

چکیده

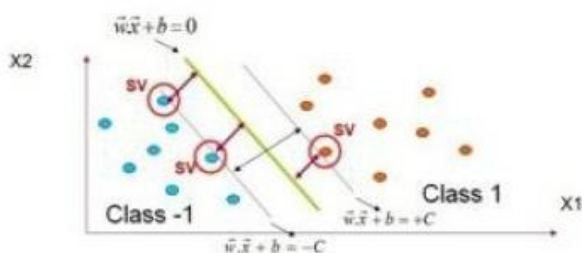
استفاده زیاد از یاتاقانهای غلتشی در صنعت، باعث شده که عیب‌های یاتاقانهای غلتشی در توقف ماشین‌آلات صنعتی صدمات جبران ناپذیری را به صنعت وارد کنند. لذا برای جلوگیری از این صدمات نیازمند فرآیندی به منظور شناسایی خطا و نیز تشخیص نوع خطا می‌باشیم. در این مقاله هدف اصلی ارائه روش جدیدی برای تشخیص و شناسایی نوع عیب در یاتاقانها با استفاده از سیگنال حوزه زمان و استخراج ویژگی از این حوزه است. همچنین یک شبکه عصبی جدید به نام ماشین بردار پشتیبان با تکیه بر رای گیری توسعه یافته است. نمونه آزمایشگاهی شامل یک موتور با دور متغیر است که بوسیله یک شافت و یاتاقان، باری متغیر را به گردش در می‌آورد. شش یاتاقان بکار رفته به منظور تولید شش وضعیت مختلف خطا که شامل یاتاقان سالم و یاتاقان معیوب با عیب روی حلقه خارجی، حلقه داخلی، ساچمه، ذره خارجی درون قفسه و روغنکاری ضعیف می‌باشند مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده به خوبی نشان دهنده تشخیص خطا و نیز شناسایی نوع خطا می‌باشد.

۱. مقدمه

یاتاقانها یکی از مهمترین اجزاء ماشینهای دوار می‌باشند [۱]. بدلیل اهمیت و گستردگی استفاده از یاتاقانی غلتشی در ماشین آلات صنعتی، عیبهای یاتاقان بعنوان عامل رایجی در توقف ماشینهای دوار مطرح می‌باشند که این عیبها می‌توانند قاجحه آفرین باشند. دلایل متعددی برای از کار افتادن یاتاقان وجود دارد مانند: شرایط نگهداری نادرست، نصب ناصحیح، روغنکاری ضعیف، محیط کاری خشن، اضافه بار، اضافه سرعت و مانند آن. درعین حال حتی تحت شرایط کاری نرمال این از کار افتادگی ممکن است به مرور زمان در اثر فرسایش ایجاد شود. از کارافتادن یاتاقان، در عمل اجتناب ناپذیر است. درحال حاضر دو روش برای نگهداری یاتاقان ها وجود دارد، اولی روشهای آماری است که بوسیله آن عمر یاتاقان را حدس می‌زنند و دیگری بررسی شرایط کاری یاتاقان است. بدلیل ماهیت تصادفی ایجاد شدن عیب درون یاتاقان، روشهای آماری که بصورت گسترده‌ای در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش مناسبی نمی‌باشند. روشهای زیادی برای تشخیص و شناسایی خطا در یاتاقان غلتشی بکار گرفته شده است برای مثال، روشهای آماری [۲-۶]، روش آنالیز فوریه [۷-۸]، روش آنالیز تبدیل فوریه زمان

کوتاه [۹]، روش آنالیز موجک [۱۰-۱۵] شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۶-۱۸]، روش ترکیبی موجک، تبدیل فوریه و انرژی آنتروپی [۱۹] و استفاده از تبدیل هیلبرت [۲۰]. اما روشی که در اینجا ارائه می‌شود، استفاده از روش های آماری استخراج ویژگی^۶ برای پردازش سیگنال ارتعاشی حوزه زمان می‌باشد، و در نهایت با بکارگیری شبکه عصبی ماشین بردار پشتیبان^۷ که روش هوشمند دسته بندی است، قابلیت تشخیص و شناسایی نوع عیب حادث شده روی یاتاقان غلتشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی نسبت به سایر روشها به لحاظ سرعت پاسخگویی و عملکرد ارجحیت دارد.

مقدار $b \in R$ که می‌تواند دو کلاس را بدون خطا جدا کند، امکان پذیر است. قانون انتخاب اعضای هر کلاس می‌تواند مبتنی بر تابع $\text{sgn}[f(x)]$ باشد. که در آن $f(x)$ تابع جداساز مربوط به ابرصفحه است. در شکل (۱): اساس کار ماشین بردار پشتیبان نمایش داده شده است.



شکل (۱): اساس کار ماشین بردار پشتیبان

۲. طبقه بندی به روش SVM

SVM اصولاً یک ماشین خطی است که ایده اصلی آن ایجاد یک فوق صفحه به عنوان سطح تصمیم گیری می‌باشد؛ به طوری که حد تفکیک بین نمونه‌های مثبت و منفی حداکثر شود. در واقع SVM یک سیستم یادگیری است که از فرضیه توابع خطی در یک فضای ویژگی با ابعاد زیاد استفاده می‌کند تا سطوح تصمیم را مستقیماً با مدل کردن توزیع احتمال مطابق داده‌های یادگیری تخمین بزند ساختار الگوریتم آموزش SVM بر اساس یک هسته ضرب داخلی بین یک بردار پشتیبان و بردار بدست آمده از فضای ورودی است. کوچکترین زیر مجموعه داده های آموزش که توسط

۳. نرمالیزه کردن ویژگیها

تجربه نشان داده است که با نرمالیزه کردن تک تک ویژگیها روی الگوهای یادگیری، در آموزش شبکه‌های عصبی برای دسته‌بندی داده‌ها چه از لحاظ سرعت یادگیری و چه از لحاظ موفقیت در یادگیری و توانایی جداسازی دسته‌ها بهبود حاصل می‌شود. بنابراین هر الگو در ماتریس داده‌های آموزش، روی سطرهای نرمالیزه می‌شود [۲۲].

۴. سنجش عملکرد

عملکرد یک عامل طبقه‌بندی کننده با استفاده از شاخصهای حساسیت، دقت و ویژگی ذکر شده، سنجیده می‌شود.

$$\text{sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

$$\text{specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (10)$$

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (11)$$

در روابط (۹-۱۱):

- TP بیانگر تعداد موارد طبقه‌بندی مثبت صحیح (ماشین یادگیری به درستی طبقه‌بندی می‌کند)

ساجمه، ذره خارجی درون قفسه و روغنکاری ضعیف می‌باشند. برای بررسی شش وضعیت یاتاقان و بدست آوردن سیگنال ارتعاشی از استفاده هر کدام روی شافت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با جایگذاری هر کدام درون نمونه آزمایشگاهی و اندازه‌گیری سیگنال ارتعاشی توسط سنسور شتاب‌سنج برای ۲۵ حالت مختلف کاری، شامل سرعتها و بارهای مختلف منحصه کلی از عملکرد نمونه در شرایط مختلف بدست می‌آید که این سیگنالها بعنوان داده‌های ارتعاشی در ادامه برای تشخیص وجود و نوع عیب مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک حالت سالم و پنج نوع عیب، در مجموع شش دسته ایجاد میکنند که هدف ما شناسایی یکی از این شش دسته بوسیله بررسی سیگنال ارتعاشی بدست آمده از سنسور شتاب سنج نصب شده بر روی یاتاقان، مطابق شکل (۴) می‌باشد. شش دسته داده که هر کدام شامل بیست و پنج سری زمانی ارتعاش میباشد از شش یاتاقان ذکر شده جمع‌آوری شده است.



شکل (۳): اجزاء یاتاقان غلتشی

الگوریتم فوق استخراج شده‌اند بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. بسته به اینکه این هسته ضرب داخلی چگونه تولید شود، ممکن است ماشینهای آموزش مختلفی با صفحات تصمیم‌گیری غیر خطی بدست آیند [۲۱]. در ادامه توضیحات مربوط به روش SVM خطی (حالت جداپذیر خطی) آورده شده است.

یک مسئله طبقه بندی نظارت شده دو کلاسه را در نظر بگیرید. فرض کنید مجموعه داده‌های آموزشی شامل N بردار از فضای ویژگی \mathbf{d} بعدی $x_i \in R^d$ ($i = 1, 2, \dots, N$) می‌باشد. به هر یک از بردارهای \mathbf{x} یک برچسب $y_i \in \{-1, +1\}$ نسبت داده می‌شود. فرض کنید دو کلاس بطور خطی تفکیک‌پذیر هستند، این بدان معنی است که پیدا کردن دست کم یک ابر صفحه (صفحه خطی) تعریف شده بوسیله یک بردار $w \in R^d$ (عمود بر صفحه) و یک

- 2- Short Time Fourier Transform (STFT)
- 3- Wavelet transform (WT)
- 3- Artificial neural network (ANN)
- 4- Energy entropy
- 5- Hilbert Transform
- 6- Feature Extraction
- 7- Support vector machine (SVM)

- TN بیانگر تعداد موارد طبقه‌بندی منفی صحیح (ماشین یادگیری به درستی طبقه‌بندی می‌کند)
- FP بیانگر تعداد موارد طبقه‌بندی مثبت نادرست (ماشین یادگیری به درستی طبقه‌بندی نمی‌کند)
- FN بیانگر تعداد موارد طبقه‌بندی منفی نادرست (ماشین یادگیری به درستی طبقه‌بندی نمی‌کند)



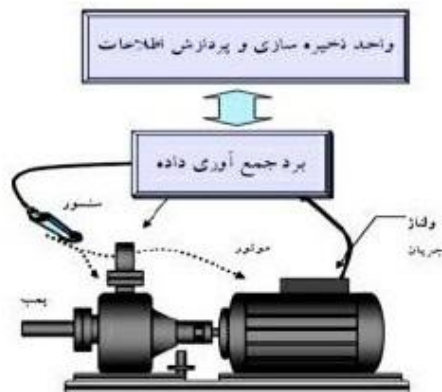
شکل (۲): نمونه یاتاقان غلتشی استفاده شده

۵. پیاده سازی و نتایج

حال به پیاده سازی و بررسی روش پیشنهادی می‌پردازیم.

۵-۱. نحوه بدست آوردن داده ها

نمونه آزمایشگاهی شامل یک موتور با دور متغیر می‌باشد که بوسیله یک شافت و یاتاقان، باری متغیر را به گردش در می‌آورد.



شکل (۴): ساختار استخراج و جمع‌آوری داده

روی حلقه داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نام این دسته 'IRD' میباشد، در شکل (۵) این عیب قابل مشاهده است.



شکل (۵): ترک روی سطح تماس حلقه داخل یک یاتاقان

دسته چهارم مربوط به عیب روی ساچمه می‌باشد. شیاری بر روی ساچمه برای شبیه‌سازی این عیب ایجاد می‌شود داده‌های بدست آمده از این حالت با نام BID^D با اختصار عیب ساچمه، نشان داده می‌شود. دسته پنجم مربوط به یاتاقانی است که شش ساعت بدون روغنکاری کار کرده است. بعد از این مدت داده‌ها از سنسور شتاب سنج برداشت شده‌اند، که بنام PRL^F با اختصار روغنکاری ضعیف نشان داده می‌شود. دسته ششم مربوط به عیب ذره خارجی درون قفس یاتاقان می‌باشد که این عیب معمولاً با کنده شدن ذراتی از اجزاء یاتاقان معلق شدن آن درون روغن بین ساچمه‌ها اتفاق می‌افتد. این عیب با اضافه کردن ذرات سیمان به روغن بین ساچمه‌ها شبیه‌سازی شده است. داده‌های بدست آمده پس از شش ساعت کار در این شرایط جمع‌آوری شده و با نام ABR^Y با اختصار ماده خارجی نشان داده می‌شوند.

یاتاقانهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی دارای شیاری در داخل رینگ درونی و بیرونی خود هستند که نسبت به یکدیگر زاویه مشخصی را می‌سازند. این خاصیت آنها را برای تحمل بار محوری و شعاعی به صورت توأم مناسب می‌سازد. این نوع یاتاقانها می‌توانند با سرعت‌های بالا گردش نموده و قادر به تحمل بارهای محوری و شعاعی می‌باشند. معمولاً به صورت یک ردیف و دو ردیف ساچمه ساخته می‌شوند و ظرفیت تحمل بار زیاد، اصطکاک کم، و کارکرد بدون صدا از ویژگیهای آنهاست. در شکل (۲) نمونه یاتاقان غلتشی استفاده شده در این پروژه و در شکل (۳) اجزا یاتاقان نمایش داده شده است.

شش یاتاقان مشابه با شش وضعیت مختلف که شامل یاتاقان سالم و یاتاقان معیوب با عیب روی حلقه خارجی، حلقه داخلی، اولین سری در شرایط سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و بار صفر برداشت شده‌اند. سپس بار مرحله به مرحله اضافه شده و سرعت ثابت نگه داشته می‌شود و چهار سری زمانی دیگر برداشت می‌شوند. سپس بار به مقدار صفر باز گردانده شده و سرعت را ۵۰۰ دور بر دقیقه اضافه می‌شود و پنج سری دیگر برداشت می‌گردد. این عملیات تا برداشت بیست و پنج سری زمانی از یک یاتاقان ادامه می‌یابد، مراحل ذکر شده برای هر شش یاتاقان با شرایط مختلف انجام می‌شود که در نهایت $(6 \times 25 = 150)$ سری زمانی مختلف تولید می‌گردد.

فرکانس نمونه برداری $41/67$ کیلو هرتز انتخاب می‌شود که نزدیک‌ترین فرکانس نمونه برداری به 40 کیلو هرتز می‌باشد که نرم افزار نمونه برداری مورد استفاده قرار می‌دهد. فرکانس نمونه‌برداری به نحوی می‌باشد که تعداد 4098 نمونه داده برداشت شده معادل $1/64$ دور چرخش موتور و شافت در کمترین سرعت گردش می‌باشد. انتخاب فرکانس بالای نمونه برداری و یا تعداد کم برداشت داده‌های نمونه ممکن است باعث عدم توانایی در تشخیص شرایط کاری یاتاقان بدلیل ناکافی بودن اطلاعات شود.

۲-۵. شبیه‌سازی عیب‌های رایج بر روی یاتاقان آزمایشگاهی

در این آزمایش از پنج یاتاقان با عیب‌های مختلف و یک یاتاقان بصورت سالم استفاده شده است. عیب‌های مورد نظر بطور آزمایشگاهی بر روی یاتاقان‌های مورد نظر ایجاد می‌شوند تا بتوان تأثیر هرکدام را بر سگنال ارتعاشی حاصل از گردش یاتاقان بررسی نمود.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق از سه شاخه اصلی مهندسی مکانیک، الکترونیک و کامپیوتر، و در یک کلام از مهندسی مکترونیک استفاده شده است. و این همان مفهوم اصلی مکترونیک است که باعث شده از یک یاتاقان ساده بتوان به عنوان یک یاتاقان هوشمند نام برد چرا که در هر لحظه با استفاده از سنسورهای مربوطه، سیگنالها از یاتاقانها دریافت شده و به طور همزمان به سخت افزار مربوطه ارسال و سپس این داده ها به واحد کنترل مرکزی یا کامپیوتر ارسال شده و به این ترتیب لحظه به لحظه وضعیت یاتاقانها مشخص می‌شود.

در این مقاله، تلاش شده است تا با استفاده از سیگنالهای ارتعاشی بدست آمده از یک نمونه آزمایشگاهی که با یاتاقانهایی با عیوب مختلف کار می‌کند، به نوع عیب یاتاقان بکار برده شده پی ببریم. با اعمال روشهای مختلف استخراج ویژگی بر سیگنال بدست آمده از حوزه زمان و نرمالیزه کردن این ویژگیها، مشخصههایی از سیگنال که اطلاعاتی در مورد ماهیت درونی سیگنال را در بردارند، بدست آورده که بواسطه آنها می‌توان به نوع عیب حادث شده پی برد سپس با اعمال این ویژگیها به SVM عمل دسته‌بندی و در نهایت تشخیص و شناسایی نوع خطا به صورت لحظه به لحظه، با موفقیت انجام شد.

اما به عنوان پیشنهاد، برای پیاده سازی می توان از یک مدار الکترونیکی ساده استفاده کرد و تشخیص و شناسایی نوع خطا را به صورت لحظه به لحظه و کاملاً هوشمند، توسط کامپیوتر انجام داد. برای انجام این کار هم می توان از یک کارت نرم افزاری که قابل پیاده‌سازی بر روی یک DSP ساده باشد استفاده کرد.

مراجع:

- [1] B.K.N. Rao, Handbook of Condition Monitoring, Elsevier Advanced Technology, Oxford, 1996.
- [2] R.B.W. Heng, M.J.M. Nor, Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, Applied Acoustics 53 (1998) 211–226.
- [3] F. Honarvar, H.R. Martin, New statistical moments for diagnostics of rolling element bearings, Journal of Manufacturing Science and Engineering 119 (1997) 425–432.
- [4] H.R. Martin, F. Honarvar, Application of statistical moments to bearing failure detection, Applied Acoustics 44(1995) 67–77.
- [5] R.B.W. Heng, M.J.M. Nor, Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, Applied Acoustics 53 (1998) 211–226.

جدول (۲): نمایش درصد تشخیص نوع عیب شناسایی شده برای سرعت ۳۰۰۰ و بار ۵۰۰ نیوتن برای یاتاقانهای غلتشی با پنج عیب متفاوت و یک حالت سالم با استفاده از ویژگیهای استخراج شده از سیگنال حوزه زمان.

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
حالت ABR	۰	۰/۷۸۷	۰	۰/۰۹۰	۰	۰/۰۹۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰
حالت BLD	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۵۴۵	۰/۰۳۰	۰/۰۹۰	۰/۰۱۸	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰
حالت GBR	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۰۶۰	۰/۶۰۶	۰	۰/۰۶۰	۰/۱۸۱	۰/۱۸۱
حالت IRD	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۱۵۱	۰/۰۶۰	۰/۴۲۴	۰/۳۱۲	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰
حالت ORD	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۹۰	۰	۰/۳۳۳	۰/۳۶۳	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
حالت PRL	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۹۰	۰/۱۵۱	۰/۰۶۰	۰/۳۱۲	۰/۴۲۴	۰/۴۲۴

در جدول (۲) اعداد ۱-۸ در سطر اول به ترتیب نشان دهنده نوع خطا، درصد تشخیص خطا برای حالت:

ABR, BLD, GBR, IRD, ORD, PRL و نوع خطای تشخیص داده شده می باشد.

جدول (۳): سنجش عملکرد طبقه‌بندی کننده SVM با استفاده از شاخصهای حساسیت، ویژگی و دقت برای سرعت ۳۰۰۰ و بار ۵۰۰ نیوتن برای یاتاقانهای غلتشی با پنج عیب متفاوت و یک حالت سالم با استفاده از ویژگیهای استخراج شده از سیگنال حوزه زمان.

	نرمال در برابر خطاها	نرمال در برابر خطای ABR	نرمال در برابر خطای BLD	نرمال در برابر خطای IRD	نرمال در برابر خطای ORD	نرمال در برابر خطای PRL
sensitivity	۰/۱۷۵	۰/۷۴۰	۰/۵۷۱	۰/۵۱۲	۰/۴۸۷	۰/۵۱۲
specificity	۰/۸۶۵	۰/۶۶۶	۰/۵۸۰	۰/۵۱۸	۰/۴۸۰	۰/۵۱۸
Accuracy	۰/۴۹۳	۰/۶۹۶	۰/۵۷۵	۰/۵۱۵	۰/۴۸۴	۰/۵۱۵