Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 589-592
DOI: 10.22060/mej.2020.18129.6742

Denoising vibration signals of rotating machines using probability density function, similarity measure and improved thresholding function

S. Nezamivand Chegini1* , Z. Karimi rastehkenari[2], A. Bagheri[1], B. Ahmadi[3]

[1] Department of Dynamics, Control and Vibrations, Faculty of Mechanical Engineering, the University of Guilan, Rasht, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran
[3] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ABSTRACT: In this paper, a new method for removing the noise from the vibration signals acquired from the rotating machinery for its condition monitoring is presented. Firstly, each signal is decomposed into its modes using the empirical mode decomposition method. Then for distinguishing the noisy modes from the noise-free modes, the similarity measure between the probability density function of the raw signal and its modes is calculated. Finally, the noise-dominate modes are denoised by the improved thresholding function, and the denoised signal is reconstructed. In this study, the proposed method is implemented for denoising the simulated signal and real data corresponding to different bearing conditions. Finally, the kurtosis and the envelope spectrum of the denoised signal are calculated for detecting the fault presence and its type. The results show that the proposed technique can improve the quality of the reconstructed signals so that the sensitivity of the kurtosis factor to the presence of the defect in the inner and outer rings is increased. Also, the defects frequencies appear in the spectrum of the signals denoised, and the fault type can easily be detected. The results indicate that the proposed denoising technique is superior to the conventional empirical mode decomposition-based denoising method.

Review History:

Received: Mar. 17, 2020
Revised: Jul. 01, 2020
Accepted: Aug. 31, 2020
Available Online: Sep. 09,2020

Keywords:

Vibration signals denoising
Empirical mode decomposition
Probability density function
Bearing fault diagnosis
Improved thresholding function

1- Introduction

Rotary machines are one of the key components of industrial equipment. The defects present in these systems reduces the efficiency and, ultimately, permanently stops the operation of these devices. On the other hand, in most cases, the signals received by the sensors are accompanied by noise. This noise complicates processing the signals and prevents the extraction of useful features from them. Therefore, a method for denoising the signals that can remove unrelated information plays a key role in the accurate troubleshooting of machines. Nguyen et al. [1] introduced a denoising technique based on Empirical Mode Decomposition (EMD) method, soft thresholding function and Naïve Bayes classifier [1]. Nezamivand Chegini et al. [2] proposed a new strategy for denoising the vibration signals using Empirical Wavelet Transform (EWT) method, the kurtosis factor and envelope spectrum. In another work [3], the authors have proposed a vibration signal denoising approach using the EWT method with common thresholding techniques. Komaty et al. [4] analyzed the heart-related signal using the EMD and Kullback–Leibler divergence criterion.

In this paper, a new technique is proposed to extract the characteristics that indicate the bearings working conditions. To achieve this goal, a method has been proposed which is based on the EMD, improved thresholding function and Probability Density Function (PDF). For evaluating the proposed approach, this noise cancellation method has been used to troubleshoot the bearings.

2- Proposed Denoising Approach

The signal *x(t)* which has noise *n(t)* can be considered as Eq. (1). In real-world applications, a noise-free signal *y(t)* is not available, and the goal is to achieve an approach that minimizes *n(t)* noise as much as possible and to extract the reconstructed benign signal.

$$x(t) = y(t) + n(t) \tag{1}$$

The implementation steps of the proposed denoising method are as follows:

a) Decompose *x(t)* into its intrinsic mode functions (IMFs) by the EMD and calculate the PDF of the signal and the IMFs.

b) Obtain the distance between the signal PDF and the ith IMF PDF according to the following equations:

$$similarity(i) = distance\left(PDF\left(x(t)\right), PDF\left(IMF_i(t)\right)\right) \tag{2}$$

$$distance(P,Q) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \left(P(Z) - Q(Z)\right)^2 dZ} \tag{3}$$

*Corresponding author's email: saeed.nezamivand@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

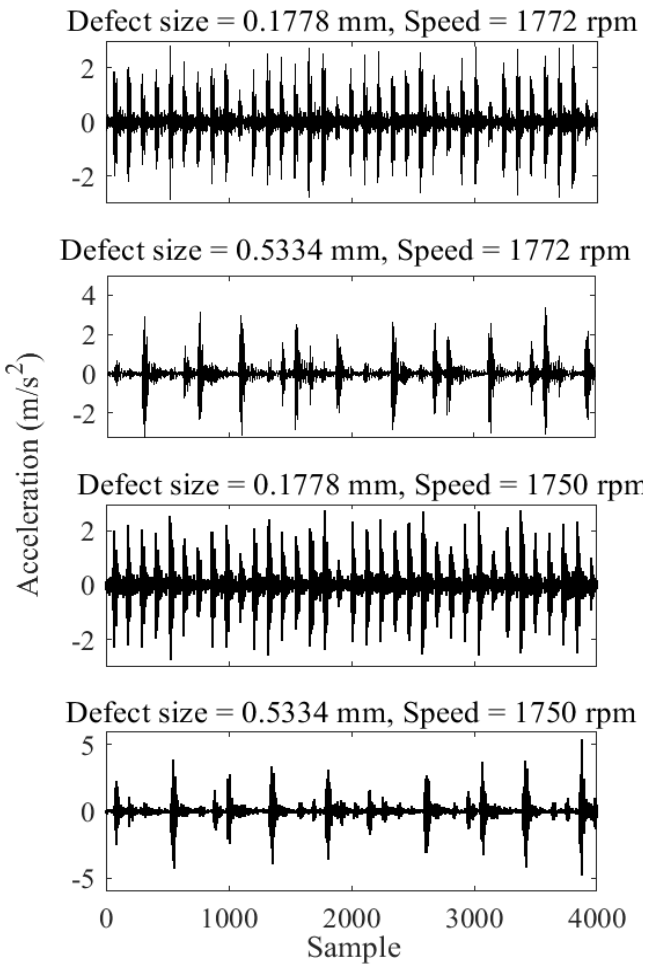


Fig. 1. The vibration signals corresponding to the defective outer ring

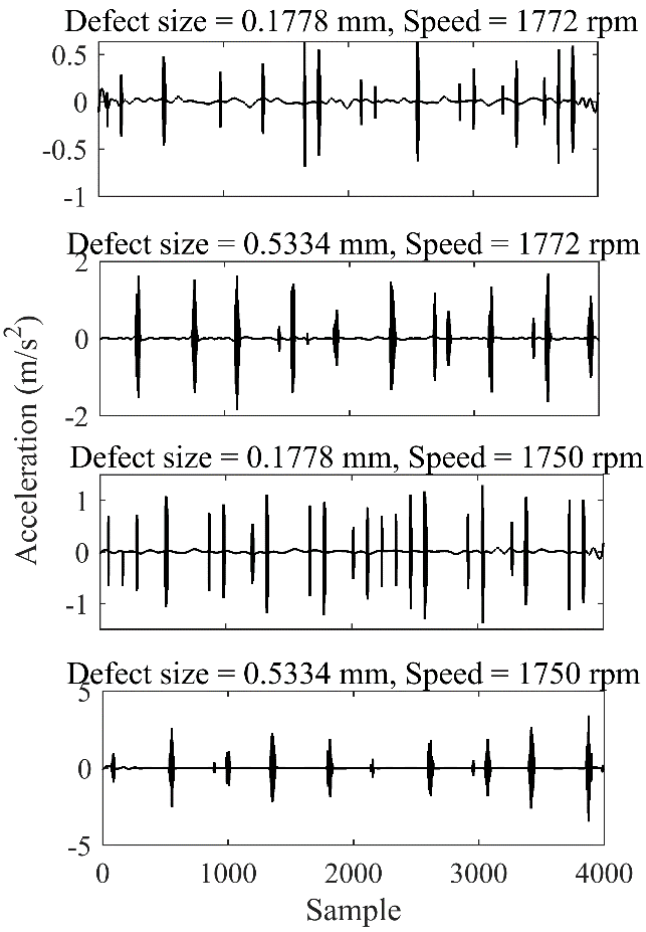


Fig. 2. Denoised signals corresponding to the defective outer ring

c) Determine the most appropriate IMF:

$$K_{th} = argmax\left\{PDF\ similarity(i)\right\} + 1 \qquad 1 \le i \le c \tag{4}$$

where The K_{th} boundary index corresponds to the IMF number after the maximum IMF. When K_{th} is determined, the first IMF up to the K_{th} are considered as noisy modes and the rest of the IMFs are considered as noise-free modes.

d) Denoise the noise by the improved thresholding function [4] and reconstruct the signal:

$$\bar{y}(t) = \sum_{i\in\Omega_1} \overline{IMF_j}(t) + \sum_{k\in\Omega_2} IMF_k(t) + r_c(t) \tag{5}$$

where $\bar{y}(t)$ is the reconstructed signal, Ω_1 and Ω_2 are the noisy modes set and noise-free modes set, respectively. Also, $\overline{IMF_j}(t)$ is the jth denoised mode, $IMF_k(t)$ is the kth noise-free mode and $r_c(t)$ is the residual.

e) Calculate the kurtosis and envelope spectrum of the denoised signal for detecting the defect presence and the fault type, respectively.

3- Application of Proposed Method for Real Data

3.1. Experimental setup

This section uses data acquired by the Case Western Reverse University (CWRU) laboratory set [2]. Point defects on the bearing components with SKF 6205-2RS JEM specifications are created by means of the electrical machining methods. The vibration data are obtained with the sampling frequency of 12 kHz. The defects created in the bearing components have a depth of 0.2794 mm and are considered in two different diameters of 0.1778 mm and 0.53434 mm. The vibration signals used in this study correspond to two rotational speeds of 1772 rpm and 1750 rpm.

4- Results and Discussion

The vibration signals for the defective outer ring are shown in Fig. 1. The denoised signals by the proposed approach are illustrated in Fig. 2. The appearance of fault impulses and the elimination of noise in the signal indicate the capability of the technique proposed in this paper. The kurtosis value for the noisy signals and denoised signals by the proposed method and the method in [5] is presented in Table 7. As can be seen in this Table, the signals denoised by the proposed method have a higher kurtosis value compared to the method presented in [5]

Table 1. Comparison of the kurtosis value for outer ring vibration signals

Fault size (mm)	Speed (rpm)	Raw signal	Ref. [5]	This study
0.1778	1772	7.64	38.31	40.06
0.1778	1750	7.73	28.22	30.83
0.5334	1772	14.02	28.84	31.35
0.5334	1750	19.32	38.97	39.33

5- .Conclusions

In this paper, a new noise removal approach based on empirical mode decomposition method, probability density function and improved thresholding was proposed. Then, this technique has been applied to identify the bearing defect at different rotational speeds. It was observed that the presented technique is able to eliminate the noise in the real data and maintain its useful information. In this paper, the kurtosis factor and spectrum of the denoised signals were used to identify the presence of a defect and its type, respectively. The results showed that this approach is able to distinguish between different bearing defectives.

References

[1] 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.

[2] S. N. Chegini, A. Bagheri, F. Najafi, Application of a new EWT-based denoising technique in bearing fault diagnosis, Measurement, 144 (2019) 275-297.

[3] 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)

[4] 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.

[5] 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.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 589-592.

DOI: 10.22060/mej.2020.18129.6742

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۴۹۳ تا ۲۵۱۲
DOI: 10.22060/mej.2020.18129.6742

حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوّار 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

خلاصه: در این مقاله، روشی جدید برای حذف نویز از سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوّار به منظور پایش وضعیت آن‌ها ارایه 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 بی‌نویزشده 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.

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

۱- مقدمه

سیستم‌های دوّار 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 ایجادشده 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 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

1 Kurtosis

2 Envelope Spectrum Analysis

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

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 دوّار ایفا می‌کند.

روش تجزیه مود تجربی[1] 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[2] 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[3] و کلاسه‌بندی مودها بر اساس طبقه‌بند نایو بیز[4]، تکنیکی تطبیق‌پذیر و مقاوم برای بی‌نویزسازی و عیب‌یابی یاتاقان‌ها معرفی شده است [۴]. اَل-رحیم و همکاران[5] [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[6] [۶] تکنیک آستانه‌گذاری بر پایه روش تجزیه مود تجربی را برای کاهش نسبت نویز به سیگنال‌های آکوستیک پیشنهاد کردند. آن‌ها ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌های بی‌نویزشده متناظر با حالت‌های سالم و نامعلوم را با هم ترکیب نموده و به کمک تکنیک‌های آماری از این ویژگی‌های فشرده برای عیب‌یابی ماشین‌های دوّار استفاده کردند. کوپزنیس و لافلین[7] [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[8] [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 بی‌نویزشده با مودهای فرکانس پایین جمع شده و سیگنال ارتعاشی بازسازی شد. برای اولین بار دونوهو و جانسون[9] [۹] روش ترکیبی تبدیل موجک و آستانه‌گذاری نرم را برای بی‌نویزسازی به کار بردند. صدوقی و خادم [۱۰] تبدیل موجک گسسته[10]، تابع دونوهو-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 بی‌نویزشده 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)

نویسندگان در کار دیگری [۱۴]، با ترکیب روش تبدیل تجربی موجک و روش‌های رایج آستانه‌گذاری نظیر آستانه‌گذاری نرم، رویکردی به منظور حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی یاتاقان‌ها ارائه نموده‌اند. آن‌ها ابتدا داده‌های ارتعاشی را به کمک تبدیل تجربی موجک پردازش نموده و مولفه‌های دارای نویز را به کمک همبستگی متقابل انتخاب شده‌اند. سپس با بکارگیری روابط رایج در بی‌نویزسازی بر پایه‌ی تبدیل موجک گسسته، ایمپالس‌های ناشی از حضور عیب به خوبی در سیگنال بی‌نویز شده نمایان شده‌اند. در مرجع [۱۵]، روش ترکیبی هوشمند برای عیب‌یابی یاتاقان بر پایه بهبود روش انتخاب ویژگی ارزیابی جبران فاصله و ماشین بردار پشتیبان معرفی شد. همچنین، استراتژی جدیدی برای عیب‌یابی چند کلاسه یاتاقان‌ها ارایه شد. ابتدا، سیگنال‌های ارتعاشی به کمک تجزیه مود تجربی و تبدیل بسته‌ای موجک تجزیه شده و سپس روش انتخاب ویژگی ارزیابی جبران فاصله بهبودیافته برای انتخاب مناسب‌ترین ویژگی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. کوماتی و همکاران[1] [۱۶] هر سیگنال مربوط به قلب را به کمک روش تجزیه مود تجربی به مودهای تشکیل دهنده‌اش تجزیه نموده‌اند. 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 کرده‌اند. در نهایت، مودهای دارای نویز به کمک تابع آستانه‌گذاری رایج نرم بی‌نویز شده‌اند.

در این مقاله، تکنیکی به منظور استخراج ویژگی‌هایی که نشان‌دهنده‌ی شرایط کاری یاتاقان از حیث سالم و معیوب‌بودن می‌باشند، ارائه شده است. برای نیل به این هدف، روشی پیشنهاد شده است که بر پایه‌ی بهبود بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی به کمک یک تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته و تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی بی‌نویز شده می‌باشد. تفاوت اساسی بین رویکرد معرفی‌شده در این مقاله نسبت به روش‌هایی نظیر تکنیک‌های ارائه شده در [۴، ۱۴ و ۱۶]، در نحوه پردازش سیگنال، فرآیند انتخاب مولفه‌های با معنی و دارای نویز و به کارگیری تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته می‌باشد. به عنوان مثال همان‌طور که در بالا گفته شد، در [۱۴] از تبدیل تجربی موجک برای پردازش سیگنال استفاده شده و با انتخاب مولفه‌ی دارای نویز به کمک همبستگی متقابل و اعمال توابع آستانه‌گذاری متداول، سیگنال بی‌نویز شده است. هدف اصلی از کار ارائه‌شده در این اینجا، بهبود تکنیک ارائه شده در [۱۶] توسط تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته و تعیین مقدار مطلوب آستانه به منظور افزایش کیفیت اطلاعات سیگنال بی‌نویز شده می‌باشد به طوری که پس از بی‌نویزسازی داده‌های ارتعاشی، حساسیت فاکتوری نظیر مقدار کشیدگی به حضور عیب افزایش یابد. در تکنیک پیشنهادی، سیگنال‌های ارتعاشی به کمک رویکرد تجزیه مود تجربی پردازش شده و به مولفه‌های تشکیل دهنده‌اش تجزیه می‌شوند. در مرحله بعد، تابع چگالی احتمال[2] سیگنال خام و هر کدام از مودهای آن محاسبه می‌شود. برای دسته‌بندی مودهای دارای نویز و مودهای بدون نویز، اندازه شباهت[3] میان تابع چگالی احتمال سیگنال معیوب و هر کدام از مودهای به دست آمده تعیین می‌شود. در نهایت، با اعمال تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته به مودهای دارای نویز، سیگنال بی‌نویزشده بازسازی می‌شود. برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی، از این روش حذف نویز برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها استفاده شده است. برای این منظور، کاربرد تکنیک حذف نویز پیشنهادی را در دو مورد سیگنال شبیه‌سازی 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- روش‌ها

۲-۱- انتخاب مودهای ذاتی دارای نویز

عموماً سیگنال‌های ارتعاشی آغشته به نویز هستند. نویز موجود در این سیگنال‌ها از منابع نامعلومی تولید می‌شوند که اطلاعاتی در خصوص این منابع در دسترس نمی‌باشد. به عبارت دیگر، در کاربردهای واقعی، دانش دقیقی در خصوص سیگنال‌های ارتعاشی بدون نویز وجود ندارد. از این رو، تا کنون در تحقیقات مختلف روش‌های بی‌نویزسازی مختلفی پیشنهاد شده‌اند که بدون داشتن دانش قبلی در خصوص سیگنال بدون نویز اصلی مبادرت به حذف نویز از داده‌ها می‌نمایند. در رویکرد بی‌نویزسازی استفاده‌شده در این مقاله، ابتدا هر سیگنال ارتعاشی به کمک روش تجزیه مود تجربی به مودهای تشکیل‌دهنده‌اش تجزیه می‌شوند. سپس، به منظور داشتن اطلاعاتی در خصوص نویز موجود در سیگنال، از فرآیندی برای تفکیک مولفه‌های دارای نویز و با معنی از مولفه‌های بدون نویز

1 Komaty et al.

2 Probability Density Function (PDF)

3 Similarity Measure

استفاده شده است.

تابع چگالی احتمال[1] در آمار و احتمالات به تابعی گفته می‌شود که توزیع آماری را به شکل انتگرالی نمایش می‌دهد. با محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال مربوط به مودهای 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]:

$$PDF\ similarity(i)=distance\left(PDF(x(t)),PDF(IMF_i(t))\right) \quad (۱)$$

که در آن

$$distance(P,Q)=2\backslash P-Q\ \backslash\ =\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}(P(Z)-Q(Z))^2dZ} \quad (۲)$$

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 مودهای بدون نویز تفکیک کرده و آماده بی‌نویزسازی می‌کند [۴ و ۱۶]:

$$K_{th}=argmax\{PDF\ similarity(i)\}+1 \qquad 1\le i\le c \quad (۳)$$

در رابطه بالا، ابتدا شماره تابع مود ذاتی مربوط به مقدار ماکزیمم تابع اندازه شباهت (رابطه (۱)) تعیین می‌شود. شاخص مرزی K_{th} متناظر با شماره مود ذاتی بعد از مود ذاتی ماکزیمم می‌باشد. هنگامی که K_{th} تعیین می‌شود، توابع مود ذاتی اول تا K_{th} ام به عنوان مودهای دارای نویز و مابقی توابع مود ذاتی به عنوان مودهای 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]:

$$\widetilde{C}_j(t)=\begin{cases}C_j(t), & |C_j(t)|\ge T_j\\ 0, & |C_j(t)|<T_j\end{cases} \quad (۴)$$

$$\widetilde{C}_j(t)=\begin{cases}C_j(t)-sign(C_j(t))T_j, & |C_j(t)|\ge T_j\\ 0, & |C_j(t)|<T_j\end{cases} \quad (۵)$$

که $\widetilde{C}_j(t)$ بی‌نویزشده‌ی $C_j(t)$، $sign(.)$ تابع علامت و T_j مقدار آستانه متناظر با مولفه $\widetilde{C}_j(t)$ 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

1 Probability Density Function (PDF)

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]:

$$\widetilde{C_j}(t)= \begin{cases} C_j(t)-sign\left(C_j(t)\right)\alpha T_j, & \left|C_j(t)\right|\geq T_j \\ 0, & \left|C_j(t)\right|<T_j \end{cases} \quad (۶)$$

که α پارامتری است که مقدار آن در بازه [۰و۱] قرار دارد و به طور تجربی تعیین می‌شود.

مهم‌ترین مسئله در تابع آستانه‌گذاری تخمین مقدار آستانه است. رابطه استفاده‌شده در این مقاله برای تخمین پارامتر آستانه به صورت زیر می‌باشد [۱۹ و ۹]:

$$T_j = K_j\sigma_j\sqrt{2ln\,N} \quad (۷)$$

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

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{median\left|C_j(t)\right|}{0.6745}} \quad (۸)$$

در این رابطه $C_j(t)$، تابع مود ذاتی jام 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.

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 بازسازی‌شده را استخراج نماید.

$$x(t)=y(t)+n(t) \quad (۹)$$

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 هریک از توابع مود ذاتی طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

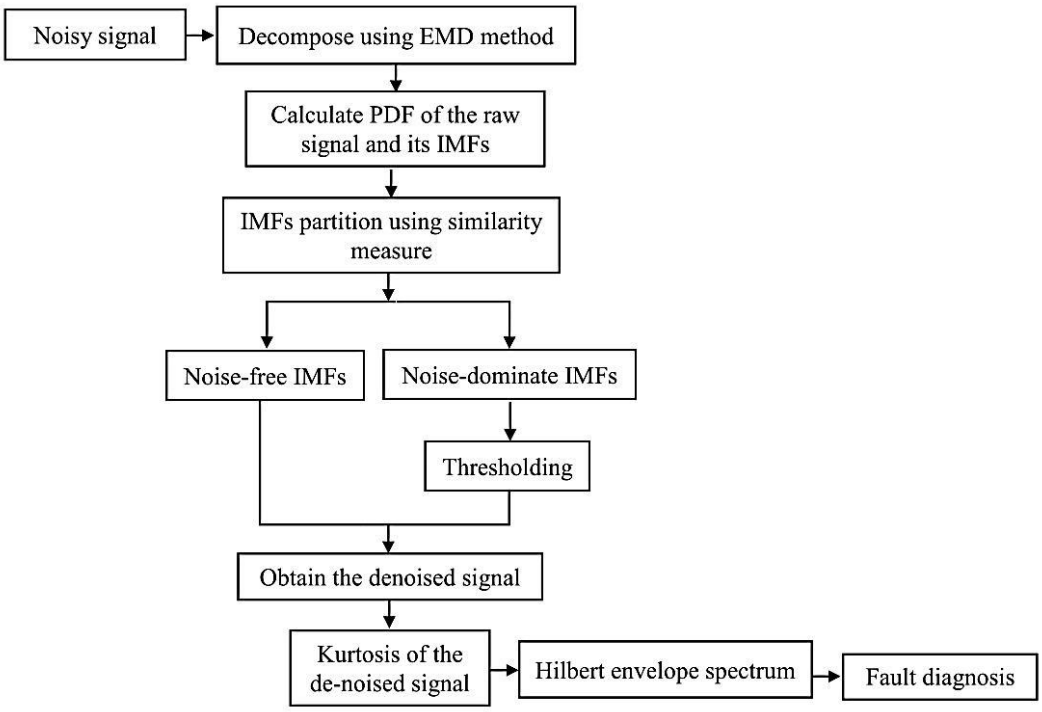
۴- در این مرحله، مناسب‌ترین تابع مود ذاتی مطابق رابطه (۳) تعیین و انتخاب می‌شود.

۵- در نهایت، مودهای دارای نویز به کمک تابع آستانه‌گذاری بهبودیافته بی‌نویز می‌شوند و سیگنال مطابق رابطه (۱۰) بازسازی می‌شود:

$$\bar{y}(t)=\sum_{i\in\Omega_1}\overline{IMF_j}(t)+\sum_{k\in\Omega_2}IMF_k(t)+r_c(t) \quad (۱۰)$$

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

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



شکل۱. فلوچارت روش بی‌نویزسازی پیشنهادی

Fig. 1. The flowchart of the proposed denoising method

جدول۱. 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

باشد، عیبی در اجزای یاتاقان وجود دارد.

۷- برای تعیین نوع عیب در یاتاقان، طیف پوش سیگنال بازسازی‌شده 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.

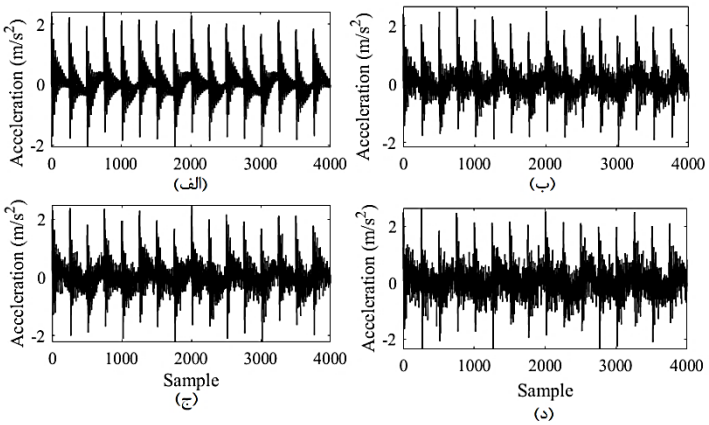
۴- کاربرد روش پیشنهادی برای سیگنال‌های شبیه‌سازی

در این بخش برای ارزیابی روش حذف نویز پیشنهادی، از سیگنال شبیه‌سازی استفاده شده است. در سیگنال شبیه‌سازی هر چقدر سیگنال بدون نویز اصلی به سیگنال بازسازی‌شده شبیه‌تر باشد، تکنیک حذف نویز پیشنهادی با خطای کم‌تری مواجه می‌شود. لذا از فاکتور مقدار میانگین مربعات خطا[1] 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]:

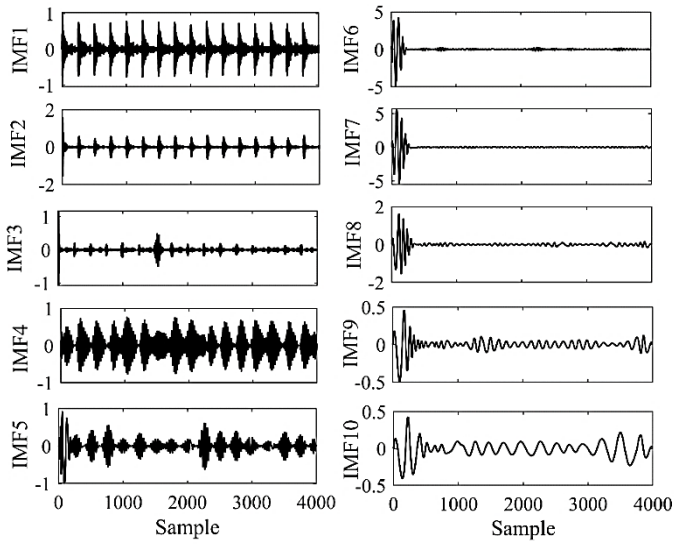
$$x(t) = A_i e^{(-\alpha_i t')} sin(2\pi f_i t) + 0.2 sin(2\pi F_r t) + 0.1 sin(2\pi(2F_r)t) + n(t) \quad (۱۱)$$

1 Mean Sqaure Error



شکل۲. 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



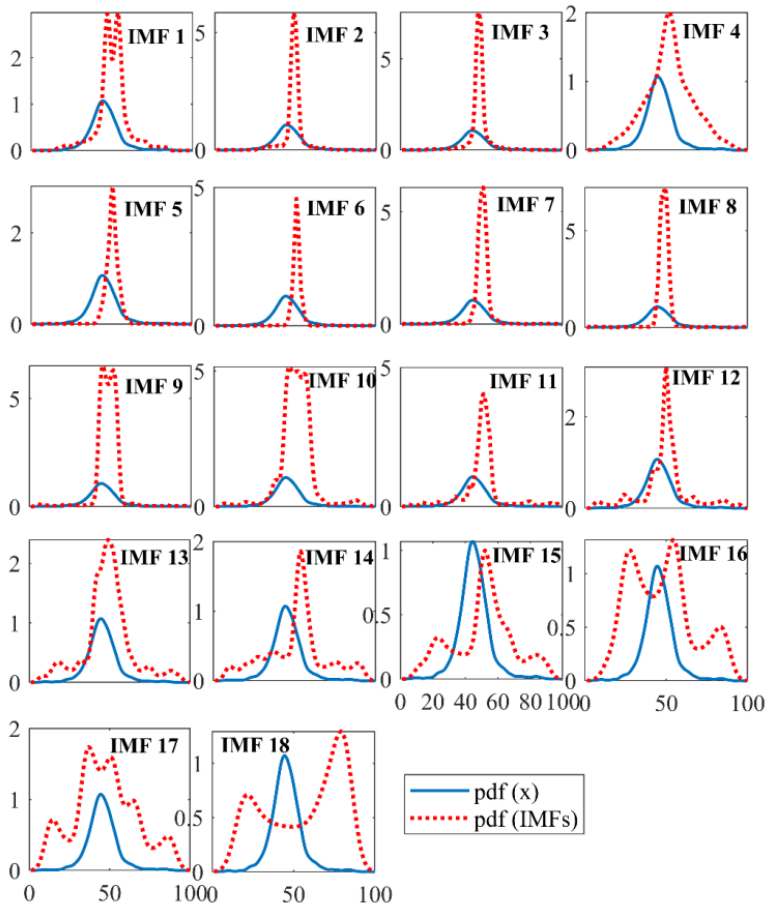
شکل۳. ۱۰ تابع مود ذاتی اول مربوط به سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱

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

$$t' = mod(t, \frac{1}{F_m}) \tag{۱۲}$$

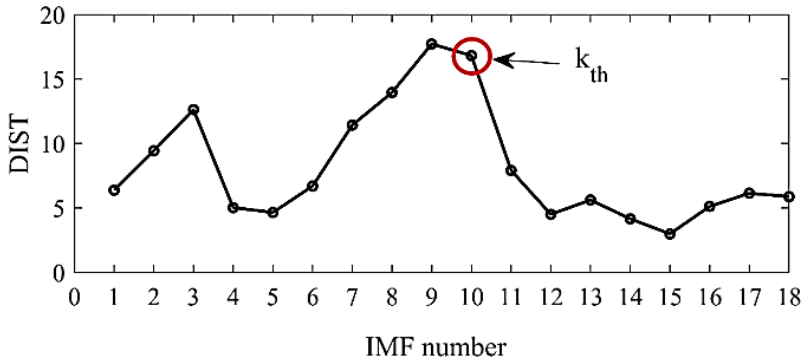
$$n(t) \sim N(0, 0.1) \tag{۱۳}$$

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 می‌باشد. پارامترهای α_i متناظر با مقادیر f_i در جدول ۱ لیست شده‌اند. F_m فرکانس مشخصه رینگ خارجی معیوب که مساوی ۵۰ Hz است. F_r 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



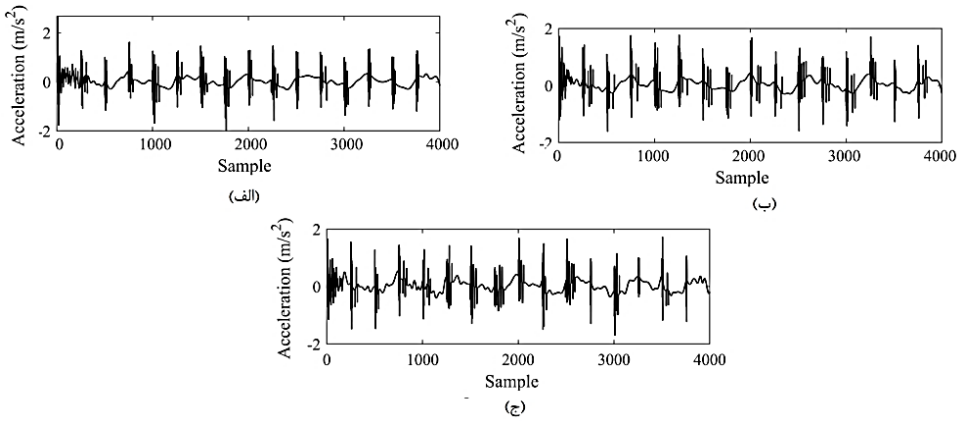
شکل۴. تابع چگالی احتمال محاسبه‌شده برای سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱ و مولفه‌های آن

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



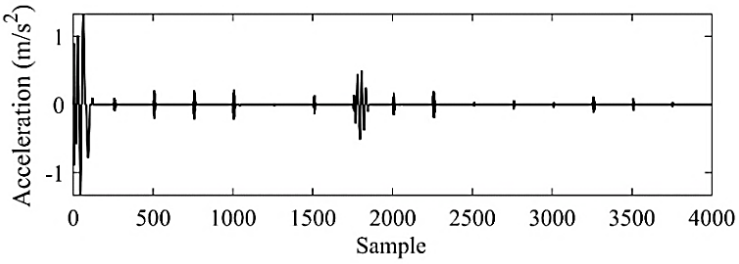
شکل۵ . نمودار اندازه شباهت بر حسب شماره مودها برای تعیین شاخص مربوط به سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی دارای نویز با انحراف معیار ۰٫۱

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



شکل۶. سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویزشده 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



شکل۷. سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویزشده توسط تکنیک معرفی شده در [۲۱]

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

جدول۲. مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال شبیه‌سازی

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

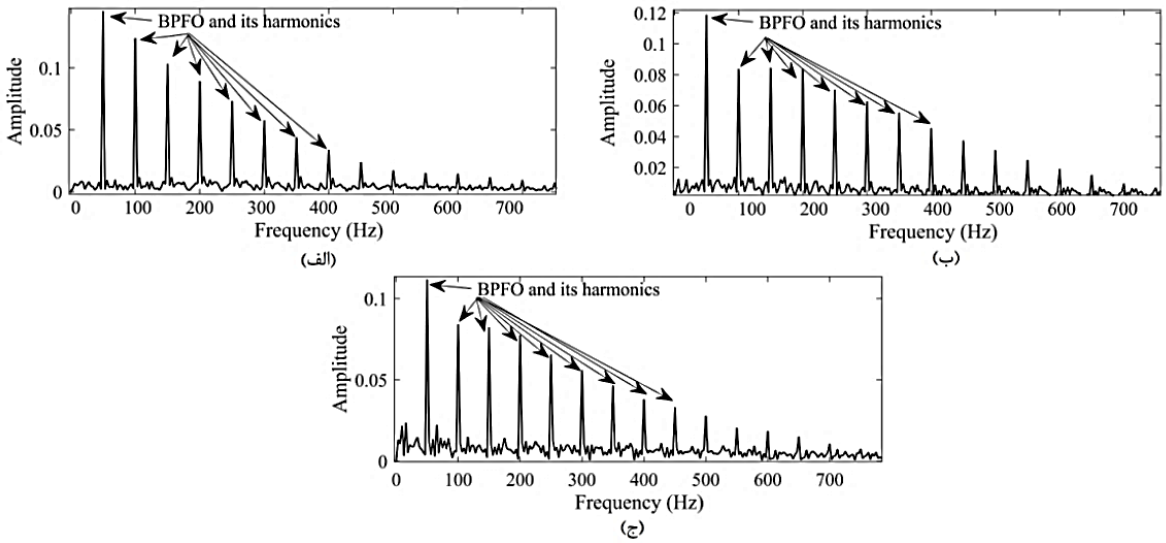
انحراف معیار نویز	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱	۶٫۲۴	۳۶٫۱۳	۸٫۱۹
۰٫۲	۵٫۴۶	۱۱۳٫۷۸	۷٫۷۶
۰٫۳	۵٫۰۲	۱۳۵٫۹۸	۷٫۰۸

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 محاسبه‌شده 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. 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}=۱۰ در نظر گرفته می‌شود. در واقع، مودهای ۱ تا ۹ دارای نویز و مودهای ۱۰ تا ۱۸ بی‌نویز هستند. سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط تکنیک ارائه‌شده در این مقاله

جدول۳. مقایسه مقدار میانگین مربعات خطا برای سیگنال شبیه‌سازی

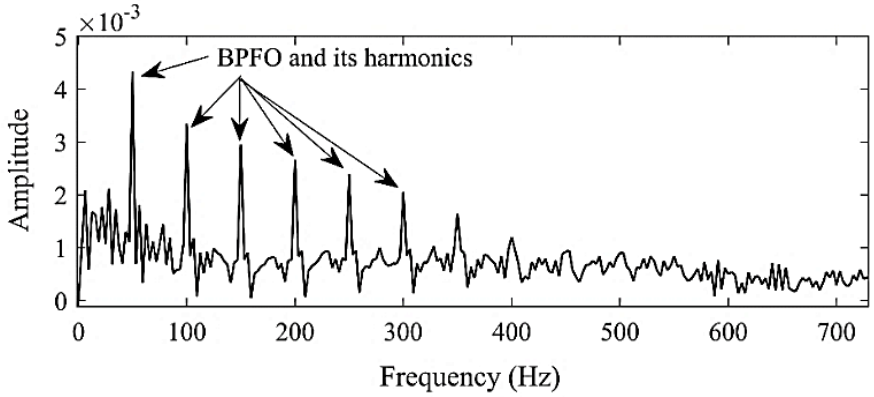
Table 3. Comparison of the mean squared error values for the simulation signal

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



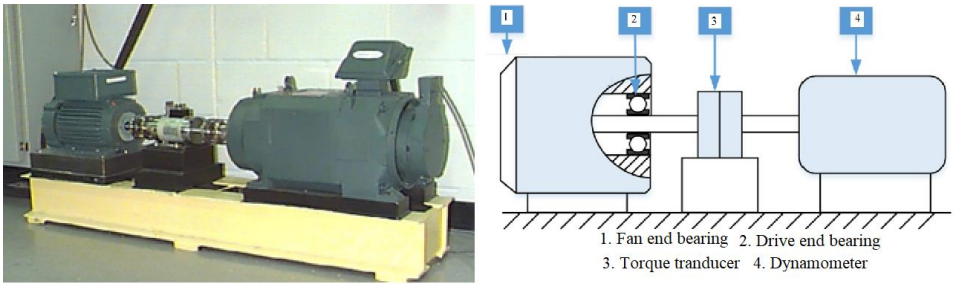
شکل ۸. طیف پوش سیگنال شبیه‌سازی بی‌نویزشده توسط تکنیک پیشنهادی الف- انحراف معیار نویز ۰/۱ ب- انحراف معیار نویز ۰/۲ ج- انحراف معیار نویز ۰/۳

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



شکل۹. طیف پوش سیگنال ارتعاشی شبیه‌سازی بی‌نویزشده توسط تکنیک ارائه شده در [۲۱]

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



شکل۱۰. 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)

جدول۴. مشخصات یاتاقان غلتشی [۲۲]

Table 4. Specifications of roller bearings [22]

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

و روش بر پایه‌ی تجزیه مود تجربی معرفی شده در [۲۱] به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارایه 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 ارائه‌شده در [۲۱]، مقادیر کشیدگی سیگنال بی‌نویزشده 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 بهره ببرد. همچنین، میانگین مربعات خطا بین سیگنال بدون نویز اصلی و سیگنال بی‌نویزشده در جدول ۳ ارایه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که مقدار میانگین مربعات خطا متناظر با روش بی‌نویزسازی پیشنهادی کم‌تر از روش ارائه شده 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 ارایه شده‌اند. مشاهده می‌شود که فرکانس مشخصه عیب رینگ خارجی[1] و هارمونیک‌های آن توسط تکنیک پیشنهادی با دامنه بالاتری در مقایسه با روش ارائه‌شده 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[2] 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

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	۱۶۰٫۱۶	رینگ خارجی	۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۱۰۵٫۶۴
	۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۱۵۸٫۱۷		۰٫۱۷۷۸	۱۷۵۰	۱۰۴٫۳۳
	۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۱۶۰٫۱۶		۰٫۵۳۳۴	۱۷۷۲	۱۰۵٫۶۴
	۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۱۵۸٫۱۷		۰٫۵۳۳۴	۱۷۵۰	۱۰۴٫۳۳

ماشینکاری الکتریکی ایجاد شده‌اند. داده‌های ارتعاشی در دانشگاه کیس وسترن ریورس[1] توسط شتاب‌سنج‌هایی که به قسمت پوسته خارجی موتور متصل هستند، ثبت شده‌اند. نمونه‌برداری از داده‌های ارتعاشی با فرکانس نمونه‌برداری ۱۲ kH انجام شده است [۲۲]. مشخصات مربوط به یاتاقان غلتشی در جدول ۴ ارایه 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]:

$$BPFO = F_s\left(\frac{N_b}{2}\right)\left(1-\frac{d}{D_m}cos\varphi\right) \quad (۱۴)$$

$$BPFI = F_s\left(\frac{N_b}{2}\right)\left(1+\frac{d}{D_m}cos\varphi\right) \quad (۱۵)$$

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

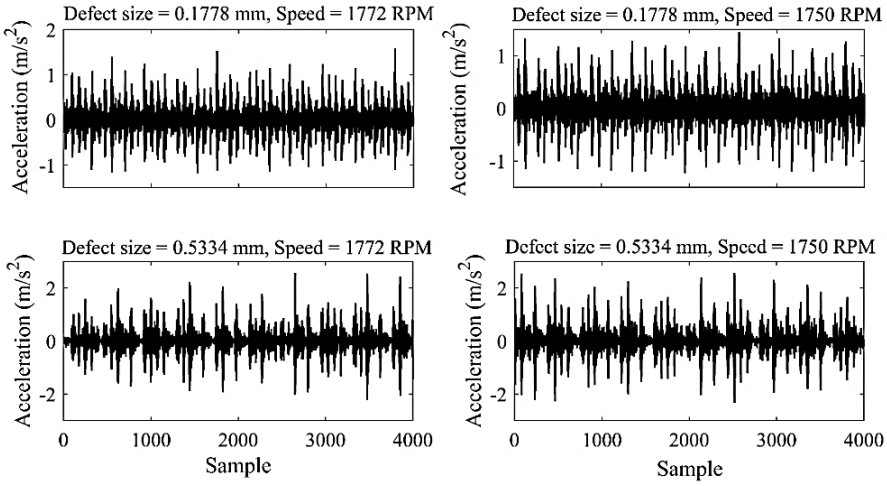
داده‌های مورد بررسی در این پژوهش، متناظر با سه حالت یاتاقان سالم، رینگ داخلی معیوب و رینگ خارجی معیوب هستند. عیوب ایجادشده در اجزای یاتاقان دارای عمق ۰٫۲۷۹۴ mm بوده و در دو قطر مختلف ۰٫۱۷۷۸ mm و ۰٫۵۳۳۴ mm در نظر گرفته شده‌اند. سیگنال‌های ارتعاشی استفاده‌شده در این مطالعه متناظر با دو سرعت دورانی ۱۷۷۲ rpm و ۱۷۵۰rpm 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 عیب۰٫۱۷۷۸ mm و ۰٫۵۳۳۴ mm در سرعت‌های ۱۷۷۲rpm و ۱۷۵۰rpm در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. شکل ۲۱ توابع مود ذاتی سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب با عیبی به اندازه۰٫۱۷۷۸ mm و سرعت دورانی۱۷۵۰rpm را نشان می‌دهد.

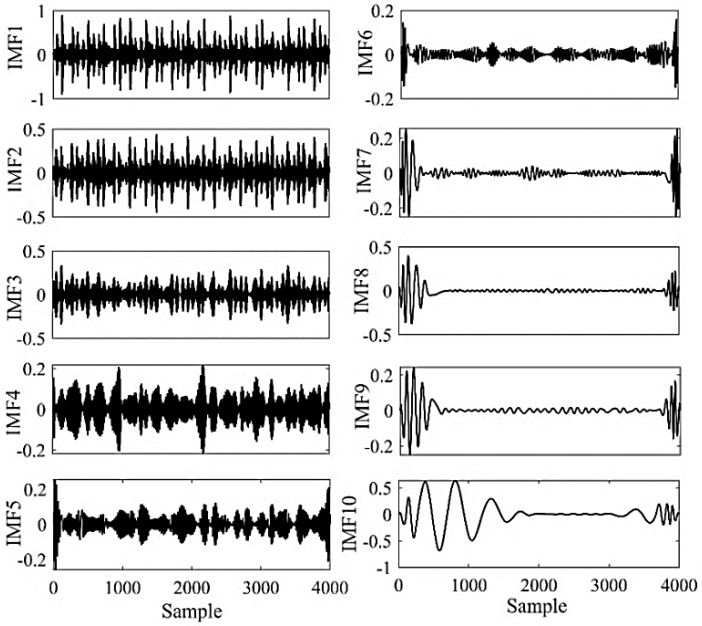
سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط تکنیک پیشنهادی در این مقاله که متناظر با رینگ داخلی معیوب هستند، در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بکارگیری رویکرد معرفی‌شده در این مقاله، ایمپالس‌های متناظر با حضور عیب به خوبی نمایان شده و سطح قابل توجهی از نویز موجود در سیگنال خام حذف شده است. مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های دارای نویز و سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط روش پیشنهادی و روش معرفی شده در [۲۱] در جدول ۶ ارایه شده است. مقادیر کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط تکنیک ارایه 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

1 Case Western Reverse University (CWRU)



شکل۱۱. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب

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

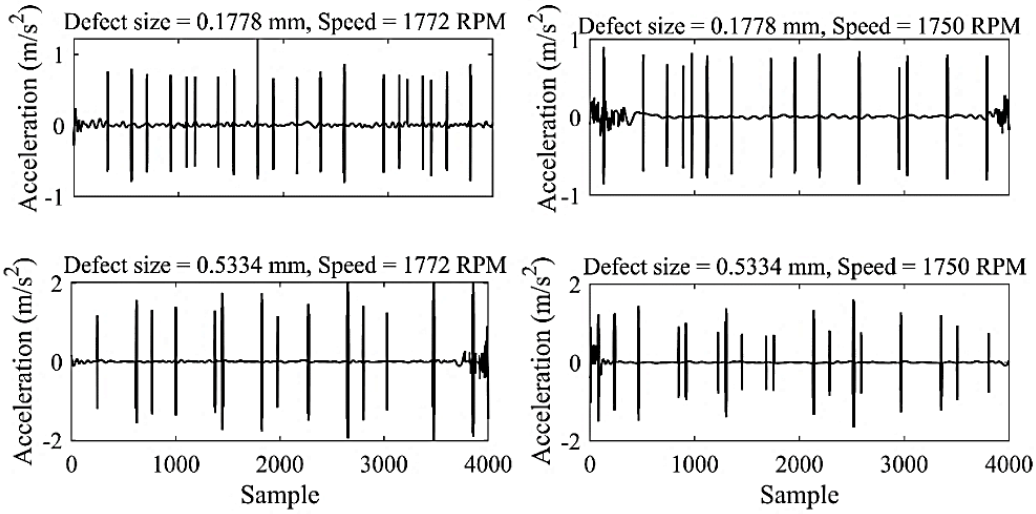


شکل۱۲. توابع مود ذاتی مربوط به سیگنال ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب با عیبی به اندازه ۰٫۱۷۷۸mm و در سرعت rpm 1750

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 ببرد.

طیف پوش برای سیگنال‌های ارتعاشی بی‌نویزشده توسط رویکرد پیشنهادی در شکل ۱۴ ارایه شده‌اند. همان‌طوری که در این شکل‌ها دیده می‌شود، فرکانس‌های مشخصه عیب رینگ داخلی و هارمونیک‌های آن در طیف سیگنال‌های بی‌نویزشده به خوبی پدیدار شده‌اند. همچنین، هنگامی که عیب بسیار کوچکی به اندازه mm ۰٫۱۷۷۸ در رینگ داخلی ایجاد می‌شود، هارمونیک‌های فرکانس‌های مشخصه عیوب 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 بی‌نویزشده 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

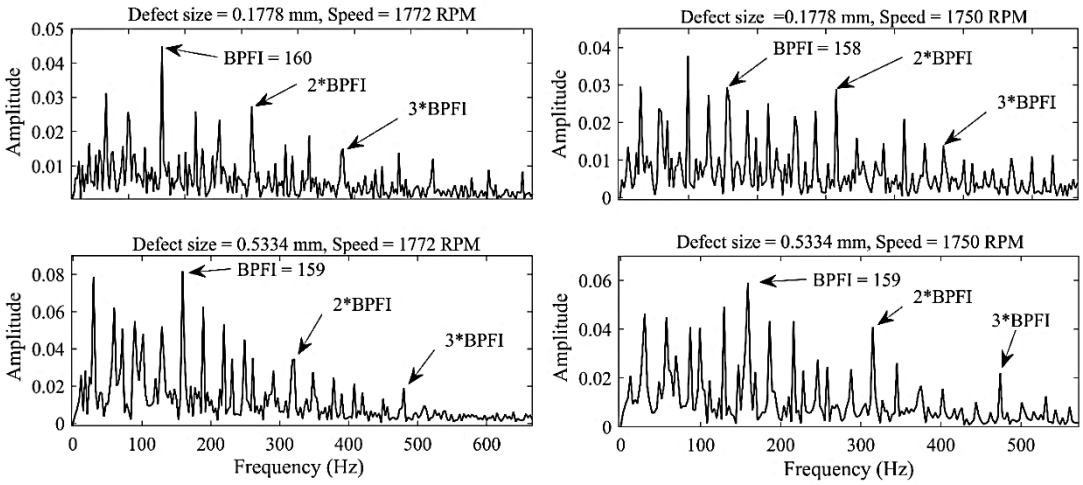
Table.6. Comparison of the value of the kurtosis for the signals of inner ring

اندازه عیب (mm)	سرعت موتور (rpm)	سیگنال اصلی	روش ارائه شده در [۲۱]	روش پیشنهادی
۰٫۱۷۷۸	۱۷۷۲	۵٫۴۶	۳۳۰٫۴۴	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 یاتاقان 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.

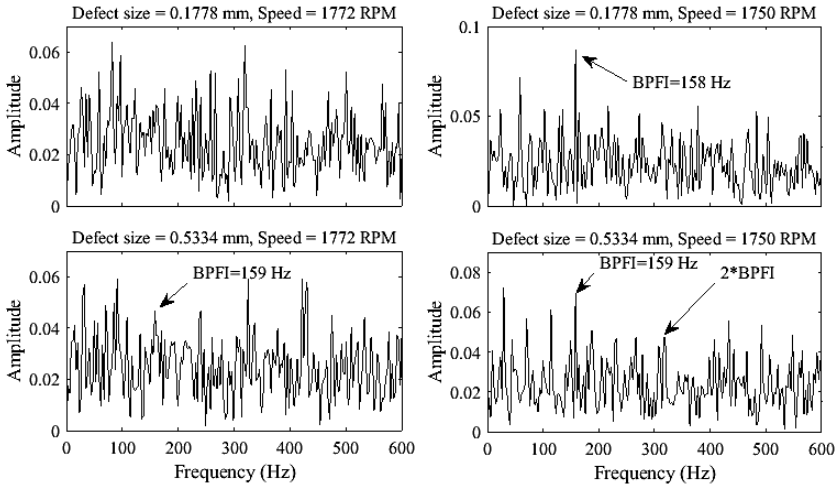
۵-۲- رینگ خارجی معیوب

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 بی‌نویزشده توسط رویکرد معرفی‌شده در این مطالعه برای سیگنال‌های ارتعاشی متناظر



شکل ۱۴. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویزشده مربوط به رینگ داخلی معیوب

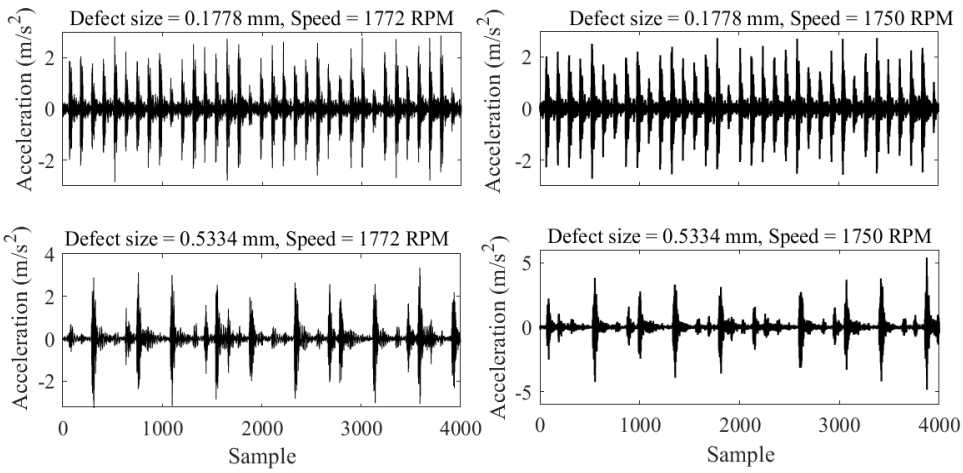
Fig. 14. The envelope spectrum of the denoised signals related to the faulty inner ring



شکل۱۵. طیف پوش سیگنال‌های دارای نویز مربوط به رینگ داخلی معیوب

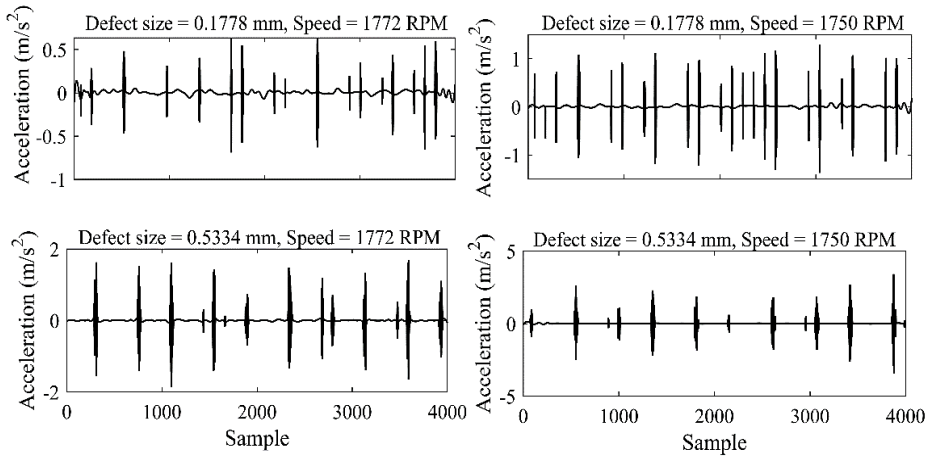
Fig. 15. The envelope spectrum of the noisy signal related to the faulty inner ring

با 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 بی‌نویزشده توسط روش پیشنهادی و روش موجود در [۲۱] در جدول ۷ ارایه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط روش پیشنهادی دارای مقدار کشیدگی بیشتری در مقایسه 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 بی‌نویزشده 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



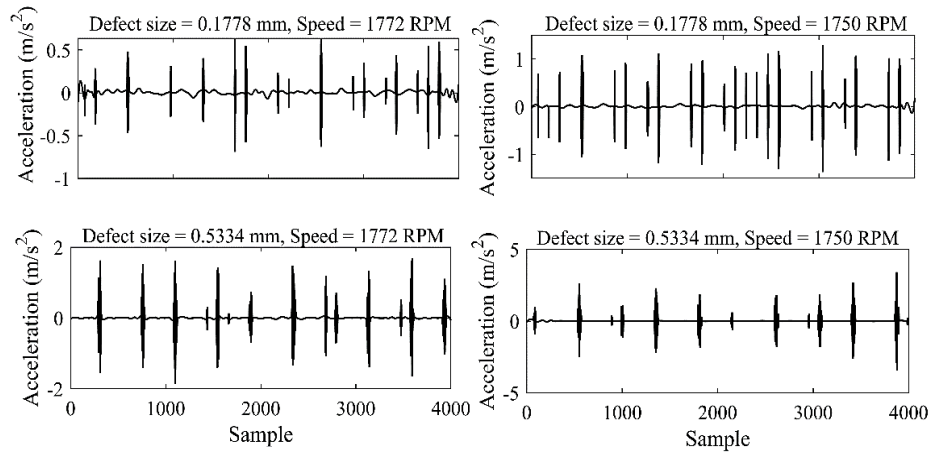
شکل۱۶. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ خارجی معیوب

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 سرعت۱۷۷۲ 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



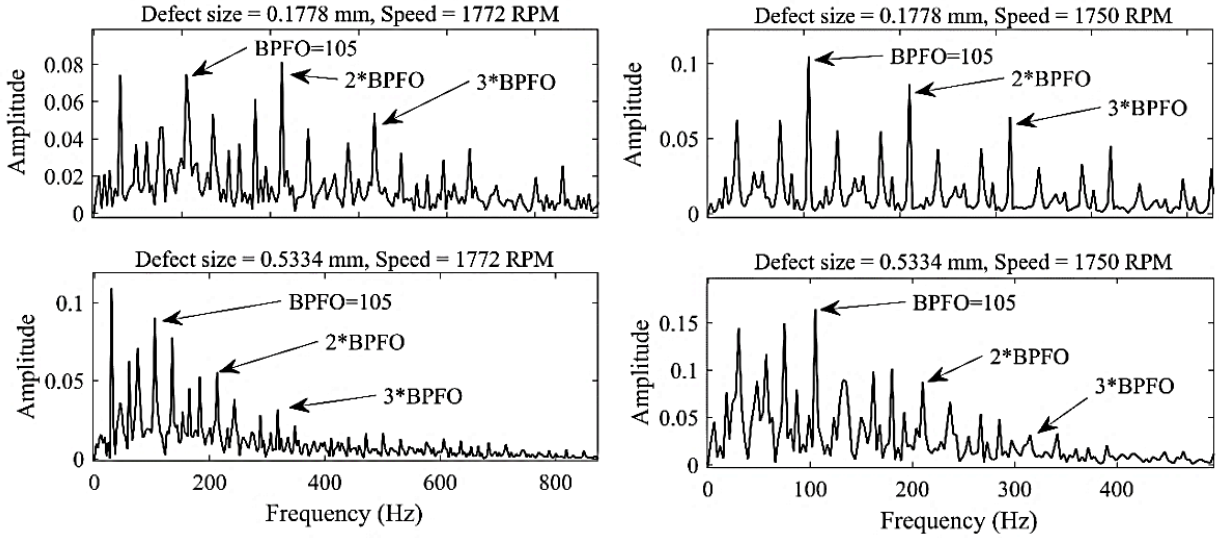
شکل ۱۸. سیگنال‌های بی‌نویزشده متناظر با رینگ خارجی معیوب

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

جدول۷. 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 بی‌نویزشده مربوط به رینگ خارجی معیوب

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

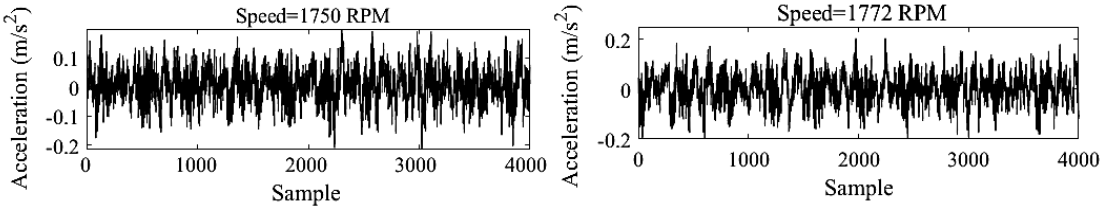
در طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده ظاهر شده‌اند. این حقیقت حتی برای عیوب با اندازه‌ی بسیار کوچک نیز صادق است.

۵-۳- حالت یاتاقان سالم

سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با حالت سالم در سرعت‌های دورانی ۱۷۷۲rpm و ۱۷۵۰rpm در شکل ۲۰ ارایه شده‌اند. نتایج حاصل از تکنیک معرفی‌شده در این مقاله متناظر با حالت یاتاقان سالم در شکل ۲۱ نشان داده شده‌اند. مقادیر فاکتور کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویزشده در جدول ۸ ارائه شده‌اند. مطابق این جدول، مقدار کشیدگی سیگنال‌های بی‌نویزشده توسط روش پیشنهادی در [۲۱] بسیار بزرگ‌تر از عدد ۳ هستند به طوری که دلالت بر معیوب بودن یاتاقان دارند. از طرف دیگر، مقدار این فاکتور برای سیگنال‌های به‌دست‌آمده توسط روش بی‌نویزسازی پیشنهادی نزدیک به ۳ می‌باشند که نشان دهنده‌ی سالم‌بودن یاتاقان‌ها هستند. در نهایت، طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده در شکل ۲۲ ارایه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، پیک‌های در F_s ، $۲\times F_s$، $۳\times F_s$ در طیف پوش سیگنال بی‌نویزشده پدیدار شده‌اند. وجود این پیک‌ها نشان می‌دهند که عیبی در یاتاقان وجود ندارد.

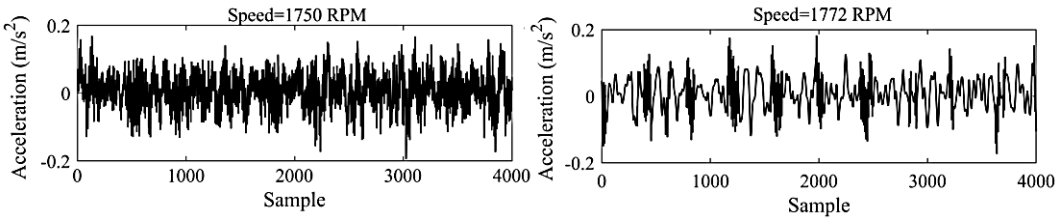
۶- نتیجه‌گیری

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



شکل۲۰. سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با حالت سالم

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



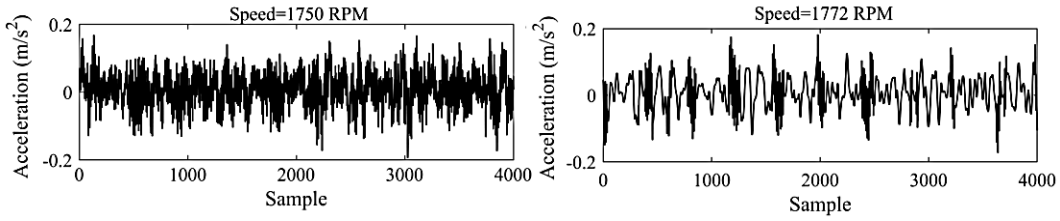
شکل۲۱. سیگنال‌های بی‌نویزشده متناظر با حالت سالم

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

جدول۸. 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



شکل۲۲. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به حالت سالم

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

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 مودهای تشکیل‌دهنده‌اش تجزیه می‌شود. از آنجایی که نویز موجود در سیگنال خام ممکن است تنها در برخی از مودهای 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 مودهای تشکیل‌دهنده‌اش محاسبه شده‌اند. سپس، با محاسبه‌ی اندازه شباهت

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 بی‌نویزشده 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 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 de-noising 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, 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 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. Kedadouche, 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.

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