



عیب یابی تجربی بلبرینگ با استفاده از مشخصه‌های رفتار آشوبناک سیگنال ارتعاشی

علی سلیمانی¹، سیامک اسماعیلزاده خادم^{2*}

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

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

*تهران، صندوق پستی 14115-177، khadem@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 مهر 1393

پذیرش: 09 آذر 1393

ارائه در سایت: 20 دی 1393

کلید واژگان:

رفتار آشوبناک

عیب یابی

بلبرینگ

سیگنال ارتعاشی

چکیده

تشخیص عیب در بلبرینگ‌ها بویژه در مراحل اولیه با سیگنال‌های ارتعاشی غیرساکن و پیچیده‌ی همراه با نویز بسیار مشکل است. همچنین، بسیاری از مکانیزم‌های شکست و شرایط عملیاتی نامطلوب در بلبرینگ‌ها شامل ویژگی‌های دینامیکی غیرخطی می‌باشند. یکی از رفتارهای دینامیکی که در سیستم‌های غیرخطی رخ می‌دهد، رفتار آشوبناک می‌باشد. در این مقاله، به بررسی رفتار آشوبناک سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ پرداخته شده است. برای بررسی کیفی رفتار آشوبناک از فضای فاز بازسازی شده استفاده شده است. برای کمی‌سازی رفتار آشوبناک، مشخصه‌های رفتار آشوبناک استخراج شده است تا اطلاعات بهتری از وضعیت عیب ارائه دهد. این مشخصه‌ها شامل بزرگترین نمای لیاپانوف، آنتروپی تقریبی و بُعد همبستگی می‌باشند. برای سنجش کارایی این مشخصه‌ها، از آن‌ها برای تشخیص و شناسایی عیب در یک مجموعه داده تجربی از بلبرینگ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این مشخصه‌ها اطلاعات خوبی از عیب و نوع آن دارند و به خوبی انواع عیوب را تشخیص داده و شناسایی می‌کنند. همچنین این روش نسبت به تغییرات بار بر روی بلبرینگ، مقاوم بوده و برای همه بارها نتایج خوبی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این روش قابلیت تعمیم‌دهی خوبی برای دیگر شرایط کاری را دارد.

Experimental fault detection of a ball bearing using the chaotic behavior features of a vibration signal

Ali Soleimani, Siamak Esmaeilzade Khadem*

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

*P.O.B. 14115-177 Tehran, Iran, khadem@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 October 2014
Accepted 30 November 2014
Available Online 10 January 2015

Keywords:
Chaotic Behavior
Ball Bearing
Fault Detection
Vibration Signal

ABSTRACT

Fault detection of ball bearings by the complex and non-stationary vibration signals with noise is very difficult, especially in the early stages. Also, many failure mechanisms and various adverse operating conditions in ball bearings involve significant nonlinear dynamical properties. The quality of chaotic vibration of ball bearings is studied by the reconstructed phase space. The phase space demonstrates different chaotic vibration of ball bearing for different healthy/faulty conditions. However, to easily use this procedure in the ball bearing fault detection, the chaotic behavior of vibration signal is quantified by a set of new features. The new set of features based on chaotic behavior, including the largest Lyapunov exponent, approximate entropy and correlation dimension is extracted to acquire more fault characteristic information. The effectiveness of the new features based on chaotic vibrations in the ball bearing fault detection is demonstrated by the experimental data sets. The proposed approach can reliably recognize different fault types and have more accurate results. Also, the performance of the new procedure is robust to the variation of load values and shows good generalization capability for various load values.

1- مقدمه

که دارای سیگنال‌های متناوب و ساکن هستند، مناسب می‌باشند. عیب‌یابی زود هنگام بلبرینگ‌ها با سیگنال‌های ارتعاشی پیچیده‌ی همراه با نویز بسیار مشکل است. بنابراین نیاز به توسعه روش‌های عیب‌یابی جدیدی احساس می‌شود که در شرایط پیچیده و غیرخطی نیز به عیب حساس باشند و آنرا تشخیص داده و شناسایی کنند.

نیروهای تحریک هارمونیک در سیستم‌های خطی، ارتعاشی هارمونیک را ایجاد می‌کنند. اما در سیستم‌های غیرخطی، نیروهای هارمونیک رفتارهای

از آنجایی که بلبرینگ‌ها به طور گسترده‌ای در انواع مختلف ماشین‌آلات و وسایل نقلیه استفاده می‌شوند، عیب‌یابی زود هنگام آن‌ها یکی از موضوعات با اهمیت به شمار می‌رود. از میان روش‌های مختلف عیب‌یابی، پردازش سیگنال ارتعاشی به دلیل محتوای غنی آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

روش‌های سنتی پردازش سیگنال ارتعاشی را می‌توان به روش‌های حوزه زمان، فرکانس، و زمان-فرکانس تقسیم نمود. این روش‌ها برای سیستم‌هایی

Please cite this article using:

A. Soleimani, S. Esmaeilzade Khadem, Experimental fault detection of a ball bearing using the chaotic behavior features of a vibration signal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 289-297, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Soleimani, S. Esmaeilzade Khadem, Experimental fault detection of a ball bearing using the chaotic behavior features of a vibration signal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 289-297, 2015 (In Persian)

حالات‌های مختلف سیگنال ارتعاشی ایجاد می‌کنند که داده‌های تجربی این موضوع را تأیید می‌کند.

محقق دیگری، رفتار دینامیکی غیرخطی و آشوبناک سیستم چرخ‌دنده‌ای را بررسی کرده است [9]. برای داشتن یک سیستم چرخ‌دنده‌ای با حرکت آرام، نیاز به حذف رفتار آشوبناک از ارتعاش چرخ‌دنده می‌باشد. برای مهار و حذف آشوب از ارتعاش چرخ‌دنده، یک سیستم کنترلی مناسب طراحی شده است.

برای بررسی رفتار آشوبناک، استفاده از صفحه فاز بسیار مرسوم است. ولی این ابزار صرفاً وجود آشوب و هم چنین کیفیت وقوع آنرا به ما ارائه می‌دهد و هیچ اطلاعات کمی ارائه نمی‌دهد. برای این که بتوان رفتار آشوبناک را به طور کمی بررسی نمود می‌توان از مشخصه‌های رفتار آشوبناک استفاده نمود. این مشخصه‌ها شامل نماهای لیاپانوف، بُدهای فرکتالی و نیز آنتروپی هستند. از آنجایی که بزرگترین نمای لیاپانوف معرف وجود و یا عدم وجود آشوب در یک سیستم است، بنابراین در این مقاله به عنوان یکی از مشخصه‌های رفتار آشوبناک استفاده شده است. هم‌چنین در بین بُدهای فرکتالی، بُد همبستگی اطلاعات غنی‌تری از دینامیک سیستم ارائه می‌دهد و به همین دلیل کاربرد بیشتری نیز دارد.

این مقاله اثر عیوب مختلف بلبرینگ را بر روی ارتعاش آشوبناک آن بررسی می‌کند. بزرگترین نمای لیاپانوف، آنتروپی تقریبی و بُد همبستگی، مشخصه‌های رفتار آشوبناک هستند که برای عیب‌یابی بلبرینگ استفاده می‌شوند. به منظور ارزیابی، روش پیشنهادی بر روی یک مجموعه داده تجربی از ارتعاش بلبرینگ اجرا شد.

2- داده‌های تجربی

مجموعه داده‌های تجربی مورد استفاده در این مقاله بوسیله مرکز داده برینگ دانشگاه کیس وسترن ریزرو⁹ تهیه شده‌اند [10]. همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، یک موتور الکتریکی به یک دینامومتر متصل شده است و داده‌های ارتعاشی توسط یک شتاب‌سنج که بر روی محفظه بلبرینگ نصب شده، اندازه‌گیری می‌شود. دینامومتر به منظور اعمال بارهای مختلف کنترل می‌شود. سرعت دورانی شفت بین 1725 تا 1796 دور بر دقیقه برای بارهای مختلف تغییر می‌کند. سرعت دورانی و بار نیز بوسیله ترانس‌دیوسر/انکودر ثبت شده‌اند. وضعیت‌های مختلف بار/سرعت بلبرینگ در جدول 1 آورده شده است. از یک بلبرینگ شیار عمیق SKF با قطر ساچمه 7/94 میلیمتر و قطر گام 39/04 میلیمتر در این تست استفاده شده است. زاویه تماس این بلبرینگ صفر بوده و تعداد ساچمه‌ها برابر با 9 عدد می‌باشد. عیوب با استفاده از ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی بر روی بلبرینگ ایجاد شده‌اند.

هم‌چنین عیوب با اندازه‌های مختلفی ایجاد شده‌اند که در این تحقیق برای بررسی عیب‌یابی زود هنگام از کوچکترین آن‌ها استفاده شده است که برابر با 0/1778 میلیمتر قطر و 0/2794 میلیمتر عمق می‌باشد. عیب حلقه خارجی در موقعیت‌های مختلف شامل ساعت 3، ساعت 6 و ساعت 12 نسبت به بار می‌باشند که در این مقاله از داده‌های موقعیت ساعت 6 استفاده شده است. داده‌های ارتعاشی با فرکانس نمونه‌برداری 12 کیلوهرتز برای بلبرینگ سالم و 48 کیلوهرتز برای بلبرینگ معیوب ثبت شده‌اند. داده‌های تجربی برای چهار حالت: بلبرینگ سالم (10NB)، عیب ساچمه (11BF)، عیب حلقه داخلی

مختلفی شامل زیرهارمونیک‌ها¹ و فوق‌هارمونیک‌ها²، شبه-متناوب³ و آشوبناک⁴ را ایجاد می‌کنند. شرط لازم برای داشتن رفتار آشوبناک در یک سیستم دینامیکی، غیرخطی بودن آن است. از طرفی، بسیاری از مکانیزم‌های شکست و شرایط عملیاتی نامطلوب در بلبرینگ‌ها دارای ویژگی‌های دینامیکی غیرخطی می‌باشند. بنابراین در چنین شرایطی، روش‌های پردازش سیگنال جدید بر پایه تئوری آشوب و دینامیک غیرخطی بسیار مفید هستند. استفاده از ابزارهای تحلیل آشوب در پردازش سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌ها یک روش جدید است در حالی که محققان حوزه پزشکی برای تحلیل سیگنال قلب، از این ابزار استفاده می‌کنند. به همین دلیل، مقاله‌های اندکی در تاریخچه به بررسی تأثیر عیوب بر رفتار آشوبناک سیگنال ارتعاشی پرداخته‌اند.

مدل‌های ریاضی زیادی، وجود اثرات غیرخطی در ارتعاش بلبرینگ‌ها را تأیید می‌کنند. پاسخ ارتعاشی بلبرینگ‌ها، رفتارهای غیرخطی متنوعی مانند زیرهارمونیک، فوق‌هارمونیک و شبه-پریودیک را دارند [1-3]. هم‌چنین وجود عیب نیز بر این ارتعاش غیرخطی تأثیر گذار است که با تحلیل رفتار غیرخطی ارتعاش بلبرینگ، این تأثیر قابل شناسایی است.

در شبیه‌سازی عددی یک مدل غیرخطی بلبرینگ، یک مسیر زیرهارمونیک به آشوب وجود دارد [4]. این ارتعاش زیرهارمونیک موقعی رخ می‌دهد که فرکانس عبور ساچمه، نزدیک اولین فرکانس طبیعی سیستم روتور باشد. هم‌چنین در رقابت بین فرکانس طبیعی دوم و فرکانس عبور ساچمه، یک مسیر شبه-متناوب به آشوب نیز شناسایی شده است.

در داده‌های تجربی ارتعاش بلبرینگ، دو مسیر متفاوت به آشوب وجود دارد [5]. حوالی فرکانس تشدید افقی، سیستم ناپایدار شده و برخی از زیرهارمونیک‌های فرکانس تحریک را تولید کرده است. حوالی فرکانس تشدید عمودی، رفتار سیستم یک حرکت زیرهارمونیک ایجاد کرده که اولین مسیر به آشوب، متناظر با اولین فرکانس تشدید می‌باشد. وقتی سرعت به سرعت بحرانی دوم می‌رسد، یک حرکت شبه-متناوب رخ می‌دهد که دومین مسیر به آشوب، متناظر با دومین فرکانس تشدید می‌باشد.

انتگرال همبستگی⁵ برای تشخیص عیوب بلبرینگ مورد استفاده قرار گرفته است [6]. بُد⁶ سیگنال ارتعاشی بوسیله انتگرال همبستگی محاسبه می‌شود. نتایج تجربی برای یک بلبرینگ با عیب حلقه خارجی در سرعت ثابت، نشان‌دهنده یک کاهش محسوس در بُد سیستم می‌باشد.

هم‌چنین بُد فرکتالی به همراه بسته موجک و شبکه عصبی نیز عیب‌یابی ماشین دوار را انجام می‌دهد [7]. این روش عیوب مختلفی همچون نابالانسی، ناهمراستایی، لقی و ترکیب نابالانسی و ناهمراستایی را تشخیص می‌دهد. تبدیل بسته موجک به سیگنال‌های ارتعاشی اعمال شده، سپس بُد جعبه شمار⁷ هر یک از باندهای فرکانسی برای شناسایی ویژگی‌های عیب محاسبه شده‌اند. این بُدهای فرکتالی به یک شبکه عصبی داده شده و عیوب مختلف تفکیک شده‌اند. نتایج تجربی نشان داده که این روش قابلیت شناسایی عیوب مختلف ماشین دوار را دارد. بُدهای چند مقیاسی فرکتال⁸ نیز عیب‌یابی بلبرینگ را انجام می‌دهند [8]. این بُدها تفکیک خوبی بین

1- Sub-harmonics
2- Super-harmonics
3- Quasi-periodic
4- Chaotic
5- Correlation integral
6- Dimension
7- Box-counting dimension
8- Multi-scale fractal dimension

9- Case Western Reserve University
10- Normal Ball Bearing
11- Ball Fault

فرض می‌شود که یکی از متغیرهای سیستم اطلاعات کافی درباره بقیه متغیرها را دارد. همچنین این روش بیان می‌کند که ویژگی‌های توپولوژیکی (نمای لیاپانوف، بُدهای فرکتالی و غیره) جاذب⁶ یک سیستم دینامیکی، معادل با همان ویژگی‌ها در فضای فاز بازسازی شده توسط بردارهای (1) می‌باشد.

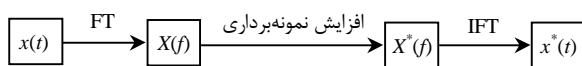
$$\vec{X}_i = \{x(i), x(i+T), x(i+2T), \dots, x(i+(m-1)T)\} \quad (1)$$

در معادله (1)، m بُعد جاسازی⁷ و T تاخیر زمانی⁸ نام دارند. مقادیر متفاوت m و T فضاهای فاز متفاوتی ارائه می‌دهند. در سیستم‌های ارتعاشی، معادله دیفرانسیل حرکت مرتبه دو می‌باشد و بنابراین سیستم دارای دو حالت⁹ است. البته برای سیستم‌های غیر خود مختار¹⁰، زمان نیز به عنوان یکی از حالت‌های سیستم در نظر گرفته می‌شود اما ترسیم فضای فاز دو بعدی نیز مرسوم بوده و اطلاعات خوبی ارائه می‌دهد. به همین دلیل در این تحقیق m برابر 2 در نظر گرفته شده است.

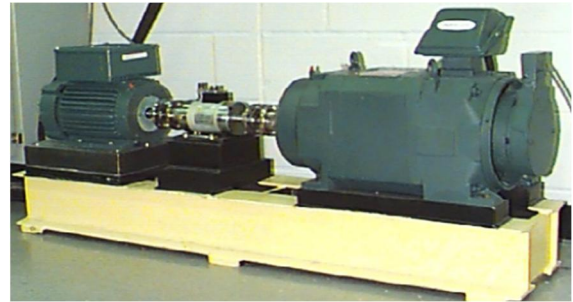
برای بدست آوردن یک فضای فاز مناسب، باید T به اندازه کافی بزرگ باشد تا متغیرهای زائد حذف شوند و از طرفی برای حفظ همبستگی بین متغیرها، نباید T خیلی بزرگ انتخاب شود. برای انتخاب تأخیر زمانی مناسب، صفحه فاز برای سیگنال‌های تجربی به ازای T های مختلف ترسیم شد و با بررسی آن‌ها تأخیر زمانی مناسب انتخاب شده است. در جدول 2 این مقادیر برای شرایط مختلف بلبرینگ معیوب/سالم آورده شده است. پس از انتخاب این دو پارامتر، سیگنال‌های ارتعاشی بر اساس معادله 1 به بردارهای صفحه فاز تبدیل شدند.

شکل‌های 3 تا 6، صفحه‌های فاز بازسازی شده از سیگنال‌های ارتعاشی را برای وضعیت‌های مختلف بلبرینگ نشان می‌دهد. مدارهای زیادی در صفحه فاز مشاهده می‌شود که قسمتی از صفحه را پر کرده‌اند و نشان‌دهنده وجود ارتعاش آشوبناک می‌باشند. در اکثر صفحه‌های فاز ترسیم شده در شکل‌های 3 تا 6، وجود جاذب عجیب¹¹ نیز قابل مشاهده است. همچنین رفتار آشوبناک مشاهده شده برای وضعیت‌های سالم و معیوب متفاوت از یکدیگر می‌باشند. صفحه فاز مربوط به حالت سالم به دلیل غالب بودن نویز بر ارتعاشات سیستم، صرفاً یک منطقه پرتراکم از مسیرها را نشان می‌دهد. ولی با ایجاد عیب در بلبرینگ، کیفیت صفحه فاز تغییر کرده است. در حالت‌های معیوب در اثر وجود عیب، مؤلفه ارتعاشی ناشی از عیب بر نویزهای موجود غالب شده است. به همین دلیل در صفحه فاز مربوط به حالت‌های معیوب می‌توان وجود جاذب را مشاهده نمود.

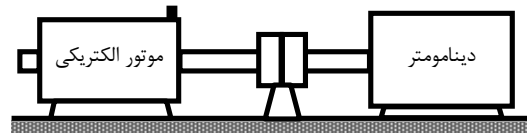
همانطور که مشاهده می‌شود، صفحه فاز برای عیوب مختلف نیز کیفیت متفاوتی دارد. عیوب حلقه داخلی و حلقه خارجی، ضربات شدیدتری در سیگنال ارتعاشی ایجاد می‌کنند، به همین دلیل صفحه فاز آن‌ها نیز شامل یک قسمت پرتراکم داخلی و یک قسمت کم‌تراکم خارجی می‌باشد. عیب ساچمه ضرباتی با شدت کمتر ایجاد می‌کند، به همین دلیل صفحه فاز آن



شکل 2 فرآیند افزایش فرکانس نمونه برداری



شتاب سنج



شکل 1 مجموعه آزمایشگاهی تست تجربی و شماتیک آن [9]

جدول 1 شرایط مختلف کاری بلبرینگ

| بار (اسب بخار) | دور (دور بر دقیقه) |
|----------------|--------------------|
| صفر | 1796 |
| 1 | 1775 |
| 2 | 1750 |
| 3 | 1725 |

(IRF)¹ و عیب حلقه خارجی (ORF)² اندازه‌گیری شده‌اند. سیگنال ارتعاشی در هر یک از حالت‌های سالم و معیوب به 150 سیگنال تقسیم شده است که هر یک از این سیگنال‌ها متناظر با یک دور چرخش ماشین می‌باشند.

3- بازسازی صفحه فاز

برای مطالعه و بررسی ارتعاش آشوبناک یک سیستم دینامیکی، بازسازی صفحه فاز از روی داده‌های تجربی ضروری می‌باشد. چنانچه، دینامیک معینی حاکم بر رفتار سیگنال زمانی ارتعاش باشد، فاصله بین نقاط داده باید به اندازه کافی کم باشد تا بتوان دینامیک سیستم را تشخیص داد. به همین منظور فرکانس نمونه‌برداری سیگنال‌های ارتعاشی افزایش داده شده و به 240 کیلوهرتز (5 برابر) رسانده شده است. از آنجایی که بررسی دینامیک سیستم و تشخیص عیب بسیار وابسته به محتوای فرکانسی سیگنال می‌باشد، این افزایش بگونه‌ای انجام شده است که محتوای فرکانسی سیگنال بدون تغییر باقی بماند.

ابتدا به کمک تبدیل فوریه (FT)³، سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده شده است و سپس در حوزه فرکانس، افزایش نمونه‌برداری⁴ انجام شده است. پس از افزایش نمونه‌برداری، به کمک تبدیل فوریه معکوس (IFT)⁵، سیگنال از حوزه فرکانس به حوزه زمان انتقال داده شده است. فرآیند اینکار در شکل 2 نشان داده شده است.

در کارهای تجربی، عموماً می‌توان یک یا تعداد کمی از متغیرهای یک سیستم دینامیکی را اندازه‌گیری کرد. می‌توان یک فضای فاز m بُعدی را تنها با اندازه‌گیری یکی از متغیرها که به صورت یک سری زمانی می‌باشد، بازسازی نمود [11]. این روش در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی مختلف نیز برای بازسازی فضای فاز به کار گرفته شده است [13,12]. در این روش

6- Attractor
7- Embedding dimension
8- Time delay
9- State
10- Non autonomous
11- Strange Attractor

1- Inner Race Fault
2- Outer Race Fault
3- Fourier Transform
4- Up Sampling
5- Inverse Fourier Transform

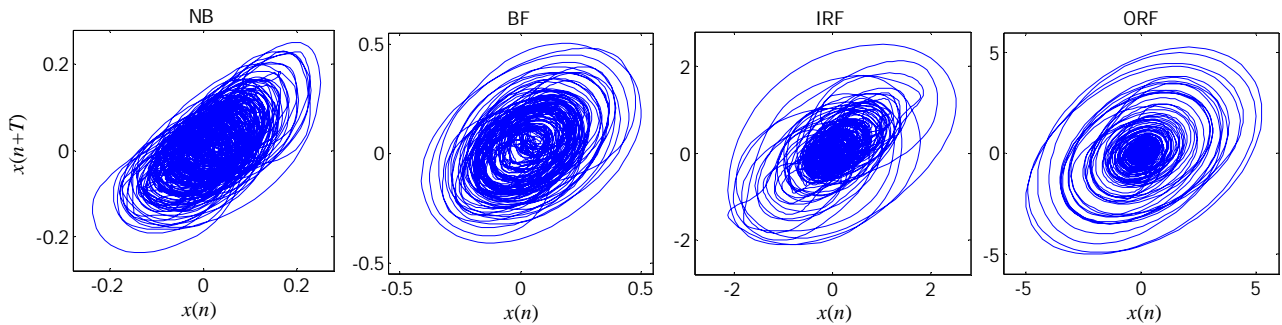
منظور از مشخصه‌های رفتار آشوبناک استفاده شده است. این مشخصه‌ها که در قسمت بعدی بررسی شده‌اند بر اساس صفحه فاز محاسبه می‌شوند و یا به

جدول 2 مقادیر T مناسب برای وضعیت‌های مختلف بلبرینگ

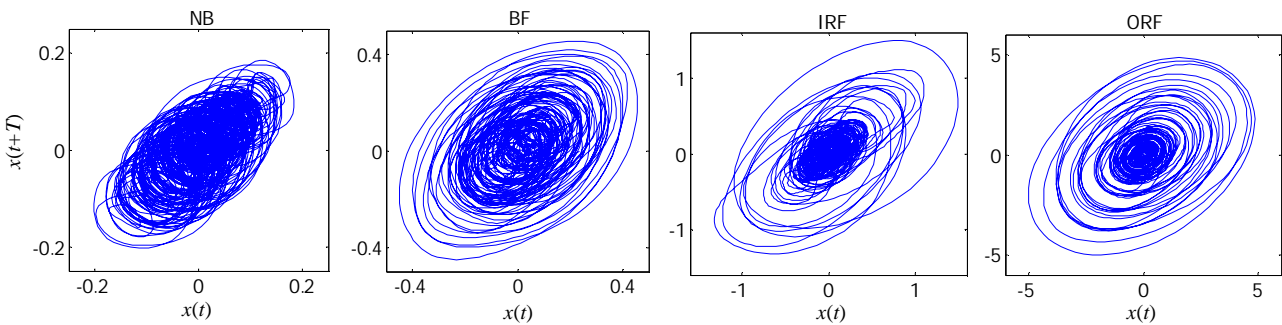
| وضعیت بلبرینگ | تأخیر زمانی (T) |
|----------------------|---------------------|
| سالم (NB) | 9 |
| عیب ساچمه (BF) | 15 |
| عیب رینگ داخلی (IRF) | 12 |
| عیب رینگ خارجی (ORF) | 14 |

دارای تراکم یکنواختی در اکثر نقاط می‌باشد. هم‌چنین صفحه فاز برای عیب حلقه خارجی، منظم‌تر از صفحه فاز برای عیب حلقه داخلی می‌باشد. این موضوع نیز به دلیل غالب بودن مشخصه فرکانسی عیب در حالت ORF نسبت به IRF می‌باشد. با بررسی صفحه فاز برای بارهای مختلف وارده به بلبرینگ، مشاهده می‌شود که بار تأثیری بر کیفیت رفتار دینامیکی سیستم نداشته است.

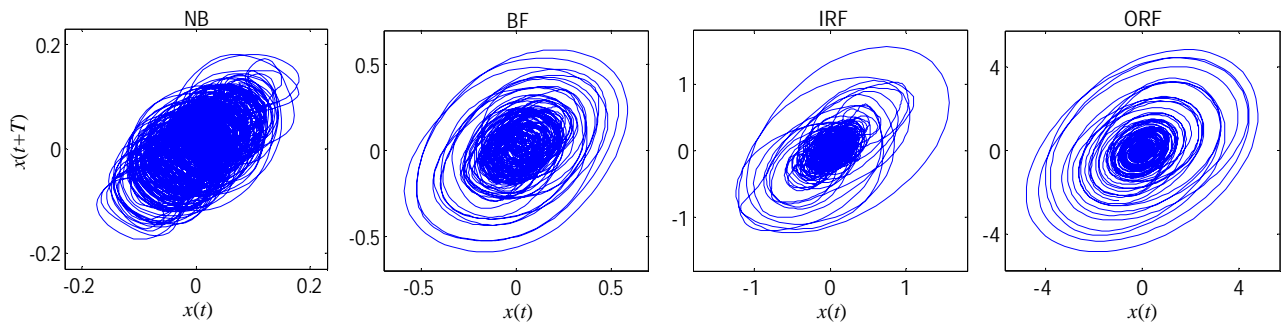
صفحه فاز به طور کیفی وضعیت رفتار آشوبناک را مشخص می‌کند ولی برای تشخیص و شناسایی عیوب نیاز به مشخصه‌های کمی می‌باشد. به همین



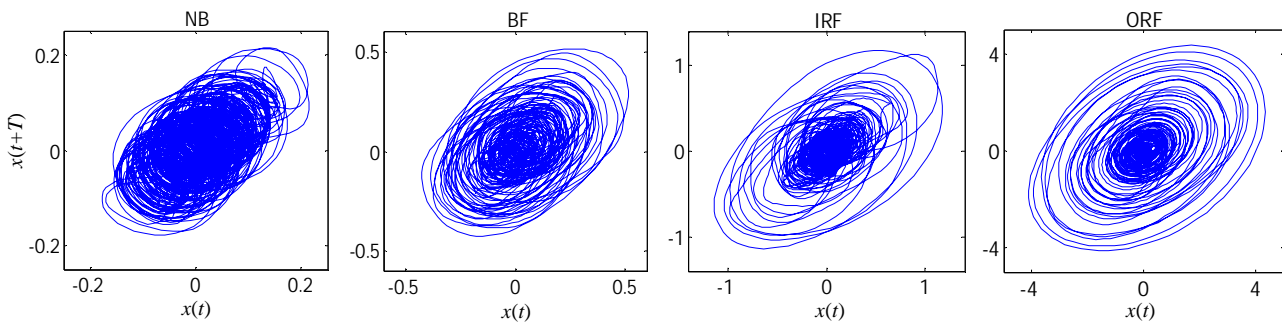
شکل 3 صفحه فاز بازسازی شده برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بار صفر اسب بخار



شکل 4 صفحه فاز بازسازی شده برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بار یک اسب بخار



شکل 5 صفحه فاز بازسازی شده برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بار دو اسب بخار



شکل 6 صفحه فاز بازسازی شده برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بار سه اسب بخار

$$d(\vec{X}_i, \vec{X}_j) = \max_{k=1,2,\dots,m} (|x(i+k-1)| - |x(j+k-1)|) \quad (4)$$

که $i=1,2,\dots,N-m+1$ ، $j=1,2,\dots,N-m+1$ بوده و N تعداد نقاط داده در سیگنال زمانی می‌باشد. سپس، شباهت بین بردار \vec{X}_i و همه بردارهای \vec{X}_j که $j=1,2,\dots,N-m+1, j \neq i$ می‌باشد، به صورت رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$C_i^m(i) = \frac{1}{N-(m-1)} \sum_{j \neq i} \theta\{r - d(\vec{X}_i, \vec{X}_j)\}, \quad (5)$$

$j = 1, 2, \dots, N - m + 1$

که $\theta\{x\}$ تابع هویساید⁴، به صورت رابطه (6) است.

$$\theta\{x\} = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

پارامتر r یک مقدار تولرانس است که بر اساس انحراف معیار (Std)⁵ سیگنال زمانی محاسبه می‌شود (رابطه (7)).

$$r = K \cdot \text{Std}(x) \quad (7)$$

سپس با تعریف رابطه (8):

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln[C_i^m(i)] \quad (8)$$

مقدار آنتروپی تقریبی برای یک سیگنال زمانی با N نقطه به صورت (9) بدست می‌آید.

$$AE(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r) \quad (9)$$

مقدار محاسبه شده AE در معادله (9)، اندازه‌گیری شباهت بین بردارهای بازسازی شده سیگنال زمانی است که مرتبط به منظم بودن سیگنال نیز می‌باشد. هر چه سیگنال منظم‌تر باشد، AE کمتری دارد. بطور مثال برای یک سیگنال متناوب که تک فرکانس است، مقدار AE خیلی کم (نزدیک صفر) است، زیرا سیگنال از نظم خیلی بالایی برخوردار است. ولی یک سیگنال پیچیده که محتوی تعداد زیادی فرکانس است به دلیل نظم کم، دارای AE بالایی است.

مشاهده می‌شود که مقدار محاسبه شده AE به دو پارامتر بُعد جاسازی m و ضریب K وابسته است. بُعد جاسازی m در بازسازی صفحه فاز توضیح داده شده و مقدار آن برابر با 2 در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب K به طور عمومی مقداری برابر 0/1 تا 0/5 توصیه می‌شود. در اصل، اگر تشابه بین بردارهای با طول m و $m+1$ افزایش یابد، دقت تخمین AE بهبود پیدا می‌کند. با انتخاب یک مقدار کوچک برای m و بزرگ برای K ، این تشابه می‌تواند افزایش یابد. برای مقادیر کوچک K ، تخمین احتمال شرطی⁶ نتایج ضعیفی ارائه می‌دهد. در حالی که مقادیر خیلی بزرگ نیز باعث از بین رفتن جزئیات سیستم می‌شود. در یک کاربرد عملی، می‌توان به کمک سعی و خطا این دو پارامتر را برای یک سیگنال تجربی خاص بدست آورد. به هر حال، مقادیر بزرگ m باعث افزایش زمان محاسبات نیز می‌شود. در واقع وقتی که $m=2$ انتخاب شود، همگرایی خوبی برقرار می‌شود و این مقدار انتخاب خوبی برای محاسبه AE می‌باشد [16].

وقتی که مقدار K به 0/4 می‌رسد، مقادیر AE برای مقادیر مختلف m به یک وضعیت پایدار همگرا می‌شوند [16]. بنابراین این مقدار برای K ، یک انتخاب مناسب برای جلوگیری از حذف جزئیات سیستم می‌باشد. در این مقاله مقادیر $m=2$ و $K=0/4$ برای محاسبه AE انتخاب شده‌اند. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است، مقادیر AE برای بلبرینگ معیوب بزرگتر از مقادیر آن برای بلبرینگ سالم است. این بدین معنی است

عبارتی رفتار آشوبناک در صفحه فاز را به صورت کمی بیان می‌کنند. نحوه رفتار مسیرها در صفحه فاز و همچنین ویژگی‌های جاذب در صفحه فاز را به صورت کمی بیان می‌کنند که برای تفکیک بلبرینگ سالم از معیوب و هم-چنین تفکیک عیوب مختلف از یکدیگر بسیار مفید هستند.

4- مشخصه‌های رفتار آشوبناک

4-1- نمای لیاپانوف

نمای لیاپانوف، حساسیت سیستم دینامیکی به شرایط اولیه را نشان می‌دهد. همچنین، پیش‌بینی پذیری سیستم را نیز نشان می‌دهد. وقتی یک سیستم آشوبناک از شرایط اولیه با شعاع d_0 در صفحه فاز شروع به حرکت کند، واگرایی مسیرها در صفحه فاز بوسیله رابطه (2) مشخص می‌شود.

$$d = d_0 e^{\lambda t} \quad (2)$$

که نمای لیاپانوف λ ، متناظر با نرخ متوسط واگرایی مسیرها می‌باشد.

وقتی که حداقل یکی از نماهای لیاپانوف مثبت باشند، رفتار سیستم آشوبناک است. از آنجایی که بزرگترین نمای لیاپانوف نشان‌دهنده وجود و یا عدم وجود رفتار آشوبناک در یک سیستم است، بنابراین از آن به عنوان یکی از مشخصه‌های رفتار آشوبناک استفاده شده است.

محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف (LLE)¹ برای صفحه فاز بازسازی شده از داده‌های تجربی، بر اساس روش ارائه شده در مرجع [14] می‌باشد. شکل 7 مقادیر LLE را برای عیب‌های مختلف بلبرینگ و تحت بارهای متفاوت نشان می‌دهد. وجود عیب در بلبرینگ باعث کاهش مقدار LLE شده است. از طرفی مقادیر مثبت LLE، آشوبناک بودن ارتعاش بلبرینگ را نیز تأیید می‌کند. همچنین تفاوت قابل توجهی بین مقادیر LLE در حالت‌های سالم و معیوب دیده می‌شود که باعث می‌شود تشخیص وجود عیب به کمک این مشخصه آسان باشد. علاوه بر آن، بین مقادیر LLE برای عیوب مختلف نیز تفاوت نسبتاً خوبی وجود دارد که باعث می‌شود نوع عیب نیز قابل تشخیص باشد.

تأثیر مقادیر بار بر مقدار LLE نیز در شکل 7 مشاهده می‌شود. قابل توجه است که مشخصه LLE با وجود تغییر بار بلبرینگ هم‌چنان قدرت تشخیص و شناسایی عیوب مختلف را دارد. بنابراین، LLE مشخصه بسیار خوبی برای تشخیص و شناسایی عیوب مختلف بلبرینگ در شرایط مختلف کاری می‌باشد.

4-2- آنتروپی تقریبی

آنتروپی تقریبی (AE)²، اندازه‌گیری پیچیدگی³ یک سیگنال زمانی می‌باشد. مقدار AE شباهت بین یک تکه از داده‌ها و تکه بعدی داده‌ها با طول یکسان را می‌سنجد. به عبارت دیگر عدم پیش‌بینی پذیری نوسانات سیگنال را کمی‌سازی می‌کند. مقادیر کوچک AE یعنی سیگنال پیش‌بینی پذیر است در حالی که مقادیر بزرگ آن نشان دهنده عدم پیش‌بینی پذیری سیگنال است [15]. مرحله اول در محاسبه مقدار AE، درست کردن یک سری بردار به صورت رابطه (3) است.

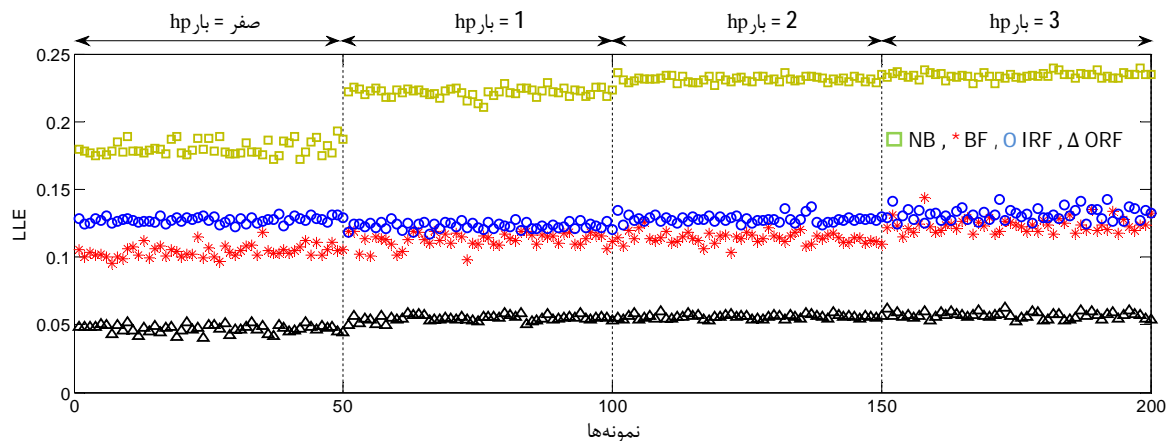
$$\vec{X}_i = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\}, \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, N - m + 1$

هر یک از بردارها از m نقطه داده گسسته و پی در پی از سیگنال زمانی ساخته شده است. فاصله بین دو بردار به صورت ماکزیمم اختلاف بین اجزای آن‌ها تعریف می‌شود (رابطه (4)).

4- Heaviside
5- Standard deviation
6- Conditional Probability

1- Largest Lyapunov Exponent
2- Approximate Entropy
3- Complexity



شکل 7 مقادیر محاسبه شده LLE برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بارهای مختلف و عیوب متفاوت

هم‌چنین $p_i = N_i / N$ احتمال وجود یک نقطه از فضای فاز در داخل مکعب i ام می‌باشد که N تعداد کل نقاط فضای فاز و N_i تعداد نقاط فضای فاز در داخل مکعب i ام می‌باشد.

به ازای $q=2$ ، بعد D_2 که بعد همبستگی ($3CD$) نام دارد بدست می‌آید که می‌توان آنرا به صورت رابطه (11) نوشت.

$$CD = D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (11)$$

که $C(r) = \sum_{i=1}^{M(r)} p_i^q$ نام دارد و احتمال وجود دو نقطه از فضای فاز در یک سلول را مشخص می‌کند. برای محاسبه CD از الگوریتم ارائه شده در [18] استفاده شده است. این الگوریتم به طور وسیعی برای محاسبه CD در سیگنال‌های تجربی استفاده می‌شود.

شکل 9، مقادیر محاسبه شده CD برای وضعیت‌های مختلف بلبرینگ شامل سالم و انواع عیوب را نشان می‌دهد. حضور عیب باعث کاهش مقدار CD شده است که کمترین مقدار نیز مربوط به عیب حلقه خارجی می‌باشد. مشاهده می‌شود که CD برای وضعیت سالم نسبت به وضعیت‌های معیوب، بزرگترین مقدار را دارد. این بدین معنی است که فضای فاز بلبرینگ معیوب دارای جاذبی با چگالی کمتر می‌باشد که این موضوع در شکل‌های 3 تا 6 نیز قابل مشاهده است و تایید می‌شود.

5- تشخیص و شناسایی عیوب

پس از استخراج مشخصه‌های سیگنال ارتعاشی با استفاده از ویژگی‌های رفتار آشوبناک، یک فضای مشخصه عیب⁵ ایجاد شده است. این فضا از مشخصه‌های LLE، AE و CD تشکیل شده است. فضای مشخصه عیب برای شرایط دور و بار مختلف ایجاد شده است که در شکل 10 قابل مشاهده است. برای نمایش و مقایسه بهتر، مشخصه‌ها نرمال شده و سپس این فضا ایجاد شده است. نرمال کردن مشخصه با تقسیم مقادیر هر مشخصه بر بیشترین مقدار آن، انجام شده است. مشاهده می‌شود که این فضا قابلیت بسیار خوبی در تفکیک عیوب مختلف بلبرینگ دارد. در شرایط مختلف کاری نیز می‌توان به کمک این فضا تشخیص وجود عیب و هم‌چنین تشخیص نوع عیب را انجام داد.

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در این مقاله، تفکیک پذیری بین حالت‌های سالم و معیوب با عیوب مختلف در فضای مشخصه عیب مورد

که سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ معیوب محتوی مولفه‌های فرکانسی بیشتر و هم‌چنین نظم کمتری می‌باشد. عبارت دیگر، هر وضعیت غیرعادی باعث اضافه شدن مولفه‌های فرکانسی جدیدی به سیگنال ارتعاشی می‌شود که نتیجه آن افزایش مقدار AE می‌باشد.

مقدار AE، عدم پیش‌بینی پذیری سیگنال ارتعاشی را می‌سنجد، بنابراین مقادیر بزرگتر AE برای وضعیت معیوب نشان‌دهنده پیش‌بینی‌پذیری کمتر آن نسبت به وضعیت سالم می‌باشد. علاوه بر آن، عدم پیش‌بینی‌پذیری سیگنال ارتعاشی، آشوبناک بودن ارتعاش سیستم را تأیید می‌کند. تأثیر مقادیر بار بلبرینگ بر روی مقدار AE نیز در شکل 8 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که که آنتروپی تقریبی در شرایط مختلف کاری (دور و بار متفاوت) می‌تواند انواع عیوب مختلف را به خوبی تفکیک کند. بنابراین مشخصه یا ویژگی مناسبی برای تشخیص و شناسایی عیوب بلبرینگ می‌باشد.

4-3- بُعد همبستگی

یک بُعد فرکتالی، شاخصی است برای ارزیابی الگوها یا مجموعه‌های فرکتالی که برای این کار پیچیدگی آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. انواع مختلفی از بُعدهای فرکتالی هستند که بصورت تجربی و نیز تئوری قابل اندازه‌گیری هستند [17]. افزایش در مقدار بُعد فرکتالی همراه با پر شدن فضای فاز بوسیله مسیرها بدین معنی است که بُعد فرکتالی، چگالی را اندازه‌گیری کرده است، ولی در حقیقت این دو به طور کامل به یکدیگر وابسته نیستند. در عوض، یک بُعد فرکتالی، پیچیدگی را اندازه‌گیری می‌کند که از ویژگی‌های اساسی فرکتال‌ها می‌باشد و به معنای خود-شبیهی¹ و نامنظمی است.

به طور کلی فرکتال‌ها، انواع و درجه‌های خود-شبیهی مختلفی را نشان می‌دهند که براحتی قابل مشاهده نیست. بدون استفاده از روش‌های تحلیلی پیچیده نمی‌توان براحتی پیچیدگی فرکتالی را تحلیل نمود ولی می‌توان به کمک بُعدهای فرکتالی آن را اندازه‌گیری کرد.

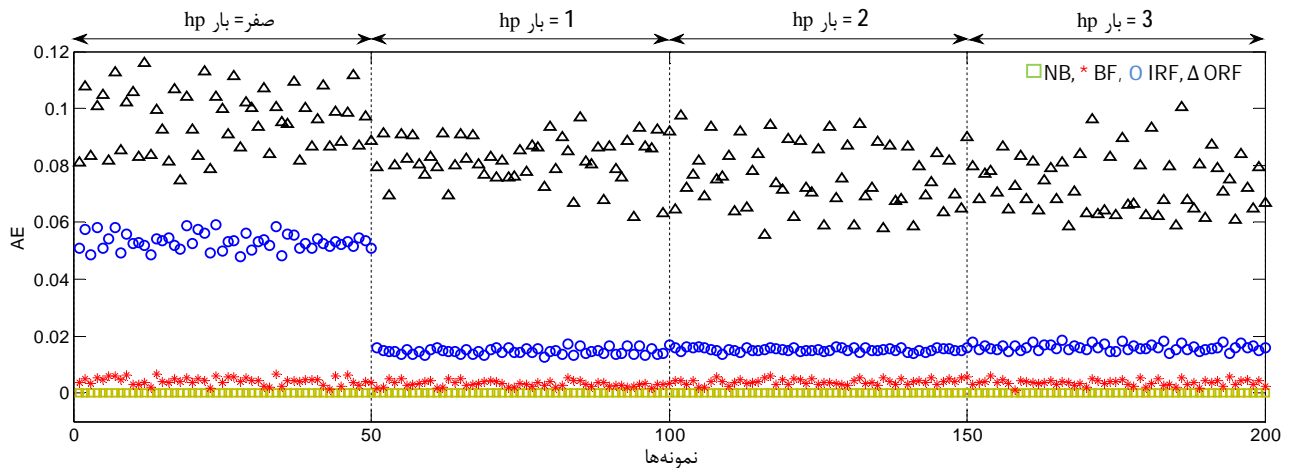
بُعد فرکتالی بصورت رابطه (10) تعریف می‌شود.

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log \sum_{i=1}^{M(r)} p_i^q}{\log r}, \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

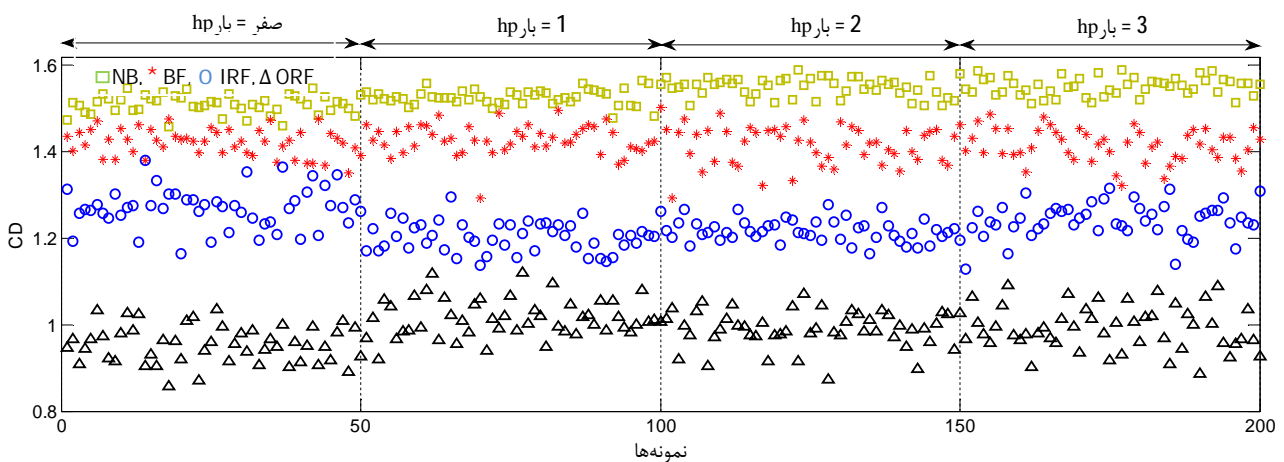
که مجموعه‌ای از بُعدهای فرکتالی که همبستگی‌های مرتبه بالاتر² را نیز با افزایش q ، شامل می‌شود، ارائه می‌دهد. در معادله 10، $M(r)$ تعداد سلول‌های m -بُعدی با اندازه r (به طور مثال یک مکعب یا مربع با طول ضلع r) است که برای پوشش مجموعه فرکتالی یا همان فضای فاز مورد نیاز می‌باشد.

3- Correlation Dimension
4- Correlation Sum
5- Fault Feature Space

1- Self-similarity
2- Higher Order Correlations



شکل 8 مقادیر محاسبه شده AE برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بارهای مختلف و عیوب متفاوت



شکل 9 مقادیر محاسبه شده CD برای سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ تحت بارهای مختلف و عیوب متفاوت

با داده‌های آموزشی مقایسه می‌کند.

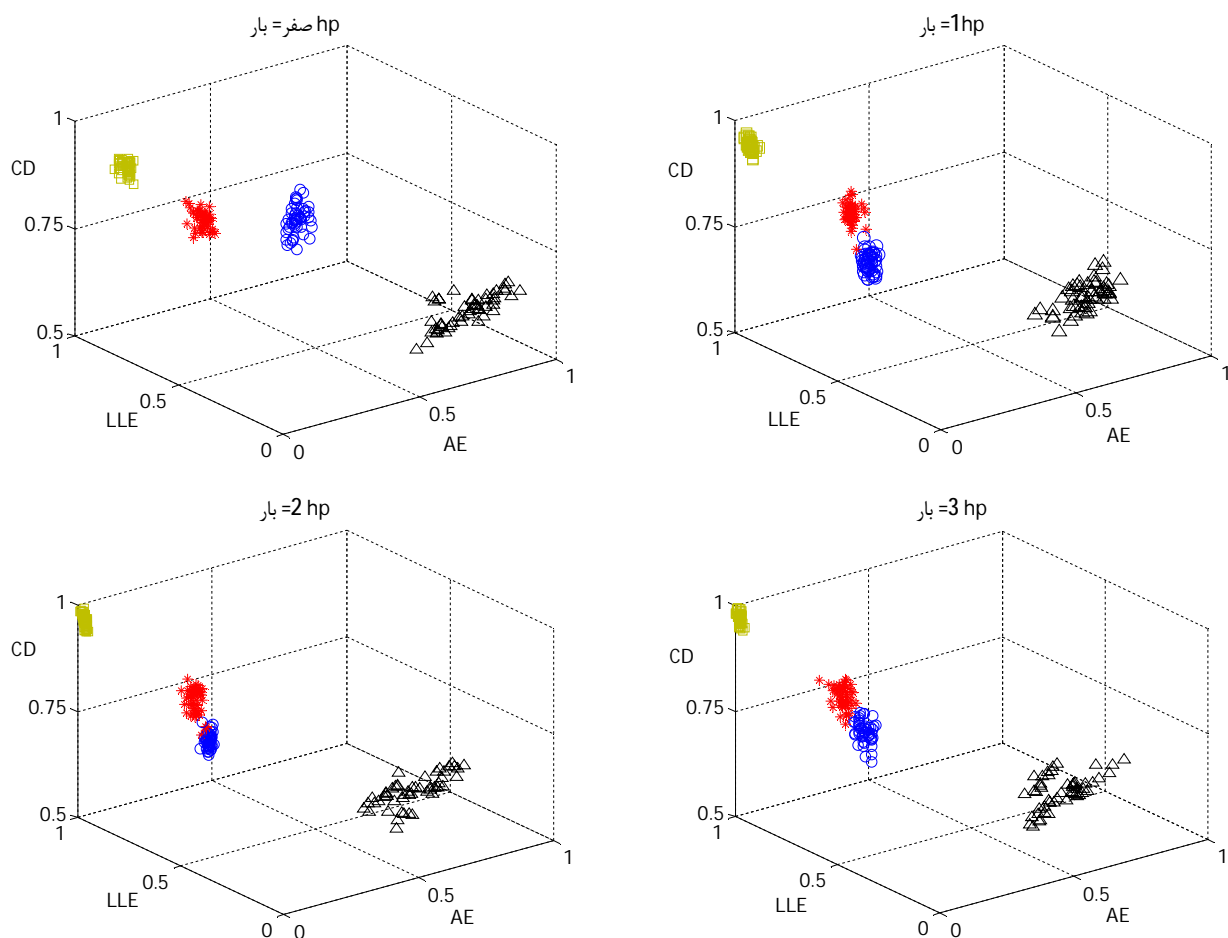
مقدار k حداکثر می‌تواند برابر با تعداد داده‌های آموزشی از یک گروه باشد، بنابراین برای مجموعه داده‌های صفر تا سه، حداکثر برابر با 35 و برای مجموعه داده کل، حداکثر می‌تواند برابر با 140 باشد. از طرفی چون مسأله طبقه‌بندی چهار گروهی می‌باشد، عدد انتخابی نباید بر 4 بخش‌پذیر باشد. بر همین اساس و همچنین برای جلوگیری از خطای بزرگ بودن یا کوچک بودن k ، مقدار آن انتخاب شده است که در جدول 3 نیز آورده شده است. پس از انتخاب k ، روش kNN برای داده‌های آزمایشی اجرا شده است. درصد موفقیت این روش در تشخیص نوع عیب در همه مجموعه داده‌ها برابر 100 درصد می‌باشد. حتی در مجموعه داده کل، نیز با موفقیت 100 درصد، عیوب مختلف تشخیص داده شده‌اند. در حقیقت این موفقیت در تشخیص و شناسایی نوع عیب متأثر از مشخصه‌های رفتار آشوبناک سیگنال ارتعاشی می‌باشد. همانطور که از شکل 10 نیز مشخص بود وضعیت‌های سالم و معیوب بطور کامل از یکدیگر قابل تفکیک بودند، همچنین عیوب مختلف نیز قابلیت تفکیک خوبی داشتند. به همین دلیل حتی با استفاده از یک روش ساده طبقه‌بندی مانند kNN نیز می‌توان به موفقیت 100 درصد رسید. این نتایج نشان دهنده وجود اطلاعات غنی از دینامیک سیستم در مشخصه‌های پیشنهادی هستند. تأثیر زیاد وجود و نوع عیب بر رفتار غیرخطی و آشوبناک سیگنال ارتعاشی، از نتایج بدست آمده مشهود است.

بررسی قرار گرفته است. این کار به کمک روش kNN^1 انجام شده است.

برای تفکیک با استفاده از این روش، ابتدا باید داده‌های فضای مشخصه عیب به دو گروه آموزشی و تست تقسیم شوند که جزئیات این تقسیم در جدول 3 آورده شده است. نحوه کار این روش بدین صورت است که یک داده از گروه آزمایشی را دریافت کرده و سپس k تا از نزدیکترین همسایه‌های آن در داده‌های آموزشی را پیدا کرده و این داده جدید را به گروهی تخصیص می‌دهد که بیشترین عضو را در بین این k داده دارد. باید توجه داشت که برای مسأله طبقه‌بندی دو گروهی، این عدد معمولاً فرد انتخاب می‌شود و برای مسأله c گروهی، معمولاً عددی انتخاب می‌شود که بر c بخش‌پذیر نباشد. کمترین مقدار ممکن برای k عدد یک است، که در این حالت داده آزمایشی به گروهی تخصیص می‌یابد که نزدیکترین داده آموزشی به آن را داشته باشد. انتخاب k بزرگ این حسن را دارد که مرزهای تصمیم‌گیری نرمتر شوند. ولی باعث افزایش حجم محاسبات شده و همچنین باعث از دست رفتن اطلاعات محلی می‌شود، زیرا داده‌های خیلی دور نیز در طبقه‌بندی مؤثر می‌شوند.

بر خلاف ساختار ساده، kNN یک رقیب جدی برای دیگر طبقه‌بندی کننده‌ها می‌باشد. در حقیقت kNN هیچ‌گونه یادگیری ندارد و هیچ‌گونه پردازشی برای طبقه‌بندی انجام نمی‌دهد بلکه به طور ساده داده آزمایشی را

1- k-Nearest Neighbors



شکل 10 فضای مشخصه عیب برای شرایط مختلف کاری بلبرینگ (□ NB, * BF, ○ IRF, Δ ORF)

جدول 3 جزئیات مربوط به مجموعه داده‌های بلبرینگ

| مجموعه داده | بار (hp) | تعداد کل داده | تعداد داده‌های آموزشی | تعداد داده‌های آزمایشی | k انتخابی |
|-------------|---------------|---------------|-----------------------|------------------------|-----------|
| صفر | صفر | 200 | 140 | 60 | 17 |
| یک | 1 | 200 | 140 | 60 | 17 |
| دو | 2 | 200 | 140 | 60 | 17 |
| سه | 3 | 200 | 140 | 60 | 17 |
| کل | صفر، 1، 2 و 3 | 800 | 560 | 240 | 71 |

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بررسی رفتار آشوبناک سیگنال ارتعاشی، روشی جدید برای عیب‌یابی بلبرینگ ارائه شد. صفحه فاز برای وضعیت‌های مختلف سالم/معیوب بلبرینگ، جاذب‌های متفاوتی را نشان داد. برای کمی کردن تغییرات دینامیک سیستم در صفحه فاز از مشخصه‌های رفتار آشوبناک استفاده شد که این مشخصه‌ها حاوی اطلاعات غنی از عیوب هستند. این مشخصه‌ها شامل بزرگترین نمای لیاپانوف، آنتروپی تقریبی و بُعد همبستگی می‌باشند. وجود عیب باعث افزایش در مقادیر بزرگترین نمای لیاپانوف و بُعد همبستگی شده است. این افزایش به دلیل غالب شدن فرکانس‌های مربوط به عیب در سیگنال ارتعاشی است که این موضوع در صفحه فاز نیز مشاهده می‌شود. آنتروپی تقریبی برای وضعیت‌های معیوب مقدار بیشتری نسبت به حالت سالم دارد.

این موضوع نشان می‌دهد که پیچیدگی دینامیکی سیستم افزایش پیدا کرده است. با توجه به حساسیت خوب این مشخصه‌ها نسبت به وجود عیب، یک فضای سه بعدی به نام فضای مشخصه عیب تشکیل شد. این فضا به راحتی وضعیت‌های مختلف بلبرینگ را به صورت تفکیک شده نمایش می‌دهد. برای ارزیابی کارایی این فضا از روش kNN برای تشخیص وضعیت بلبرینگ استفاده شد. نتایج این روش، کارایی صد درصدی را در تشخیص عیب و نوع آن نشان می‌دهد که این موفقیت به دلیل استفاده از مشخصه‌های رفتار آشوبناک سیگنال ارتعاشی می‌باشد.

7- مراجع

- [1] S. P. Harsha, P. K. Kankar, Stability analysis of a rotor bearing system due to surface waviness and number of balls, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.46, pp. 1057-1081, 2004.

- [10] K. A. Loparo, *Bearings vibration data set*, Case Western Reserve University, 2003.
- [11] F. Takens, Detecting strange attractors in turbulence, *Dynamical Systems and Turbulence*, Vol. 898, pp. 366-381, 1981.
- [12] R. Rusinek, J. Warminski, Attractor reconstruction of self-excited mechanical systems, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 40, pp.172-182, 2009.
- [13] J. J. Lou, S. J. Zhu, L. He, Q. W. He, Experimental chaos in nonlinear vibration isolation system, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 40, pp. 1367-1375, 2009.
- [14] M. T. Rosenstein, J. J. Collins, C. J. Luca, A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets, *Physica D*, Vol. 65, pp. 117-134, 1994.
- [15] S. Pincus, Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure, *Chaos*, Vol. 5, No. 1, pp. 110-117, 1995.
- [16] R. Yan, R. X. Gao, Approximate Entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 824-839, 2007.
- [17] TF. Nonnenmacher, GA. Weibel, R. Ewald R., *Fractals in Biology and Medicine*, Springer, 1994.
- [18] P. Grassberger, I. Procaccia, Characterization of strange attractors, *Physical Review Letter*, Vol. 50, pp. 346-349, 1983.
- [2] S. P. Harsha, Nonlinear dynamic analysis of an unbalanced rotor supported by roller bearing, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 26, pp. 47-66, 2005.
- [3] S. H. Ghafari, E. M. Abdel-Rahman, F. Golnaraghi, F. Ismail, Vibrations of balanced fault-free ball bearings, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 1332-1347, 2010.
- [4] B. Mevel, J. L. Guyader, Routes to chaos in ball bearings, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 162, No. 3, pp. 471-487, 1993.
- [5] B. Mevel, J. L. Guyader, Experiments on routes to chaos in ball bearings, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, pp. 549-564, 2008.
- [6] D. Logan, J. Mathew, Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearings, II: selection of experimental parameters, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 10, No. 3, pp. 251-260, 1996.
- [7] C.H. Chena, R.J. Shyua, C.K. Ma, A new fault diagnosis method of rotating machinery, *Shock and Vibration*, Vol. 15, pp. 585-598, 2008.
- [8] P. L. Zhang, B. Li, S. S. Mi, Y. T. Zhang, D. S. Liu, Bearing fault detection using multi-scale fractal dimensions based on morphological covers, *Shock and Vibration*, Vol. 19, pp. 1373-1383, 2012.
- [9] A. Saghafi, A. Farshidianfar, Bifurcation and chaos control in a gear transmission system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 61-68, 2015 (In Persian)