



تشخیص عیب یاتاقان‌های پمپ سانتریفیوژ با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیل مولفه‌های غیروابسته و بهینه‌سازی دسته ذرات

مهدی شکارزاده^{*}، محمد صادق اعلائی^۱

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول: mehdishekarzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

چکیده

باتوجه به پیشرفت علوم فنی و مهندسی و پیچیده‌تر شدن تجهیزات و ماشین‌آلات در سال‌های اخیر، تکنولوژی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر پایش وضعیت و برآورد عیب تحت عناوین مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های عیب‌یابی هوشمند برای شناسایی خرابی ماشین‌های دوار در مراحل اولیه خرابی به منظور جلوگیری از زیان‌های جانی، مالی و افزایش آهنگ تولید استفاده می‌شوند. در این مقاله یک سیستم عیب‌یابی برای تشخیص عیب یاتاقان پمپ سانتریفیوژ ارائه شده است. برای طراحی این سیستم عیب‌یابی هوشمند، مجموعه آزمایشی شامل محور، یاتاقان و شرایط تکیه‌گاهی واقعی در آزمایشگاه طراحی و اجرا شد. در این مجموعه آزمایشگاهی داده‌های ارتعاشی مورد نیاز از سه یاتاقان با شرایط یک عدد سالم، یک عدد فرسوده و یک عدد یاتاقان دارای کنس خارجی خراب پس از نصب (به صورت جداگانه) برداشت شد. پس از تشریح سیگنال‌ها در حوزه زمان، سیگنال نهایی استخراج گردید و سپس ویژگی‌های گوناگون به‌دست آمده از سیگنال‌ها به عنوان داده‌های ورودی طبقه‌بندی کننده استفاده گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، از میان ویژگی‌های آماری مختلف، ویژگی صدک، مناسب‌ترین است. برای طبقه‌بندی و شناسایی عیب، از روش تحلیل مولفه‌های غیروابسته بهره برده شد و در نهایت دقت تشخیص عیب با استفاده از روش بهینه‌سازی دسته ذرات بهینه گردید و به بیش از سه برابر حالت غیربهینه ارتقا یافت.

کلمات کلیدی: تحلیل مولفه‌های غیروابسته، عیب‌یابی هوشمند، بهینه‌سازی دسته ذرات، پمپ سانتریفیوژ.

مقدمه

تمامی ماشین‌های دوار در حال کار به صورت پیوسته در حال مستهلک شدن و تخریب تدریجی به دلایلی از جمله: خستگی، تنش مکانیکی، افزایش دمای غیرعادی، سایش مکانیکی، خوردگی شیمیایی و غیره هستند. با استفاده از ابزارهای مناسب و برنامه‌ریزی‌های منسجم که بتواند اطلاعات مفید و کارساز در اختیار ما قرار دهد، می‌توان در زمینه کاهش خسارات و همچنین بروز حوادث برآورد نشده و خرابی زودرس گام برداشت. به همین دلیل استفاده از سیستم‌های نوین نگهداری و تعمیرات دارای اهمیت زیادی می‌باشد. باتوجه به پیشرفت علوم فنی و مهندسی و پیچیده‌تر شدن تجهیزات و ماشین‌آلات در سال‌های اخیر، از فن‌آوری تعمیرات و نگهداری مبتنی بر پایش وضعیت و برآورد عیب استقبال فراوانی شده است و تحت عناوین مختلفی از جمله پشتیبانی مبتنی بر عملکرد و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های عیب‌یابی برای شناسایی خرابی ماشین‌های دوار در مراحل اولیه خرابی به منظور جلوگیری از زیان‌های جانی، مالی و افزایش تولید استفاده می‌شوند. در این میان تجهیزات دواری نظیر پمپ‌ها که به صورت گسترده در صنایع مختلف از جمله پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، نیروگاه‌ها وجود دارند، که می‌توان با روش‌های پایش وضعیت هوشمند خرابی‌های آن‌ها را برآورد و یا تشخیص داد. نوع تجهیز، نوع سیگنال‌های دریافتی، ابزارهای مورد استفاده جهت داده‌برداری روش‌های متنوعی را برای پایش وضعیت تجهیز و برآورد خرابی در حال وقوع به وجود آورده است.

غفاری و همکاران [۱] به مطالعه‌ای جهت تشخیص هوشمند محل و نوع عیب در یاتاقان غلتشی با استفاده از روش ترکیب ماشین بردار پشتیبان و آنالیز مولفه‌های مستقل پرداختند. از آنالیز مولفه‌های مستقل برای استخراج ویژگی و برای کاهش ابعاد از ویژگی‌های اصلی استفاده نمودند، همچنین از آنالیز مولفه‌های اصلی جهت استخراج ویژگی استفاده گردید. در این مطالعه از طبقه بندی کننده چند کلاسه ماشین بردار پشتیبان برای طبقه بندی عیب استفاده شده است. جیان و همکاران [۲] مطالعه‌ای



بر روی تشخیص عیب یاتاقان غیر بالانس بر اساس دو ویژگی روش اسکات (SCOTE)^۱ و روش چند کلاسه (LS-SVM)^۲ پرداختند. روش تشخیص عیب جدید به نام تشخیص چند خطی نامتوازن مبتنی بر تکنیک نمونه‌گیری زیاد پیشنهاد شد و نشان دادند روش پیشنهادی دارای نرخ تشخیص خطا و استحکام الگوریتم بالاتری نسبت به ۸ الگوریتم نمونه برداری و ۸ الگوریتم نامتعادل چند طبقه است. هان و جئونگ [۳] مطالعه‌ای بر روی واقعی‌سازی، مدل‌های شبیه‌سازی از یک مدل گروهی وزنی شبکه عصبی کانولوشنال (CNN)^۳ با مقدار کمی داده برای تشخیص خرابی یاتاقان ساچمه‌ای انجام دادند. آنها در ابتدا نویز گوسی را به مجموعه داده دانشگاه کیس وسترن ریسرو آمریکا اضافه کردند تا به وضعیت واقعی کارخانه نزدیک شود. ثانیاً، آنها مدلی را اتخاذ کردند که ثبات و دقت بالاتری نسبت به یک شبکه عصبی کانولوشنال معمولی با ساخت مدل میانگین حسابی وزنی و مدل مجموعه شبکه عصبی کانولوشنال داشت. در نتیجه دقت و تجزیه و تحلیل امتیاز، مدل پیشنهادی آنها نتیجه بهتری نسبت به مدل میانگین ساده شبکه عصبی کانولوشنال و مجموعه شبکه عصبی کانولوشنال نشان داد. کندی و ابرهارت [۴] مفهومی جهت بهینه‌سازی توابع غیر خطی با استفاده از روش دسته ذرات معرفی نمودند که در این روش چندین پارادایم تشریح و شبکه عصبی هوشمند را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات بهینه نمودند و در این آزمایش نشان دادند بهینه‌سازی به خوبی عمل می‌کند. عطاران و همکاران [۵] بیان نمودند که روش اسمارتوگرام پیشنهادی، نیازمند به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. لذا برای این منظور روش متافیزیکی جدیدی، از عملکرد تنیدن تار و شکار حشرات توسط عنکبوت در طبیعت الهام گرفتند که به اسم الگوریتم عنکبوت مصنوعی نام‌گذاری شده است. در این روش ابتدا در محدوده‌ی مجاز برای جستجو، تار اولیه‌ای تنیده می‌شود. سپس از آنجایی که فقط از گره‌ها اطلاع دارد، لذا بهترین گره در واقع معادل گرفتار شدن یک حشره در حوالی آن گره است. در ادامه عنکبوت مصنوعی برای اطلاع از محل دقیق حشره و شکار کردن آن، یک تار کوچک با اندازه مشخص به مرکز گره هدف می‌تند. اکنون مقدار تابع هدف برای گره‌های این تار کوچک محاسبه و بهترین گره‌ی این تار کوچک نشان‌دهنده محل دقیق‌تر حشره خواهد بود.

هدف از این پژوهش، افزایش دقت تشخیص خرابی یاتاقان‌های پمپ سانتریفیوژ با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیل مولفه‌های غیر وابسته و بهینه‌سازی به روش دسته ذرات می‌باشد.

تحلیل مولفه‌های غیروابسته (ICA)^۴

تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته یک روش آماری به منظور پیدا کردن ساختار پنهان داده‌ها است. در این روش داده‌های چند بعدی به صورت ترکیب خطی از چندین متغیر ناشناس فرض می‌گردند، این متغیرها غیروابسته و غیرگوسی^۵ فرض می‌گردند و به اجزای غیروابسته داده‌های مشاهده، نام‌گذاری می‌شوند. در این‌جا غیروابسته بودن به این معنا می‌باشد که مؤلفه‌های غیروابسته هیچ‌گونه اطلاعاتی در خصوص یکدیگر نمی‌دهند. روش کلی تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته را به صورت رابطه (۱) می‌نویسند [۶].

$$x(t) = As(t) \quad (1)$$

A ماتریسی ناشناس و ماتریس ترکیب است، S داده‌های مؤلفه غیروابسته و ماتریس X را داده‌های متغیر می‌گویند. یک مسئله پایه تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته شامل باورد ماتریس مؤلفه‌های غیروابسته S یا ماتریس ترکیب A از ماتریس داده‌های سنجیده شده X بدون داشتن هر اطلاعاتی از S یا X است. الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته به صورت معمول، مؤلفه‌های غیروابسته را از مجموعه داده‌ها با بیشینه و کمینه کردن تعدادی از اندازه‌های اجزای غیروابسته می‌یابد. کاردوسو [۷] در پژوهشی روش‌هایی را برای حل مسائل تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته با استفاده از معیارهای مختلف نظری آماری از قبیل

¹ Sample-characteristic Oversampling Technique

² Least squares support vector machine

³ Convolutional Neural Network

⁴ Independent Component Analysis

⁵ Non- Gaussianity



اطلاعات مشترک، آنتروپی معکوس^۱، آنتروپی بیشینه^۲ و روش حداکثر احتمال ارائه نمود. در ادامه الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته، به صورت مختصر شرح داده شده است. گام اول عملیات سفیدسازی^۳ بردار داده‌های سنجیده شده X با یک تبدیل خطی برای ایجاد یک بردار x_w که دارای اجزایی است که متقابلاً غیرهمبسته و همه دارای واریانس برابر یک هستند. برای این منظور تجزیه مقادیر منفرد^۴ از ماتریس کواریانس^۵ $E\{x_w x_w^T\} = I$ را با رابطه (۲) محاسبه کرد.

$$I = VD V^T \quad (2)$$

در این جا $D = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n]$ یک ماتریس قطری از مقدارهای منفرد و V ماتریس بردار منفرد متناظر است، سپس می‌توان بردار A_w را به صورت رابطه (۳) بیان نمود.

$$x_w = VD^{-\frac{1}{2}} V^T A s = A_w s \quad (3)$$

در این جا A_w یک ماتریس متعامد است که رابطه (۴) را ارضا می‌کند.

$$E\{x_w x_w^T\} = A_w E\{s s^T\} A_w^T = A_w A_w^T = I \quad (4)$$

یکی از برتری‌های استفاده از روشی بر اساس تجزیه مقدارهای منفرد در پردازش ابتدایی داده‌ها این می‌باشد که تا جایی که ممکن است نویز را از راه حذف مقدارهای منفرد کوچک‌تر از مقدارهای حدی کاهش می‌دهد. از این‌رو مسئله فوق را از راه پیدا کردن یک ماتریس اختیاری مرتبه کامل A به یک مسئله آسان‌تر تبدیل می‌نماید و آن پیدا نمودن یک ماتریس متعامد A_w می‌باشد که پارامترهای کمتری به دلیل قید تعامد برای برآورد دارد. گام دوم یک ماتریس تفکیک‌ساز W که بردار داده‌های سنجیده شده X را به یک بردار y منتقل می‌کند، تعریف می‌گردد، به صورتی که همه مؤلفه‌های y_i متقابلاً وابسته و دارای واریانس برابر یک باشند. سپس الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های غیروابسته، W را با حداکثرسازی مقدار قدرمطلق کشیدگی^۶ y مشخص می‌کند. به طوری که بردار y ویژگی‌های مورد نیاز برای مؤلفه غیروابسته را به صورت رابطه (۵) دارا می‌باشد.

$$\tilde{s} = y = W x \quad (5)$$

با استفاده از رابطه مقدار S را می‌توان با رابطه برآورد نمود.

$$\tilde{s} = A_w^T x_w = A_w^T V D^{-\frac{1}{2}} V^T x \quad (6)$$

با استفاده از این روابط می‌توان روابط (۷) و (۸) برای محاسبه W و A_w را نوشت.

$$W = A_w^T V D^{-\frac{1}{2}} V^T \quad (7)$$

هر ستون بردار b_i برای محاسبه A_w با یک فرض ابتدایی مقداردهی شده و سپس مقدار آن به گونه‌ای به‌روزرسانی می‌شود که i -امین مؤلفه غیروابسته $S_i = (b_i)^T x_w$ به صورت حداکثر غیرگوسی باشد. مطابق قضیه حد مرکزی، غیرگوسی بودن، غیروابسته بودن را نمایش می‌دهد [۶]. دو معیار اصلی برای غیرگوسی بودن، معیارهای کشیدگی و آنتروپی معکوس می‌باشد. آنتروپی معکوس بر پایه نظریه اطلاعات، کمیتی از بی‌نظمی دیفرانسیلی می‌باشد. بی‌نظمی متغیر اتفاقی به‌عنوان درجه اطلاعاتی که از مشاهده متغیر نتیجه می‌شود، تفسیر می‌گردد. اتفاقی بودن بیشتر متغیر بی‌نظمی حداکثر را به همراه می‌آورد. آنتروپی دیفرانسیلی H از متغیر y با پراکنش احتمال $p(x)$ را با استفاده از رابطه (۸) تعریف می‌گردد.

¹ Negentropy

² Maximum Entropy

³ Pre-whiten

⁴ Singular Value Decomposition (SVD)

⁵ Covariance

⁶ Kurtosis



$$H(x) = - \int p(x) \log p(x) dx \quad (8)$$

یک متغیر گوسی حداکثر مقدار آنتروپی را در بین تمام متغیرهای اتفاقی با واریانس برابر دارد. برای به دست آوردن یک شاخص برای غیرگوسی بودن که برای متغیر گوسی برابر صفر باشد، آنتروپی معکوس J به صورت رابطه تعریف می‌شود.

$$J(x) = H(x_{\text{gauss}}) - H(x) \quad (9)$$

که x_{gauss} یک متغیر اتفاقی گوسی و دارای واریانس برابر با x است که آنتروپی معکوس غیرمنفی و انحراف x از گوسی بودن را سنجش می‌نماید. برآورد کردن آنتروپی معکوس با رابطه نیاز به برآورد کردن تابع چگالی احتمال^۱ دارد.

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)^۲

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات بر اساس خروجی اتفاقی دسته اولیه عمل می‌نماید. این روش بهینه‌سازی بر مبنای الگوگیری از رفتار پرواز دسته‌ای از پرندگان و یا حرکت دسته جمعی گروهی از ماهی‌ها بنیان گذاری شده است. کندی و ابرهات پس از شبیه سازی رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها روش بهینه‌سازی دسته ذرات را ارائه کردند. اعضای یک دسته از یک رفتار ساده پیروی می‌نمایند. بدین صورت که هر عضو از دسته از موفقیت سایر اعضای همجوار خود تقلید می‌کند با این استراتژی که دسته‌های پرندگان و ماهی‌ها در محیط اطراف خود به دنبال غذا می‌گردند و زمان‌هایی وجود دارد که تنها یک تکه غذا موجود می‌باشد و هیچ یک از آن‌ها از محل دقیق آن تکه غذا اطلاعی ندارد و صرفاً از فاصله خود تا غذا مطلع می‌باشند. برترین استراتژی دنبال کردن عضوی از دسته می‌باشد که در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به غذا حضور دارد و به عبارت دیگر هر عضو از دسته علاوه بر تفکر خودش به عضو نزدیک‌تر برای یافتن غذا اعتماد می‌نماید هدف از این الگوریتم‌ها، حرکت اعضای دسته در فضای جستجو و جمع شدن در محل منبع غذا به عنوان نقطه بهینه می‌باشد [۴].

مراحل اجرای الگوریتم بهینه‌سازی به روش دسته ذرات

تولید اتفاقی دسته اولیه ذرات، گام اول تولید اتفاقی دسته ذرات اولیه بطور ساده عبارت است از مشخص نمودن مکان اتفاقی اولیه ذرات با پراکنش یکنواخت در فضای جستجو، مقدار پیشنهادی اول از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{X_{\min} - X_{\max}}{2} \leq V \leq \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2} \quad (10)$$

در گام دوم ارزیابی تابع هدف ذرات ابتدا مسئله را برای هر یک از ذرات حل و سپس ارزیابی را انجام شد. در گام سوم ثبت برترین مکان برای هر ذره ($P_{i.best}$) و برترین مکان در بین کل ذرات ($P_{g.best}$) که از روابط (۱۱) و (۱۲) بدست می‌آید:

$$P_{i.best} = (p_{i_1}, p_{i_2}, p_{i_3}, \dots, p_{i_d}) \quad (11)$$

$$P_{g.best} = (p_{g_1}, p_{g_2}, p_{g_3}, \dots, p_{g_d}) \quad (12)$$

در گام چهارم به روز رسانی مولفه سرعت ذرات از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$V_i(t) = w * V_i(t-1) + c_1 * rand_1 * (P_{i.best} - X_i(t-1)) + c_2 * rand_2 * (P_{g.best} - X_i(t-1)) \quad (13)$$

در گام آخر نیز تست همگرایی که در آن تعداد مشخصی تکرار از ابتدا مشخص می‌گردد و در صورت رسیدن به تعداد تکرارهای مشخص شده الگوریتم بهینه‌سازی به پایان می‌رسد در غیر این صورت به گام دوم باز می‌گردد.

¹ Probability density function

² Particle Swarm Optimization



استخراج ویژگی

مجموع نمونه هر داده متشکل از تعداد زیادی مقدار می باشد و با استفاده از علم آمار و ویژگی‌های آمار توصیفی می‌توان نمونه‌ها را در تعداد کمتر و با بیشترین اطلاع از ویژگی‌ها بیان نمود. ویژگی‌های آماری شامل سه دسته کلی، شکل توزیع‌ها، مولفه‌های مکان و اندازه پراکندگی تقسیم نمود. خرابی هر یاتاقان دارای شکل خاصی در محدوده زمان است، ویژگی‌های هر عیب مختص آن خرابی می باشد. استفاده از روش‌های آماری توصیفی کمک شایانی در تعیین چنین ویژگی‌هایی دارد و تعداد زیادی از این پارامترهای آماری در مطالعات مختلف استفاده گردیده‌اند. ویژگی‌های آمار توصیفی به صورت انحصاری به محدوده‌ی زمان وابستگی ندارند و در محدوده‌های دیگر مانند زمان - فرکانس و فرکانس نیز کاربرد دارند.

مدل آزمایشگاهی این پژوهش

برای شناسایی هوشمند عیوب یاتاقان با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های غیروابسته نیاز به داده برداری با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی دقیق می‌باشد که از مجموع مدل آزمایشگاهی PT 500 شامل الکتروموتور و تنظیم کننده دور، PT500.14 شامل پولی و تسمه و PT500.12 مجموعه یاتاقان ساخت شرکت گانت آلمان که تصویر آن در شکل (۱) نشان داده شده استفاده گردید. الکتروموتور استفاده شده در این مدل آزمایشگاهی محدوده سرعتی بین ۱۰۰ تا ۴۲۰۰ دور بر دقیقه را داراست و سرعت چرخش محور را با استفاده از دستگاه کنترل کننده سرعت در محدوده ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ثابت نگه داشته شد. اتصال انعطاف پذیر جهت میرا کردن ارتعاش بالای الکتروموتور استفاده شد، نیروهایی با استفاده از تسمه بر روی سیستم اعمال می‌شود و برای اعمال این نیرو تسمه توسط گیره‌های مخصوص که در شکل شماره (۱) مشاهده می‌شوند قابل تنظیم می‌باشند. دو یاتاقان با مشخصات یکسان در محفظه نگهدارنده یاتاقان نصب گردید حسگر شتاب سنج در دو جهت افقی و عمودی بر روی یاتاقان مورد آزمایش نصب و داده برداری توسط دستگاه ارتعاش سنج جهت استفاده در این پژوهش صورت پذیرفت.



شکل ۱: مدل آزمایشگاهی استفاده شده از نمای بالا

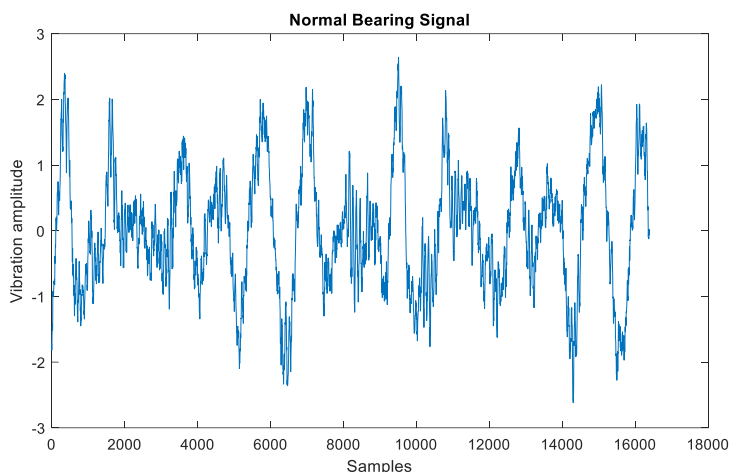
شرح یاتاقان‌های مدل آزمایشگاهی

در این آزمایش از سه یاتاقان SKF کد 6004 موجود در مجموعه یاتاقان PT500.12 شرکت گانت استفاده گردید که شامل یک عدد یاتاقان سالم، یک عدد یاتاقان فرسوده و یک عدد یاتاقان خراب می‌باشند. همچنین حسگر استفاده شده از مدل AC192-1D بوده است. هر سه یاتاقان تحت دور ثابت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. طول مدت زمان اندازه‌گیری داده‌ها ۰/۵ ثانیه و تعداد داده‌های برداشته شده ۱۶۳۸۴ عدد می‌باشد برای هر حالت و برای هر جهت ۱۰ داده برداری صورت پذیرفت که در مجموع ۶۰ مورد آزمایش بوده است.

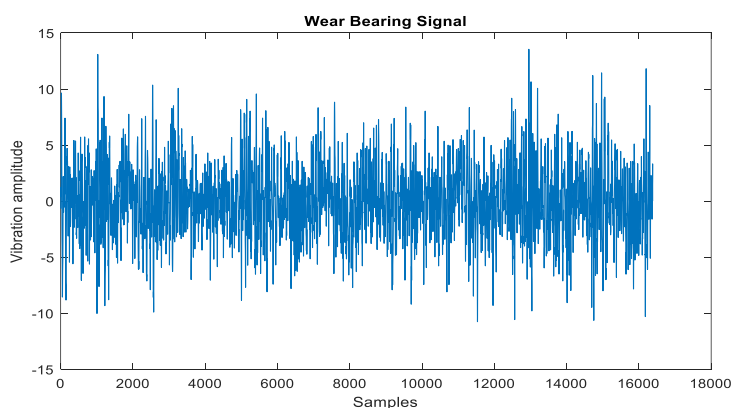


مراحل انجام آزمایش

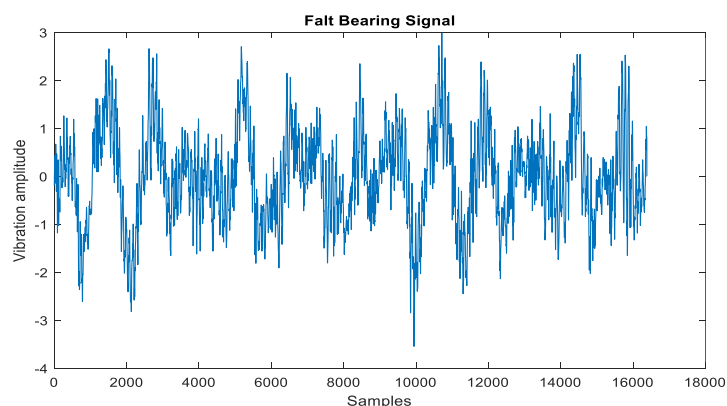
دامنه ارتعاش یاتاقان‌های سالم، فرسوده و خراب در حوزه زمان در شکل‌های (۲) تا (۴) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲: نمونه سیگنال برداشته شده از مدل آزمایشگاهی یاتاقان سالم



شکل ۳: نمونه سیگنال برداشته شده از مدل آزمایشگاهی یاتاقان فرسوده



شکل ۴: نمونه سیگنال برداشته شده از مدل آزمایشگاهی یاتاقان خراب

همانطور که در نمودارهای دریافتی ملاحظه می‌شود در سیگنال‌های خام حجم زیادی از داده وجود دارد و تا پردازش برای عیب‌یابی به روش‌های مورد نظر بر روی آن‌ها انجام نشود ارزش چندانی ندارند. اولین سیگنال‌های برداشته شده از هر سه یاتاقان



سالم، فرسوده و خراب مدل آزمایشگاهی به عنوان ورودی کد نوشته شده برای تحلیل مولفه‌های غیروابسته در نرم افزار متلب انتخاب و خروجی‌های بدست آمده به عنوان الگو در نظر گرفته شدند. برای مشخص شدن تفاوت سیگنال‌ها آنها را با یکدیگر مقایسه شده و همچنین یک‌بار سیگنال شماره ۲ یاتاقان سالم به عنوان محک مورد استفاده قرار گرفت که با استفاده از خروجی به دست آمده از سایر سیگنال‌های الگو، شناسایی عیب یاتاقان صورت می‌پذیرد. اکنون سیگنال اول برداشت شده از یاتاقان سالم به عنوان محک در نظر گرفته می‌شود و مقادیر عددی آن جهت مقایسه با هر سه سیگنال الگو یاتاقان‌های سالم، فرسوده و خراب در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌گردد، امکان شناسایی نوع یاتاقان با دقت بالا با استفاده از داده‌های سه ستون اول وجود ندارد. به همین دلیل، برای امکان تشخیص بهتر، قدرمطلق فاصله میان ویژگی‌ها در سه ستون بعدی آورده شده است. در برخی از ویژگی‌ها این فاصله کم به وضوح قابل مشاهده است. بر اساس داده‌های به دست آمده از تحلیل مولفه‌های غیر وابسته و ویژگی‌های آماری مشاهده می‌شود تعداد بسیاری از این ویژگی‌ها دارای درصدی خطا هستند و می‌بایست برای مرتفع کردن این خطاها و افزایش دقت تشخیص عیب یاتاقان از یک روش بهینه‌سازی استفاده گردد که در این پژوهش از بهینه‌سازی به روش دسته ذرات استفاده می‌شود.

جدول ۱: نتایج بدست آمده از ویژگی‌های آماری یاتاقان سالم، فرسوده و خراب

ویژگی آماری	سالم	فرسوده	خراب	فاصله میان سالم و فرسوده	فاصله میان فرسوده و خراب	فاصله میان خراب و سالم
جزر میانگین مربع	۰/۹۳۲۱	۳/۱۵۲۳	۰/۹۷۳۳	۲/۲۲۰۲	۲/۱۷۸۹	۰/۰۴۱۲
میانگین	۰/۰۲۵۷	-۰/۰۰۴۷	-۰/۰۰۲۸	۰/۰۳۰۵	۰/۰۰۱۹	۰/۰۲۸۵
میانگین هارمونیک	-۰/۱۵۱۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۰	۱/۵۳۴۶	۲/۳۲۰۲	۱/۵۳۶۹
میانگین هندسی	۰/۴۹۰۷	۱/۵۹۸۰	۰/۴۹۲۵	۱/۱۰۷۳	۱/۱۰۵۵	۰/۰۰۱۸
میانگین بریده	۰/۷۳۹۶	۲/۴۴۴۸	۰/۷۶۱۶	۱/۷۰۵۱	۱/۶۸۳۱	۰/۰۲۲۰
چولگی	۰/۱۰۴۱	-۰/۱۱۵۸	۰/۰۹۱۳	۰/۰۱۱۶	۰/۰۲۴۴	۰/۰۱۲۸
انحراف معیار	۰/۹۳۱۷	۳/۱۵۲	۰/۹۷۳۴	۰/۲۲۰۶	۲/۱۷۹۰	۰/۰۴۱۶
واریانس	۰/۸۶۸۲	۹/۹۳۷۹	۰/۹۴۲۵	۹/۰۶۹۷	۸/۹۹۰۳	۰/۰۷۹۳
دامنه	۵/۲۵۹۴	۲۴/۳۰۹۲	۶/۵۲۹۴	۱۹/۰۴۹۸	۱۷/۷۷۹۸	۱/۲۶۹۹
کشیدگی	۲/۶۹۰۸	۳/۳۴۶۷	۳/۰۲۸۸	۰/۶۵۵۸	۰/۳۱۷۸	۰/۳۳۸۰
حوزه میان چارکی	۱/۲۶۱۳	۴/۰۴۳۹	۱/۲۹۷۴	۲/۷۸۲۶	۲/۷۴۶۵	۰/۰۳۶۱
میانه	۰/۰۲۹۵	-۰/۰۴۸۵	-۰/۰۰۵۵	۰/۰۷۸۱	۰/۰۴۳۰	۰/۰۳۵۱
مُد	-۰/۳۷۰۳	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۹	۳/۷۴۶۵	۵/۶۶۴۶	۳/۷۵۲۲
صدک	-۲/۱۸۴۹	-۸/۳۶۸۰	-۲/۴۷۴۸	۶/۱۸۳۱	۵/۸۹۳۲	۰/۲۸۹۸
حاصل جمع	۴/۲۱۳۶	-۰/۷۸۶۰	-۰/۴۶۶۰	۴/۹۹۹	۳۱/۹۹۸۶	۴/۶۷۹۷

بر اساس نتایج جدول (۱) مشاهده می‌گردد که در بسیاری از ویژگی‌ها امکان شناسایی عیب یاتاقان وجود ندارد و در ویژگی‌هایی که امکان شناسایی وجود دارد اختلاف میان یاتاقان سالم و خراب بسیار اندک است و شناسایی عیب دارای دقت پایینی می‌باشد. حال با استفاده از بهینه‌سازی به روش دسته ذرات برای بالا بردن دقت شناسایی عیب یاتاقان از تابع بهینه‌سازی جهت بیشینه نمودن فاصله میان یاتاقان سالم و خراب استفاده می‌گردد. ویژگی آماری صدک برای انجام بهینه‌سازی استفاده گردید. شرایط بهینه‌سازی به شرح ذیل می‌باشد:

تعداد متغیرهای بهینه‌سازی: یک عدد

محدوده بهینه‌سازی: ۰ تا ۱۰۰ برای متغیر مورد نظر

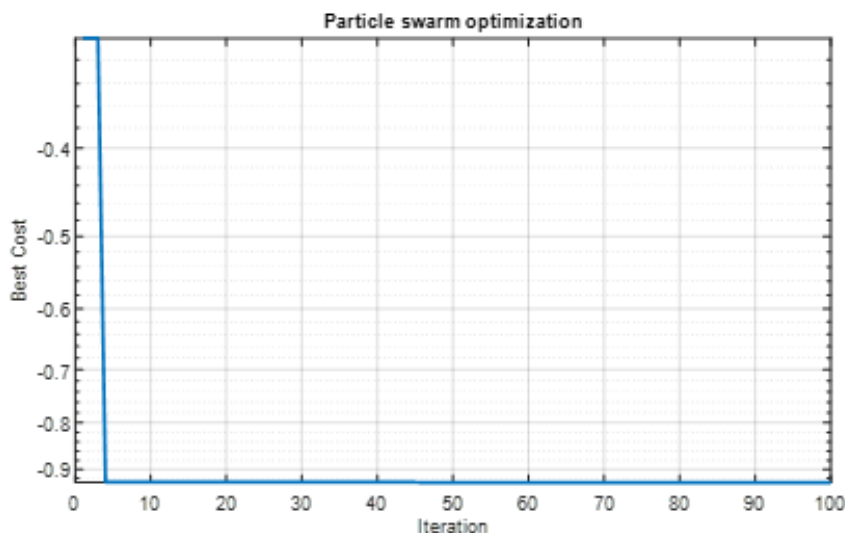
حداکثر تکرار حلقه بهینه‌سازی: ۱۰۰ تکرار



جمعیت بهینه‌سازی (تعداد دسته ذرات): ۱۰ ذره
نسبت استهلاک ضریب وزنی: ۰/۹۹

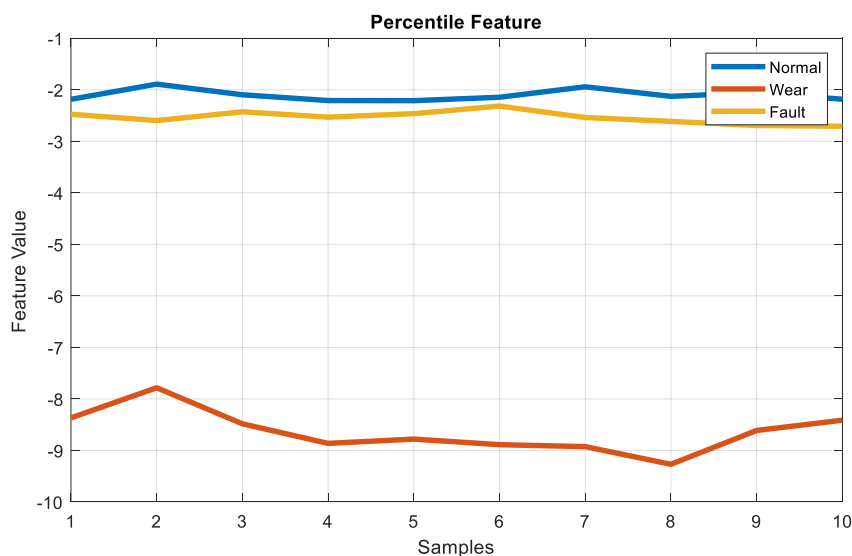
نتایج

با لحاظ شرایط فوق برای بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف در حالت بهینه ۰/۹۳۷۳ و متغیر بهینه‌سازی در حالت بهینه معادل ۰/۰۰۹۱۶ به دست آمده است و نمودار همگرایی بهینه‌سازی مطابق شکل (۵) می‌باشد.



شکل ۵: نمودار همگرایی بهینه‌سازی به روش دسته ذرات

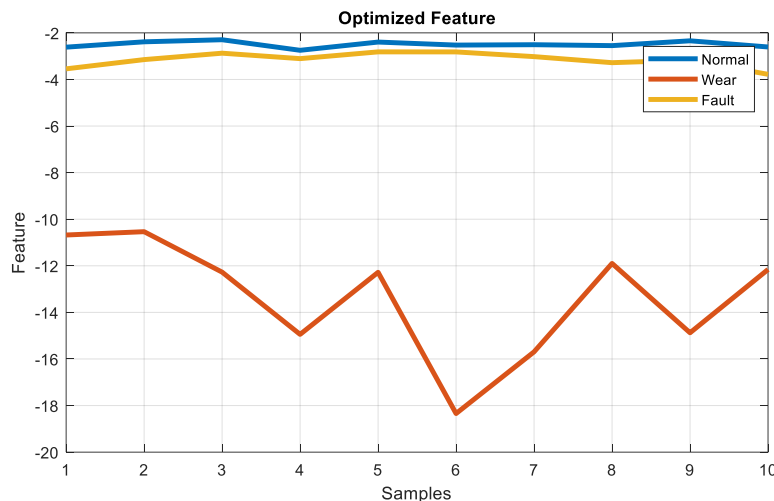
با استفاده از صدک جهت طبقه‌بندی یاتاقان‌ها از سیگنال‌های داده‌برداری شده، می‌توان دریافت که این ویژگی توانایی ایجاد اختلاف میان سیگنال‌های برداشت شده و در نتیجه تشخیص نوع یاتاقان‌ها را دارد. اما یک نکته بسیار قابل توجه، فاصله اندک میان یاتاقان سالم و خراب در نمودار دریافتی از این ویژگی می‌باشد که امکان خطا در تشخیص نوع یاتاقان را بالا می‌برد. شکل (۶) نمودار دریافتی از ویژگی آماری صدک قبل از بهینه‌سازی می‌باشد.



شکل ۶: نمودار ویژگی آماری صدک



نمودار ویژگی آماری صدک پس از اعمال عدد حاصل از بهینه‌سازی برای سیگنال شماره یک سالم، فرسوده و خراب، به صورت شکل (۷) در آمده است. در حالت غیر بهینه فاصله بین یاتاقان سالم و خراب $0/2899$ می‌باشد که پس از بهینه‌سازی مقدار تابع هدف که فاصله میان کلاس یاتاقان‌ها می‌باشد به عدد $0/93072$ افزایش پیدا نمود که این اختلاف افزایش بیش از سه برابر (معادل ۳۲۰ درصد) فاصله را نشان می‌دهد.



شکل ۷: ویژگی آماری صدک پس از بهینه‌سازی

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، ویژگی آماری صدک، مناسب‌ترین ویژگی آماری جهت تشخیص خرابی در یاتاقان‌های پمپ سانتریفیوژ است. از آنجایی که روش تحلیل مولفه‌های غیروابسته نیاز به تعداد داده کمتری دارد، استفاده از این روش، سرعت شناسایی خرابی را افزایش می‌دهد. همچنین با استفاده از بهینه‌سازی به روش دسته ذرات، دقت شناسایی خرابی یاتاقان، تا سه برابر افزایش می‌یابد.

مراجع

- [۱] غفاری، م.ه.، قنبرزاده، ا.، ولی‌پور چهارده چریک، ع.، (۱۳۹۶)، ترکیب آنالیز مؤلفه‌های مستقل و ماشین بردار پشتیبان در تشخیص هوشمند عیب در ماشین‌های دوار، مجله مهندسی مکانیک مدرس، ۱۷(۶)، صفحات ۲۵۷-۲۶۴.
- [2] Jianan, W., Haisong, H., Liguoy, Y., Yao, H., Qingsong F., Dong H., (2021), New imbalanced bearing fault diagnosis method based on Sample-characteristic Oversampling Technique (SCOTE) and multi-class LS-SVM, Applied Soft Computing Journal, 101, 107043.
- [3] Han, S., Jeong, J., (2020), A Weighted CNN Ensemble Model with Small Amount of Data for Bearing Fault Diagnosis, Procedia Computer Science, 175, pp. 88-95.
- [4] Kendy, J., Eberhart, R., (2018), Particle Swarm Optimization, Purdue School of Engineering and Technology Indianapolis, IN 46202-5160.
- [5] Attaran, B., Ghanbarzadeh, A., Moradi Sh., (2020), A novel evolutionary optimization algorithm inspired in the intelligent behaviour of the hunter spider, International Journal of Computer Mathematics, 98(3), pp. 627-655.
- [6] Hyva`rinen, A., Oja, E., (2000), Independent component analysis: Algorithms and applications, IEEE Transactions on Neural Networks, 13(4), pp. 411-430.
- [7] Cardoso, J.F., (1998), Blind signal separation: Statistical principles, Proceeding of the IEEE 86(10), pp. 2009-2020.
- [8] Hyva`rinen, A., (1999), Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, IEEE Transactions on Neural Network, 10(3), pp. 626-634.