



ارتقاء تبدیل هیلبرت- هوانگ به کمک ویژگی‌های غیر خطی مبتنی بر آنتروپی جهت عیب‌یابی سریع در یک سیستم شبیه‌ساز ارتعاشات تجهیزات دوار

محمد صادق حسین‌زاده¹، سیامک اسماعیل‌زاده خادم^{2*}، محمد صالح صدوقی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی 14115-111 khadem@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 شهریور 1396

پذیرش: 15 دی 1396

ارائه در سایت: 03 بهمن 1396

کلید واژگان:

عیب‌یابی زودهنگام

تبدیل هیلبرت - هوانگ

ویژگی‌های غیرخطی مبتنی بر آنتروپی

طیف درجات بالاتر

چکیده

به کارگیری روش‌های کارا و وفق‌پذیر در حوزه زمان-فرکانس جهت پردازش سیگنال‌های ارتعاشی ناپایدار یا متناظر با سیستم‌های غیرخطی، همچنین استخراج ویژگی‌های قدرتمند و مرتبط با عیب مهم‌ترین مراحل شناسایی عیب در یک تجهیز دوار است. هدف اصلی این مقاله، ارتقاء تبدیل هیلبرت-هوانگ با استفاده از مزایای ویژگی‌های غیرخطی مبتنی بر آنتروپی، جهت حذف اثرات نویز اضافه‌شونده می‌باشد. به علاوه استفاده از ویژگی‌های غیرخطی مناسب، منجر به محدود شدن اطلاعات اضافی و رفع نیاز به روش‌های مختلف کاهش بعد در شناسایی عیب-های یک سیستم دوار شده است. جهت ارتقاء تبدیل هیلبرت-هوانگ، تاثیر نویزهای اضافه‌شونده بر انواع مختلف ویژگی‌های مبتنی بر آنتروپی هر کدام از توابع مود ذاتی حاصل از الگوریتم تجزیه تجربی مود انباشته، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به حساسیت آنتروپی تقریبی به نویز، یک شاخص ارزیابی برای انتخاب دامنه نویز اضافه‌شونده، براساس آنتروپی تقریبی و ضریب اطلاعات متقابل توابع مود ذاتی ارائه گردیده است. سپس با استفاده از مزایای آنتروپی جایگشت و آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت در توصیف مشخصات سیگنال، آستانه‌ای برای شروع پیدایش عیب با توجه به مقادیر آنتروپی مهم‌ترین تابع مود ذاتی-که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل می‌باشد- تعیین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند برای تشخیص انحراف از حالت کارکرد سالم سیستم بدون توجه به نوع عیب، به کار گرفته شود. در مرحله بعد برای شناخت نوع عیب، از طیف درجات بالاتر استفاده شده است. به نحوی که بای اسپکتروم پوش به دست آمده از اعمال تبدیل هیلبرت به مهم‌ترین تابع مود ذاتی، محاسبه شده و با در نظر گرفتن کوپلینگ میان فرکانس‌های مشخصه عیب و فرکانس دور، عیوب ناهم‌محوری و نابالانسی روتور یک سیستم شبیه‌ساز ارتعاشات تجهیزات دوار شناسایی گردیده است.

Improving of the Hilbert-Huang transform using the nonlinear entropy-based features for early fault detection of a rotating machinery vibration simulator system

Mohammad Sadegh Hoseinzadeh¹, Siamak Esmail Zadeh Khadem^{1*}, Mohammad Saleh Sadooghi¹

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*P.O.B.14115-111, Tehran, Iran, khadem@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 09 September 2017

Accepted 05 January 2018

Available Online 23 January 2018

Keywords:

Early fault detection

Hilbert-Huang transform

Nonlinear entropy-based features

Higher order spectra

ABSTRACT

Employing the powerful and adaptive method in time-frequency domain as well as proper and fault-related feature extraction is one of the most important subjects in the processing of nonlinear and non-stationary signals. The main objective of this paper is to improve Hilbert-Huang transform using the advantages of non-linear entropy-based features in the time and frequency domain to reduce noise effects. In addition, applying appropriate entropy-based features lead to restrict information redundancy and overcome the need for dimension reduction, in the fault detection of a rotating system. To modify the Hilbert-Huang method, the effect of added noise on various types of nonlinear entropy-based features is investigated for each intrinsic mode functions (IMFs) which extracted by ensemble empirical mode decomposition algorithm. Considering the approximate entropy (ApEn) sensitivity to noise, an evaluation index is presented for selecting the proper amplitude of the added noise based on the approximate entropy and mutual information coefficient of the different IMFs. Subsequently, taking into account of the high capability of permutation entropy (PeEn) and marginal Hilbert spectrum entropy (MHE) in the signal characteristic, a threshold is determined for fault detection based on their values associating to the main IMF which has the highest value of mutual information coefficient. As a result, the permutation entropy values and marginal Hilbert spectrum entropy of the main IMF can be used for detection of any deviation from normal operation of the rotor bearings system, regardless of the fault type. Consequently, to determine the type of defect, the higher-order spectra have been used. The bi-spectrum of envelope which is obtained from applying Hilbert transform to the main IMF is calculated. This bi-spectrum is employed to identify the coupling between the rotating frequency and fault-characteristic frequencies, for misalignment and unbalanced fault diagnosis of a rotating machinery vibration simulation system.

Please cite this article using:

M. S. Hoseinzadeh¹, S. Esmail Zadeh Khadem, M. S. Sadooghi, Improving of the Hilbert-Huang transform using the nonlinear entropy-based features for early fault detection of a rotating machinery vibration simulator system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 19-29, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در موضوع عیب‌یابی تجهیزات دوار، استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی که حاوی اطلاعات دینامیکی از وضعیت ماشین می‌باشد، می‌تواند در شناسایی و تمایز بین حالت کارکرد سالم و معیوب سیستم موثر باشد. با ظهور عیب در یک سیستم دوار، دامنه و توزیع سیگنال ارتعاشی اخذ شده از سیستم، نسبت به حالت نرمال تغییر می‌کند. برای تشخیص این تغییر از ویژگی‌های آماری سیگنال در حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس بهره گرفته می‌شود [1]. در یک روش تشخیص عیب داده محور، به خاطر ناپیوستگی سیگنال‌هایی که از سیستم معیوب اخذ می‌گردد، مرحله استخراج ویژگی از سیگنال ارتعاشی، مهم و تأثیرگذار است. روش‌های قدیمی استخراج ویژگی سیگنال که بر مبنای ویژگی‌های آماری حوزه زمان تعریف می‌شوند به راحتی قابل محاسبه هستند اما دارای معایبی همچون: عدم حساسیت به داده‌های غیرخطی و ناپیوستگی و همچنین آسیب‌پذیری آن‌ها است [2].

در تحقیقات اخیر، یک روش تحلیل در حوزه زمان-فرکانس به نام تبدیل هیلبرت-هوانگ در مسائل مربوط به پردازش سیگنال‌های غیرخطی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [3,4]. زیربنای این تبدیل، روش تجزیه تجربی مود¹ است که طی یک فرآیند تکرار شونده، سیگنال را به تعداد محدودی توابع مود ذاتی، تجزیه می‌کند. در عمل مشاهده می‌گردد که میزان تعامد بین توابع مود ذاتی، مطلوب نیست و نشت انرژی میان آن‌ها قابل توجه است. از طرف دیگر روش تجزیه تجربی مود، از نواقصی همچون: اختلاط مودها، نداشتن یک مبنای تئوری قوی، اثرات انتها و تخمین فرارویه و فرورویه اسپلاین درجه 3، رنج می‌برد [5,6]. این نارسائی‌ها سبب می‌شود مفهوم تک-جزء بودن توابع مود ذاتی خدشه‌دار شود و در نتیجه، استخراج ویژگی‌های مرتبط با عیب دچار نقصان گردد. لذا برای برطرف کردن این نواقص، استفاده از روش اصلاحی به نام روش تجزیه تجربی مود انباشته² و افزودن نویز سفید به منظور همگن کردن توزیع اکسترم‌های سیگنال اجتناب‌ناپذیر است [7]. از معایب روش تجزیه تجربی مود انباشته، پراکنده شدن اجزای اصلی سیگنال و باقی‌ماندن نویز اضافه شده در توابع ذاتی مختلف است [8]. برای رفع این مشکل، در هر بار تکرار، نویز در دو جهت مثبت و منفی به سیگنال اضافه شده و سپس توابع مود ذاتی به دست آمده میانگین‌گیری می‌شود. این روش مکمل [9] در مقایسه با روش تجزیه تجربی مود انباشته، دارای مزایایی همچون حذف بسیار خوب نویز باقیمانده در ساختار سیگنال اصلی است. اما همچنان لازم است دو پارامتر دامنه نویز و تعداد دفعات تکرار از پیش تعیین شوند. که انتخاب مقادیر نامناسب برای این پارامترها سبب ایجاد اجزای غیرواقعی و همچنین اختلاط مودها می‌گردد [10].

تعداد دفعات تکرار معمولاً تأثیر ناچیزی در حل مشکل اختلاط مودها و ایجاد اجزای غیرواقعی دارد و می‌توان با در نظر گرفتن دفعات تکرار از مرتبه چند صد بار به یک نتیجه معقول و با دقت مناسب دستی‌افت [11]. در این مقاله برای تعیین دامنه نویز اضافه‌شونده یک روش سیستماتیک و سازگار با هر سیگنال ارائه می‌گردد.

از طرف دیگر ظهور عیب در یک سیستم سبب تولید سیگنال‌های ضعیف با انرژی کم و نویز بالا می‌گردد. همچنین به خاطر برخی شاخصه‌های غیرخطی مانند اصطکاک، دمپینگ، نیرو و... عوامل غیرخطی در پاسخ ارتعاشی سیستم به وجود می‌آید [12]. بنابراین در داده‌های غیرخطی، باید

ویژگی‌های مرتبط با عیب نهفته در سیگنال ارتعاشی، به صورت موثر استخراج گردد.

چنانچه شناسایی عیب در مراحل اولیه جهت تمایز نمونه‌های سالم و معیوب، صرفاً توسط یک یا چند ویژگی استخراج شده از سیگنال ارتعاشی، بدون استفاده از روش‌های مختلف کاهش بعد و یا ماشین‌های طبقه‌بندی که نیازمند آموزش است، محقق گردد، بسیار ارزشمند و مفید خواهد بود. از آنجا که سیگنال ارتعاشی شامل اجزایی با مقیاس‌های چندگانه زمانی می‌باشد، در حالت کلی، تشخیص زود هنگام عیب صرفاً با توجه به مقادیر ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال میسر نیست. روش‌های متعددی بر پایه پارامترهای غیرخطی، همچون میزان همبستگی [13]، بزرگترین ضریب لیاپانوف [14] و انواع آنتروپی‌ها در حوزه زمان و فرکانس شامل آنتروپی تقریبی [15]، آنتروپی نمونه‌ای [16]، آنتروپی جایگشت [17] و آنتروپی طیفی [18]، جهت استخراج ویژگی‌های غیرخطی و انجام فرآیند تشخیص عیب به کار گرفته شده است. همچنین تحلیل‌های آماری انجام شده پیرامون مفهوم آنتروپی انرژی، تغییرات نسبی ضرایب توزیع انرژی به دست آمده از تبدیل بسته موجک یک سیگنال اخذ شده از یک سیستم معیوب نسبت به یک توزیع مرجع مرتبط با حالت سالم، در مرجع [19] جهت تعیین مقدار شدت عیب به کار گرفته شده است. اما باید توجه داشت که کارایی روش‌های مبتنی بر مقادیر آنتروپی حاصل از اعمال روش تجزیه تجربی مود نسبت به تجزیه و بازسازی توسط تبدیل بسته موجک به اثبات شده است [20].

معرفی معیارهای مناسب برای تشخیص تغییرات دینامیکی در سری‌های زمانی، که به سرعت و آسانی قابل محاسبه باشند و همچنین در حضور نویز کارایی خود را حفظ کنند بسیار حائز اهمیت است. لذا رویکرد اصلی در این مقاله، استفاده از بهینه‌ترین پارامترهای غیرخطی در ارتقاء الگوریتم تجزیه تجربی مود انباشته و استخراج ویژگی‌های آماری توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه سیگنال، خواهد بود تا فرآیند عیب‌یابی در مراحل اولیه پیدایش عیب، با کمترین پیچیدگی و بالاترین دقت، به نتیجه برسد.

در میان ویژگی‌های مبتنی بر آنتروپی، آنتروپی جایگشت در مواجهه با داده‌های آغشته به نویز بسیار قوی و کارا است و می‌تواند برای تحلیل داده‌های طولانی، بدون فرآیند پیش‌پردازش و تنظیم پارامترهای پیچیده، با سرعت محاسباتی بالا به کار گرفته شود [21]. در طرف دیگر آنتروپی تقریبی از لحاظ محاسباتی ساده است و به شدت تحت تأثیر نویز می‌باشد [22]. در این مقاله دونوع آنتروپی در حوزه زمان شامل: آنتروپی تقریبی و آنتروپی جایگشت برای ارتقاء روش هیلبرت-هوانگ و شناسایی زود هنگام عیب به کار گرفته می‌شود.

درحوزه زمان-فرکانس نیز از آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت که قابلیت اندازه‌گیری مشخصات توزیع طیف محلی سیگنال‌های ناپیوسته و غیرخطی را داراست [23]، جهت ارائه یک آستانه به منظور تفکیک حالات سالم و معیوب، استفاده شده است.

تشخیص ظهور عیب در مراحل نخستین، اولین گام در فرآیند تشخیص عیب است. پس از آنکه ظهور عیب مسجل گردید، تشخیص نوع عیب جهت اتخاذ تصمیم صحیح جهت انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری ضروری است. اصولاً پیشرفت عیب در یک سیستم دوار سبب افزایش غیرخطی و تقویت هارمونیک‌های مرتبط با عیب می‌گردد. این فرکانس‌های هارمونیک دارای اجزایی هستند که با فرکانس‌های طبیعی سیستم برهم‌کنش دارند [24]. در حالت کلی طیف توان از میزان اتفاقی بودن فرآیند، اطلاعات کافی ارائه نمی‌دهد. با گسترش اصول حاکم بر طیف توان به درجات بالاتر، امکان تعیین

¹ Empirical Mode Decomposition(EMD)² Ensemble Empirical ModeDecomposition(EEMD)³ Complementary Ensemble Empirical ModeDecomposition(CEEMD)

افزایش تعداد جفت‌های m و $m+1$ رشد می‌یابد. تعداد جفت‌ها با انتخاب m کوچکتر و r بزرگتر، افزایش می‌یابد. پارامتر r برای تعادل کیفیت برآورد احتمال لگاریتمی به کار می‌رود. برای مقادیر کوچک r تخمین احتمال شرطی ضعیف‌تری رخ خواهد داد. در حالی که برای مقادیر بزرگتر r ، مقادیر بسیار زیادی از جزئیات سیستم از دست خواهد رفت. در یک کاربرد خاص روش سعی و خطا می‌تواند برای تعیین این مقادیر به کار گرفته شود.

2-2- آنتروپی جایگشت

آنتروپی جایگشت که جهت شناسایی میزان اتفاقی بودن و جهش و تغییر ناگهانی دینامیکی⁵ تعریف شده است [11]، برای بررسی وجود تداخل و نویز در سیگنال به کار گرفته می‌شود. تازمانی که تداخل و نویز در سیگنال، اتفاقی و دارای فرکانس بالا است، تشخیص تداخل و نویز در سیگنال با بالا بودن مقدار آنتروپی جایگشت امکان‌پذیر است و در نتیجه هر جزء سیگنال که ایستایی بیشتری داشته باشد، آنتروپی آن کمتر خواهد بود. از مزایای آنتروپی جایگشت می‌توان به تعریف ساده، سرعت بالای محاسبات و بی‌شک و تردید⁶ بودن آن اشاره کرد.

مبانی تئوری محاسبه آنتروپی جایگشت در مرجع [21] ارائه گردیده است. دو پارامتر مهم در محاسبه مقدار آنتروپی جایگشت τ تأخیر زمانی⁷ و m بعد فضای جاسازی⁸ است. انتخاب مقادیر مختلف m و τ ، مسیرهای⁹ بازسازی شده مختلفی را در برخواهد داشت. به این ترتیب به منظور بازسازی بستر جذب یک سیستم دینامیک، دو مسأله باید حل شود. اولین مسأله مربوط به انتخاب تأخیر زمانی بهینه برای بازسازی مسیر در فضای فاز، و مسأله دوم تعیین بعد جاسازی می‌باشد.

2-3- آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت

یک روش مرسوم جهت کمی‌سازی توزیع توان طیفی، شناختن آشفتگی و پیچیدگی سیستم است. داده‌هایی با توزیع پهن و صاف آنتروپی بالایی دارند. در حالی که داده‌هایی با توزیع باریک و قله‌دار آنتروپی پایین‌تری دارند. آنتروپی یک معیار آماری استخراج شده از سیگنال می‌باشد. آنتروپی‌های بر مبنای طیف حاشیه‌ای هیلبرت می‌تواند کارایی مناسبی در طبقه‌بندی سیگنال‌های نایست داشته باشد [30].

برای محاسبه آنتروپی، طیف سیگنال باید ابتدا به یک تابع جرم احتمال، از طریق نرمالایز توان طیف، تبدیل گردد. رابطه زیر برای نرمال کردن به کار می‌رود:

$$p_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

که P_i انرژی جزء فرکانس i ام طیف فرکانسی و p_i تابع جرم احتمال طیف خواهد بود. سپس آنتروپی شانون به صورت زیر نوشته می‌شود [32]:

$$\text{ShEn} = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (2)$$

که p_i احتمال وقوع هر متغیر می‌باشد که در این جا احتمال چگالی طیف است و $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ خواهد بود.

2-4- طیف درجات بالاتر

طبق تعریف، طیف فوریه از مرتبه سوم، به عنوان بای اسپکتروم شناخته

تغییرات جزئی و ظریف و همچنین تغییرات شکل موج سیگنال، فراهم می‌گردد. طیف‌های درجات بالا (تحلیل بای اسپکتروم)، نمودار طیفی مومنوم‌های درجه بالای یک سیگنال نامنظم است که، غیرخطی شدن سیگنال و انحراف از توزیع گوسی را نشان می‌دهد، در حالی که ویژگی‌های فازی سیگنال را حفظ می‌کند [25]. همچنین آنالیز پوش یکی از مهمترین و اثرگذارترین روش‌های دمودولاسیون و پردازش سیگنال است [26]. در روش‌های متداول دمودولاسیون استفاده از فیلترهای باند گذر¹ جهت ارتقاء فرکانس‌های مرتبط با عیب بیرینگ اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین انتخاب فرکانس مرکزی و پهنای باند فیلتر، بر نتایج پردازش سیگنال تاثیرگذار خواهد بود. از معایب روش پوش می‌توان به دو موضوع اشاره کرد. اول این که به کارگیری و استفاده صحیح از این روش نیازمند اطلاعات کافی و علم قبلی از فرکانس تشدید سیستم موردنظر می‌باشد. دوم این که هیچ روش جامع و سیستماتیکی برای تعیین پهنای باند مناسب فیلترینگ وجود ندارد [27]. لذا ترکیب روش تجزیه تجربی مود با آنالیز پوش می‌تواند خصوصیات مدولاسیون سیگنال اخذ شده از سیستم بیرینگ معیوب را استخراج نماید [28]. در این مقاله، برای تشخیص نوع عیب، با توجه به ارتباط فرکانس‌های مشخصه عیب و فرکانس‌های دور ماشین توسط مقادیر بای اسپکتروم² پوش³ حساس‌ترین تابع مودداتی، معیاری جهت تشخیص نوع عیب ارائه گردیده است.

هدف از این مقاله ارتقاء روش هیلبرت- هوانگ برای افزایش کارایی روش در تشخیص زود هنگام ظهور عیب، با استفاده از مقادیر آنتروپی در حوزه زمان و زمان- فرکانس مرتبط با مهمترین و حساس‌ترین تابع مود ذاتی می‌باشد. همچنین فرآیند تشخیص نوع عیب با بهره‌گیری از طیف‌های درجات بالاتر تابع مود ذاتی حاصل از تجزیه سیگنال انجام می‌گیرد. صحنه‌گذاری روش پیشنهادی با اعمال آن بر داده‌های اخذ شده از میز تست دانشگاه تربیت مدرس که دارای عیوب مصنوعی بسیار کوچک نابالانسی و نا هم‌محوری در روتور می‌باشد، محقق می‌گردد.

2- چارچوب نظری

2-1- آنتروپی تقریبی

تخمین همگرا و قابل اعتماد از پارامترهای غیرخطی معمولاً یک فرآیند زمانبر و نیازمند یک مجموعه داده طولانی می‌باشد. این حقیقت ممکن است در کاربرد این روش‌ها در فرآیند عیب‌یابی ناامیدوارکننده باشد اما آنتروپی تقریبی از لحاظ محاسباتی کارا و قابل اعمال به داده‌های طولانی و یا کوتاه می‌باشد. آنتروپی تقریبی، احتمال شرطی شباهت میان دو بخش متوالی از یک داده در طول آن را بررسی می‌نماید. در واقع آنتروپی تقریبی یک وسیله جهت اندازه‌گیری قاعده‌مندی و پیچیدگی یک سری زمانی است. کم بودن مقدار آنتروپی تقریبی به معنی پایین بودن قاعده‌مندی و ترتیب سری زمانی است.

الگوریتم محاسبه آنتروپی تقریبی به شرح مرجع [15] می‌باشد. از الگوریتم تعریف فوق مشاهده می‌گردد که محاسبه مقدار آنتروپی تقریبی وابسته به تعیین دو مقدار بعد جاسازی m و ترانس r است.

پنکوس⁴ [29] پیشنهاد کرد $m = 2$ و

$r = d \times \text{std}(X) = (0.1 - 0.25) \times \text{std}(X)$ پارامترهای مناسبی برای کاربردهای عمومی است. در اصل دقت و اطمینان تخمین آنتروپی تقریبی با

⁵ Dynamic mutation

⁶ Robust

⁷ Delay time

⁸ Embedding dimension

⁹ Trajectories

¹ Band-pass filters

² Bispectrum

³ Envelope

⁴ Pincus

ذاتی از میانگین‌گیری دو مجموعه توابع مود ذاتی حاصل می‌گردد. روش مکمل دارای مزایایی همچون حذف بسیار خوب نویز باقی مانده در ساختار سیگنال اصلی است.

در روش تجزیه تجربی مود انباشته‌تعداد تلاش‌های مجدد (N) و دامنه نویز اضافه شده (a) دو پارامتر مهم است که می‌بایست به دقت انتخاب گردد. به‌منظور کاهش خطا، دامنه نویز کم پیشنهاد می‌گردد، اما اگر دامنه نویز بسیار کاهش یابد، ممکن است تغییرات کافی در اکستریم‌های روش تجزیه تجربی مود ایجاد نکند و در واقع عملاً توفیقی در حذف مشکل درآمیختگی مودها حاصل نگردد.

در روش پیشنهادی این مقاله، انتخاب بهترین مقادیر پارامترهای اساسی روش تجزیه تجربی مود انباشته ارتقاء یافته، مهمترین مرحله می‌باشد. جهت مطالعه ارتباط میان توابع مود ذاتی مختلف با سیگنال موردنظر و تعیین توابعی که به تغییرات سیگنال حساسیت بیشتری دارد و حاوی بیشترین اطلاعات پیرامون سیگنال موردنظر است، از ضریب اطلاعات متقابل استفاده می‌گردد. از آنجایی که این ضریب، وابستگی میان داده‌های مختلف را برآورد می‌کند، می‌تواند گزینه بسیار خوبی برای اندازه‌گیری شباهت دو سیگنال با یکدیگر باشد. ضریب اطلاعات متقابل قادر است، فراتر از ضریب همبستگی، میزان همبستگی غیرخطی میان متغیرهای مختلف را تعیین نماید. علاوه بر این، ضریب اطلاعات متقابل نسبت به تعداد نقاط داده‌ها حساس نیست و محاسبه آن پیچیدگی خاصی ندارد [9].

بنابراین تابع مود ذاتی‌ای که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل با سیگنال اصلی می‌باشد، به عنوان معیار جهت تعیین دامنه نویز اضافه شونده در روش تجزیه تجربی مود انباشته ارتقاء یافته، مد نظر قرار می‌گیرد. از طرف دیگر بایستی میزان نویز باقی مانده در توابع مود ذاتی، به حداقل مقدار خود برسد. چرا که مقدار آنتروپی تحت تاثیر نویز است. جهت دستیابی به حداکثر تفکیک‌پذیری میان حالات سالم و معیوب براساس ارزیابی تابع مود ذاتی برتر لازم است تا تاثیر نویز بر آنتروپی در کمترین حالت خود باشد. جهت بررسی میزان بی‌نظمی و نویزدار بودن توابع مود ذاتی از آنتروپی تقریبی استفاده می‌گردد. چرا که این پارامتر به شدت به میزان نویز و بی‌قاعدگی سیگنال حساس است. بنابراین طبق گستره‌ای که [10] برای میزان دامنه نویز اضافه شونده پیشنهاد داد، با تغییر دامنه نویز از 0 تا 0.6 برابر انحراف معیار سیگنال موردنظر، برترین تابع مود ذاتی به لحاظ ضریب اطلاعات متقابل رصد می‌گردد. مقداری که بیشترین ضریب اطلاعات متقابل و کمترین میزان آنتروپی نسبی را برای دامنه‌ای نویز اضافه‌شونده نتیجه دهد، برای اعمال در روش پیشنهادی، مناسب خواهد بود. پس یک شاخص ارزیابی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$e_i = \frac{MI_i}{AE_i} \quad (5)$$

که MI_i ضریب اطلاعات متقابل میان تابع مود ذاتی λ_m با سیگنال مورد نظر و AE_i مقدار آنتروپی تابع مود ذاتی λ_m می‌باشد. این شاخص برای حساس‌ترین تابع مود ذاتی به‌کار گرفته می‌شود. پس میزان دامنه نویز اضافه شونده‌ای که بالاترین شاخص ارزیابی را برای حساس‌ترین تابع مود ذاتی نتیجه دهد، به عنوان دامنه نویز مناسب خواهد بود.

3-2- شناسایی شروع عیب

شناسایی مرحله اولیه رشد عیب و توانایی تمایز نمونه‌های سالم و معیوب توسط یک یا چند ویژگی استخراج شده از سیگنال ارتعاشی، بدون استفاده از

می‌شود. این پارامتر میزان کولپینگ بین فرکانس‌های حاصل از وقوع عیب و فرکانس‌های طبیعی سیستم را نشان می‌دهد. در نتیجه تحلیل بای اسپکتروم می‌تواند اثرات نویز با توزیع گوسی چه از نوع سفید و چه از نوع رنگی را به حداقل مقدار خود برساند و اطلاعاتی در مورد میزان انحراف توزیع سیگنال از توابع گوسی در اختیار قرار دهد. بنابراین امکان استفاده از این پارامتر به عنوان معیاری برای تعیین نوع عیب، فراهم می‌باشد.

برای تخمین طیف‌های درجات بالاتر روش مستقیم، داده‌ها به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود که تعداد بلوک‌های هم‌پوشان آن‌ها مساوی است. سپس تبدیل فوریه سریع به هر بلوک اعمال می‌شود و ضرایب طیفی در یک طیف مرتبه بالای خام، ایجاد می‌شود. میانگین وزنی طیف درجه بالای خام، مومنوم درجه سوم را نتیجه می‌دهد که به بای اسپکتروم شناخته می‌شود. طیف درجات بالا، تابعی از دو فرکانس به فرم زیر می‌باشد [25]:

$$B(f_1, f_2) = [X(f_1)X(f_2)X(f_1 + f_2)] \quad (3)$$

که $X(f)$ تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ است. بای اسپکتروم یک مقدار مختلط است که اثر متقابل سه فرکانس f_1, f_2 و $f_1 + f_2$ را بررسی می‌کند. همچنین فرکانس f می‌تواند به عددی بین صفر تا یک (فرکانس نایکویست) نرمال شود. بای اسپکتروم یک سیگنال حقیقی دارای تقارن‌هایی می‌باشد که منجر به تولید اطلاعات اضافی می‌گردد. لذا برای محاسبه بای اسپکتروم فضایی در محدوده سه ضلعی محدود می‌گردد، به نحوی که، مقادیر بای اسپکتروم در امتداد خطی که از مبدا فضای بای اسپکتروم شروع می‌شود و بر روی محدوده سه ضلعی $0 \leq f_2 \leq f_1 \leq f_2 + f_1 \leq 1$ ختم می‌گردد، به‌دست می‌آید [30].

3- تشریح مدل پیشنهادی

3-1- روش تجزیه تجربی مود انباشته ارتقاء یافته

اساسا روش تجزیه تجربی مود سیگنال موردنظر را به فرم رابطه (4) تجزیه می‌نماید. این فرآیند توسط حذف میانگین پوش‌های فوقانی و تحتانی فیت شده به اکستریم‌های محلی سیگنال صورت می‌پذیرد.

$$x_i = \sum_{l=1}^N C_{i,N}(t) + r_{i,N}(t) \quad (4)$$

که $C_{i,N}(t)$ بیانگر توابع مود ذاتی تک جزء است که شامل باند فرکانسی محدودی می‌باشد. N تعداد توابع مود ذاتی و $r_{i,N}(t)$ نیز تابع باقی‌مانده است. هر تابع مود ذاتی در حالت ایده‌آل باید یک تابع تک جزء باشد که در دامنه آن تعداد اکستریم‌ها و تعداد نقاط عبوری از محور افق برابر بوده و یا نهایتاً یک اختلاف داشته باشد. اگرچه روش تجزیه تجربی مود یک روش سازگار برای پردازش سیگنال‌های غیرخطی و ناپایستا می‌باشد، اما مشکل درآمیختگی مودها که ناشی از وجود تداخل‌ها در سیگنال است، رخ می‌دهد. به‌منظور غلبه بر این مشکل، روش تجزیه تجربی مود انباشته پیشنهاد گردیده است. در این رویکرد، نویز سفید با دامنه محدود جهت تشکیل یک چارچوب یکنواخت مرجع در فضای زمان-فرکانس به سیگنال اصلی اضافه می‌گردد. این امر موجب اغتشاش سیگنال حوالی جواب‌های صحیح در فرآیند غربالگری و در نتیجه استخراج تمام جواب‌های ممکن می‌شود. بنابراین مقیاس‌های مختلف اجزاء سیگنال در قالب توابع مود ذاتی مناسب خویش تلفیق می‌گردد. در این روش، نویز اضافه شده با به‌کارگیری تلاش‌های مجدد کافی، حذف می‌گردد. جهت ارتقا و افزایش کارایی روش تجزیه تجربی مود انباشته، رویکردی به نام الگوریتم مکمل ارائه گردیده است [9]. در این روش نویز در دو جهت مثبت و منفی به سیگنال اضافه شده و در نهایت توابع مود

3-3- شناسایی نوع عیب

ارائه معیاری برای تعیین نوع عیب، تنها با توجه به طیف فرکانس سیگنال ارتعاشی بسیار مشکل است. چرا که طیف فرکانسی حاصل از اعمال تبدیل فوری، بیشتر تحت تاثیر محتوای فرکانس تشدید سیستم قرار دارد، در حالی که اطلاعاتی که جهت تخمین شرایط سیستم مفید می‌باشد، در فرکانس‌های تکرار و نه در فرکانس تشدید تحریک شده، نهفته است. همچنین در طیف فرکانسی، اطلاعات مهم به واسطه درآمیختن با هارمونیک‌های مراتب بالا، قابل تشخیص نیست. به‌طور کلی فرکانس‌های مشخصه عیب‌های مرسوم در تجهیزات دوار به مشخصات هندسی و سرعت اجزای آن بستگی دارد. در هنگام ظهور عیب‌های مرتبط با روتور، میزان ارتعاشات سیستم در فرکانس دور و هارمونیک‌های کوچک آن افزایش می‌یابد. اما یک راه‌حل ساده برای تفکیک میان آن‌ها نمی‌توان ارائه داد. این خود می‌تواند دلیلی باشد تا از مزایای طیف‌های درجات بالاتر در محدوده فرکانسی محدودتری استفاده شود. حساس‌ترین تابع مود ذاتی، در بازه فرکانسی محدود خود دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل با سیگنال اصلی است. لذا بهره‌گیری از طیف بای‌اسپکتروم حساس‌ترین تابع مود ذاتی هر سیگنال قابلیت تعیین معیاری جهت تشخیص نوع عیب را محتمل‌تر می‌سازد. پیشنهاد می‌شود پس از تعیین دامنه مناسب نویز اضافه شونده در الگوریتم تجزیه تجربی مود انباشته و شناسایی وجود عیب در سیستم توسط ویژگی‌های مبتنی بر آنتروپی، تشخیص نوع عیب با مقایسه مقادیر بای‌اسپکتروم مرتبط با پوش‌آهمترین تابع مود ذاتی که معرف کوپلینگ میان فرکانس‌های مشخصه عیب با فرکانس‌های دور می‌باشد، انجام پذیرد. برای این منظور برای هر کدام از حالات سالم و معیوب، مهمترین تابع مود ذاتی با استفاده از الگوریتم ارتقاء یافته تجزیه تجربی مود استخراج می‌گردد. سپس پوش تابع مود ذاتی توسط اعمال تبدیل هیلبرت به محاسبه می‌گردد و با مقایسه مقادیر طیف بای‌اسپکتروم پوش به‌دست آمده مرتبط با فرکانس دور و فرکانس‌های مشخصه عیب، راهنمایی جهت تعیین نوع عیب ارائه می‌گردد. در مجموع فلوجارت روش پیشنهادی جهت شناسایی ظهور و نوع عیب در "شکل 1" نشان داده شده است.

4- نتایج تجربی

4-1- داده‌ها و میز شبیه‌ساز ارتعاشات

ساختار کلی میز شبیه‌ساز ارتعاشات ماشین‌آلات دانشگاه تربیت مدرس [34]، در "شکل 2" نشان داده شده است. این مجموعه با داشتن یک موتور القایی دور بالا، سیستم درایو و کنترل دور موتور، قابلیت اعمال گشتاورهای مختلف را داراست. سیستم دوار این سیستم شامل یک روتور است که تکیه‌گاه آن دو بلبرینگ از نوع SKF6010 است و برای بالانس آن، دو دیسک با تقارن محوری به‌کار رفته است. به‌منظور اخذ داده در شرایط کاری متفاوت، عیوب نابالانسی به اندازه 122.5 گرم میلی‌متر با اختلاف فاز 180 درجه بر روی دو دیسک و همچنین ناهم محوری به میزان 0.03 درجه در دو سمت کوپلینگ میان محور موتور و محور روتور، به‌صورت مجزا، ایجاد شده است. داده‌های شتاب برحسب زمان سیستم در حالت بی‌باری و با سرعت موتور ثابت و برابر 1914 دور بر دقیقه است. نرخ داده‌برداری داده‌ها با توجه به نوع سیستم اخذ داده‌ها و اصل نایکوئیست برابر 8192 هرتز می‌باشد. همچنین با توجه به مرجع [21] برای محاسبه آنتروپی جایگشت تعداد داده بیش از 512 نقطه و مطابق مرجع [22] برای محاسبه آنتروپی تقریبی تعداد داده بیش از 1000

روش‌های مختلف کاهش بعد و یا ماشین‌های طبقه‌بندی که نیازمند آموزش و یادگیری می‌باشند، بسیار ارزشمند و مفید فایده خواهد بود. در اکثر موارد سیگنال‌های اخذ شده از نمونه‌های معیوب، دارای آنتروپی بالاتر از نمونه‌های سالم می‌باشد [11]. هنگامی که تجهیز دوار در حالت سالم و نرمال خود قرار دارد، سیگنال ارتعاشی از اجزای با ارتباط و تعامل قطعی و مشخص¹ تشکیل شده است، که حاصل کوپل میان اجزای مکانیکی و احیاناً نویز محیط می‌باشد. در این حالت ارتعاشات دارای یک قاعده و نظم معین است. در نتیجه مقادیر آنتروپی مرتبط به حالت سالم، به تناسب کوچکتر است. خواص دینامیکی و اتفاقی حالت نرمال در مقایسه با سیگنال‌های حالت معیوب متفاوت خواهد بود. انتخاب نوع آنتروپی که بتواند تغییرات حالت‌کارکرد سیستم را دقیق‌تر نشان دهد، یکی از عوامل تاثیرگذار در فرآیند عیب‌یابی خواهد بود. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که آنتروپی جایگشت برای شناسایی سیگنال ارتعاشی در سیستم‌های دوار پرکاربرد و مناسب می‌باشد [21]. هنگامی که در اجزاء یک سیستم دوار عیبی رخ می‌دهد، با ایجاد ایمپالس‌های مرتبط با عیب، فرکانس‌های مرتبه بالای سیستم تحریک می‌گردد که در هم کنش این اجزای فرکانسی سبب افزایش پیچیدگی سیگنال خواهد شد. لذا میزان آنتروپی جایگشت افزایش خواهد یافت. این موضوع در مراجع [11] و [33] مورد بحث قرار گرفته است. این قاعده کلی برای همه سیستم‌های واقعی که حاوی انواع نویزها و تداخلات سیگنال می‌باشند، لزوماً همواره برقرار نیست. در این تحقیق پیشنهاد می‌شود برای تفکیک دقیق‌تر میان حالت سالم و معیوب بر محدوده فرکانسی باریک‌تری تمرکز گردد. این محدوده فرکانسی باریک می‌تواند تابع مود ذاتی که دارای بیشترین همبستگی با سیگنال اصلی است، باشد. یعنی میزان آنتروپی تابع مود ذاتی استخراج شده از سیگنال حالت نرمال که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل است برای تعیین میزان آستانه خروج از حالت نرمال به‌کار گرفته می‌شود. برای شناسایی عیب نیز میزان آنتروپی جایگشت همان شماره تابع مود ذاتی مدنظر گرفته خواهد شد.

در مباحث مرتبط با پایش وضعیت و عیب‌یابی تجهیزات دوار، تحقیقات کمتری پیرامون استفاده از ویژگی‌هایی مبتنی بر آنتروپی در حوزه فرکانس نسبت به حوزه زمان، انجام شده است. کمی‌سازی توزیع توان طیف می‌تواند ملاکی جهت شناخت پیچیدگی‌ها و بی‌نظمی‌های موجود در طیف سیگنال باشد. مفهوم آنتروپی یک معیار جهت تشخیص میزان پیچیدگی و بی‌قاعدگی در تحلیل داده‌های مرتبط با سیستم‌های فیزیکی و مکانیکی باشد. تبدیل هیلبرت هر کدام از توابع مود ذاتی توزیع زمان-فرکانس دامنه ارتعاش را نشان می‌دهد. همچنین طیف حاشیه‌ای هیلبرت می‌تواند توزیع دامنه برای هر مقدار از فرکانس را اندازه‌گیری نماید. بنابراین می‌توان با بهره‌گیری از دقت طیف حاشیه‌ای هیلبرت در نشان دادن تغییرات توزیع فرکانس، برای محاسبه ویژگی‌های مرتبط با عیب در حوزه فرکانس بهره برد. با تعریف مفهوم آنتروپی برحسب توزیع طیف حاشیه‌ای هیلبرت امکان استخراج ویژگی در حوزه زمان-فرکانس جهت شناسایی تغییرات توزیع انرژی فراهم می‌گردد. برای شناسایی عیب نیز پیشنهاد می‌گردد آستانه وقوع عیب با توجه به مقادیر آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت مرتبط با تابع مود ذاتی که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل با سیگنال حالت نرمال است، تعریف شود و تشخیص عیب با محاسبه آنتروپی تابع مود ذاتی متناظر هر سیگنال صورت پذیرد.

² Envelope¹ Deterministic Interaction

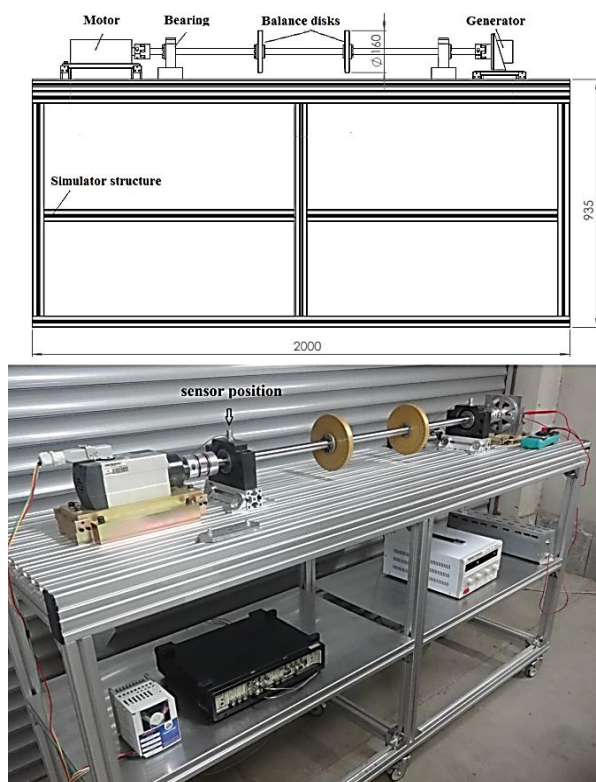


Fig. 2 TMU rotating machinery vibration simulator

شکل 2 میز شبیه‌ساز ارتعاشات تجهیزات دوار دانشگاه تربیت مدرس

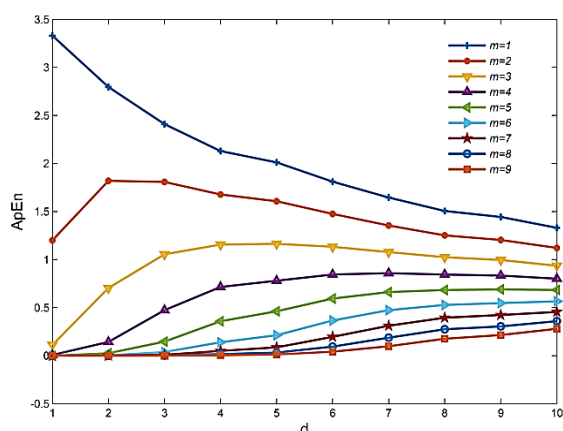


Fig. 3 ApEn values of normal vibration signal versus m and d variation
شکل 3 مقادیر آنتروپی تقریبی سیگنال حالت سالم براساس تغییرات پارامترهای d و m

توجه بیشتر به نسبت سیگنال به نویز کمتر از 50 می‌باشد. چنانچه از جدول ملاحظه می‌گردد میزان تغییر آنتروپی به ازای $SNR=5$ برابر 46 درصد و به ازای $SNR=20$ برابر 7.8 درصد است. در حالی که تغییرات آنتروپی جایگشت به ازای $SNR=5$ برابر 23 درصد و به ازای $SNR=20$ برابر 4.6 درصد می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که آنتروپی تقریبی حساسیت بیشتری به میزان نویز موجود در سیگنال خواهد داشت.

3-4- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی از داده‌های اخذ شده از میز شبیه‌ساز ارتعاشات تجهیزات دوار دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. در گام اول

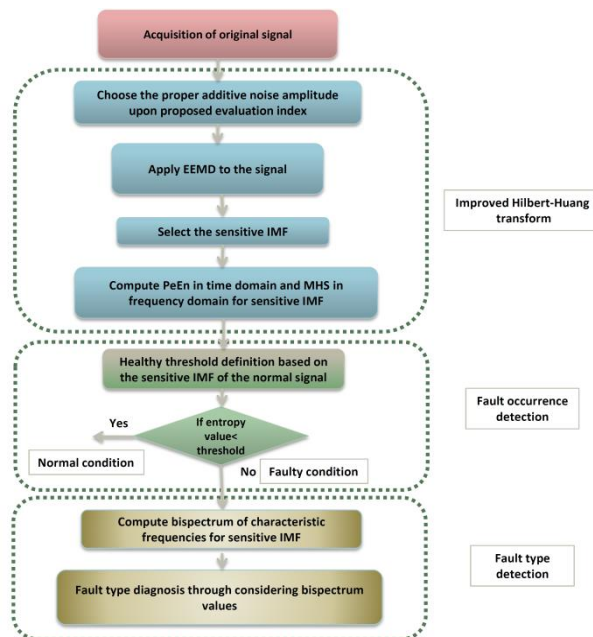


Fig.1 Flowchart of the proposed method

شکل 1 فلوچارت روش پیشنهادی

نقطه مناسب خواهد بود. لذا برای رسیدن به نتیجه مطلوب در محاسبه آنتروپی تقریبی و جایگشت، طول داده‌ها برابر 1 ثانیه با تعداد داده 8192 نقطه، در نظر گرفته می‌شود.

2-4- تعیین پارامترهای محاسبه آنتروپی تقریبی و جایگشت

مطابق آنچه در بند 2-1 ذکر شد محاسبه مقدار آنتروپی تقریبی وابسته به تعیین دو مقدار m و تِلرانس r است. برای انتخاب بهترین ضرایب محاسبه آنتروپی تقریبی، مقادیر آنتروپی تقریبی به ازای m و d های مختلف رسم شده است. مطابق آنچه در "شکل 3" مشاهده می‌شود، با افزایش m همگرایی مقدار آنتروپی افزایش می‌یابد اما منجر به افزایش حجم و زمان محاسبات می‌گردد. لذا با توجه به "شکل 3" و نتایج مراجع [15] و [29] با در نظر گرفتن $m=2$ و $k=0.24$ محاسبه آنتروپی به یک مقدار پایدار می‌رسد.

همچنین مطابق بند 2-2 دو پارامتر مهم در محاسبه مقدار آنتروپی جایگشت، τ تأخیر زمانی¹ و m بعد فضای جاسازی² است. مطابق مراجع [11] و [21] مقادیر منطقی برای پارامترهای فوق ترکیب $m=3-9$ و $\tau=1-4$ می‌باشد و تغییرات τ تأثیر محسوسی در مقدار آنتروپی جایگشت ندارد. لذا تخصیص $m=6$ و $\tau=1$ برای استخراج آنتروپی جایگشت سری‌های زمانی در این مقاله به کار گرفته می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد مقادیر آنتروپی جایگشت و آنتروپی تقریبی وابسته به پارامترهای محاسبه آن است و این پارامترها با توجه به رفتار سیگنال حالت سالم نسبت به تغییرات مقادیر پارامترها تعیین شد. برای بررسی میزان حساسیت آنتروپی جایگشت و آنتروپی تقریبی، سیگنال حالت سالم به عنوان معیار در نظر گرفته می‌شود و نویز سفید با توان‌های مختلف به سیگنال اضافه می‌شود تا نسبت سیگنال به نویزهای مختلف شامل 5، 20، 50 و 100 دسی‌بل حاصل گردد. تغییرات مقدار آنتروپی بر اثر اضافه شدن نویز به سیگنال در جدول 1 ارائه گردیده است. در سیگنال‌های اخذ شده از سیستم‌های دوار واقعی مقدار توان نویز نسبت به توان سیگنال اصلی قابل ملاحظه است. لذا

¹ Delay time

² Embedding dimension

جدول 1 حساسیت آنتروپی تقریبی و جایگشت نسبت به نویز

Table 1 Noise sensitivity of ApEn and PeEn				
نسبت تغییرات آنتروپی تقریبی	نسبت تغییرات آنتروپی تقریبی	نسبت تغییرات آنتروپی تقریبی	نسبت سیگنال به نویز	نسبت سیگنال به نویز
-	0.7837	-	1.2513	سیگنال اصلی
0%	0.7837	0%	1.2513	100 دسیبل
0.1%	0.7845	1.2%	1.2664	50 دسیبل
4.6%	0.8239	7.8%	1.3492	20 دسیبل
23%	0.9637	46%	1.8156	5 دسیبل

را به ازای مقادیر متفاوت دامنه نویز اضافه‌شونده برای حالت‌های سالم و معیوب نابالانسی و ناهم محوری، نشان می‌دهد. تغییرات دامنه نویز اضافه‌شونده سبب تغییرات مقدار آنتروپی تقریبی در توابع مود ذاتی خواهد شد. طبق روش پیشنهادی، به ازای هر دامنه نویز اضافه‌شونده، تابعی که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل باشد، به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری خواهد بود.

"شکل 6" مقدار شاخص ارزیابی ارائه شده در رابطه (5) را برای تابع مود ذاتی برتر به ازای حالت‌های مختلف سالم و معیوب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است برای حالت سالم، $k=0.05$ ، برای حالت معیوب با عیب نابالانسی $k=0.35$ و همچنین برای حالت معیوب با عیب ناهم‌محوری، $k=0.25$ ، بهترین دامنه نویز اضافه‌شونده خواهد بود و بالاترین شاخص ارزیابی را نتیجه خواهد داد.

هدف از تجزیه و پردازش سیگنال تعیین معیاری برای شروع پیدایش عیب و یا به عبارتی تفکیک میان حالت سالم و معیوب توسط یک یا چند ویژگی آماری است تا به آسانی و در زمان کوتاه، بدون استفاده از روش‌های متداول کاهش ابعاد و طبقه‌بندی داده‌های مختلف، این تمایز صورت پذیرد.

"شکل 7-a" آنتروپی جایگشت را برای حالت سالم و دو حالت معیوب ناهم‌محوری و نابالانسی نشان می‌دهد. در این شکل، 10 نمونه اول مربوط به حالت سالم و 10 نمونه دوم مربوط به حالت معیوب ناهم‌محوری و 10 نمونه آخر مربوط به حالت معیوب نابالانسی است. طول هر کدام از نمونه‌ها یک ثانیه می‌باشد. همان‌طور که مشخص است مقادیر آنتروپی جایگشت سیگنال اصلی مرتبط با حالت سالم بزرگتر از مقادیر مرتبط با حالت معیوب است و این دقیقاً خلاف انتظار مقادیر آنتروپی مرتبط با حالات سالم و معیوب است. چرا که انتظار می‌رفت آنتروپی مربوط به حالت سالم کمتر از آنتروپی مربوط به حالت معیوب باشد.

حال برای ارتقاء توانایی تشخیص حالت سالم از معیوب، طبق روش پیشنهادی، پس از انتخاب دامنه مناسب برای دامنه نویز اضافه‌شونده، مقادیر مربوط به حساس‌ترین و مهم‌ترین تابع مود ذاتی مورد توجه قرار می‌گیرد. چرا که ظهور عیب در سیستم، با به‌وجود آمدن اجزای ایمپالس در محدوده فرکانس بالای سیگنال ارتعاشی، توصیف می‌گردد. این امر سبب افزایش پیچیدگی سیگنال و عریض شدن پهنای فرکانسی اجزاء می‌گردد. بنابراین

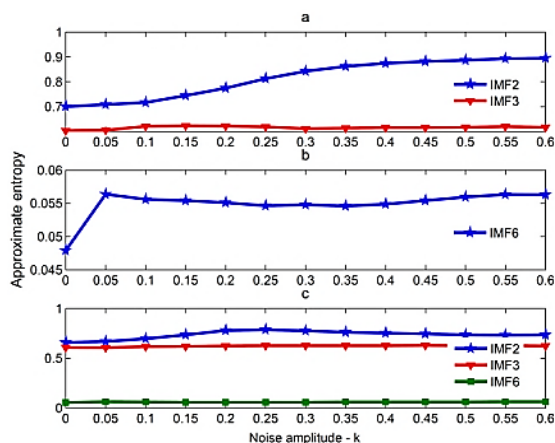


Fig. 5 The ApEn values of the most important IMFs with the original signal for different amplitudes of the added noise. a) Normal condition. b) Misalignment fault condition. c) Unbalanced faulty condition

شکل 5 مقادیر آنتروپی تقریبی توابع مود ذاتی مهم با سیگنال اصلی برای دامنه‌های مختلف نویز اضافه‌شونده. الف) حالت سالم. ب) حالت معیوب ناهم‌محوری پ) حالت معیوب نابالانسی

میزان ضریب اطلاعات متقابل ده تابع مود ذاتی اول با سیگنال اصلی به ازای مقادیر متفاوت دامنه نویز اضافه‌شونده برای حالت‌های سالم و معیوب دارای عیب نابالانسی و ناهم‌محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییرات دامنه نویز اضافه‌شونده، تغییراتی در گستره وسیعی از توابع مود ذاتی ایجاد می‌کند. "شکل 4" میزان ضریب اطلاعات متقابل توابع مود ذاتی که بیشترین مقدار را در برابر تغییرات دامنه نویز به خود اختصاص می‌دهند، نشان می‌دهد. با بررسی "شکل 4" می‌توان نتیجه گرفت که تغییر دامنه نویز اضافه‌شونده سبب تغییر میزان ضریب اطلاعات متقابل بین توابع مود ذاتی و سیگنال اصلی می‌گردد. با تغییر نویز اضافه‌شونده، تابع مود ذاتی که دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل است، تغییر می‌یابد، به نحوی که در برابر تغییرات نویز اضافه‌شونده از 0 تا 0.6 برابر انحراف معیار سیگنال اصلی، برای حالت سالم ابتدا تابع مود ذاتی دوم و در نهایت تابع مود ذاتی سوم دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل خواهد بود. در حالی که برای حالت معیوب ناهم‌محوری، تغییرات دامنه نویز سبب می‌گردد که همواره تابع مود ذاتی ششم دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل باشد. برای حالت عیب نابالانسی نیز با افزایش نویز اضافه‌شونده، ابتدا تابع مود ذاتی دوم، بعد از آن تابع مود ذاتی ششم و در نهایت تابع مود ذاتی سوم دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل خواهد بود.

"شکل 5" میزان آنتروپی تقریبی توابع مود ذاتی مورد بحث "شکل 4"

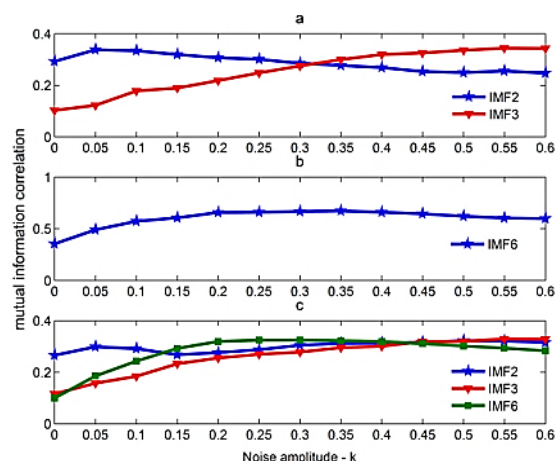


Fig.4 The mutual information coefficient of the most important IMFs with the original signal for different amplitudes of the added noise. a) Normal condition. b) Misalignment fault condition. c) Unbalanced faulty condition. (In order to avoid the figure bustling, only IMFs with maximum mutual information coefficients are plotted)

شکل 4 ضریب اطلاعات متقابل توابع مود ذاتی مهم با سیگنال اصلی برای دامنه‌های مختلف نویز اضافه‌شونده. الف) حالت سالم. ب) حالت معیوب ناهم‌محوری. پ) حالت معیوب نابالانسی (جهت جلوگیری از شلوغی شکل، تنها توابع با ضریب اطلاعات متقابل بیشینه رسم شده است)

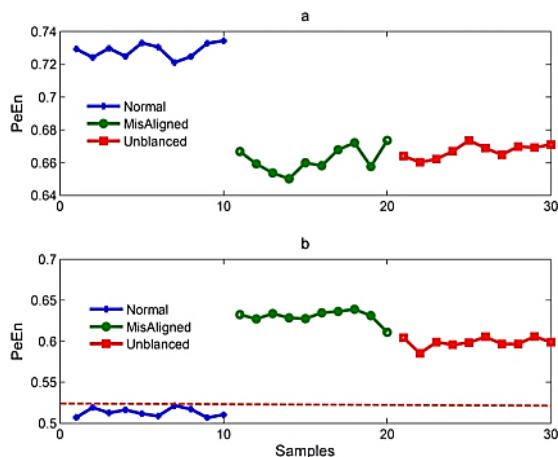


Fig.7 The PeEn values a) For the original signals. b) For the second IMF; the first 10 samples are in normal working conditions and the rest 10 samples are in faulty working conditions.

شکل 7 مقادیر آنتروپی جایگشت (الف) برای سیگنال اصلی، (ب) برای تابع مود ذاتی دوم. 10 نمونه اول برای شرایط کاری سالم، 20 نمونه بعدی برای شرایط کاری معیوب

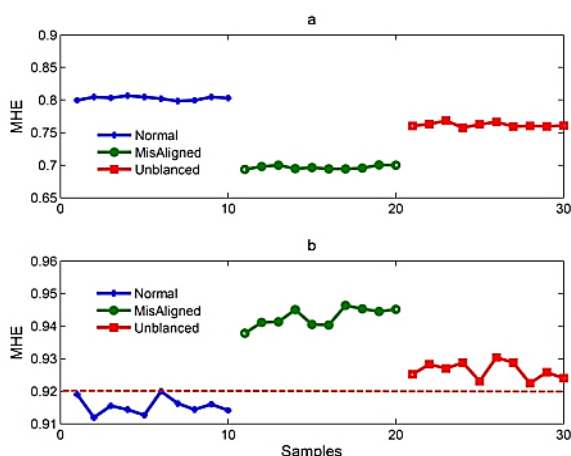


Fig. 8 The MHE values a) For the original signals. b) For the second IMF; the first 10 samples are in normal working conditions and the rest 10 samples are in faulty working conditions.

شکل 8 مقادیر آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت (الف) برای سیگنال اصلی، (ب) برای تابع مود ذاتی دوم. 10 نمونه اول برای شرایط کاری سالم، 20 نمونه بعدی برای شرایط کاری معیوب

حاشیه‌ای هیلبرت تابع مود ذاتی دوم میسر می‌گردد که تجاوز از این آستانه به منزله انحراف از حالت کارکرد سالم سیستم است.

در این مقاله سعی شده با ارتقاء روش هیلبرت- هوانگ و استفاده از مفهوم آنتروپی جایگشت، در حوزه زمان و مفهوم آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت، در حوزه فرکانس، تشخیص ظهور عیب میسر گردد. برای تحلیل کمی نحوه تفکیک حالات سالم و معیوب پارامتر انحراف معیار پیشنهاد می‌شود. پس چنانچه علاوه بر کمتر بودن آنتروپی مرتبط با حالت سالم از حالات معیوب، انحراف معیار داده‌ها بیشتر باشد، تفکیک‌پذیری بهتری رخ داده‌است. انحراف معیار مقادیر آنتروپی جایگشت مرتبط با تابع مود ذاتی دوم STD_{PeEn} برابر 0.0498 و معیوب ارائه شده در "شکل 7-b" برابر $STD_{PeEn} = 0.0181$ خواهد بود. پس می‌توان گفت آنتروپی جایگشت نسبت به طیف حاشیه‌ای هیلبرت قدرتمندتر و به تغییرات دینامیکی

مقدار آنتروپی افزایش می‌یابد. لذا در "شکل 7-b" مقادیر آنتروپی جایگشت برای تابع مود ذاتی متناظر با مهمترین تابع مود ذاتی حاصل از تجزیه سیگنال‌های مرتبط با حالت سالم ارائه گردیده است. همان‌طور که در "شکل‌های 4 و 6" مشاهده شد، در تجزیه سیگنال حالت سالم توسط الگوریتم تجزیه تجربی مود انباشته، برای بهترین دامنه نویز اضافه شونده، تابع مود ذاتی شماره 2 دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل است. لذا می‌توان با مقایسه مقادیر آنتروپی جایگشت تابع مود ذاتی دوم، معیار و آستانه‌ای برای ظهور عیب ارائه داد و در این حالت مقادیر مرتبط با شرایط کارکردی سالم دارای مقدار آنتروپی کمتری نسبت به حالت معیوب است. پس در حوزه زمان، آنتروپی جایگشت تابع مود ذاتی دوم حاصل از تجزیه سیگنال‌های سالم و معیوب به‌عنوان معیاری جهت تشخیص ظهور عیب در این سیستم به‌کار گرفته می‌شود. بنابراین برای داده‌های اخذ شده از میز شبیه‌ساز ارتعاشات دانشگاه تربیت مدرس، مقدار آستانه‌ای برای آنتروپی تقریبی تابع مود ذاتی دوم برابر با $PeEn_{threshold} = 0.52$ ، به‌عنوان معیاری برای ظهور عیب ارائه می‌گردد.

از طرف دیگر با توجه به مزایای طیف هیلبرت حاشیه‌ای در مواجهه با داده‌های ناپایستا و غیرخطی، می‌توان از آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت برای مطالعه اجزای فرکانسی مختلف سیگنال بهره برد و از آن به‌عنوان معیاری برای تفکیک حالت سالم و معیوب در حوزه فرکانس استفاده کرد. "شکل 8" مقادیر این نوع آنتروپی را برای سیگنال‌های مرتبط با حالات سالم و معیوب و همچنین مهمترین تابع مود ذاتی حاصل از تجزیه سیگنال حالت سالم، نشان می‌دهد. مقادیر "شکل 8-a" متعلق به سیگنال‌های اصلی حالت سالم و معیوب است. مشاهده می‌گردد در حوزه فرکانس نیز میزان آنتروپی سیگنال حالت سالم نیز برخلاف انتظار بیشتر از مقادیر مرتبط با حالات معیوب است. اما در بررسی "شکل 8-b" و مقادیر آنتروپی مرتبط با دومین تابع مود ذاتی که بیشترین ضریب اطلاعات متقابل میان توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه سیگنال حالت سالم با خود سیگنال اصلی رقم می‌زند، می‌توان دریافت که مقدار آنتروپی حالت سالم کمتر از مقادیر مرتبط با حالات معیوب است. لذا تعیین آستانه‌ای برابر $MHE_{threshold} = 0.92$ برای مقدار آنتروپی طیف

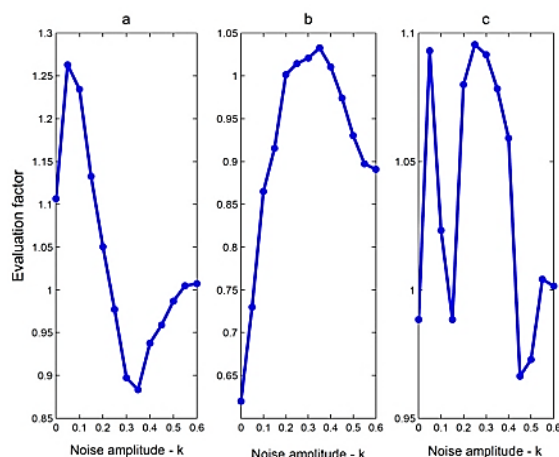


Fig.6 The evaluation index values related to the decision-making IMFs with the original signal for different amplitudes of the added noise. a) Normal condition. b) Misalignment fault condition. c) Unbalanced faulty condition

شکل 6 مقادیر شاخص ارزیابی مربوط به تابع مود ذاتی معیار برای دامنه‌های مختلف نویز اضافه‌شونده. (الف) حالت سالم، (ب) حالت معیوب ناهم‌محوری، (پ) حالت معیوب نابالانسی

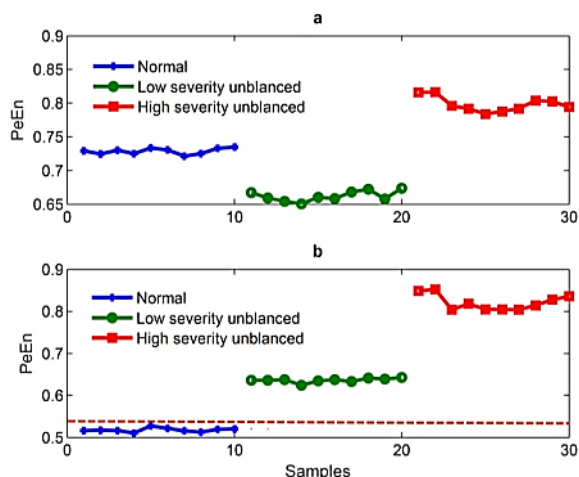


Fig. 10 The PeEn values a) For the original signals. b) For the second IMF; the first 10 samples are in normal working conditions, the second 10 samples are in low severity unbalanced and the rest 10 samples are in high severity unbalanced working conditions.

شکل 10 مقادیر آنتروپی جایگشت. الف) برای سیگنال اصلی، ب) برای تابع مودزاتی دوم. 10 نمونه اول برای شرایط کاری سالم، 10 نمونه دوم برای حالت معیوب نابالانسی شدت کم و 10 نمونه آخر برای حالت معیوب نابالانسی شدت زیاد

چنین نیست اما در واقعیت ممکن است مقدار بسیار کوچکی ناهم‌محوری و یا نابالانسی وجود داشته باشد. همچنین برای عیوب ناهم‌محوری و نابالانسی پیک‌هایی در $1x$ و هارمونیک‌های بالاتر مشاهده می‌گردد. لذا ارائه معیاری برای تفکیک حالت سالم و معیوب و همچنین تعیین نوع عیب، تنها با توجه به طیف فرکانس سیگنال ارتعاشی، میسر نیست.

بنابراین در نظر گرفتن طیف بای‌اسپکترم حساس‌ترین تابع مودزاتی هر سیگنال احتمال تعیین معیاری جهت تشخیص نوع عیب را افزایش می‌دهد. حساس‌ترین تابع مودزاتی، در بازه فرکانسی محدود خود دارای بیشترین ضریب اطلاعات متقابل با سیگنال اصلی است. با توجه به دامنه مناسب نویز اضافه شونده در روش پیشنهادی طبق "شکل 4"، برای حالت کارکرد سالم سیستم، تابع مودزاتی شماره 2 و برای حالت معیوب ناهم‌محوری و نابالانسی تابع مودزاتی شماره 6، حساس‌ترین و مهم‌ترین تابع مودزاتی می‌باشد.

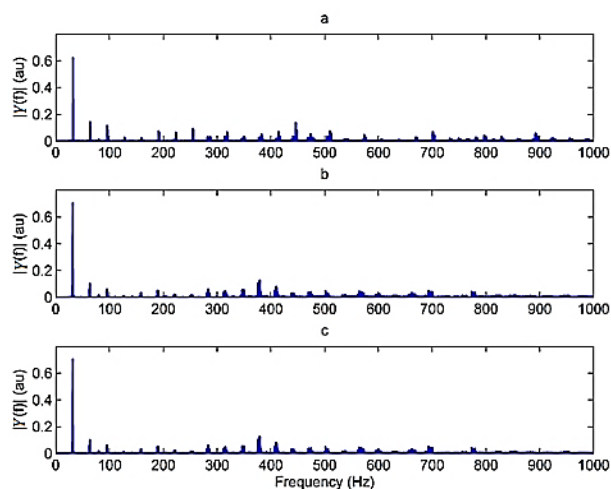


Fig. 11 Fourier spectra for: a) Normal condition. b) Misalignment fault condition. c) Unbalanced faulty condition

شکل 11 طیف فوری برای الف) حالت سالم، ب) حالت معیوب ناهم‌محوری، پ) حالت معیوب نابالانسی

حساس‌تر است.

از طرف دیگر برای نشان دادن کارایی معیار انتخاب توابع مودزاتی حساس به عیب، چنانچه معیار انتخاب دامنه نویز اضافه شونده صرفاً براساس بالاترین ضریب اطلاعات متقابل باشد، مطابق "شکل 4"، برای حالت سالم سومین تابع مودزاتی به ازای $k=0.6$ ، برای حالت ناهم‌محوری ششمین تابع مودزاتی به ازای $k=0.25$ و برای حالت نابالانسی سومین مودزاتی به ازای $k=0.55$ برترین تابع مودزاتی خواهد بود. حال چنانچه روش را با این داده‌ها ادامه دهیم، "شکل 9" مقادیر این آنتروپی جایگشت را برای سیگنال‌های مرتبط با حالات سالم و معیوب و همچنین مهم‌ترین تابع مودزاتی مرتبط با تجزیه سیگنال حالت سالم، نشان می‌دهد. آنچه مشخص است در این حالت برخلاف رویکرد قبلی تفکیکی میان حالات سالم و معیوب مشاهده نمی‌گردد. لذا علاوه بر میزان همبستگی میان توابع مودزاتی و سیگنال اصلی، میزان نویز باقی‌مانده در توابع مودزاتی نیز در تشخیص ظهور عیب تأثیرگذار است. همچنین این روش جهت ظهور عیب باید مستقل از سرعت، نوع و میزان شدت عیب باشد. برای این که اثرات تغییر دور و شدت عیب نیز منظور گردد، میزان عیب نابالانسی از 122.5 میلی‌متر گرم به 165.5 میلی‌متر گرم افزوده می‌گردد و میزان دور نیز به 1905 دور بر دقیقه تغییر داده می‌شود. با در نظر گرفتن حالت کارکرد سالم و حالات معیوب با شدت کم و زیاد "شکل 10-a" مقایسه‌ای میان مقادیر آنتروپی جایگشت سیگنال اصلی حالات سالم و معیوب ارائه می‌دهد. مشاهده می‌گردد برخلاف حالت شدت کم، آنتروپی جایگشت حالت معیوب با شدت بیشتر، از آنتروپی حالت سالم بیشتر است. چنانچه روش پیشنهادی اعمال گردد، تفکیک میان حالات سالم و معیوب با شدت‌های مختلف مطابق "شکل 10-b" به‌طور کامل محقق می‌گردد. این شکل خاصیت و اهمیت این روش در تشخیص عیب در مراحل اولیه را واضح نماید چرا که در حالت معیوب با شدت کم، توجه به مقدار آنتروپی جایگشت سیگنال اصلی، موجب خطا در تعیین حالت کارکرد سیستم می‌گردد.

در حوزه فرکانس، ارائه معیاری برای تعیین نوع عیب صرفاً با توجه به طیف فرکانس آن بسیار مشکل است. "شکل 11" طیف فوری داده‌های اخذ شده از میز شبیه‌ساز را در حالت کارکرد سالم، نابالانسی و ناهم‌محوری نشان می‌دهد. دامنه‌ی طیف ارتعاش حالت سالم دارای پیک‌هایی در $1x$ و تعدادی از هارمونیک‌های بالاتر است. علی‌رغم این که برای یک سیستم ایده‌آل انتظار

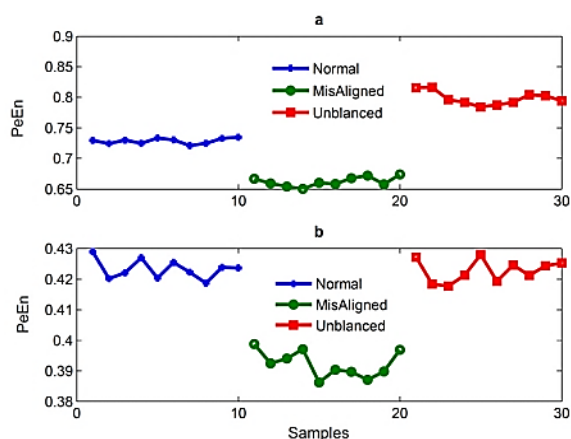


Fig.9 The PeEn values a) For the original signals. b) For the third IMF; the first 10 samples are in normal working conditions and the rest 10 samples are in faulty working conditions.

شکل 9 مقادیر آنتروپی جایگشت. الف) برای سیگنال اصلی، ب) برای تابع مودزاتی سوم. 10 نمونه اول برای شرایط کاری سالم، 20 نمونه بعدی برای شرایط کاری معیوب

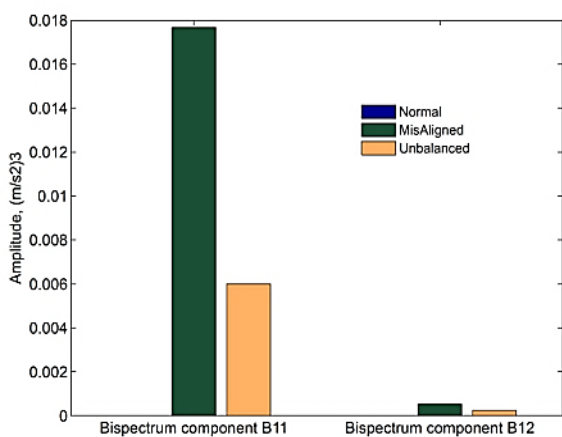


Fig. 13 The amplitude of the bi-spectrum components, B_{11} and B_{12} for the normal, misalignment and unbalanced conditions

شکل 13 مقدار اجزاء بای اسپکتروم B_{11} و B_{12} برای شرایط حالت سالم، ناهم‌محوری و نابالانسی

حاصل از تجزیه سیگنال، توسط روش تجزیه تجربی مود انباشته - سیگنال اصلی، الگوریتمی جهت انتخاب دامنه نويز اضافه شونده پیشنهاد گردید. درگام بعدی با بهره‌گیری از مزایای تبدیل هیلبرت - هوانگ در تجزیه سیگنال به توابع مود ذاتی باند باریک، مهمترین تابع مود ذاتی سیگنال حالت سالم که دارای اجزای ایمپالس در محدوده فرکانس بالای سیگنال ارتعاشی است، به عنوان معیار حساس‌تری نسبت به سیگنال اصلی برای شناسایی عیب، انتخاب شد. با مطالعه مقادیر آنتروپی جایگشت در حوزه زمان و همچنین مقادیر آنتروپی طیف حاشیه‌ای هیلبرت در حوزه فرکانس مهمترین تابع مود ذاتی، مشاهده شد، مقادیر مرتبط با حالت سالم کمتر از مقادیر متناظر مرتبط با حالت معیوب است. پس می‌توان آستانه‌ای برای شروع عیب تعریف نمود که تجاوز از آن به معنی انحراف از حالت کارکرد سالم سیستم است. بعد از شناسایی شروع عیب در مراحل اولیه، تشخیص نوع عیب با توجه به مقادیر طیف درجات بالای حساس‌ترین توابع مود ذاتی امکان‌پذیر خواهد بود. با بررسی طیف بای اسپکتروم پوش به‌دست آمده از اعمال تبدیل هیلبرت، کوپلینگ میان فرکانس دور و فرکانس‌های مشخصه عیب یک سیستم شبیه‌ساز ارتعاشی بررسی و میزان کارایی روش پیشنهادی در تشخیص عیوب ناهم‌محوری و نابالانسی روتور با شدت‌های مختلف ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که به حداقل رساندن میزان نويز باقی‌مانده در توابع مود ذاتی تاثیر بسزایی در تشخیص زود هنگام عیب دارد و همچنین استفاده از آنتروپی جایگشت تفکیک کمی بالاتری میان حالات سالم و معیوب ارائه می‌دهد.

6- مراجع

- [1] N. Tandon, A. Choudhury, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International*, Vol. 32, No. 8, pp. 469-480, 1999.
- [2] Z. Feng, M. Liang, F. Chu, Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 38, No. 1, pp. 165-205, 2013.
- [3] S. Ramezan, O. Bahar, Identification of natural frequencies based on a new enhanced Hilbert-Huang transform, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 123-132, 2012. (in Persian)
- [4] Y. Zhang, B. Tang, X. Xiao, Time-frequency interpretation of multi frequency signal from rotating machinery using an improved Hilbert-Huang transform, *Measurement*, Vol. 82, No. 2, pp. 221-239, 2016.
- [5] S.D. Wu, P.H. Wu, C.W. Wu, J.J. Ding, C.C. Wang, Partly ensemble empirical mode decomposition: An improved noise-assisted method for eliminating mode mixing, *Signal Processing*, Vol. 96, No. 12, pp. 362-374, 2014.

اصولا پاسخ فرکانسی غالب سیستم در مواجه با عیب نابالانسی در $1x$ و برای عیب ناهم‌محوری پاسخ ارتعاشی در فرکانس‌های $1x$ ، $2x$ و $3x$ ظاهر می‌گردد. "شکل 12" طیف فوریه پوش حاصل از اعمال تبدیل هیلبرت بر توابع مود ذاتی مذکور را نشان می‌دهد. طیف پوشی که از اعمال تبدیل هیلبرت بر مود ذاتی دوم حاصل از تجزیه سیگنال حالت سالم به‌دست آمده است، دارای پیک‌هایی در محدوده فرکانسی بالا می‌باشد در حالی که طیف پوشی که از اعمال تبدیل هیلبرت بر تابع مود ذاتی ششم حاصل از تجزیه سیگنال حالت معیوب ناهم‌محوری و نابالانسی به‌دست آمده است، پیک‌هایی در $1x$ و برخی هارمونیک‌های بالاتر دارد. لذا بررسی ارتباط میان فرکانس دور و فرکانس‌های مشخصه عیب برای حساس‌ترین توابع مود ذاتی قدرت تشخیص نوع کارکرد سیستم را افزایش خواهد داد.

"شکل 13" مقدار جزء بای اسپکتروم B_{11} که بیان‌کننده ارتباط میان جزء فرکانسی $1x$ (دو بار) با جزء فرکانسی $2x$ و همچنین B_{12} که بیان‌کننده رابطه میان اجزاء فرکانسی $1x$ ، $2x$ و $3x$ می‌باشد را برای حساس‌ترین توابع مود ذاتی نشان می‌دهد.

مشاهده می‌گردد برای حالت سالم هر دو مقدار بای اسپکتروم به مراتب کمتر از حالت‌های معیوب و نزدیک به صفر است. این نیز می‌تواند معیاری برای تفکیک حالت سالم از حالات عیب ناهم‌محوری و نابالانسی باشد. برای تعیین نوع عیب نیز می‌توان به این نکته توجه نمود که برای عیب ناهم‌محوری، بیشترین مقدار بای اسپکتروم ثبت شده است. این حقیقت بیان می‌دارد، ارتباط میان اجزای فرکانسی $1x$ ، $2x$ و $3x$ در حالت عیب ناهم‌محوری بیشتر است. از طرف دیگر مقادیر بای اسپکتروم مربوط به عیب نابالانسی از حالت سالم بیشتر و از حالت عیب ناهم‌محوری کمتر است چرا که جزء فرکانسی $1x$ غالب بوده و ارتباط کمتری با سایر هارمونیک‌ها دارد.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله یک روش جدید برای ارتقاء تبدیل هیلبرت - هوانگ جهت شناسایی شروع پیدایش عیب، برپایه ویژگی‌های مبتنی بر آنتروپی و همچنین تشخیص نوع عیب براساس طیف درجات بالاتر ارائه گردیده است. با استفاده از مفهوم آنتروپی تقریبی و مقدار ضریب اطلاعات متقابل میان توابع مود ذاتی

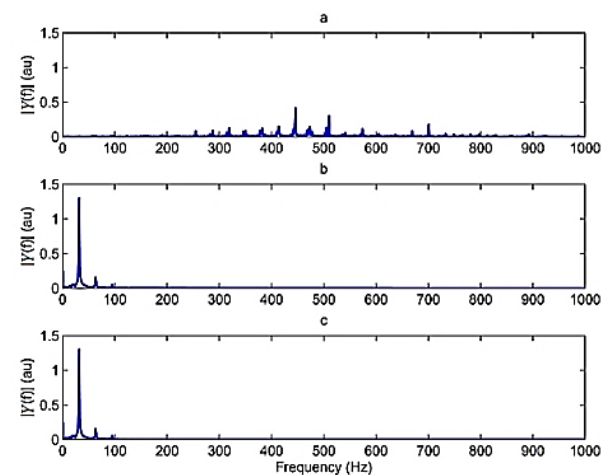


Fig. 12 Envelope Fourier spectra for the most important IMFs: a) Normal condition. b) Misalignment fault condition. c) Unbalanced faulty condition

شکل 12 طیف فوریه پوش مهمترین تابع مود ذاتی الف) حالت سالم، ب) حالت معیوب ناهم‌محوری، پ) حالت معیوب نابالانسی

- [21] R. Yan, Y. Liu, R.X. Gao, Permutation entropy: A nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 29, No. 13, pp. 474-484, 2012.
- [22] Y. He, J. Huang, B. Zhang, Approximate entropy as a nonlinear feature parameter for fault diagnosis in rotating machinery, *Measurement Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 045603, 2012.
- [23] C. Lu, S. Wang, V. Makis, Fault severity recognition of aviation piston pump based on feature extraction of EEMD paving and optimized support vector regression model, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 67, No. 4, pp. 105-117, 2017.
- [24] R.U. Maheswari, R. Umamaheswari, Trends in non-stationary signal processing techniques applied to vibration analysis of wind turbine drive train – A contemporary survey, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 85, No. 9, pp. 296-311, 2017.
- [25] R.U. Maheswari, R. Umamaheswari, Application of higher order spectral features and support vector machines for bearing faults classification, *ISA Transactions*, Vol. 54, No. 6, pp. 193-206, 2015.
- [26] 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*, Vol. 42, No. 7, pp. 9024-9032, 2015.
- [27] A. Boudiaf, A. Moussaoui, A. Dahane, I. Atoui, A comparative study of various methods of bearing faults diagnosis using the case Western Reserve University data, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 16, No. 3, pp. 271-284, 2016.
- [28] M. C. Pan, W. C. Tsao, Using appropriate IMFs for envelope analysis in multiple fault diagnosis of ball bearings, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 69, No. 2, pp. 114-124, 2013.
- [29] S.M. Pincus, Approximate Entropy as a measure of system complexity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 88, No. 8, pp. 2297-2301, 1991.
- [30] K. Fu, J. Qu, Y. Chai, T. Zou, Hilbert marginal spectrum analysis for automatic seizure detection in EEG signals, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 18, No. 7, pp. 179-185, 2015.
- [31] L. Saidi, J.B. Ali, F. Fnaiech, Bi-spectrum based-EMD applied to the non-stationary vibration signals for bearing faults diagnosis, *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 5, pp. 1650-1660, 2014.
- [32] S. Osman, W. Wang, An enhanced Hilbert-Huang transform technique for bearing condition monitoring, *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, No. 8, pp. 085004, 2013.
- [33] X. Xue, J. Zhou, A hybrid fault diagnosis approach based on mixed-domain state features for rotating machinery, *ISA Transactions*, Vol. 66, No. 3, pp. 284-295, 2017.
- [34] M.S. Sadooghi, S.E. Khadem, S. Bab, Dynamic behavior investigation of a rotating system by two methods of nonlinear modeling and finite element, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 303-314, 2016. (in Persian)
- [6] N. Tsakalozos, K. Drakakis, S. Rickard, A formal study of the nonlinearity and consistency of the empirical mode decomposition, *Signal Processing*, Vol. 92, No. 9, pp. 1961-1969, 2012.
- [7] Z. Wu, N.E. Huang, Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advanced in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-41, 2009.
- [8] W. Guo, P.W. Tse, A. Djordjevic, Faulty bearing signal recovery from large noise using a hybrid method based on spectral kurtosis and ensemble empirical mode decomposition, *Measurement*, Vol. 45, No. 5, pp. 1308-1322, 2012.
- [9] J.R. Yeh, J.S. Shieh, N.E. Huang, Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 2, No. 2, pp. 135-156, 2010.
- [10] Z. Wang, Z. Han, F. Gu, J.X. Gu, S. Ning, A novel procedure for diagnosing multiple faults in rotating machinery, *ISA Transactions*, Vol. 55, No. 8, pp. 208-218, 2015.
- [11] X. Zhang, Y. Liang, J. Zhou, Y. zang, A novel bearing fault diagnosis model integrated permutation entropy, ensemble empirical mode decomposition and optimized SVM, *Measurement*, Vol. 69, No. 6, pp. 164-179, 2015.
- [12] L.Y. Zhao, L. Wang, R.Q. Yan, Rolling bearing fault diagnosis based on wavelet packet decomposition and multi-scale permutation, *Entropy*, Vol. 17, No. 9, pp. 6447-6461, 2015.
- [13] X. Wang, C. Liu, F. Bi, X. Bi, K. Shao, Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 41, No. 9, pp. 581-597, 2013.
- [14] A. Soleimani, S. E. Khadem, Experimental fault detection of ball bearing using the chaotic behavior features of vibration signal, *Modare Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 289-297, 2015. (In Persian)
- [15] R. Yan, R.X. Gao, Approximate entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 2, pp. 824-839, 2007.
- [16] G. Cheng, X. Chen, H. Li, P. Li, H. Liu, Study on planetary gear fault diagnosis based on entropy feature fusion of ensemble empirical mode decomposition, *Measurement*, Vol. 91, No. 5, pp. 140-154, 2016.
- [17] Y. Tian, Z. Wang, C. Lu, Self-adaptive bearing fault diagnosis based on permutation entropy and manifold-based dynamic time warping, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 94, No. 4, pp. 239-257, 2016.
- [18] G. Cheng, X. Chen, H. Li, P. Li and H. Liu, Study on planetary gear fault diagnosis based on entropy feature fusion of ensemble empirical mode decomposition, *Measurement*, Vol. 91, No. 5, pp. 140-154, 2016.
- [19] J. Singh, A. K. Darpe, S. P. Singh, Bearing damage assessment using Jensen-Rényi Divergence based on EEMD, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 87, No. 8, pp. 307-339, 2017.
- [20] Y. Yu, C. A. Junsheng, Roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 294, No. 5, pp. 269-277, 2006.