی می‌باشد. یاتاقان‌های مورد نظر، شفت موتور را نگه می‌دارند. عیوب نقطه‌ای روی یاتاقان‌های غلتشی با مشخصات SKF 6205-2RS JEM به کمک روش‌های

و روش بر پایه‌ی تجزیه‌ی مود تجربی معرفی شده در [۲۱] به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، تکنیک پیشنهادی قادر است ایمپالس‌های ناشی از حضور عیب را با کیفیت بسیار خوبی حفظ کرده و سطح قابل توجهی از نویز موجود در سیگنال را حذف نماید. از طرف دیگر مطابق شکل ۷، مشاهده می‌شود که تکنیک ارائه شده در [۲۱] قسمت‌های زیادی از سیگنال به ویژه ایمپالس‌های عیب را حذف نموده است. مقدار فاکتور کشیدگی برای سیگنال دارای نویز و سیگنال بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۲۱] در جدول ۲ آورده شده است. مطابق جدول ۲، با بکارگیری روش ارائه شده در [۲۱]، مقادیر کشیدگی سیگنال بی‌نویز شده توسط این روش افزایش غیرمنتظره‌ای دارد که ناشی از حذف بخش‌های زیادی از سیگنال می‌باشد. از طرف دیگر، رویکرد پیشنهادی قادر است مقدار پارامتر کشیدگی را به طور محسوس و منطقی افزایش دهد. به عبارت دیگر، این روش بی‌نویزسازی قادر است از کمیت کشیدگی به عنوان ابزاری برای شناسایی حضور عیب و تشخیص زودهنگام عیب بهره‌بردار. همچنین، میانگین مربعات خطا بین سیگنال بدون نویز اصلی و سیگنال بی‌نویز شده در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که مقدار میانگین مربعات خطا متناظر با روش بی‌نویزسازی پیشنهادی کمتر از روش ارائه شده

1 Ball Pass Frequency of the Outer raceway (BPFO)

2 Encoder

جدول ۵. داده‌های مطالعاتی

Table 5. The studies data [22]

نوع عیب	اندازه عیب (mm)	سرعت موتور (rpm)	فرکانس عیب (Hz)	نوع عیب	اندازه عیب (mm)	سرعت موتور (rpm)	فرکانس عیب (Hz)
رینگ داخلی	۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۱۰۵٫۶۴	رینگ خارجی	۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۱۶۰٫۱۶
	۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۱۰۴٫۳۳		۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۱۵۸٫۱۷
	۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۱۰۵٫۶۴		۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۱۶۰٫۱۶
	۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۱۰۴٫۳۳		۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۱۵۸٫۱۷

ایجادشده در اجزای یاتاقان دارای عمق 0.2794 mm بوده و در دو قطر مختلف 0.1778 mm و 0.5334 mm در نظر گرفته شده‌اند. سیگنال‌های ارتعاشی استفاده‌شده در این مطالعه متناظر با دو سرعت دورانی 1772 rpm و 1750 rpm می‌باشند. مشخصات سیگنال‌های مورد مطالعه در این مقاله و فرکانس مشخصه متناظر با آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

۵-۱- رینگ داخلی معیوب

سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب با دو اندازه عیب 0.1778 mm و 0.5334 mm در سرعت‌های 1772 rpm و 1750 rpm در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. شکل ۲۱ توابع مود ذاتی سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب با عیبی به اندازه 0.1778 mm و سرعت دورانی 1750 rpm را نشان می‌دهد.

سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط تکنیک پیشنهادی در این مقاله که متناظر با رینگ داخلی معیوب هستند، در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بکارگیری رویکرد معرفی‌شده در این مقاله، ایمپالس‌های متناظر با حضور عیب به خوبی نمایان شده و سطح قابل توجهی از نویز موجود در سیگنال خام حذف شده است. مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های دارای نویز و سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی و روش معرفی شده در [۲۱] در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط تکنیک ارائه شده در [۲۱] افزایش بسیار زیادی داشته است در حالی که روش بی‌نویزسازی پیشنهادی با افزایش معقول کمیت کشیدگی و افزایش کیفیت سیگنال‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای توانسته است از این کمیت به عنوان ابزاری برای شناسایی

ماشینکاری الکتریکی ایجاد شده‌اند. داده‌های ارتعاشی در دانشگاه کیس وسترن ریورس^۱ توسط شتاب‌سنج‌هایی که به قسمت پوسته خارجی موتور متصل هستند، ثبت شده‌اند. نمونه‌برداری از داده‌های ارتعاشی با فرکانس نمونه‌برداری 12 kHz انجام شده است [۲۲]. مشخصات مربوط به یاتاقان غلتشی در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

معمولاً عیوب یاتاقان‌ها در اجزای اصلی آن یعنی رینگ خارجی، رینگ داخلی و عیب ساچمه و یا ترکیبی از آن‌ها به وجود می‌آیند. هر المان از یاتاقان دارای یک فرکانس مشخصه‌ای است که مقدار آن وابسته به ابعاد مکانیکی یاتاقان می‌باشد. فرکانس مشخصه رینگ خارجی و رینگ داخلی یاتاقان به ترتیب توسط روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند [۱۳]:

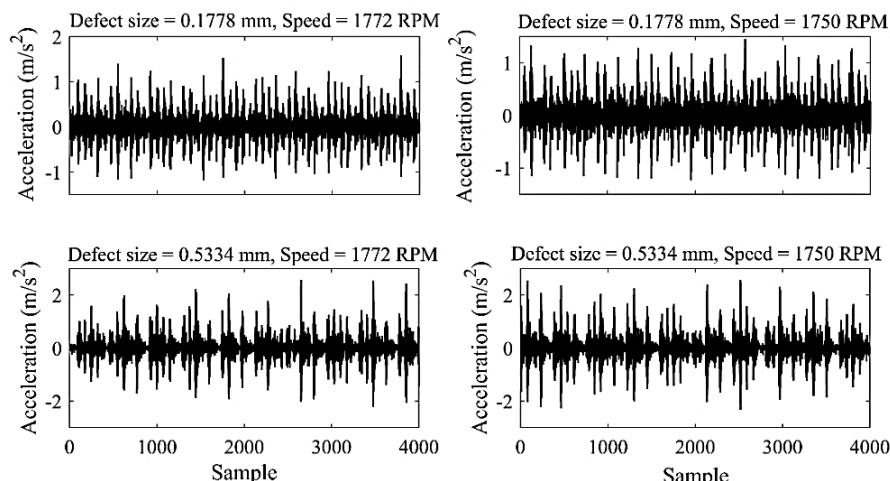
$$BPFO = F_s \left(\frac{N_b}{2} \right) \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \varphi \right) \quad (14)$$

$$BPFI = F_s \left(\frac{N_b}{2} \right) \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \varphi \right) \quad (15)$$

که D_m قطر گام، d قطر ساچمه، N_b تعداد ساچمه، φ زاویه تماس، F_s سرعت دورانی موتور هستند.

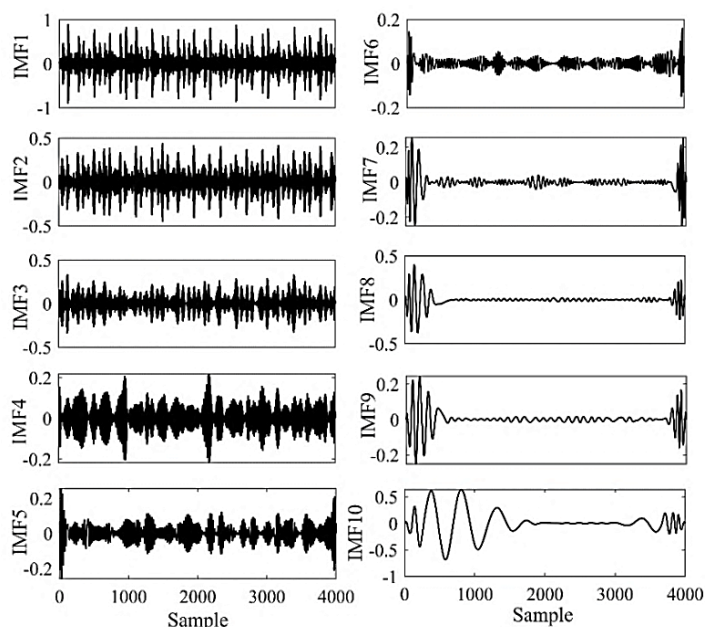
داده‌های مورد بررسی در این پژوهش، متناظر با سه حالت یاتاقان سالم، رینگ داخلی معیوب و رینگ خارجی معیوب هستند.

1 Case Western Reserve University (CWRU)



شکل ۱۱. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب

Fig. 11. The vibration signals corresponding to the faulty inner ring

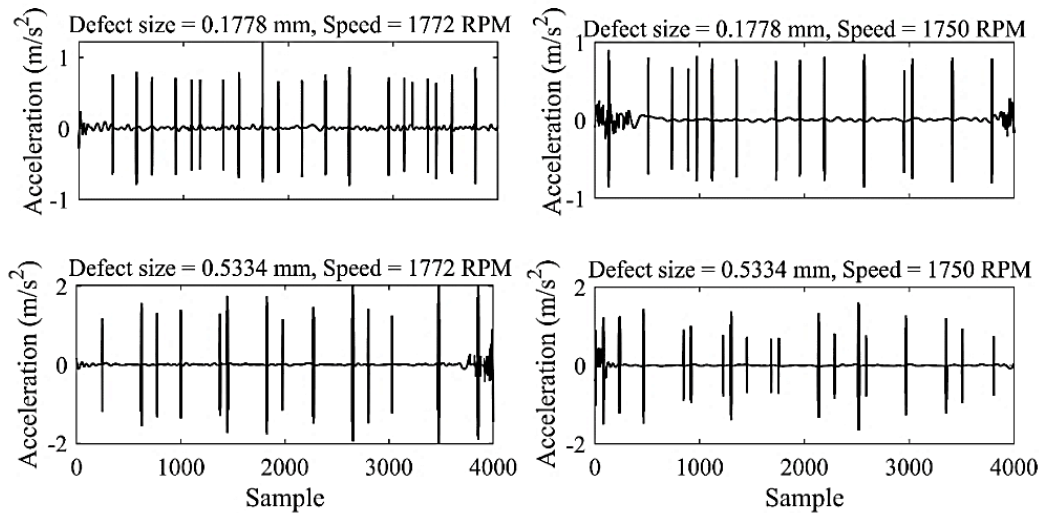


شکل ۱۲. توابع مود ذاتی مربوط به سیگنال ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب با عیبی به اندازه ۰٫۱۷۷۸mm و در سرعت ۱۷۵۰ rpm

Fig. 12. The IMFs for the vibration signal corresponding to the faulty inner ring with the fault size of 0.1778 mm and speed of 1750 rpm

حضور عیب و همچنین تشخیص زودهنگام عیب بهره برد. طیف پوش برای سیگنال‌های ارتعاشی بی‌نویز شده توسط رویکرد پیشنهادی در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. همان‌طوری که در این شکل‌ها دیده می‌شود، فرکانس‌های مشخصه عیب رینگ داخلی و هارمونیک‌های آن در طیف سیگنال‌های بی‌نویز شده به خوبی پدیدار شده‌اند. همچنین، هنگامی که عیب بسیار کوچکی به اندازه mm

۰٫۱۷۷۸ در رینگ داخلی ایجاد می‌شود، هارمونیک‌های فرکانس‌های مشخصه عیب رینگ داخلی درطیف پوش سیگنال بازسازی شده پس از حذف نویز به خوبی نمایان می‌شوند. نتایج حاصل از شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با استفاده از طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی در این پژوهش می‌توان نوع عیب رینگ داخلی را به خوبی تشخیص داد.



شکل ۱۳. سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با رینگ داخلی معیوب

Fig. 13. The denoised signal corresponding to the faulty inner ring

جدول ۶. مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های رینگ داخلی

Table.6. Comparison of the value of the kurtosis for the signals of inner ring

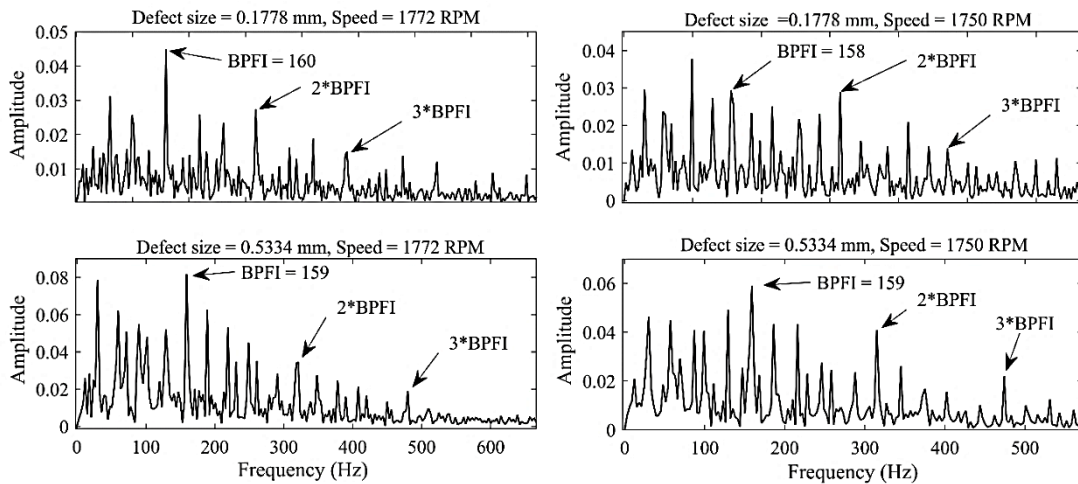
اندازه عیب (mm)	سرعت موتور (rpm)	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۵٫۴۶	۳۳٫۴۴	۴۴٫۰۵
۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۵٫۵۶	۳۳۶٫۳۹	۴۱٫۸۷
۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۷٫۱۹	۱۲۶٫۰۶	۴۱٫۳۱
۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۶٫۹۴	۹۱٫۹۷	۳۷٫۴۶

به منظور بررسی میزان کارایی روش بی‌نویزسازی پیشنهادی، طیف پوش سیگنال‌های ارتعاشی اصلی که دارای نویز هستند، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در حالتی که رینگ داخلی دارای عیبی به اندازه‌ی ۰٫۱۷۷۸ mm بوده و سرعت دورانی ۱۷۷۲ rpm می‌باشد، هیچکدام از فرکانس‌های مشخصه یا تاقان در طیف پوش سیگنال دارای نویز ظاهر نمی‌شوند. همچنین، در دیگر حالت‌ها تنها فرکانس مشخصه‌ی رینگ داخلی و یا هارمونیک دوم آن در طیف پوش پدیدار شده‌اند. نکته قابل توجه دیگر در این شکل عدم حضور ظهور دیگر هارمونیک‌های فرکانس مشخصه در طیف پوش سیگنال‌های دارای نویز است. با مقایسه طیف پوش سیگنال ارتعاشی دارای نویز در شکل ۱۵ با طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده در شکل ۱۴ دیده می‌شود که روش پیشنهادی با حذف

سطح مناسبی از نویز، به خوبی قادر است ایمپالس‌های ناشی از حضور عیب را نمایان سازد و فرکانس‌های مشخصه و هارمونیک‌های آن را با دامنه قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر فرکانس‌ها در طیف پوش سیگنال پدیدار سازد.

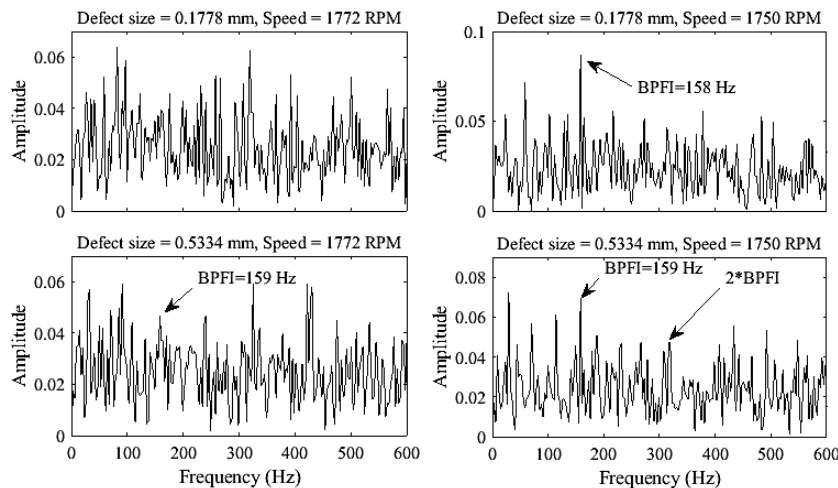
۵-۲- رینگ خارجی معیوب

سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ خارجی معیوب که مشخصات آن در جدول ۵ آمده است در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. شکل ۱۷ نتایج حاصل از روش تجزیه مود تجربی را برای سیگنال‌ها متناظر با رینگ خارجی معیوب با عیبی به اندازه ۰٫۵۳۳۴ mm و سرعت ۱۷۷۲ rpm نشان می‌دهد. سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط رویکرد معرفی شده در این مطالعه برای سیگنال‌های ارتعاشی متناظر



شکل ۱۴. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ داخلی معیوب

Fig. 14. The envelope spectrum of the denoised signals related to the faulty inner ring

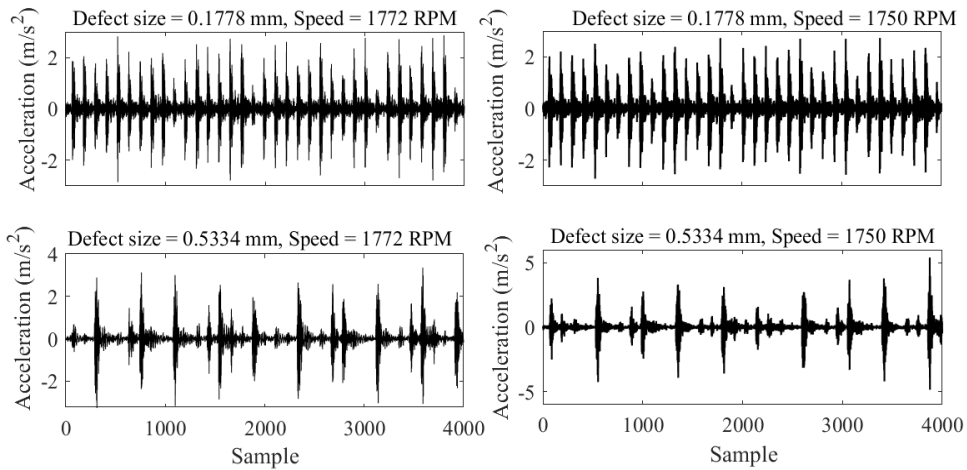


شکل ۱۵. طیف پوش سیگنال‌های دارای نویز مربوط به رینگ داخلی معیوب

Fig. 15. The envelope spectrum of the noisy signal related to the faulty inner ring

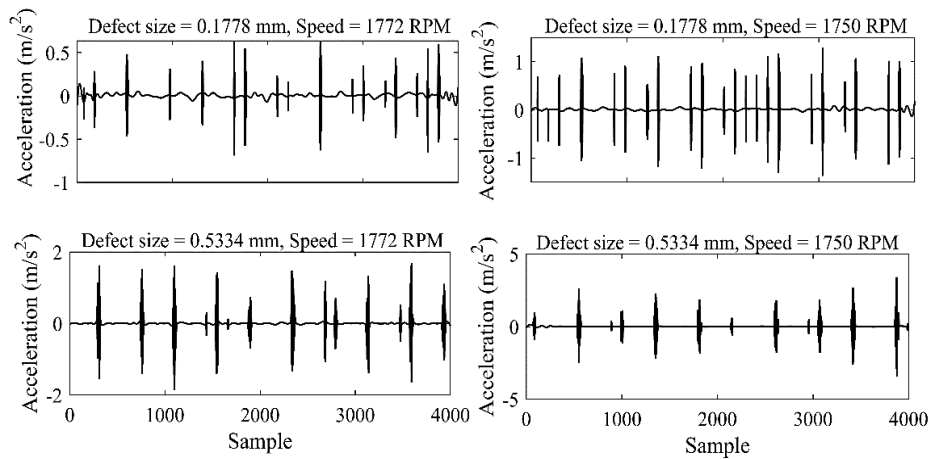
با روش ارائه شده در [۲۱] هستند. در واقع تکنیک بی‌نویزسازی پیشنهادی، به دلیل افزایش منطقی حساسیت پارامتر کشیدگی نسبت به حضور عیب بر روش مرجع [۲۱] برتری دارد. در شکل ۱۹، طیف پوش مربوط به سیگنال‌های ارتعاشی بی‌نویز شده متناظر با رینگ خارجی معیوب نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با بکارگیری تکنیک پیشنهادی، فرکانس‌های مشخصه که شاخصی برای تعیین عیب رینگ خارجی هستند به خوبی

با رینگ خارجی معیوب در شکل ۱۸ نشان داده شده‌اند. پدیدار شدن ایمپالس‌های عیب و حذف نویز موجود در سیگنال نشان‌دهنده‌ی توانمندی تکنیک پیشنهاد شده در این مقاله است. مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های دارای نویز و سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی و روش موجود در [۲۱] در جدول ۷ ارایه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی دارای مقدار کشیدگی بیشتری در مقایسه



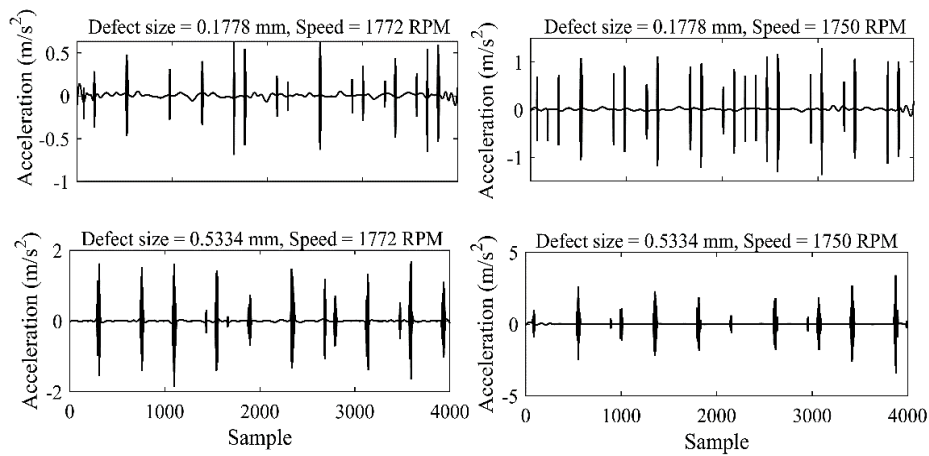
شکل ۱۶. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ خارجی معیوب

Fig. 16. The vibration signals corresponding to the faulty outer ring



شکل ۱۷. تجزیه مود تجربی برای سیگنال ارتعاشی متناظر با رینگ خارجی معیوب با عیبی به اندازه ۰/۵۳۳۴mm در سرعت ۱۷۷۲ rpm

Fig. 17. The IMFs for the vibration signal corresponding to the faulty inner ring with the fault size of 0.5334 mm and speed of 1772 rpm



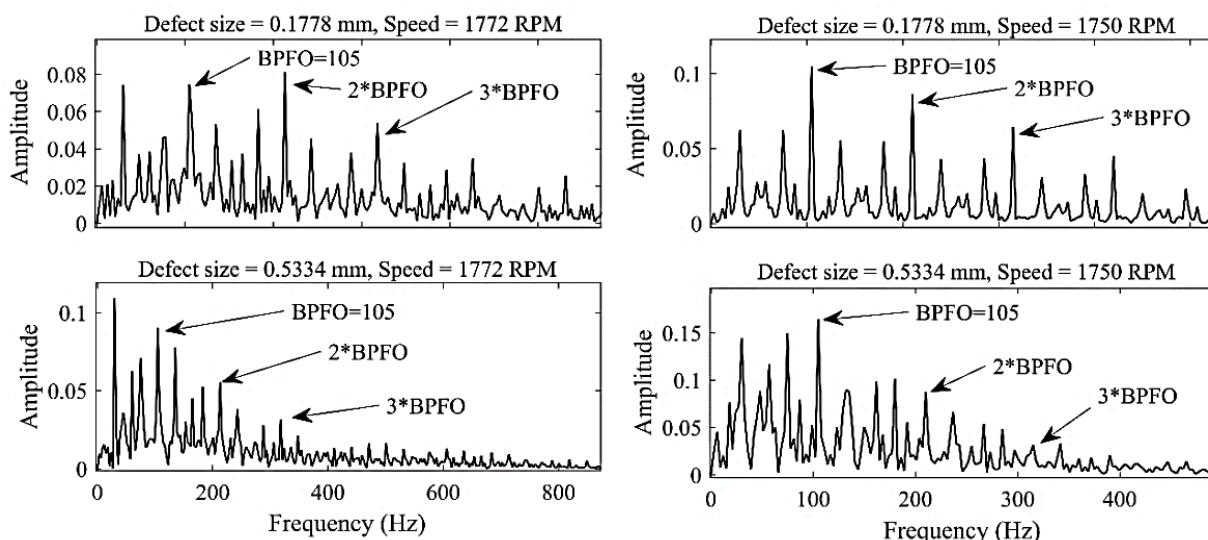
شکل ۱۸. سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با رینگ خارجی معیوب

Fig. 18. The denoised signal corresponding to the faulty outer ring

جدول ۷. مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های رینگ خارجی

Table 7. Comparison of the value of the kurtosis for the signals of outer ring

اندازه عیب (mm)	سرعت موتور (rpm)	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۷٫۶۴	۳۸٫۳۱	۴۰٫۰۶
۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۷٫۷۳	۲۸٫۲۲	۳۰٫۸۳
۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۱۴٫۰۲	۲۸٫۸۴	۳۱٫۳۵
۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۱۹٫۳۲	۳۸٫۹۷	۳۹٫۳۳



شکل ۱۹. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ خارجی معیوب

Fig. 19. The envelope spectrum of the denoised signals related to the faulty outer ring

یاتاقان دارند. از طرف دیگر، مقدار این فاکتور برای سیگنال‌های به‌دست‌آمده توسط روش بی‌نویزسازی پیشنهادی نزدیک به ۳ می‌باشند که نشان دهنده‌ی سالم بودن یاتاقان‌ها هستند. در نهایت، طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده در شکل ۲۲ ارائه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، پیک‌های در F_s ، $2 \times F_s$ ، $3 \times F_s$ در طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده پدیدار شده‌اند. وجود این پیک‌ها نشان می‌دهند که عیبی در یاتاقان وجود ندارد.

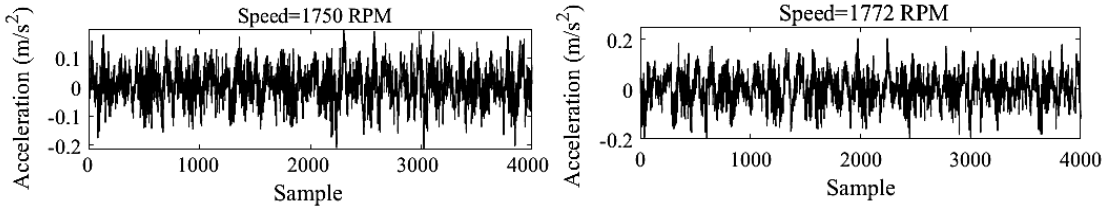
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویکرد حذف نویز جدیدی بر پایه روش‌های تجزیه مود تجربی، تابع چگالی احتمال و آستانه‌گذاری بهبودیافته پیشنهاد

در طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده ظاهر شده‌اند. این حقیقت حتی برای عیوب با اندازه‌ی بسیار کوچک نیز صادق است.

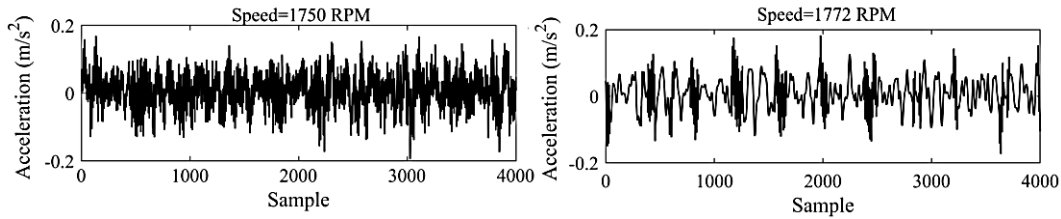
۵-۳- حالت یاتاقان سالم

سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با حالت سالم در سرعت‌های دورانی ۱۷۷۲rpm و ۱۷۵۰rpm در شکل ۲۰ ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از تکنیک معرفی‌شده در این مقاله متناظر با حالت یاتاقان سالم در شکل ۲۱ نشان داده شده‌اند. مقادیر فاکتور کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویز شده در جدول ۸ ارائه شده‌اند. مطابق این جدول، مقدار کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی در [۲۱] بسیار بزرگ‌تر از عدد ۳ هستند به طوری که دلالت بر معیوب بودن



شکل ۲۰. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با حالت سالم

Fig. 20. The vibration signals corresponding to the healthy status



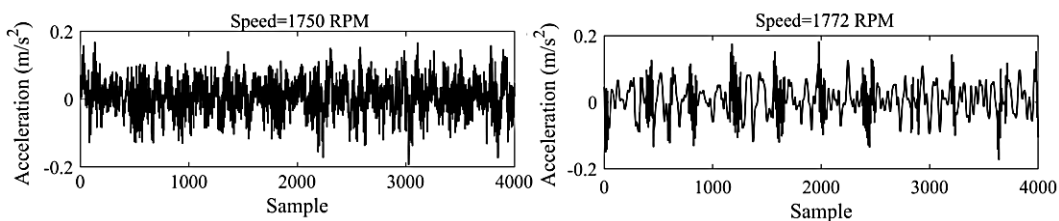
شکل ۲۱. سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با حالت سالم

Fig. 21. The denoised signal corresponding to the healthy status

جدول ۸. مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های حالت سالم

Table 8. Comparison of the value of the kurtosis for the signals of healthy status

سرعت موتور (rpm)	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۱۷۷۲	۲٫۹۱	۱۲۹٫۹۹	۳٫۱۴
۱۷۵۰	۲٫۹۴	۶۷۶٫۳۰	۳٫۱۳



شکل ۲۲. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به حالت سالم

Fig. 22. The envelope spectrum of the denoised signals related to the healthy status

در سیگنال خام ممکن است تنها در برخی از مدهای آن نهفته باشد، در این مطالعه از رویکردی مبتنی بر تابع چگالی احتمال استفاده شده است. برای این منظور، تابع چگالی احتمال سیگنال خام و مدهای تشکیل‌دهنده‌اش محاسبه شده‌اند. سپس، با محاسبه‌ی اندازه شباهت

شده است. سپس، از این تکنیک به منظور شناسایی لحظه وقوع عیب و نوع آن در یاتاقان‌ها در سرعت‌های دورانی مختلف استفاده شده است. در تکنیک پیشنهادی، هر سیگنال به کمک روش تجزیه مود تجربی به مدهای تشکیل‌دهنده‌اش تجزیه می‌شود. از آنجایی که نویز موجود

- decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 454(1971) (1998) 903-995.
- [4] P. Nguyen, M. Kang, J. M. Kim, B. H. Ahn, J. M. Ha, B. K. Choi, Robust condition monitoring of rolling element bearings using de-noising and envelope analysis with signal decomposition techniques, *Expert Systems with Applications*, 42(22) (2015) 9024-9032.
- [5] K.F. Al-Raheem, A. Roy, K. Ramachandran, D.K. Harrison, S. Grainger, Rolling element bearing faults diagnosis based on autocorrelation of optimized: wavelet denoising technique, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(3-4) (2009) 393-402.
- [6] R. Li, D. He, Rotational machine health monitoring and fault detection using EMD-based acoustic emission feature quantification, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(4) (2012) 990-1001.
- [7] Y. Kopsinis, S. McLaughlin, Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding, *IEEE Transactions on signal Processing*, 57(4) (2009) 1351-1362.
- [8] X. x. Liu, F. l. Han, J. g. Wang, Wavelet extended EMD noise reduction model for signal trend extraction, in: 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, IEEE, 2009, pp. 1-5.
- [9] D. L. Donoho, J. M. Johnstone, Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *biometrika*, 81(3) (1994) 425-455.
- [10] M.S. Sadooghi, S.E. Khadem, A new performance evaluation scheme for jet engine vibration signal denoising, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76 (2016) 201-212.
- [11] R. Abdelkader, A. Kaddour, Z. Derouiche, Enhancement of rolling bearing fault diagnosis based on improvement of empirical mode decomposition denoising method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5-8) (2018) 3099-3117.
- [12] K. Wang, P.S. Heyns, Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 1-12.
- بین توابع چگالی احتمال سیگنال و مودهای به‌دست‌آمده، مودهای ذاتی دارای نویز از مودهای بدون نویز تفکیک شده‌اند. در مرحله‌ی بعد با اعمال تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته به مودهای منتخب، فرآیند بی‌نویزسازی انجام شده است. از رویکرد پیشنهادی در دو مورد مطالعاتی بی‌نویزسازی سیگنال‌های شبیه‌سازی و عیب‌یابی یاتاقان‌ها در سرعت‌های دورانی مختلف استفاده شده است. مشاهده شده که تکنیک ارائه‌شده در این مقاله قادر است نویز موجود در سیگنال‌های شبیه‌سازی و یا داده‌های واقعی را با سطح قابل قبولی حذف نموده و اطلاعات مفید آن را حفظ نماید. در این مقاله، از فاکتور کشیدگی و طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده به ترتیب برای شناسایی حضور عیب و تشخیص نوع آن استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که این رویکرد قادر است حالت‌های مختلف یاتاقان نظیر یاتاقان سالم، رینگ داخلی معیوب و رینگ خارجی معیوب را به خوبی تشخیص دهد. نتایج به‌دست‌آمده از کیفیت بیشتری نسبت به روش‌های رایج بی‌نویزسازی برخوردار هستند.
- فهرست علائم**
- علائم انگلیسی
- | | |
|----------|-----------------------------|
| BPFO | فرکانس مشخصه رینگ خارجی، Hz |
| BPFI | فرکانس مشخصه رینگ داخلی، Hz |
| EMD | تجزیه مود ذاتی |
| IMF | مولفه مود ذاتی |
| K_{th} | شاخص مرزی |
| PDF | تابع چگالی احتمال |
| $x(t)$ | سیگنال |
- مراجع**
- [1] R. Heng, M.J.M. Nor, Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, *Applied Acoustics*, 53(1-3) (1998) 211-226.
- [2] J. Antoni, R.B. Randall, The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines, *Mechanical systems and signal processing*, 20(2) (2006) 308-331.
- [3] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu, The empirical mode

- for denoising of gaussian noise, International Journal of Advanced Research in Computer Science, 8(8) (2017).
- [18] L. Jing-yi, L. Hong, Y. Dong, Z. Yan-sheng, A new wavelet threshold function and denoising application, Mathematical Problems in Engineering, 2016 (2016).
- [19] D. L. Donoho, De-noising by soft-thresholding, IEEE transactions on information theory, 41(3) (1995) 613-627.
- [20] M. Kedadouch, M. Thomas, A. Tahan, A comparative study between empirical wavelet transforms and empirical mode decomposition methods: Application to bearing defect diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing, 81 (2016) 88-107.
- [21] D. z. Zhao, J. y. Li, W. d. Cheng, T. y. Wang, W. g. Wen, Rolling element bearing instantaneous rotational frequency estimation based on EMD soft-thresholding denoising and instantaneous fault characteristic frequency, Journal of Central South University, 23(7) (2016) 1682-1689.
- [22] Case Western Reserve University, Bearing data center. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>, 2018.
- Processing, 25(1) (2011) 416-430.
- [13] S. N. Chegini, A. Bagheri, F. Najafi, Application of a new EWT-based denoising technique in bearing fault diagnosis, Measurement, 144 (2019) 275-297.
- [14] S.N. Chegini, A. Bagheri, F. Zarif, M. Alitavoli, Noise removal from the vibration signals of the rotating machinery using the empirical wavelet transform and the conventional thresholding methods, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 9(1) (2019) 111-124. (in Persian)
- [15] S. Nezamivand Chegini, A. Bagheri, F. Najafi, A new hybrid intelligent technique based on improving the compensation distance evaluation technique and support vector machine for bearing fault diagnosis, Modares Mechanical Engineering, 19(4) (2019) 865-875. (in Persian)
- [16] A. Komaty, A. O. Boudraa, B. Augier, D. Daré-Emzivat, EMD-based filtering using similarity measure between probability density functions of IMFs, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63(1) (2013) 27-34.
- [17] V. Singh, Comparative study of algorithms/techniques

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Nezamivand Chegini, Z. Karimi rastehkenari, A. Bagheri, B. Ahmadi, Denoising vibration signals of rotating machines using probability density function, similarity measure and improved thresholding function, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2493-2512.

DOI: [10.22060/mej.2020.18129.6742](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18129.6742)

