



## حذف نویز از سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوار به کمک تبدیل موجک تجربی و روش‌های رایج آستانه‌گذاری

سعید نظامیوند چگینی<sup>۱\*</sup>، سیده فاطمه ظریف<sup>۲</sup>، احمد باقری<sup>۳</sup>، مجید علی‌طاوی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه دینامیک، کنترل و ارتعاشات، دانشگاه گیلان، رشت  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، مهندسی مکاترونیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت  
<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه دینامیک، کنترل و ارتعاشات، دانشگاه گیلان، رشت  
<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه طراحی جامدات، دانشگاه گیلان، رشت  
 یاداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۵

### چکیده

در این مقاله، روش جدیدی برای حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی اکتساب شده از ماشین‌های دوار بر پایه تبدیل موجک تجربی و آستانه‌گذاری نرم ارائه شده است. تبدیل موجک تجربی، روش جدیدی است که هر سیگنال را بر اساس اطلاعات فرکانسی‌اش به مولفه‌های تشکیل دهنده آن تجزیه می‌کند که مود تجربی نامیده می‌شوند. پس از تجزیه هر سیگنال، روش آستانه‌گذاری نرم به هر کدام از مولفه‌های حاصل از تجزیه اعمال شده و سیگنال بی‌نویز شده بازسازی می‌شود. برای ارزیابی روش حذف نویز پیشنهادی در این مطالعه، از این تکنیک برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها استفاده شده است. برای این منظور، فاکتور کشیدگی و طیف پویش هر سیگنال بی‌نویز شده، به ترتیب برای شناسایی حضور عیب و تشخیص نوع عیب محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی کیفیت سیگنال‌های ارتعاشی را به گونه‌ای افزایش می‌دهد که فاکتور کشیدگی به دست آمده به حضور عیوب موجود در رینگ‌های داخلی و خارجی حساس‌تر است. از طرف دیگر، با مشاهده فرکانس‌های پدیدار شده در طیف پویش سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش تبدیل موجک تجربی، می‌توان نوع عیب را به خوبی تشخیص داد. نتایج نشان می‌دهند که رویکرد بی-نویزسازی به کمک تبدیل موجک تجربی، برتر از روش بی‌نویزسازی تجزیه مود تجربی در فرآیند عیب‌یابی ماشین‌های دوار است.

**کلمات کلیدی:** بی‌نویزسازی؛ تبدیل موجک تجربی؛ تحلیل طیف پویش؛ عیب‌یابی.

## Noise Removal from the Vibration Signals of the Rotating Machinery Using the Empirical Wavelet Transform and the Conventional Thresholding Methods

S. Nezamivand Chegini<sup>1\*</sup>, S. F. Zarif<sup>2</sup>, A. Bagheri<sup>3</sup>, M. Ali Tavoli<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht.

<sup>2</sup> MSc. Student, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran.

<sup>3</sup> Prof., Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran.

<sup>4</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran.

### Abstract

In this paper, a new method is presented for removing the noise from the vibration signals of the rotating machinery based on the empirical wavelet transform (EWT) and the soft thresholding function. The EWT is a new signal processing method that decomposes each signal into its constituent components based on its frequency information. After decomposing each signal, the soft thresholding method is performed to empirical modes and the denoised signal is reconstructed. For evaluating the proposed denoising approach, this technique is used for detecting the bearing fault. For this purpose, the kurtosis factor and the envelope spectrum of each denoised signal are calculated for detecting the presence of fault and diagnosing the fault type, respectively. The results illustrate that the proposed technique increases the quality of the vibration signals so that the obtained kurtosis value is more sensitive to the presence of fault in the inner ring and the outer ring. On the other hand, the type of fault is diagnosed by observing the appeared frequencies in the envelope spectrum of signals denoised with EWT. The results show that the EWT-based denoising approach is superior to the empirical mode decomposition-based denoising method in the rotating machinery fault diagnosis procedure.

**Keywords:** Denoising; Empirical Wavelet Transform; Envelope Spectrum Analysis; Fault Detection.

## ۱- مقدمه

ماشین‌های دوار یکی از پرکاربردترین تجهیزات در صنعت به شمار می‌روند. خرابی هر یک از اجزا این ماشین‌ها نظیر، یاتاقان‌ها، چرخ‌دنده‌ها و شفت‌ها می‌تواند دلیل اصلی واماندگی کل دستگاه باشد؛ بنابراین، شناسایی زود هنگام عیب<sup>۱</sup> در هر یک از این اجزاء، یکی از موضوعات مهم و مورد توجه محققان به حساب می‌آید. شناسایی عیب بر پایه داده‌های ارتعاشی<sup>۲</sup>، یکی از تکنیک‌های مشهور در زمینه پایش وضعیت است [۱]. استخراج ویژگی‌های حوزه زمان و فرکانس، دو گروه از روش‌های پردازش سیگنال می‌باشند. از جمله ویژگی‌های پر کاربرد در حوزه عیب‌یابی، فاکتور آماری کشیدگی<sup>۳</sup> است. مقدار فاکتور کشیدگی برای سیگنال‌های جمع‌آوری شده از یاتاقان‌های سالم، نزدیک به ۳ است. این کمیت به سیگنال‌های دارای ایمپالس، حساس و بزرگ‌تر از ۳ است. هنگامی که اجزای یاتاقان مانند رینگ داخلی، رینگ خارجی و المان غلتشی معیوب می‌شوند، ایمپالس‌های متناوبی در سیگنال اصلی ظاهر می‌شوند؛ بنابراین، از کشیدگی می‌توان برای تعیین حضور عیب در یاتاقان استفاده کرد. به هر حال تشخیص نوع عیب توسط پارامتر کشیدگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. یک ابزار مفید برای تشخیص نوع عیب، تحلیل طیف پوش<sup>۴</sup> سیگنال‌های ارتعاشی است [۲].

سیگنال‌های ارتعاشی اغلب آلوده به نویزهای تولید شده توسط منابع نامعلومی هستند. در چنین شرایطی، ویژگی‌ها و اطلاعات استخراج شده از سیگنال‌ها آغشته به نویز بوده و تشخیص شرایط حاکم بر اجزای ماشین‌های دوار دشوار است؛ بنابراین، به کارگیری روش‌های استاندارد حذف نویز برای افزایش کیفیت سیگنال‌ها و حذف اطلاعات غیرمرتبط ضروری است.

تبدیل موجک<sup>۵</sup> از روش‌های کاربردی و مشهور برای حذف نویز و تحلیل سیگنال‌ها است [۳ و ۴]. دونوهو و جانسون<sup>۶</sup> [۵]، روشی بر پایه تبدیل موجک و آستانه‌گذاری

نرم ارائه کرده‌اند. ال-رحیم و همکاران<sup>۷</sup> [۶]، به کمک تبدیل موجک پیوسته<sup>۸</sup> و موجک ضربه<sup>۹</sup>، تکنیکی برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی یاتاقان‌های غلتشی ارائه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که پارامترهای موجک ضربه را می‌توان توسط فاکتور کشیدگی به دست آورد. صدوقی و خادم<sup>۱۰</sup> [۷]، از ترکیب تبدیل موجک گسسته<sup>۱۱</sup>، تابع دونوهو - جانسون و روش آستانه‌گذاری پارامتری روشی برای حذف نویز سیگنال ارتعاشی اکتساب شده از موتور جت ارائه کرده‌اند. میسرا و همکاران<sup>۱۲</sup> [۸]، یک تکنیک عیب‌یابی ترکیبی جدیدی به کمک بی‌نویزسازی بر پایه تبدیل موجک و تحلیل طیف پوش در شرایط سرعت پایین یاتاقان‌ها ارائه کرده‌اند.

انتخاب تابع موجک مادر<sup>۱۳</sup> و سطح تجزیه در تبدیل موجک، به شدت نتایج حاصل از بی‌نویزسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. روش تجزیه مود تجربی<sup>۱۴</sup> یک روش تطبیق-پذیر است که سیگنال‌های غیرایستا را بدون به کارگیری توابع پایه خاصی و تنها بر پایه مشخصات محلی‌اش به مولفه-هایی تجزیه می‌کند که توابع مود ذاتی<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شوند [۹]. اخیراً در بسیاری از پژوهش‌ها، از روش تجزیه مود تجربی به عنوان ابزاری برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی اکتساب شده از ماشین‌های دوار و شناسایی عیب استفاده شده است. باقری و همکاران، روشی هوشمند جهت شناسایی عیب چرخ‌دنده‌ها بر مبنای انتخاب ویژگی‌های مناسب به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، روش تجزیه مود تجربی و ماشین بردار پشتیبان ارائه کرده‌اند [۱۰]. ژو و همکاران<sup>۱۶</sup> [۱۱]، یک تکنیک بی‌نویزسازی جدیدی معرفی نموده‌اند که ترکیبی از روش تجزیه مود تجربی، همبستگی متقابل، فاکتور کشیدگی و آستانه‌گذاری موجک است. عبدالکادر و همکاران<sup>۱۷</sup> [۱۲]، یک استراتژی جدیدی برای انتخاب

<sup>7</sup> K.F. Al-Raheem et al

<sup>8</sup> Continous Wavelet Transform (CWT)

<sup>9</sup> Impulse Wavelet

<sup>10</sup> M.S. Sadooghi and S.E. Khadem

<sup>11</sup> Discrete Wavelet Transform (DWT)

<sup>12</sup> C. Mishra et al

<sup>13</sup> Mother Wavelet

<sup>14</sup> Empirical Mode Decomposition (EMD)

<sup>15</sup> Intrinsic Mode Function (IMF)

<sup>16</sup> D.Z. Zhao et al

<sup>17</sup> R. Abdelkader et al

<sup>1</sup> Early Fault Detection

<sup>2</sup> The Vibration Data Based Diagnostic

<sup>3</sup> Kutrosis

<sup>4</sup> Envelope Spectrum Analysis

<sup>5</sup> Wavelet Transform (WT)

<sup>6</sup> D.L. Donoho and J.M. Johnston

مودال محیطی<sup>۷</sup> روشی برای بهبود شناسایی عیب یاتاقان ارائه ارائه کرده‌اند. نویسندگان از پارامتر کشیدگی برای تعیین مودهای مناسب به منظور استخراج فرکانس‌های عیب استفاده کرده‌اند. بی‌نویزسازی بر پایه تبدیل موجک تجربی، کاربرد دیگری از این روش است که اخیراً توجه بسیاری از محققان را به خود جذب کرده است. سینق و سانکاریا<sup>۸</sup> [۱۹]، [۱۹]، به کمک تبدیل موجک تجربی یک روش جدید برای بی‌نویز کردن سیگنال‌های قلب ارائه کرده‌اند. لی و همکاران<sup>۹</sup> [۲۰]، یک تکنیک بی‌نویزسازی به تبدیل موجک تجربی و یک تابع آستانه‌گذاری تطبیق‌پذیر ارائه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که کارایی روش تبدیل موجک تجربی، بهتر از تبدیل موجک و تجزیه مود تجربی کامل است.

در این مقاله، رویکرد جدیدی برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی بر پایه تبدیل موجک تجربی ارائه شده است. برای این منظور، هر سیگنال ارتعاشی به کمک روش تبدیل موجک تجربی به مولفه‌های تجزیه می‌شوند. سپس، از تابع آستانه‌گذاری نرم برای حذف نویز از مودهای تجربی به دست آمده استفاده شده است. در اینجا برای ارزیابی رویکرد مطرح شده در این مقاله، از روش بی‌نویزسازی پیشنهادی برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها استفاده شده است. برای این منظور، پس از بازسازی سیگنال‌های بی‌نویزسازی شده، از فاکتور آماری کشیدگی برای پاسخ به این سوال استفاده شده است که آیا عیبی در یاتاقان وجود دارد. در نهایت، برای تشخیص نوع عیب از طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده استفاده شده است.

دیگر بخش‌های این مقاله به صورت زیر تدوین یافته‌اند: در بخش دوم، تئوری حاکم بر روش تبدیل موجک تجربی تشریح شده است. روش بی‌نویزسازی پیشنهادی در بخش سوم ارائه شده است. داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله، در بخش چهارم معرفی شده‌اند. نتایج کاربردی روش بی‌نویزسازی پیشنهادی برای تعیین عیوب رینگ داخلی و رینگ خارجی در بخش پنجم، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، مقاله در بخش ششم نتیجه‌گیری شده است.

مشخصات عیوب یاتاقان به کمک بهبود روش بی‌نویزسازی تجزیه مود تجربی، مقدار کشیدگی و طیف پوش ارائه کرده‌اند. وانگ و همکاران<sup>۱</sup> [۱۳]، روشی برای محاسبه پارامتر پارامتر آستانه بر پایه تخمین واریانس در روش بی‌نویزسازی به کمک روش تجزیه مود تجربی ارائه نموده‌اند. نویسندگان واریانس نویز در سیگنال را به کمک انرژی هر مولفه مود ذاتی به دست آورده‌اند. نگوین و همکاران<sup>۲</sup> [۱۴]، تکنیک جدیدی برای تشخیص عیب یاتاقان‌ها بر پایه روش تجزیه مود تجربی و رده‌بندی کننده بیزی ارائه کرده‌اند. آن‌ها شباهت بین تابع توزیع احتمال هر مولفه مود ذاتی و سیگنال اصلی را محاسبه و سپس به کمک رده‌بندی کننده بیزی، مولفه‌های دارای نویز و بودن نویز را شناسایی کرده‌اند. در نهایت، از آستانه‌گذاری نرم برای حذف نویز از مولفه‌های دارای نویز استفاده شده است.

روش تجزیه مود تجربی دارای مشکلات اساسی همچون، پدیده اختلاط مودها، اثرات انتهایی و فقدان مدل ریاضی دقیق است. اخیراً روش جدیدی که تبدیل موجک تجربی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود، توسط گیلز<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۳ ارائه شده است [۱۵]. مفهوم روش تبدیل موجک تجربی بر پایه تولید موجک‌های تطبیق‌پذیر برای استخراج کردن مولفه‌های سیگنال اصلی است. در مطالعات اخیر، از تکنیک تجزیه موجک تجربی برای شناسایی وضعیت ماشین‌های دوار استفاده شده است. توانمندی روش‌های تجزیه مود تجربی و تبدیل موجک تجربی برای عیب‌یابی یاتاقان بررسی شده‌اند. نتایج حاکی از برتری تبدیل موجک تجربی بر روش تجزیه مود تجربی است [۱۶]. پن و همکاران<sup>۵</sup> [۱۷]، یک روش تبدیل موجک تجربی بهبود یافته بر پایه روش تقسیم‌بندی تطبیق‌پذیر طیف فوریه سیگنال‌های ارتعاشی برای شناسایی نوع عیب ارائه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که روش تبدیل موجک تجربی بهبود یافته قادر است، سیگنال‌های ارتعاشی را به مودهای تجربی معنی‌داری تجزیه کند. کدادوچ و همکاران<sup>۶</sup> [۱۸]، به کمک روش تبدیل موجک تجربی و آنالیز

<sup>1</sup> R. Wang et al

<sup>2</sup> P. Nguyen et al

<sup>3</sup> Empirical Wavelet Transform (EWT)

<sup>4</sup> J. Gilles

<sup>5</sup> J. Pan et al

<sup>6</sup> M. Kedadouch et al

<sup>7</sup> Operational Mode Analysis (OMA)

<sup>8</sup> O. Singh and R.K. Sunkaria

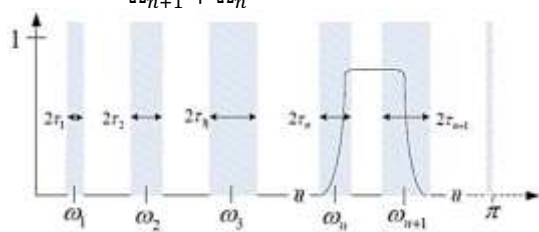
<sup>9</sup> J. Li et al

## ۲- تبدیل موجک تجربی

روش تبدیل موجک تجربی، روش تجزیه تطبیق‌پذیر است که اخیراً توسط گیلز معرفی شده است [۱۵]. در این رویکرد از مجموعه‌ای از موجک‌ها که موجک‌های تجربی<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند، برای تجزیه هر سیگنال به مولفه‌هایش استفاده می‌شود. این موجک‌ها طبق اطلاعات فرکانسی موجود در سیگنال‌ها تعیین می‌شوند؛ بنابراین می‌توان گفت که روش تبدیل موجک تجربی از روش تجزیه مود تجربی الهام گرفته شده است.

ساخت خانواده‌ای از موجک‌های تجربی، معادل تشکیل مجموعه‌ای از فیلترهای میان‌گذر<sup>۲</sup> است. از آنجایی که هر مود مود معادل یک فرکانس خاص است؛ بنابراین، در روش تبدیل موجک تجربی، طیف فرکانسی نرمال شده هر سیگنال را به  $N$  بخش برای استخراج مودهای تجربی تقسیم‌بندی می‌شود. برای تقسیم‌بندی محور فوری به  $N$  بخش،  $N-1$  ماکزیمم محلی در طیف سیگنال با بیشترین دامنه تعیین می‌شوند. مرز هر بخش توسط فرکانس  $\omega_n$  تعیین می‌شوند. مطابق شکل ۱، برای هر  $\omega_n$  یک فاز گذار  $T_n$  با عرض  $2\tau_n$  در نظر گرفته می‌شود. برای سادگی،  $\tau_n$  متناسب با  $\omega_n$  به صورت  $\tau_n = \gamma\omega_n$  در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که  $\gamma$  به بازه  $(0,1)$  محدود می‌شود. هر بخش به صورت  $\Omega_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$  نشان داده می‌شود؛ به طوری که  $\cup_{n=1}^N \Omega_n = [0, \pi]$  می‌توان ثابت کرد که با برقراری نامساوی زیر هیچ همپوشانی بین دو بخش متوالی وجود نخواهد داشت:

$$\gamma < \min_n \left( \frac{\Omega_{n+1} - \Omega_n}{\Omega_{n+1} + \Omega_n} \right) \quad (1)$$



شکل ۱- تقسیم‌بندی محور فرکانس [۱]

با به کارگیری ایده حاکم بر تولید موجک‌های لیتل‌وود پلی<sup>۳</sup> و میر<sup>۴</sup>، توابع مقیاس<sup>۵</sup> و موجک تجربی به صورت زیر ساخته می‌شوند [۱۵]:

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_n \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n) \right) \right], & \text{if } (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{if } (1 + \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_{n+1} \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_{n+1}) \right) \right], & \text{if } (1 - \gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_{n+1} \\ \sin \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n) \right) \right], & \text{if } (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

که تابع  $\beta(x)$  شرایط زیر را ارضا می‌کند:

$$\beta(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0 \\ \beta(x) + \beta(1 - x) = 1, & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{if } x \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

توابع چند جمله‌ای بسیار زیادی وجود دارند که شرایط رابطه (۴) را ارضا می‌کنند. در [۱۵]، تابع زیر پیشنهاد شده است:

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (5)$$

روش تبدیل موجک تجربی، مشابه تبدیل موجک تعریف می‌شود. ضرایب جزئیات<sup>۶</sup> مربوط به تابع  $f(t)$  توسط توابع موجک تجربی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$w_f^\varepsilon(n, t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} dt = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \overline{\hat{\psi}_n(\omega)}) \quad (6)$$

ضرایب تقریب<sup>۷</sup> به صورت ضرب داخلی سیگنال و تابع مقیاس مقیاس تعریف می‌شود:

<sup>3</sup> Littlewood-Paley's Wavelet

<sup>4</sup> Meyer Wavelet

<sup>5</sup> Scalling Function

<sup>6</sup> Detail Coefficients

<sup>7</sup> Approximation Coefficients

<sup>1</sup> Empirical Wavelets

<sup>2</sup> Bandpass Filters

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\text{median}|c_i(t)|}{0.6745}} \quad (14)$$

تابع آستانه‌گذاری سخت در مقدار آستانه ناپیوسته است که منجر به تولید نوسانات شدیدی در سیگنال بی‌نویز شده اصلی می‌شود. در آستانه‌گذاری نرم مشکل ناپیوستگی حل شده است. در این مطالعه، از تابع آستانه‌گذاری نرم برای حذف نویز از مولفه‌های حاصل از تجزیه استفاده شده است.

در این مطالعه، از بی‌نویزسازی داده‌های ارتعاشی برای حذف اطلاعات نامرتب و زائد و حفظ بخش‌های مفید سیگنال‌های ارتعاشی استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد، حذف نویز به کمک تبدیل موجک و تجزیه مود تجربی، از جمله روش‌های رایج پاک کردن نویز از سیگنال‌های ارتعاشی هستند. تجزیه یک سیگنال به مولفه‌های متعامدش، یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند پاک کردن نویز به شمار می‌آید. کیفیت سیگنال بی‌نویز شده، به شدت وابسته به مولفه‌های حاصل از تجزیه است. یک روش تجزیه نامناسب می‌تواند منجر به حذف اطلاعات مفید و باقی‌ماندن اطلاعات نامرتب در سیگنال شود. چالش‌های اساسی در روش تجزیه سیگنال به کمک تبدیل موجک، انتخاب دو پارامتر کلیدی موجک مادر و سطح تجزیه است. در روش تبدیل موجک، میزان اطلاعات مفید استخراج شده از سیگنال وابسته به شباهت موجک مادر با سیگنال اصلی است. تاکنون برای کاربردهای خاص، موجک‌های گوناگونی برای پردازش سیگنال‌ها پیشنهاد شده‌اند؛ اما در طراحی هیچکدام از این موجک‌ها، شرایط اکتساب سیگنال‌های ارتعاشی و نوع منبع تولید داده‌ها در نظر گرفته نشده است. از طرف دیگر، در ضابطه اکثر توابع موجک، پارامترهایی وجود دارند که تنظیم آن‌ها بسیار دشوار است. در روش تجزیه مود تجربی، صرفاً با توجه به ویژگی‌های محلی داده‌ها و بدون به کارگیری پایه‌های متعامد، سیگنال‌ها به طور تطبیق‌پذیری به مودهای تشکیل دهنده‌اش تجزیه می‌شوند. فقدان یک تئوری ریاضی، اختلاط مودهای مختلف در یک مولفه خاص و اثرات انتهایی، اساسی‌ترین نواقص موجود در روش تجزیه مود تجربی می‌باشند. وجود این مشکلات باعث تولید مولفه‌های وابسته به هم و عدم برقراری شرط تعامد می‌شود؛ اما همان‌طور که در بخش ۲ گفته شد، در روش تبدیل موجک تجربی با به کارگیری موجک‌های تطبیق‌پذیر، مودهای تجربی

$$w_f^\varepsilon(0, t) = \langle f, \phi_1 \rangle = \int f(\tau) \overline{\phi_1(\tau - t)} d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \overline{\hat{\phi}_1(\omega)}) \quad (17)$$

سیگنال بازسازی شده<sup>۱</sup> با رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$f(t) = w_f^\varepsilon(0, t) * \phi_1(t) + \sum_{n=1}^N w_f^\varepsilon(n, t) * \psi_n(t) \quad (8)$$

طبق معادله (۸)، مودهای تجربی<sup>۲</sup> به صورت زیر می‌باشند:

$$f_0 = w_f^\varepsilon(0, t) * \phi_1(t) \quad (9)$$

$$f_n = w_f^\varepsilon(n, t) * \psi_n(t) \quad (10)$$

### ۳- روش بی‌نویزسازی پیشنهادی به کمک تبدیل موجک تجربی

در اکثر روش‌های بی‌نویزسازی بر پایه تحلیل موجک و تجزیه مود تجربی، فرآیند حذف نویز شامل، سه مرحله اصلی است: تجزیه سیگنال، آستانه‌گذاری مولفه‌های به دست آمده توسط روش‌های پردازش سیگنال و بازسازی سیگنال. آستانه‌گذاری سخت و آستانه‌گذاری نرم، از جمله تکنیک‌های رایجی هستند که به طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند [۷]. عبارت‌های ریاضی این دو تابع آستانه‌گذاری به صورت روابط (۱۱-۱۲) می‌باشند:

$$\tilde{c}_i(t) = \begin{cases} c_i(t), & |c_i(t)| \geq \lambda_i \\ 0, & |c_i(t)| < \lambda_i \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{c}_i(t) = \begin{cases} \text{sign}(c_i(t)) (|c_i(t)| - \lambda_i), & |c_i(t)| \geq \lambda_i \\ 0, & |c_i(t)| < \lambda_i \end{cases} \quad (12)$$

در معادلات (۱۱) و (۱۲)،  $\tilde{c}_i(t)$  بی‌نویز شده‌ی  $c_i(t)$ ، تابع علامت و مقدار آستانه متناظر با مولفه  $c_i(t)$  است. در مقالاتی نظیر [۲۰]، مقدار  $\lambda_i$  به صورت رابطه تطبیق‌پذیر (۱۳) تعریف شده‌اند:

$$\lambda_i = k_i \sigma_i \sqrt{2 \ln N} \quad (13)$$

که  $k_i$  به طور تجربی تنظیم می‌شود.  $\sigma_i$  انحراف معیار نویز مولفه‌ی  $i$  ام و  $N$  طول سیگنال هستند. انحراف معیار نویز،  $\sigma_i$  مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

<sup>1</sup> Reconstructed Signal

<sup>2</sup> Empirical Modes

<sup>3</sup> Hard and Soft Thresholding

شده است. اجزای اصلی این مجموعه شامل، یک موتور القایی (سمت چپ)، میدل گشتاور و کوپلینگ (وسط)، دینامومتر (سمت راست) و یاتاقان‌ها می‌باشند. موتور نشان داده شده در شکل ۲، دارای توان ۲ اسب بخار است و از آن به عنوان محرک اصلی برای به حرکت در آوردن شفت کوپل شده به محفظه یاتاقان استفاده شده است؛ همچنین، یک مدار الکتریکی برای کنترل سرعت و ایجاد سرعت‌های مختلف برای اکتساب داده‌ها در شرایط کاری متفاوت استفاده شده است. سرعت و توان توسط میدل گشتاور / انکودر اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده‌اند. داده‌های ارتعاشی توسط شتاب‌سنج‌هایی که با پایه‌های مغناطیسی به محفظه موتور نصب شده‌اند، با نرخ فرکانس نمونه‌برداری ۱۲ KHz جمع‌آوری شده‌اند. شتاب-سنج‌ها در موقعیت ساعت ۱۲ در محل یاتاقان‌ها مطابق شکل ۲-الف نصب شده‌اند. قابلیت این سنسورها به گونه‌ای هستند که در محدوده وسیع دمایی  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $120^{\circ}\text{C}$  قادر به داده‌برداری می‌باشند. این سنسورها دارای جرم ناچیز و اندازه کوچکی بوده و محدوده وسیعی از فرکانس‌های نمونه‌برداری را پوشش می‌دهند.

عیوب ایجاد شده در یاتاقان‌ها به کمک روش‌های ماشینکاری الکتریکی ایجاد شده‌اند. سیگنال‌های ارتعاشی به کار گرفته شده در این مقاله، مربوط به یاتاقان از نوع SKF 6205-2RS JEM است. مشخصات هندسی این یاتاقان، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سیگنال‌های استفاده شده در این مطالعه، متناظر با دو حالت رینگ خارجی معیوب و رینگ داخلی معیوب هستند که در دو سرعت ۱۷۹۷ rpm و ۱۷۳۰ rpm با فرکانس نمونه‌برداری ۱۲ KHz اکتساب شده‌اند. عیوب ایجاد شده دارای عمق  $0.11\text{ in}$  و در دو قطر مختلف  $0.07\text{ in}$  و  $0.21\text{ in}$  هستند که در اجزای رینگ داخلی و خارجی ایجاد شده‌اند. فرکانس مشخصه یکی از پارامترهایی است که می‌تواند برای تعیین نوع عیب استفاده شود. فرکانس مشخصه رینگ خارجی معیوب و رینگ داخلی معیوب، به ترتیب توسط روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شوند [۱۲]:

$$BPFO = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha\right) \quad (15)$$

$$BPFI = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos\alpha\right) \quad (16)$$

با معنی و قابل تفسیر از سیگنال‌های ارتعاشی قابل استخراج هستند. ایده کلیدی در روش تبدیل موجک تجربی، فشرده بودن طیف فوریه هرکدام از مولفه‌های به دست آمده است. به عبارت دیگر، جداسازی و استخراج مودهای مختلف از سیگنال معادل تقسیم‌بندی طیف فوریه است. این ویژگی‌ها باعث شده که مودهای به دست آمده توسط روش تبدیل موجک تجربی مستقل از هم بوده و همگی قابل تفسیر هستند؛ بنابراین، با توجه به مطالب بالا و عدم وجود نگرانی‌هایی نظیر، انتخاب تابع موجک، سطح تجزیه و اختلاط مودها، در این مقاله در مرحله تجزیه سیگنال در فرآیند بی‌نویزسازی، از روش تبدیل موجک تجربی استفاده خواهد شد. مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی به صورت زیر می‌باشند:

۱. سیگنال ارتعاشی توسط روش تبدیل موجک تجربی به مودهای تجربی‌اش تجزیه می‌شود.
۲. مقدار آستانه متناظر با هر مود توسط روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود. سپس، این مودها به کمک تابع آستانه‌گذاری نرم (رابطه ۱۲) بی‌نویز می‌شوند.
۳. سیگنال بی‌نویز شده با جمع کردن مودهای بی‌نویز شده بازسازی می‌شود.

به منظور بررسی توانمندی روش پیشنهادی در این مقاله، از سیگنال‌های بی‌نویز شده برای عیب‌یابی یاتاقان استفاده شده است. برای این منظور، از پارامتر آماری کشیدگی برای تعیین حضور عیب و از طیف پوش سیگنال برای تشخیص نوع عیب استفاده شده است. در نهایت، نتایج حاصل از عیب‌یابی به کمک روش‌های تبدیل موجک تجربی و تجزیه مود تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

#### ۴- مجموعه داده‌های ارتعاشی

سیگنال‌های ارتعاشی به کار گرفته شده در این مقاله، از مجموعه آزمایشگاهی ارائه شده توسط وب سایت CWRU<sup>۱</sup> گرفته شده‌اند [۲۱]. این داده‌ها به طور گسترده‌ای توسط محققان برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی خود، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۲-۲۵]. تصویر واقعی و طرح شماتیک سیستم آزمایشگاهی مزبور، در شکل ۲ نشان داده

<sup>۱</sup> Case Western Reserve University (CWRU)

که در آن  $D$  قطر گام،  $d$  قطر ساچمه،  $n_b$  تعداد المان غلتشی،  $\alpha$  زاویه تماس و  $f_r$  سرعت موتور است. مشخصات سیگنال‌های استفاده در این مطالعه شامل، نوع و اندازه عیب، سرعت دورانی موتور و فرکانس مشخصه متناظر با آن در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

### ۵- نتایج

#### ۵-۱- رینگ داخلی معیوب

سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب در دو اندازه‌ی  $0.007$  in و  $0.021$  in در سرعت‌های  $1797$  و  $1730$  در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در شکل ۳، مودهای تجربی سیگنالی را نشان می‌دهد که در سرعت دورانی  $1797$  rpm اکتساب شده و متناظر با رینگ داخلی معیوب با عیبی به اندازه  $0.007$  in است.

در جدول ۳، مقادیر کشیدگی برای سیگنال اصلی و سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش‌های حذف نویز بر پایه تبدیل موجک تجربی و تجزیه مود تجربی ارائه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی، بزرگ‌تر از مقدار این کمیت آماری برای سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط تجزیه مود تجربی است. این نتایج نشان می‌دهند که تکنیک بی‌نویزسازی پیشنهادی قادر است، حساسیت پارامتر کشیدگی

جدول ۲- موارد مطالعاتی

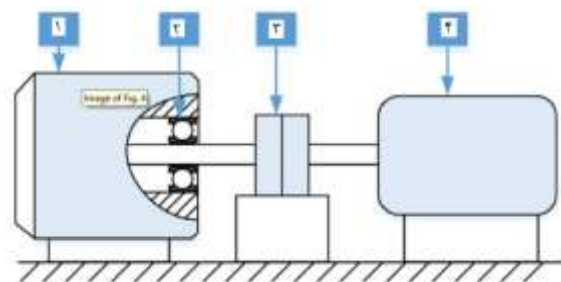
نوع عیب	اندازه عیب (in)	سرعت موتور (rpm)	فرکانس عیب (Hz)
رینگ داخلی	$0.007$	$1797$	$162,18$
		$1730$	$156,13$
	$0.021$	$1797$	$162,18$
		$1730$	$156,13$
رینگ خارجی	$0.007$	$1797$	$107,36$
		$1730$	$103,36$
	$0.021$	$1797$	$107,36$
		$1730$	$103,36$

جدول ۱- مشخصات یاتاقان غلتشی [۲۱]

مشخصات	فهرست
نام یاتاقان	6205-2RSJEM SKF
قطر داخلی	۲۵mm
قطر خارجی	۵۲ mm
قطر متوسط	۳۹mm
قطر ساچمه	۸mm
ضخامت	۱۵mm
زاویه تماس	صفر رادیان
تعداد المان غلتشی	۹ عدد



(الف)



(۱) موتور القایی، (۲) بلبرینگ، (۳) مبدل گشتاور، (۴) دینامومتر یا موتور بارگذاری

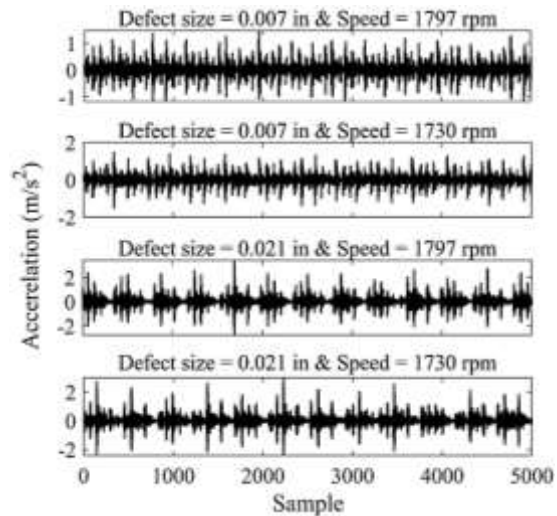
(ب)

شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی و اجزای اصلی آن [۲۱]  
الف) تصویر واقعی مجموعه و ب) توصیف شماتیکی سیستم آزمایشگاهی

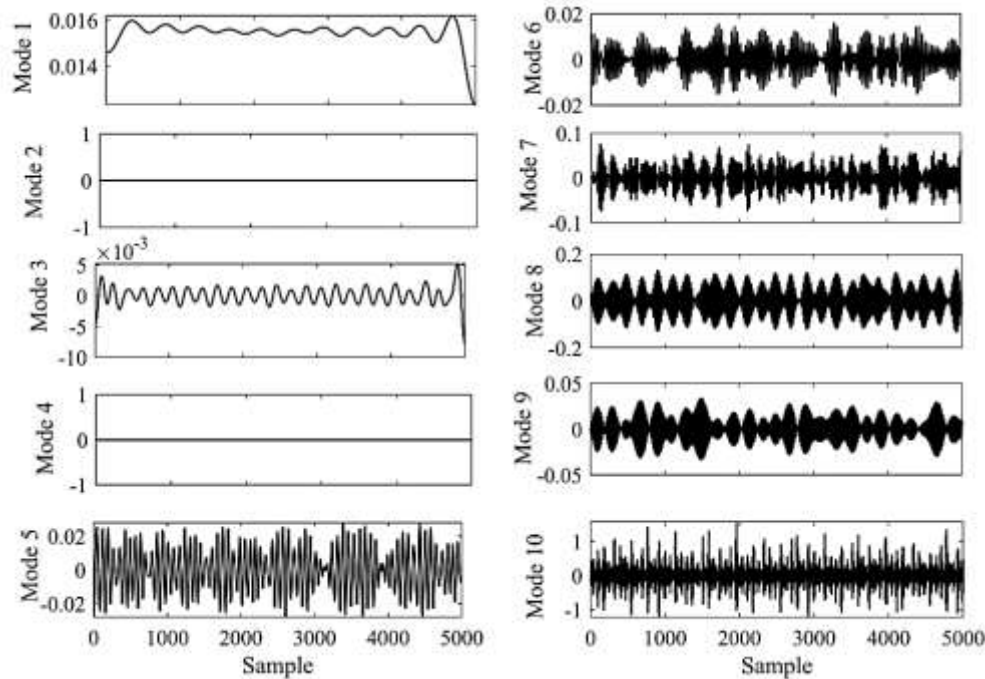
را به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حضور عیب افزایش دهد. نتایج حاکی از برتری روش پیشنهادی بر روش بی‌نویزسازی بر پایه‌ی تجزیه‌ی مود تجربی است.

جدول ۳- مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های رینگ داخلی

اندازه عیب	سرعت دورانی سیگنال اصلی	EMD	EWT
۰٫۰۰۷	۱۷۹۷	۵٫۴۳	۶۵٫۱۶
۰٫۰۰۷	۱۷۳۰	۵٫۳۰	۵۱٫۷۲
۰٫۰۲۱	۱۷۹۷	۶٫۹۳	۶۱٫۳۳
۰٫۰۲۱	۱۷۳۰	۸٫۲۸	۵۶٫۸۳



شکل ۳- سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ داخلی معیوب

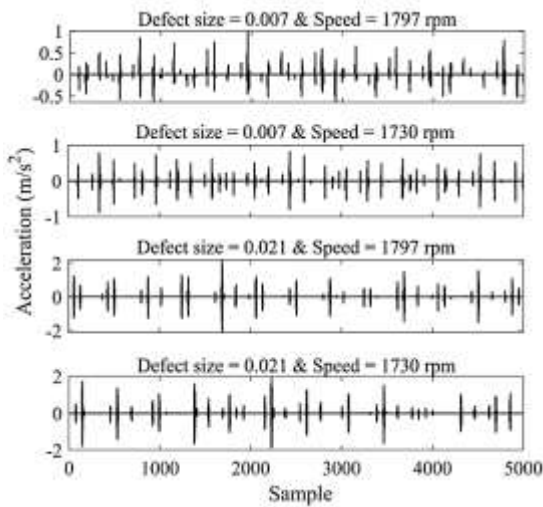


شکل ۳- مدهای تجربی سیگنال اکتساب شده از یک یاتاقان با رینگ داخلی معیوب با اندازه ۰٫۰۰۷ in و سرعت ۱۷۹۷ rpm

ملاحظه می‌شود، ایمپالس‌های ناشی از عیب دارای رفتاری نسبتاً متناوب هستند. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده برای دو اندازه ۰٫۰۰۷ in و ۰٫۰۲۱ in به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، هنگامی که موتور با سرعت دورانی ۱۷۹۷ rpm

سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ داخلی معیوب، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پس از بی‌نویزسازی سیگنال‌های اصلی، ضربه‌های حاصل از وجود عیب در سیگنال بی‌نویز شده باقی مانده و اطلاعات مربوط به نویز حذف شده‌اند. همان‌طور که



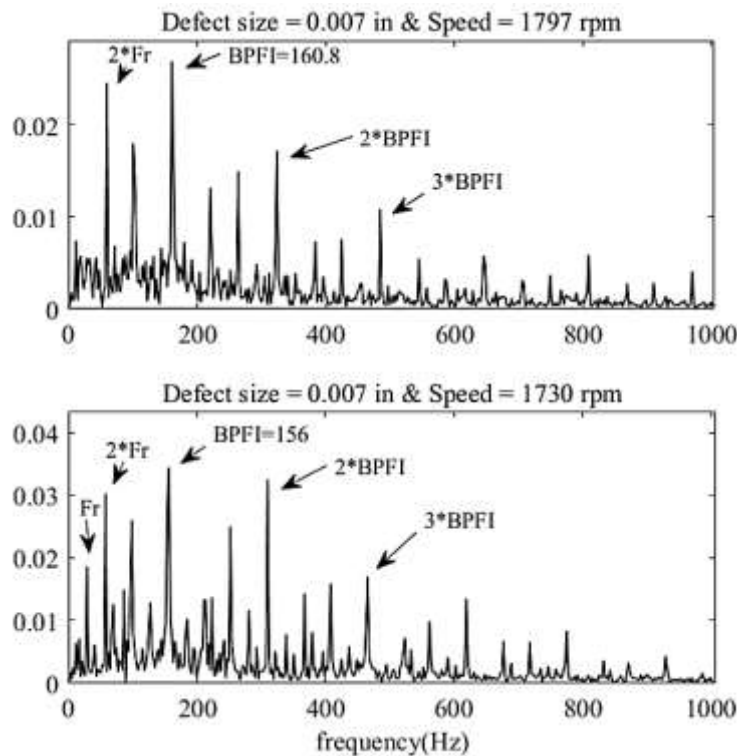


شکل ۴- سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با رینگ داخلی معیوب

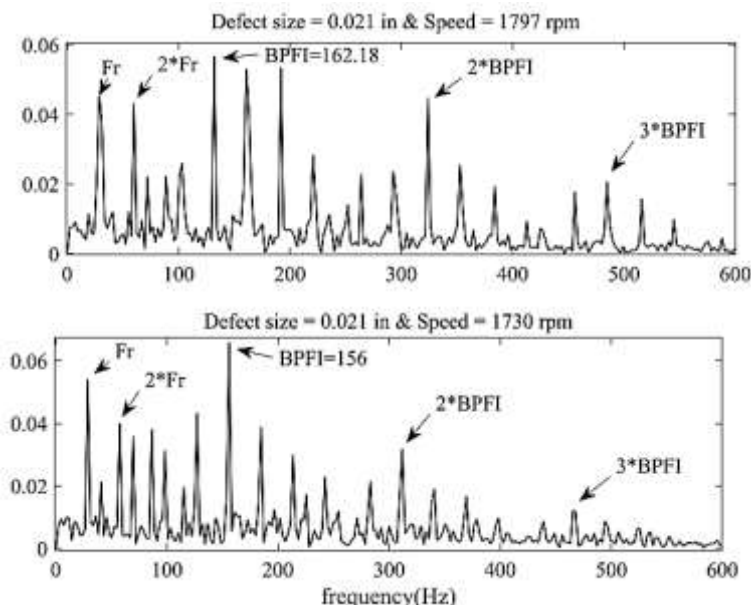
دوران می‌کند، پیک‌هایی در  $f_r = 29,95 \text{ Hz}$ ،  $2f_r$ ،  $BPFI = 162,8$  و  $3 \times BPFI$  در طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده ظاهر شده‌اند؛ همچنین، هنگامی که سیگنال‌های ارتعاشی در سرعت دورانی  $1730 \text{ rpm}$  جمع‌آوری شده‌اند، پیک‌هایی در  $f_r = 28,8 \text{ Hz}$ ،  $2f_r$ ،  $BPFI = 156$  و  $3 \times BPFI$  و  $2 \times BPFI$  پدیدار شده‌اند. وجود این فرکانس‌ها دلالت بر وجود عیب در رینگ داخلی یاتاقان دارد.

#### ۵-۲- رینگ خارجی معیوب

سیگنال‌های ارتعاشی برای یاتاقانی با رینگ خارجی معیوب با دو اندازه عیب  $0,007 \text{ in}$  و  $0,021 \text{ in}$  در سرعت‌های  $1797 \text{ rpm}$  و  $1730 \text{ rpm}$  در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مودهای تجربی سیگنال اکتساب شده از یاتاقانی که عیبی به اندازه  $0,007 \text{ in}$  در رینگ خارجی آن اعمال شده است، در شکل ۸ ارائه شده‌اند.



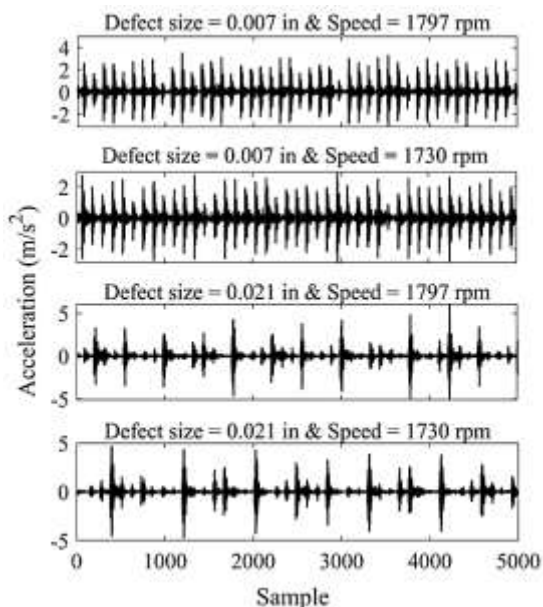
شکل ۵- طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ داخلی با عیبی به اندازه  $0,007 \text{ in}$



شکل ۶- طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ داخلی با عیبی به اندازه 0.021 in

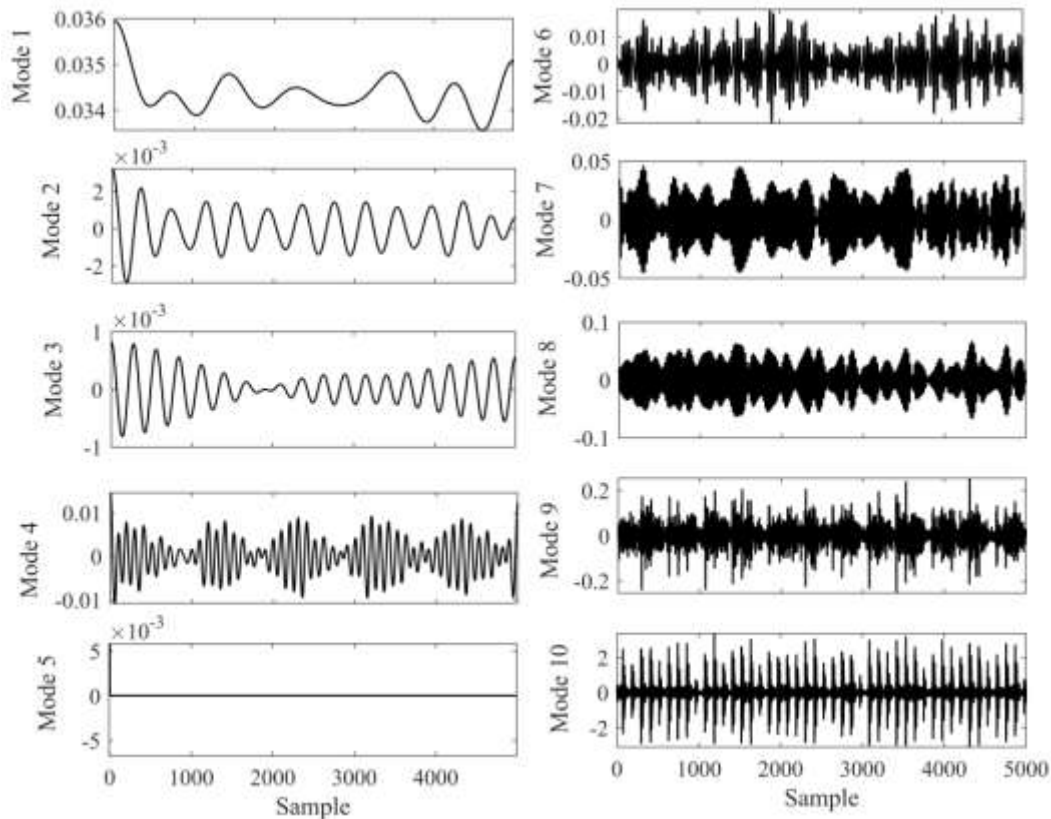
هارمونیک‌های آن یعنی  $BPFO$ ،  $2 \times BPFO$  و  $3 \times BPFO$  در طیف پوش سیگنال پدیدار شده‌اند؛ همچنین، با دقت در شکل ۱۱ دیده می‌شود که پیک‌هایی در  $f_r$ ،  $2 \times f_r$  و  $BPFO$  و  $2 \times BPFO$  نمایان شده‌اند.

مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های دارای نویز و سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش‌های تبدیل موجک تجربی و تجزیه مود تجربی متناظر با رینگ خارجی معیوب، در جدول ۴ گزارش شده است. مقادیر کشیدگی در جدول ۴ نشان می‌دهند که سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش تبدیل موجک تجربی، دارای مقادیر کشیدگی بیشتری نسبت به سیگنال‌های بی‌نویز شده به کمک تجزیه مود تجربی می‌باشند. به عبارت دیگر، با به کارگیری روش پیشنهادی در این مقاله، می‌توان از کمیت کشیدگی به عنوان ابزاری برای شناسایی حضور عیب و تشخیص زود هنگام عیب در ماشین‌های دوار استفاده کرد.

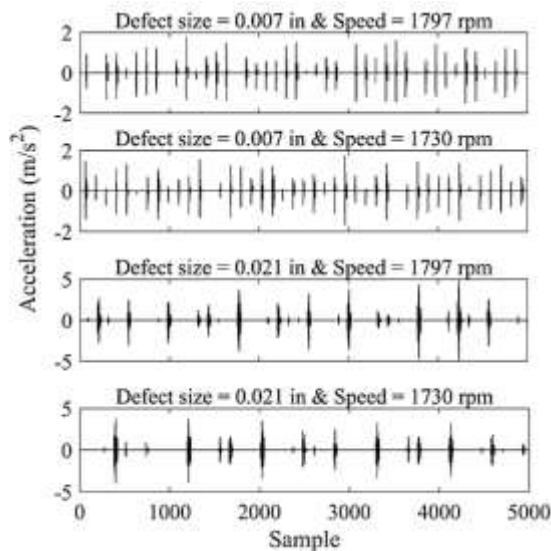


شکل ۷- سیگنال‌های ارتعاشی متناظر با رینگ خارجی معیوب

سیگنال‌های بی‌نویز شده و طیف پوش این سیگنال‌ها برای دو اندازه 0.021 in و 0.007 in به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، با به کارگیری روش تبدیل موجک تجربی، کیفیت سیگنال‌ها به نحوی افزایش یافته است که ایمپالس‌های ناشی از حضور عیب در رینگ خارجی به خوبی پدیدار شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، هنگامی که حتی عیب بسیار کوچکی (به اندازه 0.007 in) در رینگ خارجی یاتاقان ایجاد می‌شود، پیک‌هایی در سرعت دورانی دور شفت یعنی  $f_r$  فرکانس مشخصه رینگ خارجی و



شکل ۸- مودهای تجربی سیگنال اکتساب شده از یک یاتاقان با رینگ خارجی معیوب با اندازه ۰.۰۰۷ in و سرعت ۱۷۹۷ rpm

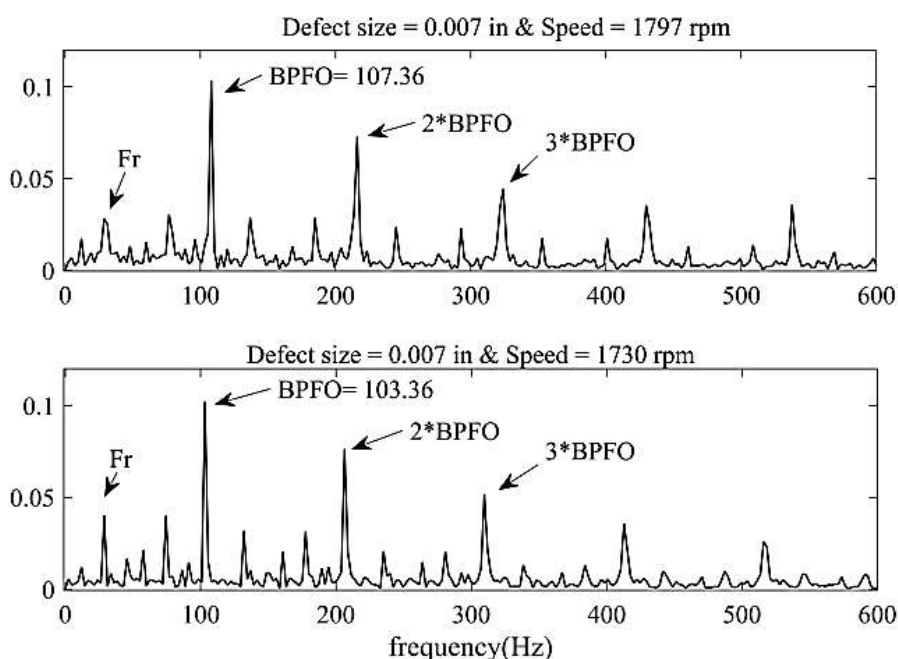


شکل ۹- سیگنال‌های بی‌نویز شده متناظر با رینگ خارجی معیوب

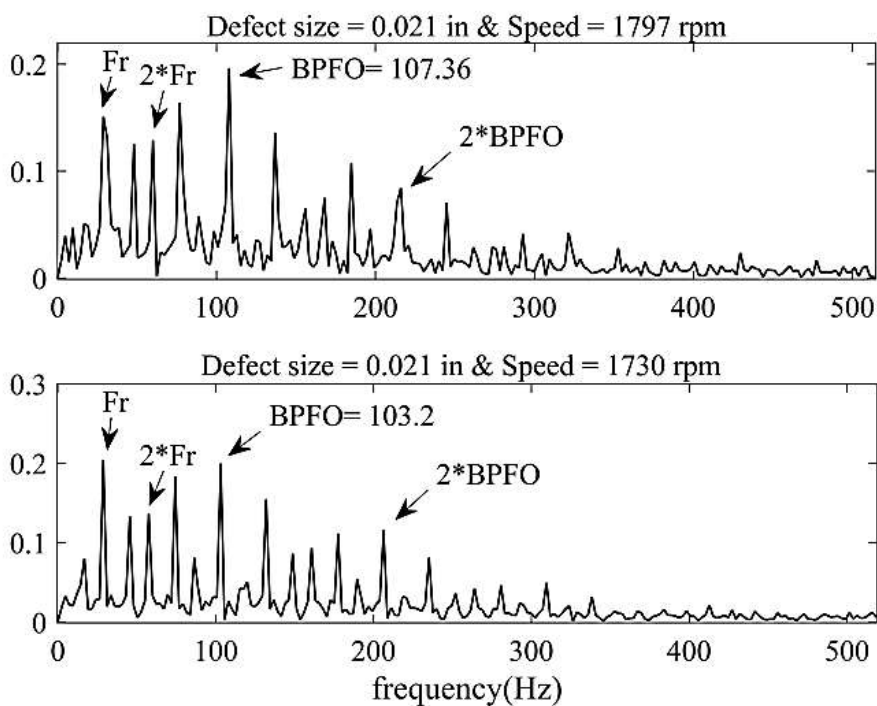
نتایج حاصل از این دو شکل نشان می‌دهند که با استخراج طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهادی در این مطالعه، می‌توان نوع عیب رینگ خارجی با اندازه‌های مختلف را به خوبی تشخیص داد. به عبارت دیگر، طیف پوش ابزار توانمندی برای تشخیص نوع عیب محسوب می‌شود.

جدول ۴- مقایسه مقدار کشیدگی برای سیگنال‌های رینگ خارجی

EWT	EMD	سیگنال اصلی	سرعت دورانی (rpm)	اندازه عیب (in)
۵۱,۹۷	۱۸,۶۱	۷,۶۸	۱۷۹۷	۰,۰۰۷
۴۹,۹۹	۱۸,۹۹	۸,۰۰	۱۷۳۰	۰,۰۰۷
۵۵,۱۰	۳۸,۰۵	۲۲,۷۰	۱۷۹۷	۰,۰۲۱
۵۰,۱۴	۳۴,۱۵	۲۰,۶۷	۱۷۳۰	۰,۰۲۱



شکل ۱۰- طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ خارجی با عیبی به اندازه ۰٫۰۰۷ in



شکل ۱۱- طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده مربوط به رینگ خارجی با عیبی به اندازه ۰٫۰۲۱ in

- optimized: wavelet de-noising technique. *Int J Adv Manuf Technol* 40: 393-402.
- [7] Sadooghi MS, Khadem SE (2016) A new performance evaluation scheme for jet engine vibration signal denoising. *Mech Syst Signal Process* 76: 201-212.
- [8] Mishra C, Samantaray AK, Chakraborty G (2017) Rolling element bearing fault diagnosis under slow speed operation using wavelet de-noising. *Measurement* 103: 77-86.
- [9] Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen NC, Tung CC, Liu HH (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci* 454: 903-995.
- [۱۰] باقری ا، نظامیوند چگینی س، رضانی دشتیمان م، فرید نجفی (۱۳۹۷) عیب‌یابی چرخ‌دنده بر پایه انتخاب مناسب-ترین ویژگی به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات. *مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۸(۳): ۶۴-۴۹.
- [11] Zhao DZ, Li JY, Cheng WD, Wang TY, Wen WG (2016) Rolling element bearing instantaneous rotational frequency estimation based on EMD soft-thresholding denoising and instantaneous fault characteristic frequency. *J CENT SOUTH UNIV* 23: 1682-1689.
- [12] Abdelkader R, Kaddour A, Derouiche Z (2018) Enhancement of rolling bearing fault diagnosis based on improvement of empirical mode decomposition denoising method. *Int J Adv Manuf Technol* 97: 1-19.
- [13] Wang R, Sun S, Guo X, Yan D (2018) EMD threshold denoising algorithm based on variance estimation. *CIRCUITS SYST SIGNAL PROCESS* 1-20.
- [14] Nguyen P, Kang M, Kim JM, Ahn BH, Ha JM, Choi BK (2015) Robust condition monitoring of rolling element bearings using de-noising and envelope analysis with signal decomposition techniques. *Expert Syst Appl* 42: 9024-9032.
- [15] Gilles J (2013) Empirical wavelet transform. *IEEE Trans Signal Processing* 61: 3999-4010.
- [16] Kedadouche M, Thomas M, Tahan A (2016) A comparative study between Empirical Wavelet Transforms and Empirical Mode Decomposition Methods: Application to bearing defect diagnosis. *Mech Syst Signal Process* 81: 88-107.
- [17] Pan J, Chen J, Zi Y, Li Y, He Z (2016) Mono-component feature extraction for mechanical fault diagnosis using modified empirical wavelet transform via data-driven adaptive Fourier spectrum segment. *Mech Syst Signal Process* 72: 160-183.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش حذف نویز جدیدی به کمک تبدیل موجک تجربی ارائه شده است. روش تبدیل موجک تجربی، روش نسبتاً جدیدی است که از دو روش تبدیل موجک و تجزیه مود تجربی الهام گرفته شده است. این تکنیک قادر است، هر سیگنال ارتعاشی را به طور تطبیق‌پذیری به مودهای تجربی‌اش تجزیه کند. در این مقاله، ابتدا سیگنال‌های ارتعاشی به کمک تبدیل موجک تجربی تجزیه شده و سپس مولفه‌های حاصل از تجزیه به کمک تابع آستانه‌گذاری نرم بی‌نویز شده‌اند. سپس، برای بررسی کیفیت سیگنال‌های بی‌نویز شده توسط روش پیشنهاد شده در این مقاله، از سیگنال‌های ارتعاشی گرفته شده از یاتاقانی با عیوب رینگ داخلی و رینگ خارجی معیوب با اندازه‌ها و در سرعت‌های دورانی مختلف استفاده شده است. برای این منظور، از فاکتور کشیدگی و طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده به ترتیب برای تشخیص حضور عیب و تشخیص نوع عیب استفاده شده است. نتایج مقدار کشیدگی و طیف پوش، حاکی از برتری روش تبدیل موجک تجربی بر تجزیه مود تجربی در شناسایی مشخصات عیوب یاتاقان است.

## ۷- مراجع

- [1] He D, Wang X, Li S, Lin J, Zhao M (2016) Identification of multiple faults in rotating machinery based on minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. *Mech Syst Signal Process* 81: 235-249.
- [2] McFadden PD, Smith JD (1984) Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique—a review. *Tribol Int* 17: 3-10.
- [3] Shi DF, Wang WJ, Qu LS (2004) Defect detection for bearings using envelope spectra of wavelet transform. *J Vib Acoust* 126: 567-573.
- [4] Wang D, Miao Q, Fan X, Huang HZ (2009) Rolling element bearing fault detection using an improved combination of Hilbert and wavelet transforms. *J MECH SCI TECHNOL* 23: 3292-3301.
- [5] Donoho DL, Johnstone JM (1994) Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika* 81: 425-455.
- [6] Al-Raheem KF, Roy A, Ramachandran KP, Harrison DK, Grainger S (2009) Rolling element bearing faults diagnosis based on autocorrelation of

- objective optimization and its application to fault feature extraction of rolling bearing. *Appl Acoust* 127: 46-62.
- [23] Dong S, Sun D, Tang B, Gao Z, Yu W, Xia M (2014) A fault diagnosis method for rotating machinery based on PCA and Morlet kernel SVM. *MATH PROBL ENG*.
- [24] Ziani R, Felkaoui A, Zegadi R (2017) Bearing fault diagnosis using multiclass support vector machines with binary particle swarm optimization and regularized Fisher's criterion. *J INTELL MANUF* 28 (2): 405-417.
- [25] Zhang X, Zhang Q, Chen M, Sun Y, Qin X, Li H (2018) A two-stage feature selection and intelligent fault diagnosis method for rotating machinery using hybrid filter and wrapper method. *Neurocomputing* 275: 2426-2439.
- [18] Kedadouche M, Liu Z, Vu VH (2016) A new approach based on OMA-empirical wavelet transforms for bearing fault diagnosis. *Measurement* 90: 292-308.
- [19] Singh O, Sunkaria RK (2017) ECG signal denoising via empirical wavelet transform. *Australas Phys Eng Sci Med* 40: 219-229.
- [20] Li J, Li Y, Li Y, Qian Z (2018) Downhole microseismic signal denoising via empirical wavelet transform and adaptive thresholding. *J Geophys Eng* 15: 2469.
- [21] Bearing Data Center-Case Western Reserve University. <http://csegroups.case.edu/bearingdata-center/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website>
- [22] He D, Wang X, Li S, Lin J, Zhao M (2017) An improved EMD method based on the multi-