

## تشخیص عیوب همزمان بلبرینگ و عدم هم محوری در موتورهای القایی با استفاده از روش ترکیبی پردازش پیشرفته بای اسپکتروم سیگنال ارتعاشی و الگوریتم K-نزدیکترین همسایه

رضا دردمند<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

میرسعید صفی زاده<sup>۲</sup>

دانشیار

عیوب خرابی بلبرینگ و عدم هم محوری دو عیب بسیار متداول در الکتروموتورها محسوب میشود. در این مقاله، هدف تشخیص عیوب هم زمان بلبرینگ موتور القایی و عدم هم محوری موتور با تجهیز است. برای این منظور سیستمی متشکل از الکتروموتور و شفت کوپل شده به آن طراحی شده و تحت شرایط متفاوت بارگذاری و در سرعت های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. عیوب مذکور با استفاده از روش های مرسوم آنالیز سیگنال ارتعاشی و روش جدید بای اسپکتروم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند و پارامترهای مناسب جهت تشخیص عیوب از هر یک از روش های آنالیز محاسبه شدند. در ادامه با استخراج ویژگی های برتر با الگوریتم آنالیز مولفه های اساسی، برای تشخیص عیوب و تصمیم گیری از الگوریتم کلاس بندی KNN استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استفاده از روش جدید بای اسپکتروم به همراه روش های مرسوم آنالیز سیگنال قابلیت تشخیص عیوب بلبرینگ و عدم هم محوری موتورهای القایی چه بصورت تکی و چه بصورت هم زمان را تنها با اندازه گیری سیگنال ارتعاشی با دقت قابل قبولی فراهم می آورد.

واژه های راهنما: عیب یابی، موتورهای القایی، آنالیز ارتعاشات، عیب بلبرینگ، عدم هم محوری، بای اسپکتروم

### ۱- مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع الکتروموتورها در صنایع گوناگون، پایش وضعیت این تجهیزات از حساسیت و اهمیت فراوانی برخوردار است. مطالعات نشان داده است که ۴۵ درصد برق تولیدی نیروگاه های دنیا صرف حرکت الکتروموتورهای بخش های صنعتی، واحدهای اداری و خانگی می شود که در ایران این سهم به ۶۵ درصد

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Reza\_Dardmand@mecheng.iust.ac.ir

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران Safizadeh@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳

می‌رسد. بر اساس این مطالعات ۶۰ تا ۷۰ درصد این میزان صرف الکتروموتورهای صنعتی می‌شود که این موضوع نشان از اهمیت الکتروموتورها در صنعت دارد.

در طول دو دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای جهت توسعه روش‌های جدید پایش وضعیت موتورهای القایی بر اساس ارتعاشات و آنالیز سیگنال‌های جریان انجام شده است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد از خرابی‌های موتور القایی مربوط به یاتاقان‌های آن است [۱ و ۲ و ۳]. علاوه بر این عدم هم‌محوری یکی از رایج‌ترین و مهم‌ترین مشکلات تجهیزات دوار بوده به طوری که بیش از ۷۰ درصد ارتعاشات سیستم ناشی از این عیب است [۴].

برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ با بررسی طیف فرکانسی سیگنال جریان و ارتعاشات، رابطه بین فرکانس مشخصه عیوب در سیگنال جریان و ارتعاشات به دست آمد [۵]. سال‌ها بعد با بررسی که روی آنالیز ارتعاشات در بعد زمان برای تشخیص عیوب بلبرینگ انجام شده، نشان داده شد که تابع احتمال با عیوب بلبرینگ در ارتباط است. به طوری که چگالی احتمال شتاب ارتعاشات یاتاقان در شرایط خوب و نرمال دارای توزیع گاوسی<sup>۱</sup> است، در حالیکه برای یک بلبرینگ معیوب، توزیع چگالی احتمال، غیر گاوسی و با دنباله‌ی غالب است که دلیل آن، افزایش سیگنال‌های با فرکانس بالا است. همچنین آقای فادن<sup>۲</sup> در تحقیقی که در سال ۲۰۰۰ میلادی انجام داد، نشان داد که برخی از پارامترهای آماری دیگر نظیر میانگین و واریانس و غیره در تشخیص عیوب، کمک شایانی به ما می‌کند [۶]. به هر حال اگر چه چندین دهه آنالیز ارتعاشات مورد توجه و استفاده بوده است، اما بیشتر تحقیقات اخیر در رابطه با پایش وضعیت سیستم‌ها به سمت آنالیز سیگنال جریان سوق داده شده است [۷].

ژو و مارانگنی در سال ۱۹۹۴ [۸] به بررسی سیستم مکانیکی موتور-کوپلینگ-شافت که دارای عیب عدم هم‌محوری و نابالانسی بود پرداختند. در این تحقیق محققان تنها توانستند نشان دهند در حالتی که این دو عیب به طور هم‌زمان اتفاق بیفتند با وجود نابالانسی کوچک در سیستم، اثر ناهم‌راستایی نمایان‌تر است. محدودیت این مطالعه در این بوده است که مدل استفاده شده در این آزمایش برای مقایسه علاوه بر اینکه در تفکیک نوع عیب ناتوان است، در تعیین مقدار عیب هم مشکل دارد.

از طرفی وجود ناهم‌راستایی در هنگام راه‌اندازی ماشین از اهمیت بسزایی برخوردار است. در همین راستا سانتیاگو<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۹] با استفاده از تبدیل موجک توانستند به شناسایی عیب ناهم‌راستایی در روتور هنگام راه‌اندازی ماشین پی ببرند. نتیجه این تحقیق این بود که برای ناهم‌راستایی‌های کوچک در زمان راه‌اندازی ماشین، تبدیل موجک در مقایسه با تحلیل فرکانسی و زمانی حساس‌تر است.

سینها<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۰] روش آنالیز جدیدی برای عیب‌یابی روتورها ارائه دادند. در این مطالعه سعی شده است که بر خلاف اغلب کارها که در آن‌ها برای عیب‌یابی روتورها از طریق پردازش سیگنال به چندین حس‌گر در هر یاتاقان نیاز است، با استفاده از یک شتاب‌سنج در هر یاتاقان به بررسی عیوب روتور پرداخته شود. برای این امر با استفاده از یک روش جدید ابتدا سیگنال‌های گرفته شده از هر یاتاقان با استفاده

<sup>1</sup> Gaussian distribution

<sup>2</sup> Fadden

<sup>3</sup> Santiago

<sup>4</sup> Sinha

از ترکیب اطلاعات باهم آمیخته شده و با پردازش این اطلاعات از طریق بای اسپکتروم<sup>۱</sup> به شناسایی و تفکیک عیوب ناهم‌راستایی و مالش روتور پرداخته شده است. در نهایت نشانه عیب‌های ناهم‌راستایی را تحریک واضح مؤلفه‌های مربوط به هارمونیک اول و دوم و نشانه مالش روتور را تحریک محسوس همین مؤلفه به اضافه باندهای فرکانسی پیرامون نصف هارمونیک دور روتور بیان کرد. الباه<sup>۲</sup> و سین‌ها در سال ۲۰۱۳ [۱۱] نیز با همان روش پردازش اطلاعات از طریق بای اسپکتروم، به پردازش اطلاعات ترکیب شده از یاتاقان پرداخته و علاوه بر ناهم‌راستایی و مالش روتور توانایی این روش در تشخیص شفت ترک دار را نیز نشان داده‌اند. علاوه بر اینکه عیوب مذکور در این مطالعه به صورت ترکیبی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند، یکی دیگر از مسئله‌های موجود در این پژوهش، ارزیابی چندین یاتاقان در سیستم و سپس ترکیب اطلاعات (بای اسپکتروم مرکب) حاصل از آنها بوده است. به طوریکه به ازاء هر یاتاقان یک سنسور لازم است که بایستی بر روی هاوزینگ آن در جهت خاصی نصب شود و ترکیب اطلاعات این سنسورها برای عیب یابی استفاده شود. این درحالی است که در ماشین‌آلات دوار در اکثر مواقع این دسترسی موجود نیست. از طرفی عموماً اجازه نصب یک سنسور بر روی ماشین داده می‌شود و نه اینکه به تعداد یاتاقان‌های موجود در سیستم سنسور نصب شود. همچنین برای بعضی ماشین‌های خاص نظیر توربین‌ها گاهی محل نصب حسگر بر روی یاتاقان فقط در جهت شعاعی فراهم شده است و در هر جهت دلخواه امکان نصب سنسور نیست. مرجع ۱۱ یک شفت ساده بر روی چهار بلبرینگ را در نظر گرفته است در حالیکه در این پژوهش یک ماشین الکتریکی واقعی مورد تست قرار گرفته است.

گاما<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۲] از شتاب سنج و پیزو الکتریک در تشخیص عدم هم‌محوری شفت استفاده کرده‌اند. آقای دلوند و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۳] روش نوینی مبتنی بر فرکانس آنی (لحظه‌ای) ولتاژ موتور به منظور پایش وضعیت یاتاقان‌های موتور القایی ارائه داده‌اند.

آقای لیانگ<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۴] بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مقایسه‌ای در مورد اثربخشی برخی از تکنیک‌های پردازش سیگنال در سیگنال‌های ارتعاشات و جریان برای عیب‌یابی موتورهای القایی با عیوب شکستگی میله‌های روتور و عیب استاتور انجام دادند. طیف قدرت<sup>۵</sup>، کپستروم و بای اسپکتروم تکنیک‌های مورد مقایسه بوده‌اند. نتایج بدست آمده دلالت بر این دارند که استفاده از تکنیک کپستروم در سیگنال‌های ارتعاشی موتور القایی باعث می‌شود که یک طیف قدرت پیچیده بسیار ساده‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد. با این حال اگر علائم خطا صرفاً در یک خط فرکانسی خود را نشان دهند و در هیچ فرکانس هارمونیک رخ ندهند، استفاده از روش کپستروم در سیگنال ارتعاش یا سیگنال جریان از مزایای کمی برخوردار خواهد بود. طبق نتایج این تحقیق الگوهای بای اسپکتروم جریان به روشنی تفاوت بین شرایط سالم و شکست میله‌های روتور و عیب استاتور موتور القایی را مشخص می‌کند. یکی از بزرگترین مزیت‌های تحلیل بای اسپکتروم، توانایی آن برای سرکوب نویز گاوسی و ارائه اطلاعات فاز در سیگنال است. در صورتی که تحلیل طیف قدرت هیچکدام از این خواص را ندارد. بنابراین بای اسپکتروم می‌تواند ابزاری مؤثر برای استخراج و شناسایی ویژگی‌های عیوب باشد.

<sup>1</sup> Bispectrum

<sup>2</sup> Elbbah

<sup>3</sup> Gama

<sup>4</sup> Liang

<sup>5</sup> Power Spectrum

با توجه به مروری بر منابع می بینیم که تحقیقات نسبتاً زیادی در زمینه پایش عیوب الکتروموتورها با روش ارتعاشی و دیگر روش‌ها انجام شده است، اما اکثر این تحقیقات در مورد عیوب تکی بوده است در حالیکه در واقعیت یک عیب می تواند عیوب دیگری را در سیستم ایجاد کند که در این حالت چندین عیب بطور همزمان بر سیستم اثر گذاشته و باعث می شود رفتار ارتعاشی با حالت تک عیب متفاوت باشد.

همانطور که توضیح داده شد، چندین کار تحقیقاتی توسط برخی محققین به منظور تشخیص عیوب همزمان عدم هم‌محوری، مالش روتور و همچنین ترک محور در ماشینهای دوار ساده آزمایشگاهی انجام گرفته است. در این مقاله، هدف تشخیص دو عیب همزمان متداول در الکتروموتورهایی که جهت حرکت در آوردن دیگر ماشینهای دوار استفاده می شوند است. این دو عیب همزمان، عیب بلبرینگ موتورالکتریکی و عیب عدم هم‌محوری موتور با تجهیز است. جهت تشخیص این دو عیب همزمان، از سیگنال‌های ارتعاش الکتروموتور استفاده خواهد شد. از طرفی با بکارگیری روشهای پردازش سیگنال مرسوم و روشهای جدید ارائه شده نظیر بای اسپکتروم سعی در افزایش دقت و قابلیت اعتماد سیستم عیب یابی می‌گردد.

باید توجه شود که در عیب‌یابی ماشین آلات عیب غالب مد نظر است، زیرا عیبی مانند عدم هم‌محوری اکثراً به میزان بسیار کم در ماشین آلات وجود دارد. از طرفی اگر شدت یکی از دو عیب خیلی بیشتر و شدت عیب دیگر خیلی کم باشد. در این حالت یکی از عیوب تحت سایه عیب دیگر قرار خواهد گرفت و بسیاری از روش‌ها قادر به عیب یابی صحیح نخواهد بود. در همین راستا چنین مواردی بعنوان محدودیت روش پیشنهادی عنوان می‌گردند.

## ۲- آنالیز ارتعاشات به منظور عیب‌یابی در الکتروموتورها

از متداول‌ترین روش‌های عیب‌یابی موتورهای القایی آنالیز ارتعاشات<sup>۱</sup> است که در این مطالعه نیز تحلیل‌های حوزه زمان و فرکانس بر روی سیگنال‌های ارتعاشات دریافتی از الکتروموتور انجام شده است.

### ۲-۱- آنالیز طیف فرکانسی و چگالی طیف توان<sup>۲</sup>

عیوب مختلفی که برای ماشین‌آلات دوار رخ می‌دهند هرکدام همراه با رفتار دینامیکی خاص خود و به تعبیر دیگر با مشخصه‌های ارتعاشی ویژه‌ای رخ می‌دهند. یکی از مشخصه‌های مهم ارتعاش، فرکانس ارتعاشی است. معمولاً ارتعاش اندازه‌گیری شده از روی ماشین، یک سیگنال پیچیده و ترکیبی از چندین سیگنال ارتعاشی با فرکانس‌های مختلف است که باید به نحوی سیگنال‌های مربوط به عیوب مختلف را از یکدیگر تمیز داده و شناسایی شوند. بسیاری از سیگنال‌هایی که در کاربردهای عملی با آن‌ها مواجه هستیم به صورتی هستند که تغییرات آن‌ها در طول زمان را نمی‌توان به صورت دقیق توصیف کرد. در مورد این سیگنال‌ها فقط می‌توان عباراتی احتمالاتی برای توصیف تغییرات به کار برد. ممکن است به این صورت تصور شود که می‌توان یک تعریف قطعی<sup>۳</sup> برای توصیف این سیگنال‌ها نیز مورد استفاده قرار داد. اما این تصور غلط است؛ زیرا تحقق یک سیگنال تصادفی به صورت یک دنباله گسسته با زمان دیده می‌شود که انرژی محدود ندارد و به همین دلیل

<sup>۱</sup> Vibration Analysis

<sup>۲</sup> Power Spectrum Density

<sup>۳</sup> Deterministic

نمی توان از تبدیل فوریه گسسته با زمان یا DTFT در مورد آن ها استفاده کرد. یک سیگنال تصادفی همواره دارای توان متوسط محدود است و بنابراین می توان با یک چگالی طیف توان میانگین آن ها را توصیف کرد. چگالی طیف توان یک سیگنال تصادفی را در یک تعریف می توان به صورت تبدیل فوریه گسسته با زمان دنباله خود همبستگی سیگنال در نظر گرفت:

$$\phi(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} r(k)e^{-i\omega k} \quad (1)$$

که در آن  $r(k)$  دنباله خود همبستگی<sup>۱</sup> سیگنال است.

## ۲-۲- طیف مرتبه بالا و روش تحلیل بای اسپکتروم

طیف تجمعی مرتبه دوم همان طیف توان و طیف تجمعی مرتبه سوم و چهارم به ترتیب بای اسپکتروم و تری اسپکتروم خواهد بود. کمولانت مرتبه سوم برای یک سیگنال گسسته و غیر گاوسی با میانگین صفر که همانند ممان مرتبه سوم با میانگین صفر خواهد بود از طریق رابطه زیر به دست می آید [۱۶].

$$C(m, n) = E[x(k)x(k+m)x(k+n)] \quad (2)$$

کمولانت مرتبه سوم یک تابع متقارن است به طوریکه  $E$  امید ریاضی و  $x(k)$  نمونه های سیگنال می باشد. طیف بای اسپکتروم از تبدیل فوریه کمولانت مرتبه سوم بصورت زیر به دست می آید:

$$B(w_1, w_2) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C(m, n) \cdot \exp[-j(mw_1 + nw_2)] \quad (3)$$

بطوریکه  $|w_1|, |w_2| \leq \pi$ .

با قرار دادن رابطه (۲) در رابطه (۳) برای همه نمونه های سیگنال خواهیم داشت:

$$B(w_1, w_2) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)x(k+m)x(k+n) \cdot \exp[-j(mw_1 + nw_2)] \quad (4)$$

همچنین با در نظر گرفتن  $k+m=p, k+n=q$  در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$B(w_1, w_2) = \left\{ \sum_{p=-\infty}^{+\infty} x(p)e^{-j(pw_1)} \right\} \left\{ \sum_{q=-\infty}^{+\infty} x(q)e^{-j(qw_1)} \right\} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)e^{j(w_1+w_2)k} \right\}$$

<sup>1</sup> Covariance

$$B(w_1, w_2) = X(w_1)X(w_2)X^*(w_1 + w_2) \quad (5)$$

و از آنجایی که طیف یک سیگنال حقیقی حول مبدا بصورت مزدوج متقارن است، بنابراین قسمت متقارن کمولنت مرتبه سوم به ۱۲ ناحیه مزدوج متقارن بای اسپکتروم تبدیل خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده است، می‌توان با استفاده از ناحیه مثلثی در  $w_1 + w_2 \leq \pi$  و  $w_1 \geq w_2$  و  $w_1 \geq 0$  تمام طیف را که دارای اطلاعات مستقلی از سایر نواحی متقارن است را بدست آورد [۱۶].

### ۲-۳- فرکانس‌های مشخصه بلبرینگ

خرابی محلی یا ساییدگی در بلبرینگ باعث ایجاد ضربه‌های متوالی در سیگنال ارتعاشات می‌شود که اندازه و دوره تکرار آن با توجه به سرعت چرخش، محل عیب و ابعاد مشخصه بلبرینگ تعیین می‌شود. این ضربه‌ها با توجه به اینکه عیب در کدام قسمت بلبرینگ ایجاد شده باشد توسط روابط (۶) تا (۹) بدست می‌آیند [۱۷]. فرکانس اصلی ارتعاشات قفسه نگهدارنده، از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) \quad (6)$$

فرکانس عیب ساچمه‌ها دو برابر فرکانس چرخش ساچمه به دور خود است و از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$f_{bd} = f_r \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2(\alpha)\right) \quad (7)$$

همچنین فرکانس‌های عیب رینگ خارجی و رینگ داخلی به ترتیب از روابط (۸) و (۹) بدست می‌آیند:

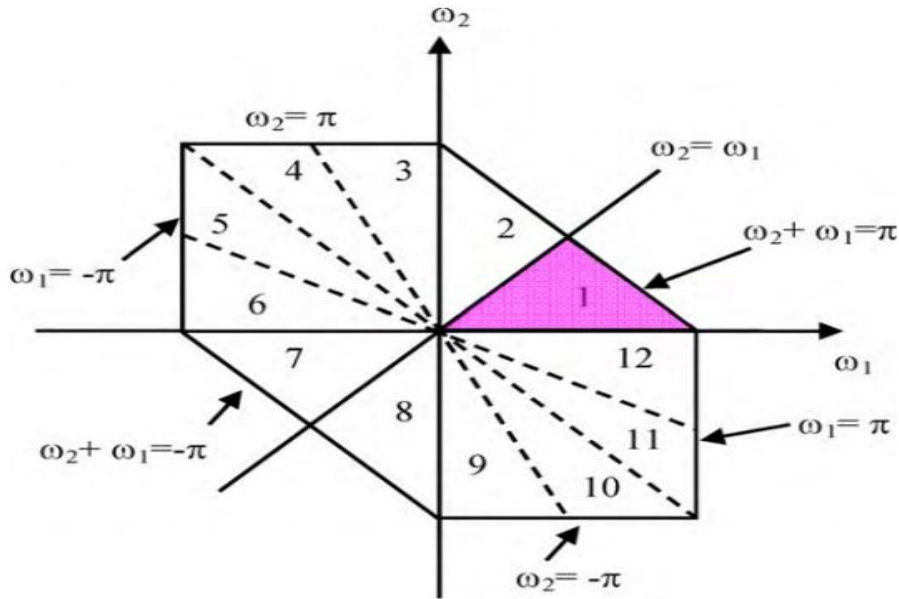
$$f_{od} = n f_c = \frac{n f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) \quad (8)$$

$$f_{id} = n(f_r - f_c) = \frac{n f_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) \quad (9)$$

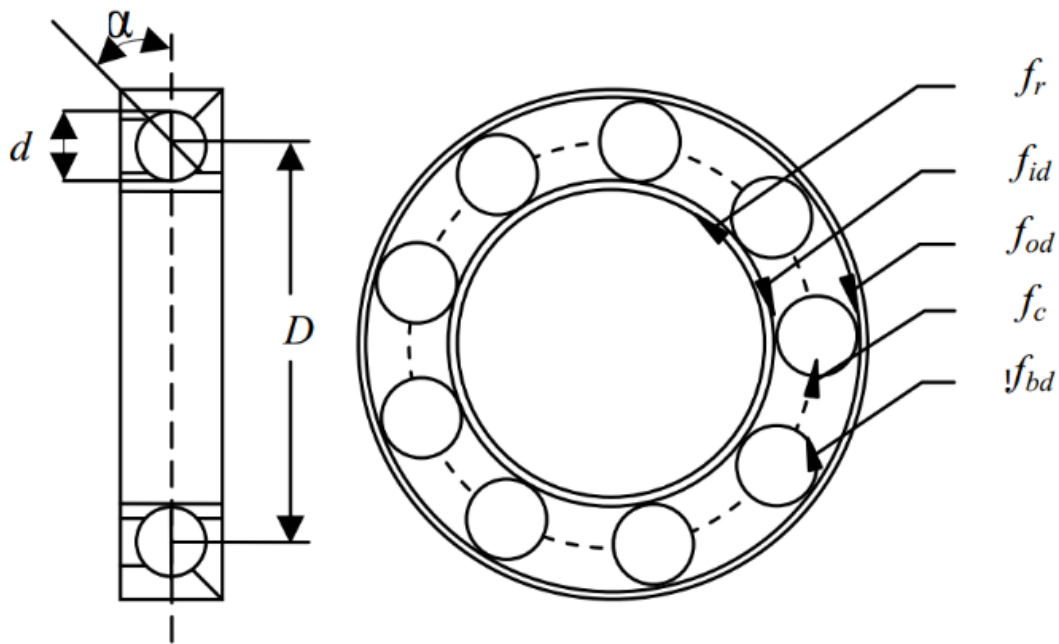
در این روابط  $n$  تعداد ساچمه‌ها،  $D$  قطر گام و  $d$  قطر ساچمه‌ها،  $\alpha$  زاویه تماس و  $f_r$  فرکانس دوران شفت است که بر اساس ابعاد مشخصه بلبرینگ نشان داده شده در شکل (۲) تعیین می‌شوند. البته فرکانس عیب حلقه داخلی و خارجی برای بلبرینگ‌هایی با ۶ تا ۱۲ ساچمه را می‌توان به‌طور تقریبی و بدون نیاز به دانستن ابعاد مشخصه بلبرینگ از روابط زیر محاسبه نمود [۵]:

$$f_{id} = 0.6 \cdot n \cdot f_r \quad (10)$$

$$f_{od} = 0.4 \cdot n \cdot f_r \quad (11)$$



شکل ۱- محدوده استخراج اطلاعات از بای اسپکتروم



شکل ۲- ابعاد مشخصه بلبرینگ ساچمه‌ای

### ۳- روش تحقیق

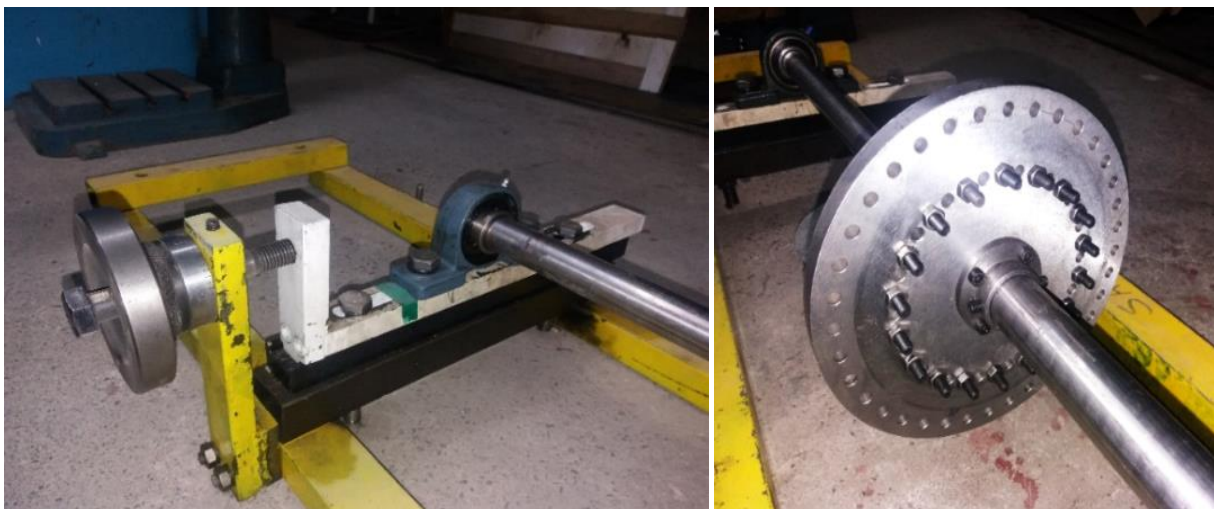
برای شبیه سازی عیوب مربوطه، سیستم آزمایشگاهی متشکل از یک الکتروموتور تک فاز با توان یک اسب بخار دارای بلبرینگ شماره ۶۲۰۴ به همراه شفت کوپل شده به آن طراحی و ساخته شده است. قطر شفت قسمت متحرک ۳۰ میلیمتر بوده که به کمک دو یاتاقان بر روی سازه آزمایش نصب می شود و از طریق دیسک سوراخ دار متصل شده به آن و کم و زیاد کردن وزن بوسیله پیچ و مهره، بارگذاری در سطوح مختلف اعمال خواهد شد. همچنین محل نشیمنگاه یاتاقان های نگهدارنده ی شفت قابل جابجایی بوده که می توان با حرکت دادن آن بصورت کنترل شده، سطوح مختلف ناهمراستایی را بر سیستم اعمال کرد.

لازم به ذکر است کوپلینگ استفاده شده در سیستم مدل KB80 بوده است. برای ثبت داده‌های مربوطه از شتاب سنج پایه مغناطیسی مدل 608A111 ساخت شرکت IMI Sensors استفاده شده است که محدوده فرکانسی آن ۱۰ کیلو هرتز است. برای کاهش دور الکتروموتور نیز از دیمر استفاده شده است. فرکانس نمونه برداری در این تحقیق ۴۰۹۶ هرتز بوده است.

شکل (۳) نمایی کلی از سیستم ثبت اطلاعات که شامل رایانه، مبدل آنالوگ به دیجیتال<sup>۱</sup> و دیمر بوده و همچنین نحوه نصب شتاب سنج روی الکتروموتور را نشان می‌دهد. شکل (۴) نیز مکانیزم ایجاد ناهمراستایی در سیستم و همچنین دیسک برای بارگذاری در سیستم را نشان می‌دهد.



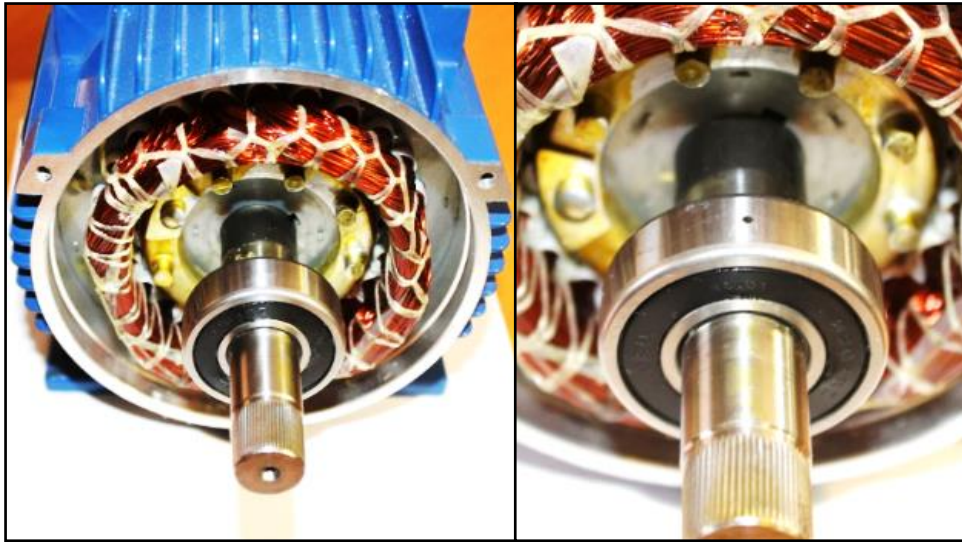
شکل ۳- نمایی کلی از سیستم طراحی شده و تجهیزات ثبت اطلاعات



شکل ۴- مکانیزم ایجاد ناهمراستایی در سیستم و دیسک برای بارگذاری

<sup>۱</sup> ADC (Analog to Digital Convertor)





شکل ۵- الکتروموتور با بلبرینگ سالم (سمت چپ) و بلبرینگ معیوب (سمت راست)

جدول ۱- ویژگی‌های مربوی به ۴۸ تست انجام شده تحت شرایط مختلف بارگذاری، سرعت و سطح عیب

شماره تست	عدم هم محوری	عیب بلبرینگ	بار	سرعت دوران	شماره تست	عدم هم محوری	عیب بلبرینگ	بار	سرعت دوران												
۱	---	---	سطح ۱	سطح ۱	۲۵	---	---	سطح ۱	سطح ۱												
۲				سطح ۲	۲۶				سطح ۲	۱											
۳			---	---	سطح ۲			سطح ۱	۲۷	---	---	سطح ۲	سطح ۱								
۴								سطح ۲	۲۸				سطح ۲	۲							
۵					---			---	سطح ۳			سطح ۱	۲۹	---	---	سطح ۳	سطح ۱				
۶												سطح ۲	۳۰				سطح ۲	۲			
۷					---			---	سطح ۱			سطح ۱	۳۱	---	---	سطح ۱	سطح ۱				
۸												سطح ۲	۳۲				سطح ۲	۲			
۹			سطح ۱	---					سطح ۲	سطح ۱	۳۳	---	---			سطح ۲	سطح ۱				
۱۰										سطح ۲	۳۴						سطح ۲	۲			
۱۱									---	---	سطح ۳					سطح ۱	۳۵	---	---	سطح ۳	سطح ۱
۱۲																سطح ۲	۳۶				سطح ۲
۱۳	---	---				سطح ۱	سطح ۱		۳۷	---	---					سطح ۱	سطح ۱				
۱۴							سطح ۲		۳۸								سطح ۲	۲			
۱۵			---	---		سطح ۲	سطح ۱		۳۹			---	---			سطح ۲	سطح ۱				
۱۶							سطح ۲		۴۰								سطح ۲	۲			
۱۷			---	---		سطح ۳	سطح ۱		۴۱			---	---			سطح ۳	سطح ۱				
۱۸							سطح ۲		۴۲								سطح ۲	۲			
۱۹	---	---	سطح ۱	سطح ۱	۴۳	---	---	سطح ۱	سطح ۱												
۲۰				سطح ۲	۴۴				سطح ۲	۲											
۲۱			---	---	سطح ۳			سطح ۱	۴۵	---	---	سطح ۳	سطح ۱								
۲۲								سطح ۲	۴۶				سطح ۲	۲							
۲۳					---			---	سطح ۳			سطح ۱	۴۷	---	---	سطح ۳	سطح ۱				
۲۴												سطح ۲	۴۸				سطح ۲	۲			

## جدول ۲- سطوح مختلف سرعت، بار و درجه عیب

ناهمراستایی	بار	سرعت	عیب بلبرینگ
۰.۲۵ میلیمتر اختلاف در ساعت اندازه گیری نسبت به حالت همراستا	وجود دیسک روی شفت بدون بستن پیچ و مهره روی آن	سرعت اسمی الکتروموتور	۱ میلیمتر سوراخ در جداره خارجی بلبرینگ
۰.۵ میلیمتر اختلاف در ساعت اندازه گیری نسبت به حالت همراستا	وجود دیسک روی شفت با بستن پیچ و مهره در یک ردیف از سوراخ های دیسک	کمتر از سرعت اسمی الکتروموتور	
۱ میلیمتر اختلاف در ساعت اندازه گیری نسبت به حالت همراستا	وجود دیسک روی شفت با بستن پیچ و مهره در هر دو ردیف از سوراخ های دیسک	---	

به منظور ایجاد عدم هم محوری، با استفاده از ساعت اندازه گیری و مکانیزم ایجاد ناهمراستایی، در سه سطح مختلف ناهمراستایی زاویه ای بر سیستم اعمال شده است و از دیسک که روی آن سوراخ هایی برای اضافه کردن وزن تعبیه شده است برای ایجاد بار روی سیستم استفاده شد. همچنین مطابق شکل (۵) برای شبیه سازی عیب بلبرینگ، سوراخی به قطر یک میلیمتر در جداره خارجی بلبرینگ ایجاد شده است. با توجه به بلبرینگ مورد آزمایش در این تحقیق بر اساس سرعت دوران الکتروموتور (۲۴/۵ هرتز) همانطور که اشاره شد میتوان فرکانس های مشخصه عیوب آنرا از روابط (۶) تا (۹) به دست آورد که در اینجا فرکانس مشخصه مربوط به عیب در جداره خارجی بلبرینگ ۷۴/۸ هرتز خواهد بود.

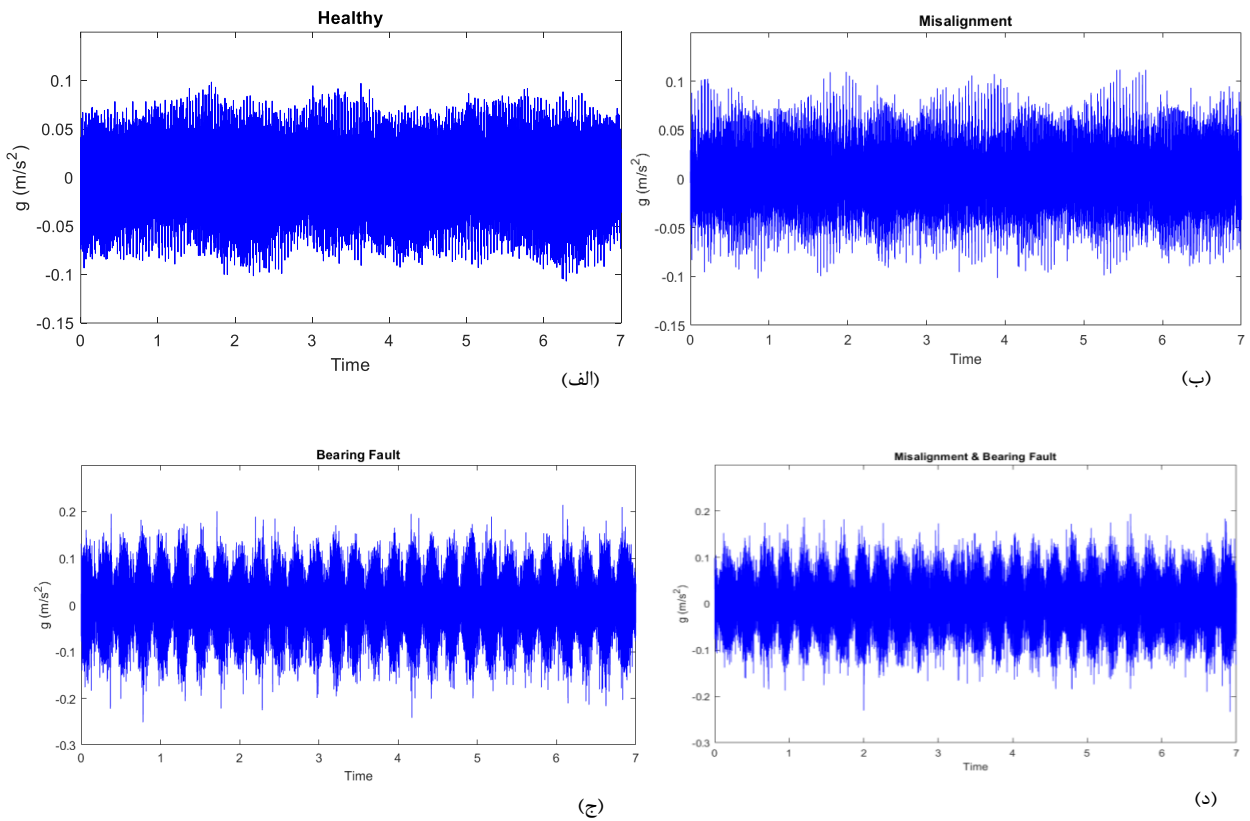
مطابق جدول (۱) در این پژوهش ۴۸ آزمایش (بر مبنای طراحی عاملی کامل<sup>۱</sup> چند سطحی) در شرایط مختلف دور و بار صورت گرفته است که ۶ تست اول مربوط به شرایط سالم، ۱۸ تست بعدی مربوط به ناهمراستایی، ۶ تست بعدی مربوط به بلبرینگ معیوب و ۱۸ تست انتهایی مربوط به سیستم با عیوب همزمان است که در نهایت ۴ کلاس متفاوت برای شرایط سیستم پایش وضعیت خواهیم داشت. جدول (۲) سطوح مختلف سرعت، بار و درجه عیب را بیان می کند.

## ۴- تحلیل نتایج

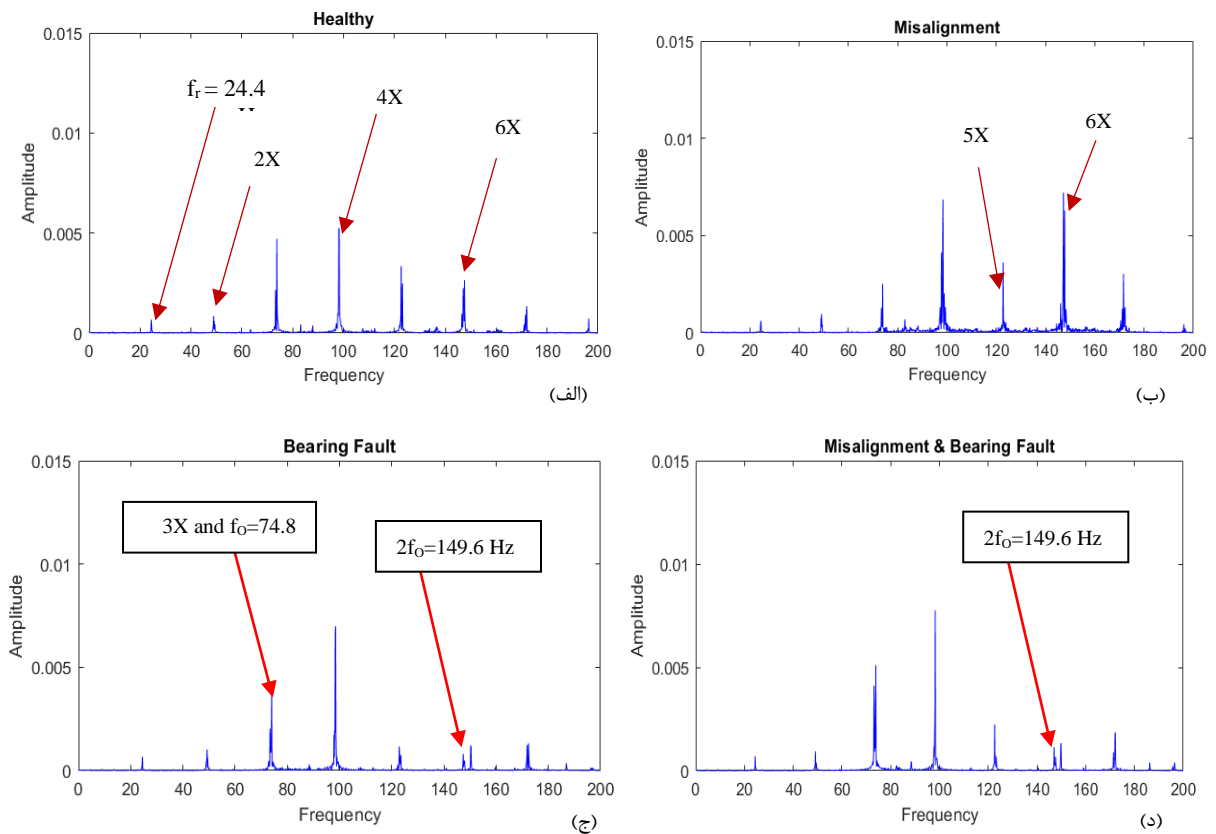
## ۴-۱- تحلیل سیگنال ارتعاشی، نتایج و نمودارها

شکل (۶) سیگنال حوزه زمان و شکل (۷) طیف فرکانسی سیگنال های ارتعاشی متناسب با آن و مربوط به ۴ حالت موتور الکتریکی را نشان می دهد. شکل (۷-الف) مربوط به شرایط سالم سیستم است که در آن فرکانس دور و هارمونیک های آن مشخص هستند. شکل (۷-ب) مربوط به شرایط ناهمراستایی در سیستم است که در آن افزایش قابل توجه دامنه هارمونیک ششم (6X) نسبت به حالت سالم را شاهد هستیم. از آنجایی که کوپلینگ مورد استفاده از ۶ شاخک تشکیل شده است، لذا انتظار این می رود که در این فرکانس اطلاعاتی مربوط به شرایط هم محوری سیستم نهفته باشد که در همین راستا اگر نسبت هارمونیک ششم دور (6X) به هارمونیک پنجم دور (5X) با هدف نزدیکترین هارمونیک به 6X را مورد بررسی قرار دهیم در صورت عدم وجود عیب بلبرینگ در سیستم به خصوص در سرعت پایین، دامنه این نسبت فرکانسی شرایط ناهمراستایی را به خوبی از شرایط سالم سیستم متمایز می کند.

<sup>1</sup>Full Factorial Design

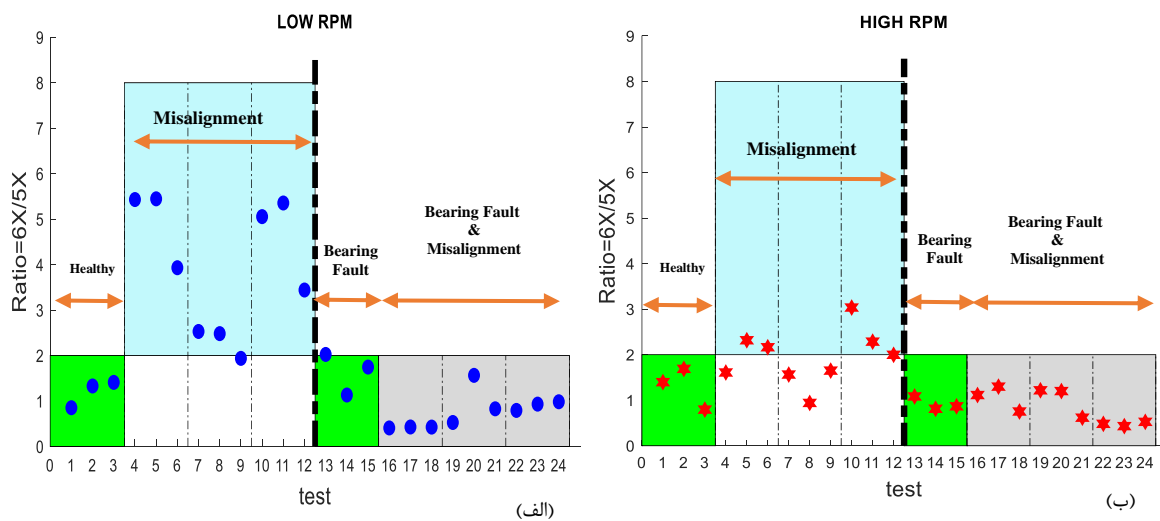


شکل ۶- سیگنال حوزه زمان مربوط به حالات سالم (الف)، ناهمراستایی (ب)، بلبرینگ معیوب (ج) و عیوب همزمان (د)



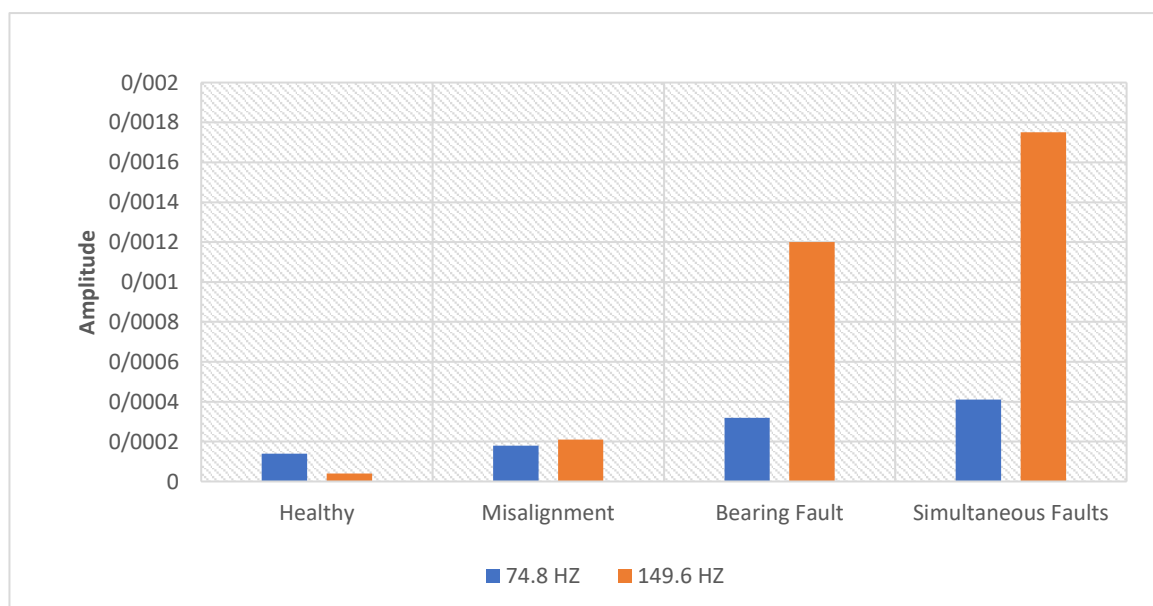
شکل ۷- طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشات مربوط به حالات سالم (الف)، ناهمراستایی (ب)، بلبرینگ معیوب (ج) و عیوب همزمان (د)

اما در سرعت دوران بالا طبق شکل (۸) نتیجه‌ای را ارائه می‌دهد که تقریباً نمی‌توان بر اساس آن در مورد سیستم به خوبی اظهار نظر کرد. اما مسئله‌ای که وجود دارد این است که در هر حال در صورت وجود عیب بلبرینگ، شناسایی ناهم‌راستایی از طریق چنین ویژگی ناممکن یا بسیار دشوار به نظر می‌رسد. با توجه به شکل (۷-ج) در حالت بلبرینگ معیوب شاهد افزایش دامنه فرکانس  $74/8$  و هارمونیک دوم آن ( $149/6$  هرتز) هستیم که فرکانس  $74/8$  به علت نزدیکی زیاد به هارمونیک سوم دور (تقریباً  $74$  هرتز) به وضوح مشخص نیست. میزان اختلاف دامنه فرکانس‌های مربوط به عیب در جدار خارجی بلبرینگ در شرایط مختلف را در شکل (۹) مشاهده می‌کنیم. در حالت عیوب همزمان (شکل ۷-د) نیز تفاوت چندانی با حالت عیب تنها بلبرینگ مشاهده نمی‌شود.



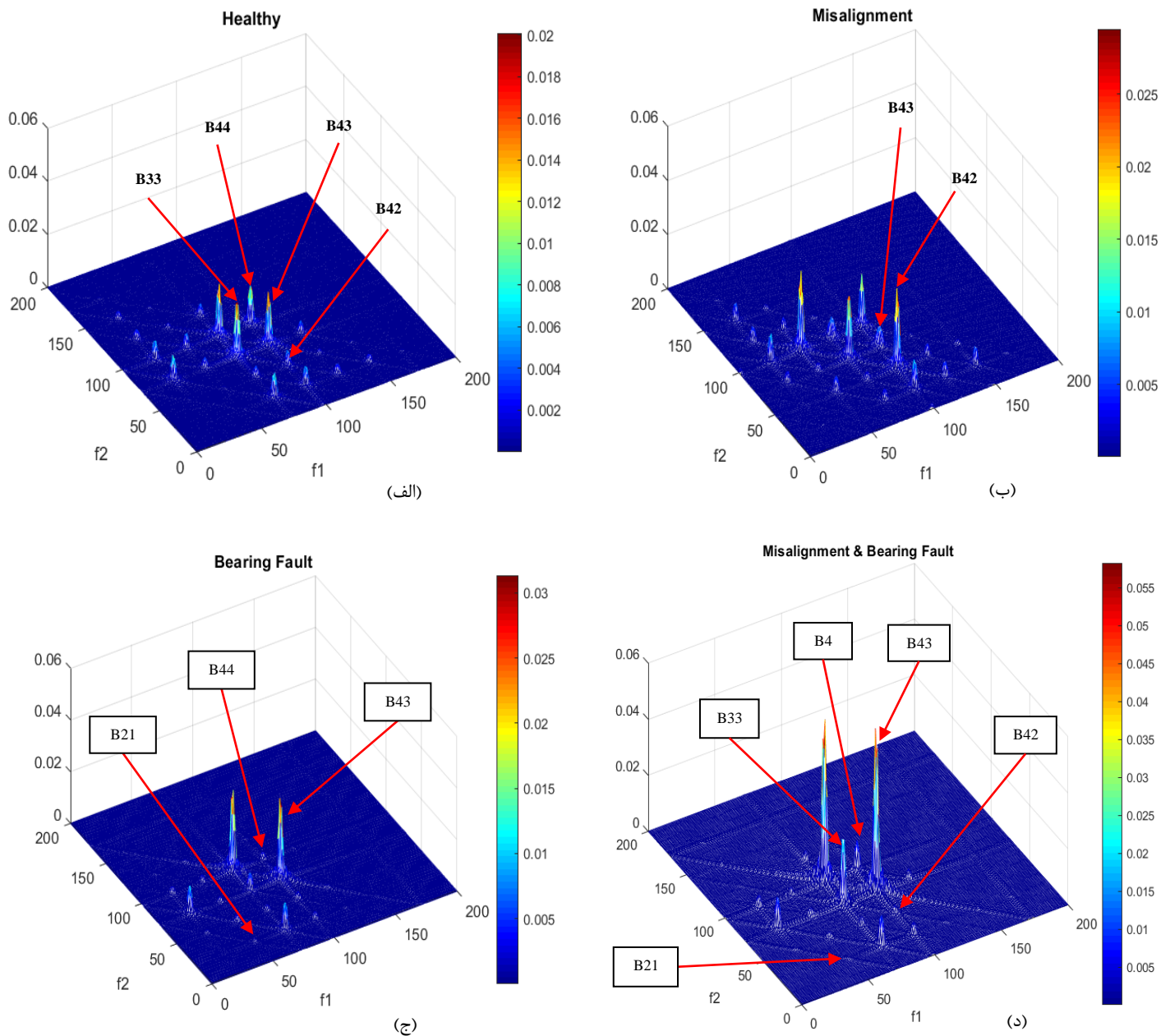
شکل ۸- نسبت دامنه هارمونیک 6X به 5X طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشات

(الف) تست‌های مربوط به سرعت پایین (۲۴ تست اول از مجموع ۴۸ تست) (ب) تست‌های مربوط به سرعت بالا (سرعت نامی)



شکل ۹- مقادیر دامنه فرکانس  $74/8$  و هارمونیک دوم آن ( $149/6$  هرتز) در شرایط مختلف

در ادامه شکل (۱۰) تحلیل بای اسپکتروم را برای شرایط مختلف سیستم نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰-الف) در شرایط سالم، تحریک شدن قابل توجه کوپل فرکانس‌های (B33)، (B44)، (B43) و برخی دیگر که دارای دامنه کمتری می‌باشند را شاهد هستیم که پارامتر B33 به علت وجود ارتباطی در سیستم در رخ دادن هارمونیک سوم و هارمونیک ششم است. پارامتر B44 به علت وجود ارتباط در رخ دادن هارمونیک چهارم و هارمونیک هشتم اتفاق افتاده است. همچنین B43 ارتباط بین هارمونیک چهارم، سوم و هفتم را بیان می‌کند. و در نهایت B42 بیانگر میزان ارتباط بین هارمونیک دوم (۴۹ هرتز)، هارمونیک چهارم (۹۸ هرتز) و مجموع این دو هارمونیک (6x) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمای کلی بای اسپکتروم مربوط به سیستم در چهار حالت سالم (الف)، ناهمراستایی (ب)، بلبرینگ معیوب (ج) و عیوب هم‌زمان بلبرینگ و ناهمراستایی (د)

- در شرایط وجود ناهم‌راستایی در شکل (۱۰-ب)، کوپل فرکانس B42 به شدت با افزایش دامنه مواجه شده که در شرایط سالم هرگز چنین ارتباطی قابل مشاهده نیست. از طرفی وجود پارامتر B33 و B44 در هر دور شرایط تقریباً یکسان بوده و پارامتر B43 نیز در شرایط وجود ناهم‌راستایی با کاهش دامنه قابل توجهی نسبت به حالت سالم مواجه شده است.
- در شکل (۱۰-ج) در حالتی که بلبرینگ معیوب است، به‌وضوح افزایش دامنه پارامتر B43 و همچنین کاهش قابل توجه دامنه پارامتر B44 را در حالت بلبرینگ معیوب نسبت به شرایط سالم شاهد هستیم. همچنین پیدایش کوپل فرکانس (50,25) را در موقعیت B21 شاهد هستیم که بیانگر ارتباط فرکانس‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ هرتز خواهد بود که نشان دهنده این است که بای‌اسپکتروم به خوبی نسبت به فرکانس عیب در جداره خارجی بلبرینگ واکنش نشان داده است.
- در صورت وجود عیوب به صورت همزمان در سیستم، مطابق شکل (۱۰-د)، همانطور که مشاهده می‌شود، در این حالت عیب بلبرینگ به صورت کاملاً واضح قابل تشخیص بوده و تمام ویژگی‌های تحلیل بای‌اسپکتروم مربوط به سیستم تحت عیب بلبرینگ را دارا می‌باشد. چرا که اختلاف دامنه پارامتر B43 از پارامترهای B44 و B33 به شدت افزایش یافته و پارامتر B21 نیز در این حالت نمود پیدا کرده است. اما مسئله ای که در اینجا وجود دارد این است که هرچند در حالت وجود عیوب به صورت همزمان، عیب بلبرینگ قابل تشخیص و تفکیک است، امام وجود این عیب مانع از تشخیص عیب ناهم‌راستایی در سیستم شده است. چراکه پارامترهای B42 و B43 که در حالت وجود ناهم‌راستایی به صورت تکی بعنوان شاخصی برای ارزیابی تشخیص این عیب در نظر گرفته شده بود، در این حالت حاوی اطلاعاتی مبنی بر وجود عیب ناهم‌راستایی در سیستم نیست.

#### ۴-۲- پارامترهای حوزه زمان، فرکانس و بای‌اسپکتروم بمنظور عیب یابی موتور القایی

در این مطالعه از پارامترهای مرسوم حوزه زمان، حوزه فرکانس و آنالیز بای‌اسپکتروم جهت بررسی و تشخیص عیوب همزمان بلبرینگ و ناهم‌راستایی شفت خروجی موتورهای القایی استفاده شده است. در حوزه زمان، ۶ پارامتر شامل ماکزیمم<sup>۱</sup>، RMS<sup>۲</sup>، فاکتور قله<sup>۳</sup>، واریانس<sup>۴</sup>، کورتوسیس<sup>۵</sup> و اسکینوس<sup>۶</sup> جهت ورودی‌های الگوریتم کلاس بندی انتخاب شده‌اند. ۶ پارامتر استخراج شده از سیگنال حوزه زمان، از طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشات نیز استخراج شده و بعنوان ورودی کلاس‌بند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین برای سیگنال ارتعاشات در حوزه فرکانس اگر  $X_n$  بیانگر هارمونیک n ام فرکانسی باشد، مطابق روند زیر، ۲۸ ویژگی حاصل از نسبت‌های فرکانسی استخراج شده‌اند. به عنوان مثال شماره ۱، بیانگر نسبت دامنه هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم، هفتم و هشتم نسبت به هارمونیک اول است.

<sup>1</sup> Max

<sup>2</sup> Root Mean Square

<sup>3</sup> Crest Factor

<sup>4</sup> Variance

<sup>5</sup> Kurtosis

<sup>6</sup> Skewness

1)  $X_{n+1} / X_1 \mid n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

5)  $X_{n+1} / X_5 \mid n=5, 6, 7$

2)  $X_{n+1} / X_2 \mid n=2, 3, 4, 5, 6, 7$

6)  $X_{n+1} / X_6 \mid n=6, 7$

3)  $X_{n+1} / X_3 \mid n=3, 4, 5, 6, 7$

7)  $X_{n+1} / X_7 \mid n=7$

4)  $X_{n+1} / X_4 \mid n=4, 5, 6, 7$

در ادامه برای روش آنالیز بای اسپکتروم، همانطور که اشاره شد ۵ پارامتر شامل دامنه پیکها در کوپل فرکانسهای B21، B33، B42، B43 و B44 از اهمیت خاصی به‌منظور تشخیص عیب برخوردار بودند و به‌عنوان پارامترهای حاصل از این تحلیل انتخاب شدند.

به این ترتیب مجموعاً ۴۵ پارامتر برای سیگنال ارتعاشی خواهیم داشت که شامل ۶ پارامتر آماری حوزه زمان، ۶ پارامتر آماری حوزه فرکانس، ۲۸ نسبت دامنه هارمونیک‌ها و ۵ پارامتر از آنالیز بای اسپکتروم خواهد بود. از طرفی از آنجایی که قضاوت بر مبنای تعداد زیادی از پارامترها اولاً زمان‌بر بوده و دوماً می‌تواند گیج‌کننده باشد لذا نیازمند این هستیم که ابعاد ویژگی‌ها را کاهش داده و بتوانیم با تعداد ویژگی کمتر عملیات عیب‌یابی را انجام دهیم. برای این منظور الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق ما از آنالیز مولفه اساسی<sup>۱</sup> استفاده کرده ایم که در ادامه به آن می‌پردازیم.

#### ۴-۳- آنالیز مؤلفه اساسی

از آنجایی که تعداد پارامترهای بدست آمده در این پژوهش زیاد هستند، به‌منظور تسریع در کلاس بندی به نحوی که بتوان با تعداد ویژگی‌های کمتر و سریعتر عملیات کلاس بندی را انجام داد نیازمند این هستیم که ابعاد ویژگی را کاهش دهیم. برای این منظور از آنالیز مؤلفه‌های اساسی بهره گرفته شده است. PCA همان‌طور که از نامش پیداست می‌تواند مولفه‌های اصلی را شناسایی کند و به ما کمک می‌کند تا به جای اینکه تمامی ویژگی‌ها را مورد بررسی قرار دهیم، یک سری ویژگی‌هایی را که ارزش بیشتری دارند، تحلیل کنیم. درواقع عملکرد اصلی PCA به این صورت است که تمام ویژگی‌های ورودی یک سیستم را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و نهایتاً ترکیبی از آن‌ها را بعنوان ویژگی‌های برتر در دسترس قرار خواهد داد.

#### ۵- کلاس بندی داده‌ها از طریق نرم افزار متلب

باتوجه به اینکه چهار حالت سیستم سالم، سیستم دارای عیب ناهم‌راستایی، سیستم دارای عیب بلبرینگ و سیستم با عیوب هم‌زمان ناهم‌راستایی و عیب بلبرینگ، تحت شرایط مختلف دور و بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفته است، این شرایط به چهار کلاس مستقل تقسیم شده و در نهایت برای حالات مختلف سیستم به ترتیب ۶، ۱۸، ۶ و ۱۸ نوع داده مختلف در دسترس خواهد بود که از هر کلاس تعدادی داده برای آموزش و تعدادی برای تست انتخاب خواهند شد.

<sup>1</sup> Principle Component Analysis (PCA)

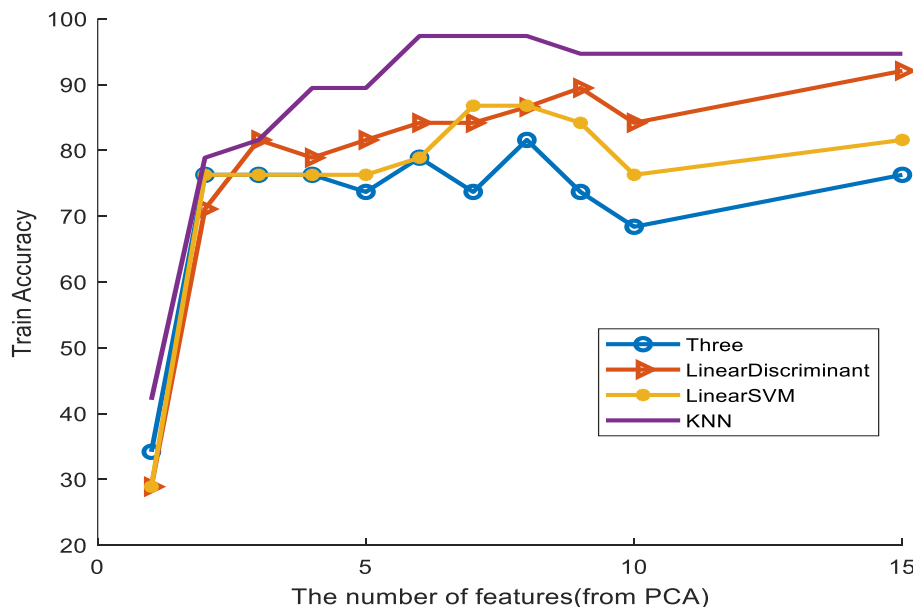
در این پژوهش با استفاده از جعبه ابزار Classification Learner نرم افزار متلب<sup>۱</sup>، الگوریتم‌های مختلف جهت کلاس بندی سیگنال‌ها آزمایش شد. بدین صورت که ۸۰ درصد از داده‌های موجود از هر کلاس را بعنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد از آنها را به عنوان داده‌های آزمایش الگوریتم کلاس بندی استفاده شده است.

### ۵-۱- انتخاب الگوریتم کلاس‌بندی و بررسی تعداد ویژگی‌های بهینه قابل استفاده از نتایج PCA

در این بخش ویژگی‌های حاصل از سیگنال ارتعاشات را مورد بررسی قرار داده و دلیل انتخاب‌هایی چون تعداد ویژگی‌های استخراج شده توسط PCA و همچنین نوع الگوریتم کلاس‌بندی را مشخص خواهیم کرد.

اگر نتایج دقت<sup>۲</sup> در مرحله آموزش روش‌های کلاسه بندی را نشان دهیم، همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است، الگوریتم KNN بالاترین دقت آموزش را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها ارائه می‌دهد. از طرفی در همان شکل (۱۱) مشخص است که در الگوریتم KNN با انتخاب تعداد ویژگی‌های مستخرج از PCA با تعداد بالاتر از ۶ ویژگی تغییر چندانی در دقت آموزش نداشته و فقط موجب افزایش زمان تحلیل خواهد شد. بنابراین براساس نتایج ذکر شده در این بخش، الگوریتم KNN با  $K=1$  به منظور کلاس بندی انتخاب شده است. همچنین از آنجاکه در هر مرتبه اجرای برنامه‌ها تعداد ۸۰ درصد داده‌ها بصورت اتفاقی برای آموزش انتخاب می‌شوند، جدول (۳) تکرارپذیری الگوریتم KNN را تحت ۱۰ تکرار نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این جدول مشخص است، از شرایط تقریباً پایداری برای آموزش بهره‌مند هستیم بطوریکه میانگین دقت در مرحله آموزش الگوریتم KNN تقریباً ۹۲ درصد است.



شکل ۱۱- دقت آموزش روش‌های مختلف کلاس‌بندی با تعداد ویژگی‌های متفاوت انتخاب شده از PCA

<sup>۱</sup> MATLAB

<sup>۲</sup> Accuracy

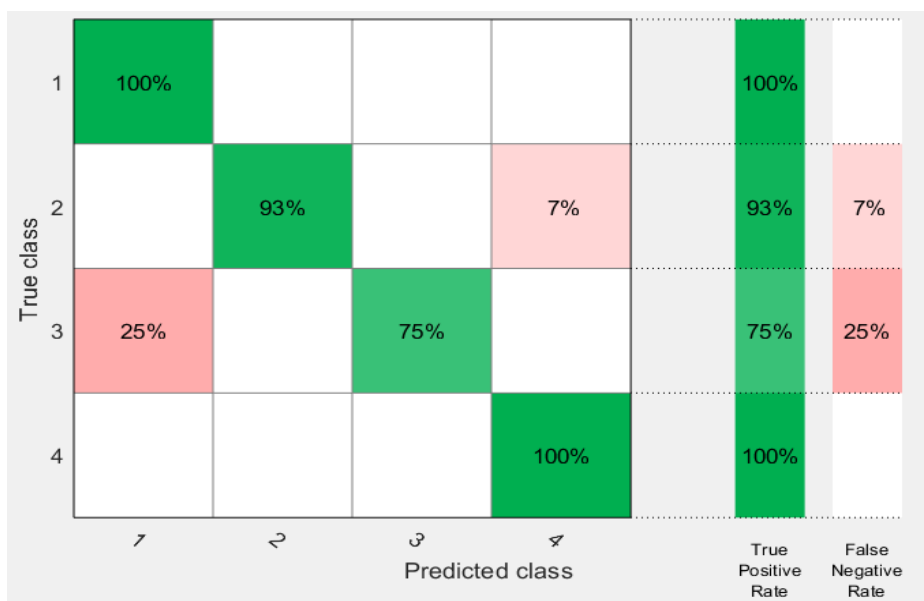


## جدول ۳- تکرارپذیری الگوریتم KNN برای ده بار تکرار آموزش به کمک ۶ ویژگی از PCA

Repeat	Accuracy
1	90.25
2	91.7
3	94
4	91.7
5	90.25
6	91.7
7	94
8	91.7
9	94
10	91.7
<b>Mean</b>	<b>92.1</b>

## ۵-۲- نتایج آموزش شبکه

شکل (۱۲) نتیجه آموزش الگوریتم کلاس بندی KNN را با استفاده از ۶ ویژگی مستخرج از اعمال روش PCA بر روی پارامترهای حوزه زمان، فرکانس و بای اسپکتروم سیگنال های ارتعاشی را نشان می دهد که در این حالت برآیند دقت کلاس بندی داده های آموزش برای تمام کلاس ها ۹۴/۷ درصد بوده و همانطور که مشخص است، کلاس ۱ و ۴ که به ترتیب مربوط به شرایط سالم و عیوب همزمان سیستم هستند با نهایت دقت و کلاس ۲ و ۳ که به ترتیب مربوط به سیستم با عیب ناهمراستایی و عیب بلبرینگ به تنهایی است، با دقت ۹۳ و ۷۵ درصد کلاس بندی شده اند.



شکل ۱۲- نتیجه آموزش الگوریتم کلاس بندی با استفاده از ویژگی های سیگنال ارتعاشات

## جدول ۴- نتایج کلاس بندی داده های آزمایش

Actual Condition	Detection by vibration features	
Healthy	Healthy	✓
Healthy	Healthy	✓
Just Misalignment	Just Misalignment	✓
Just Misalignment	Just Misalignment	✓
Just Misalignment	Just Misalignment	✓
Just Bearing Fault	Just Bearing Fault	✓
Just Bearing Fault	Simultaneous Faults	×
Simultaneous Faults	Simultaneous Faults	✓
Simultaneous Faults	Simultaneous Faults	✓
Simultaneous Faults	Simultaneous Faults	✓

## ۵-۳- نتیجه مرحله تست کلاس بندی و شناسایی عیوب

برای آزمودن مدل های آموزش دیده برای شرایط مختلف سیستم، بایستی ۲۰ درصد داده هایی که برای مرحله تست کنار گذاشته شده بود را بر روی آن ها آزمایش نماییم. برای کلاس ۱ (شرایط سالم) و کلاس ۳ (بلبرینگ معیوب) دو نمونه داده تست و برای کلاس ۲ (ناهم راستایی) و کلاس ۴ (عیوب همزمان)، سه نمونه داده تست را مورد ارزیابی قرار داده ایم که جدول (۴) نتایج کلاس بندی برای داده های تست را نشان می دهد. همان طور که در نتایج مشخص است، شرایط سالم سیستم و همچنین عیوب بصورت تکی و همزمان به خوب شناسایی شده اند. با توجه به یک پیش بینی اشتباه سیستم پایش عیوب بلبرینگ و عدم هم محوری شفت خروجی موتور القایی از ۱۰ مورد تست، می توان گفت که سیستم در مجموع ۱۰ درصد خطا دارد. ولی باید دقت کرد که خصوصیت اصلی این سیستم در قابلیت تشخیص دو عیب مکانیکی بسیار رایج در موتور های القایی چه در حالت تک عیب و چه در حالت دو عیب همزمان است. همچنین بر خلاف اکثر سیستم های عیب یابی موتور های القایی که بدنبال عیب های الکتریکی با درصد وقوع کمتر و استفاده از سیگنال جریان الکتریکی موتور در کنار سیگنال ارتعاشی هستند، سیستم پایش ارائه شده در این مقاله تنها از سیگنال ارتعاشی برای تشخیص دو عیب مکانیکی بسیار رایج موتور القایی استفاده کرده است. در نهایت این سیستم بدون خطا توانسته است تمام موارد عیوب همزمان بلبرینگ و عدم هم محوری را پیش بینی کند.

## ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مطالعه به بررسی عیوب همزمان بلبرینگ و عدم هم محوری شفت خروجی موتور های القایی پرداخته شد که از درصد وقوع بسیار بالایی نسبت به عیوب دیگر برخوردار هستند. برای این منظور با استفاده از سیگنال ارتعاشات، آنالیزهایی در حوزه زمان و فرکانس جهت عیب یابی سیستم انجام گرفت که در ادامه ویژگی هایی شامل پارامترهای آماری در حوزه زمان و فرکانس بعلاوه نسبت هارمونیک ها و همچنین تحلیل پیشرفته بای اسپکتروم در حوزه فرکانس از سیگنال ها استخراج شد که به منظور کاهش ابعاد ویژگی با هدف کاهش

فضای ذخیره سازی اطلاعات و همچنین پردازش سریع‌تر اطلاعات از الگوریتم PCA بهره گرفته شد. در ادامه داده‌های سیستم توسط برنامه کلاسه بندی KNN به چهار کلاس که به ترتیب شامل شرایط سالم، ناهمراستایی، بلبرینگ معیوب و عیوب همزمان است، تقسیم شده و از هر کلاس داده‌هایی برای آموزش و تست به کار گرفته شدند.

نتایج بدست آمده نشان دهنده این است که استفاده از آنالیز بای اسپکتروم سیگنال ارتعاشی به همراه روش‌های مرسوم پردازش سیگنال قابلیت تشخیص عیوب بلبرینگ و عدم هم‌محوری شفت خروجی موتورهای القایی را چه بصورت تک عیب و چه بصورت هم‌زمان دارا بوده و می‌تواند برای تشخیص عیوب مکانیکی موتورهای القایی تنها با اندازه گیری سیگنال ارتعاشی با دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار بگیرد.

در نهایت نوآوری و مزایای روش پیشنهادی را می‌توان اینگونه بیان نمود که:

- عیوب ترکیبی بلبرینگ و ناهمراستایی مورد مطالعه قرار گرفته است که در دیگر منابع، یا عیوب به صورت ترکیبی بررسی نشده اند و یا ترکیب عیوب شامل موارد مذکور نبوده است.
- صرفاً از یک حسگر ارتعاشی، در یک جهت (عمودی) و فقط روی خود الکتروموتور (در نزدیکترین مکان به بلبرینگ داخلی خود الکتروموتور) بهره گرفته شده است. در حالیکه در اکثر مطالعات مانند مرجع [11] از چند سنسور در چند محل مختلف استفاده شده است.
- هزینه اجرای پایش وضعیت به مراتب نسبت به حالت چند سنسور پایین تر خواهد بود.
- بدون کوچکترین آسیبی به سیستم مورد آزمایش، حسگر شتاب سنج نصب شده است. در حالیکه در بعضی مطالعات برای ثبت دقیق تر داده‌ها و با هدف بهبود نتایج بدست آمده، اقدام به سوراخ ناحیه‌ای از همسایگی بلبرینگ برای نصب حسگرها می‌شود.
- شرایط عیب ناهمراستایی در سیستم نیز صرفاً با داده‌های حاصل از حسگر نصب شده روی الکتروموتور ارزیابی شده است. بنابراین با پایش یک نقطه چندین متغیر از شرایط مهم سیستم پایش وضعیت شده و عملیات عیب یابی صورت گرفته است.
- با طراحی آزمایش به صورت طراحی عاملی کامل چندسطحی، تمام شرایط ممکن سیستم مورد آزمایش ارزیابی قرار گرفته و بنابراین اثر شدت متغیرها نیز بررسی شده اند.

## مراجع

[1] M. Demetgul and M. Ünal, Fault Diagnosis and Detection. InTech, 2017.

[2] K. M. Siddiqui, K. Sahay, and V. K. Giri, "Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor- A Review," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, Vol. 3, No. 1, pp. 2320–3765, 2014, Retrieved from <http://www.ijareeie.com/volume-3-issue-1>.

[3] T. Ciszewski, L. Swędrowski, and L. Gelman, "Induction Motor Bearings Diagnostic Using MCSA and Normalized Tripple Covariance," In *Proceedings - SDEMPED 2015: IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 2015, pp. 333–337, <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2015.7303711>.

- [4] A. K. Verma, S. Sarangi, and M. H. Kolekar, "Misalignment Fault Detection in Induction Motor Using Rotor Shaft Vibration and Stator Current Signature Analysis," *Int. J. Mechatronics Manuf. Syst.*, Vol. 6, No. 5–6, pp. 422–436, 2013, <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2013.058519>.
- [5] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartfield, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring," In *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 6, pp. 1274-1279, Nov.-Dec. 1995, <https://doi.org/10.1109/28.475697>.
- [6] M. Vishwakarma, R. Purohit, V. Harshlata, and P. Rajput, "Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review," In *Materials Today: Proceedings*, 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 2659–2664, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.140>.
- [7] N. Tandon and A. Choudhury, "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings," *Tribol. Int.*, Vol. 32, No. 8, pp. 469–480, Aug. 1999, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8).
- [8] M. Xu and R. D. Marangoni, "Vibration Analysis Of A Motor-flexible Coupling-rotor System Subject to Misalignment and Unbalance, Part II: Experimental Validation," *J. Sound Vib.*, Vol. 176, No. 5, pp. 681–691, Oct. 1994, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1406>.
- [9] D. F. A. Santiago and R. Pederiva, "Application of Wavelet Transform to Detect Faults in Rotating Machinery," In *ABCMS Symposium Series in Mechatronics*, 2004, Vol. 1, pp. 616–624, <https://doi.org/10.7763/IJMLC.2012.V2.93>.
- [10] J. K. Sinha and K. Elbhah, "A Future Possibility of Vibration Based Condition Monitoring of Rotating Machines," *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 34, No. 1–2, pp. 231–240, Jan. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.07.001>.
- [11] K. Elbhah and J. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Rotating Machine Using Composite Bispectrum," In *Rasd International Conference*, 2013, No. July, Retrieved from <https://www.ocs.soton.ac.uk/index.php/rasdconference/RASD2013/paper/view/1036>.
- [12] A. L. Gama, W. B. de Lima, and J. P. S. de Veneza, "Detection of Shaft Misalignment Using Piezoelectric Strain Sensors," *Exp. Tech.*, Vol. 41, No. 1, pp. 87–93, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0158-x>.
- [13] F. Dalvand, A. Kalantar, and M. S. Safizadeh, "A Novel Bearing Condition Monitoring Method in Induction Motors Based on Instantaneous Frequency of Motor Voltage," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 1, pp. 364–376, Jan. 2016, <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2464294>.
- [14] B. Liang, S. D. Iwnicki, and Y. Zhao, "Application of Power Spectrum, Cepstrum, Higher Order Spectrum and Neural Network Analyses for Induction Motor Fault Diagnosis," *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 39, No. 1–2, pp. 342–360, Aug. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.02.016>.
- [15] C. S. P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. 2016.

[16] K. C. Chua, V. Chandran, U. R. Acharya, and C. M. Lim, "Application of Higher Order Statistics/Spectra in Biomedical Signals-A Review," *Medical Engineering and Physics*, Vol. 32, No. 7. Elsevier, pp. 679–689, 01-Sep-2010, <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.04.009>.

[17] J. Zarei, J. Pashtan, "A New Bearing Condition Monitoring Method in Induction Motors Using Park Transform," *In the 20th International Electricity Conference, 2005*, No. Oct, Retrieved from <https://civilica.com/doc/20357>.

## **Diagnosing Simultaneous Faults of Bearing and Misalignment in Induction Motor using Combined Method of Bispectrum Analysis of Vibration Signal and KNN Algorithm**

**Reza Dardmand**

M.Sc. Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,  
Tehran, Iran

Reza\_Dardmand@mecheng.iust.ac.ir

\*Corresponding author: **Mir Saeed Safizadeh**

Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,  
Tehran, Iran

Safizadeh@iust.ac.ir

### **Abstract**

The monitoring system for induction motors (IMs) plays an important role in the majority of industrial plants. Bearing faults and shaft misalignment are common mechanical defects in induction motors. The aim of this paper is to detect simultaneously two common faults in induction motor including bearing defect and shaft misalignment. For this purpose, a test setup consisting of an induction motor coupled to a rotor shaft is designed and tested under different loading conditions and at different speeds. The diagnosis parameters of vibration signal are calculated by conventional signal processing methods as well as bispectrum analysis. Feature extraction and KNN classification techniques are applied to the calculated parameters to provide condition monitoring of the induction motor. The results show that the application of bispectrum analysis along with the conventional signal processing methods improves detecting bearing fault in induction motor and shaft misalignment in the case of single fault as well as multiple simultaneous faults.

*Keywords:* Fault diagnosis, Induction motors, Vibration analysis, Bearing defects, Misalignment, Bispectrum