Deep learning based intelligent fault diagnosis in flexible rotors using an innovative piezoelectric bearing

Reza Ebrahimi[1, 2*]

[1] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
[2]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

ABSTRACT

Recently, structural health monitoring has attracted considerable attention due to its great significance to prolong the lifespan and improve the system reliability of industrial machineries. The conventional fault diagnosis methods mainly depend on battery-support sensors. The self-powered fault diagnosis methods provide a new idea to realize fault diagnosis without using battery-supported or wired sensors. So, this study proposes a novel piezoelectric smart bearing for generating the voltage signals from the rotor's vibrations. These voltage signals can be used for supplying the monitoring units and fault diagnosis. For this purpose, a prototype is fabricated and is experimentally tested with different shafts. Each shaft has a central disc and a breathing transverse crack at its mid-span. The shafts are identical except for the crack depth. Then, the convolutional neural network algorithm is developed and trained based on the output voltage of the smart bearing under different crack depths. The results indicate that the crack fault can be classified to three labeled categories (level I, level II and level III). Also, the classification accuracy of this method can achieve 99.9%, which are quite feasible in practical applications. So, the proposed piezoelectric smart bearing has good application prospects for the self-powered fault diagnosis of rotating machinery.

KEYWORDS

Deep learning, Piezoelectric smart bearing, Convolutional neural network, Damage detection, Rotor dynamic

1. Introduction

Recently, with the development of industrial informatization and intellectualization, the development of smart bearings has attracted a lot of significant attention in an attempt to reduce maintenance costs and increase reliability by providing online health condition monitoring. The smart bearing is a fully integrated system that includes the bearing structure, miniatured sensors and electrical circuit. In the smart bearing, sensors can be arranged closer to fault sources for overcoming path losses that lead to a high signal to noise ratio. The most common physical signals used for fault diagnosis are vibration, temperature, load, and speed [1]. Employing the self-powered technologies without destructive change in the structure of the rolling bearing is a main challenge in design of smart bearings. These technologies can avoid using wired sensors and battery-supported sensors in condition monitoring [2]. Miao et al. [3] fabricated a variable reluctance smart bearing using a ribbon-shaped soft ferromagnetic cage. They showed that the proposed bearing is capable of detecting the cage surface crack. Also, the results confirmed that increasing the number of turns and decreasing the gap length can lead to better performance. Jiang et al. [4] constructed a triboelectric smart bearing to recognize faults in rotating machineries. They concluded that the performance of the system can be improved when the number of electrode section pairs increases.

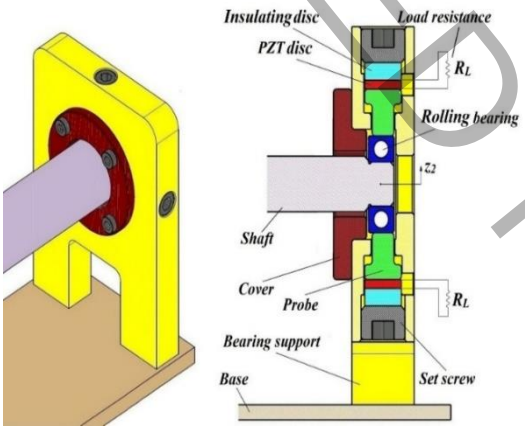
* Corresponding Author: Email: rebrahimi@yu.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

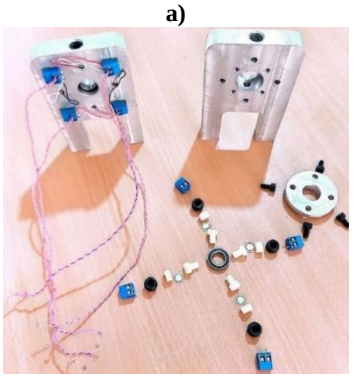
As described in the literature, previous works mainly focused on condition monitoring and modelling of cracked rotor systems with simple bearings. Also, in the most self-powered smart bearings the existing structure of rolling bearings is changed or destroyed to install sensor elements. Moreover, there is no comprehensive model of flexible rotors that incorporates the breathing transverse crack, unbalance force and electromechanical coupling due to piezoelectric smart bearings. Therefore, it is the main motivation of this study to design a piezoelectric smart bearing without destructive change in the structure of the rolling bearing, propose a convolutional neural network (CNN) for analyzing the voltage responses and detecting damage in the shaft.

2. Structure of the smart bearing

Figure 1 depicts the components and the structure of the proposed piezoelectric smart bearing. It is composed of a bearing support, a rolling bearing, a cover, four probes, four piezoelectric discs, four insulating discs and four set screws.



a)



b)

Figure 1. Assembly of the piezoelectric smart bearing components: a) Structure diagram and b) Physical model.

The housing of the rolling bearing is embedded in the bearing support. The rolling bearing is encompassed by four probes and is able to move radially within the clearance space of the housing. Probes are orthogonal to the shaft axis and can slide within their guide holes. Axial displacement of the rolling bearing is constrained by the cover. The set screw mounted at the end of each guide hole applies a very low preload. This is required to keep each piezoelectric disc in contact with a probe at one side and with an insulating disc at the other side. During operation, transverse vibrations carried by the probes cause axial strains in the piezoelectric discs. So, the piezoelectric discs generate electric charges which can be analyzed as the voltage signals for damage detection.

3. Experimental procedure

An overall view of the experimental setup is given in figure 2. The shaft with the radius of *7.94* mm and length of *72.4* cm is connected to the motor using a lightweight, flexible coupling that allows radial movement of the shaft. A disk with the thickness of *11.72* mm and radius of *76.2* mm is mounted at the center of the shaft. The disc and shafts (fifteen samples) have been machined from steel. In order to mimic the breathing crack behavior, an extremely narrow notch (crack) is placed near the midspan of the shafts using a wire electric discharge machine. The shafts are identical except for the notch depth μ. The bearing supports and covers are machined from aluminum. The base, motor pedestal, probes and insulating discs have been made of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) material. The rotational speed of the motor is manually controlled by a dimmer circuit and is measured by a laser tachometer (DT-2234C). The voltage applied to each resistor is collected using a data acquisition system (MA-DR300-AV08, Mahda Co.).

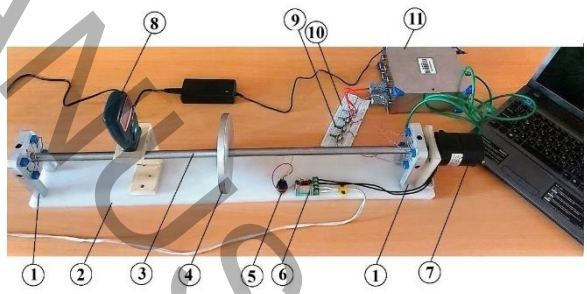


Figure 2. Smart bearing test rig used for shaft crack testing: (1) smart bearing (2) base (3) shaft (4) disc (5) speed control (6) dimmer circuit (7) motor (8) tachometer (9) potentiometer (10) breadboard (11) data acquisition system.

In this research, the control experiments were carried out for fifteen different values of the crack depth (fifteen samples), at *100*, *200* and *300* rpm (forty-five experiments). Then, *900000* sample of the voltage signal were recorded in each experiment. Finally, the wavelet transform is used to extract the time–frequency images of the signals, which are the inputs of the convolutional neural network (CNN) model. Figure 3 shows some scalograms generated from the voltage signals in the experiments at *300* rpm.

ACCEPTED MANUSCRIPT

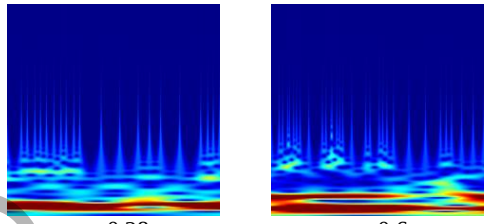


Figure 3. Some scalograms generated from the voltage signals in the experiments at *300* rpm.

4. Design of convolutional neural network

The structure of the CNN model is presented in Figure 4. The time–frequency images of the voltage signals are input in tensor form. The architecture of this CNN comprises of three convolutional layers, three pooling layers, fully connected layers and an output layer. In each layer, batch normalization is set up to speed up the training and convergence of the network, and reduce the internal covariance deviation. The active function of each convolution layer is ReLu, which is used to improve the overall network's expressive capacity and prevent overfitting. Three convolutional layers have an associated pooling layer. After the first and last convolution layer a dropout value of *50*% is applied.

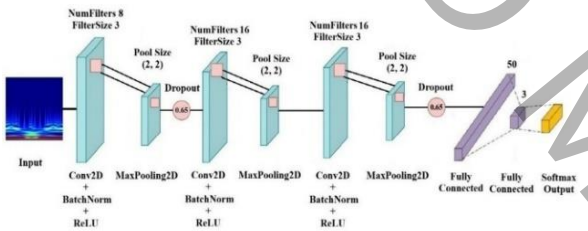
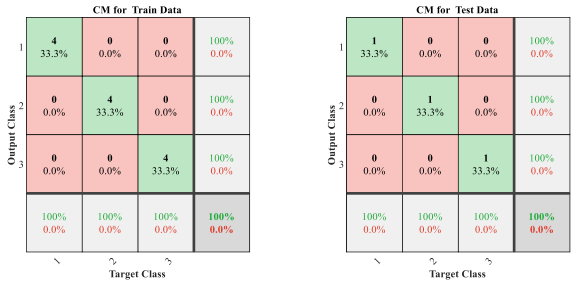


Figure 4. Structure of the constructed CNN model.

For each class, *80*% of the samples are taken as the training set and the remaining *20*% comprise the testing set. Figure 5 illustrates the fault classification confusion matrix based on the output voltages. It can be seen that the average accuracy for fault classification reaches *99.9*%, indicating that the piezoelectric smart bearing has high sensing capability and can be applied to condition monitoring and fault diagnosis of rotors.



a) **b)**

Figure 5. The confusion matrix based on the output voltages a) training b) test.

Model accuracy and loss functions are shown in figure 6. It can be observed that the CNN model can converge quickly and achieve good recognition performance on the verification set.

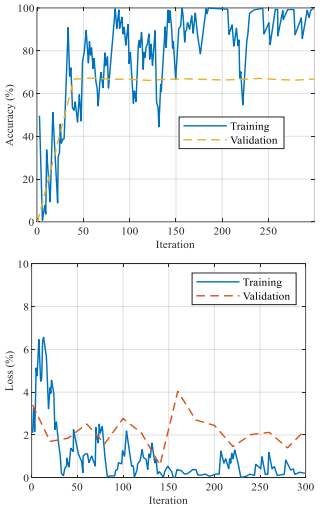


Figure 6. The loss function and accuracy curves of the classification model.

5. Conclusion

In this study, a novel piezoelectric smart bearing was designed and constructed. The voltage responses of the smart bearing were recorded for different values of the crack depth and rotational speed. Then, the wavelet transform and a CNN algorithm were used to classify the crack fault into the three labeled categories. The results showed that the output voltage of the smart bearing can be used for damage detection. Also, the classification accuracy of this method can achieve 99.9%. So, the results of this research present an accurate, fast and nondestructive algorithm for damage detection of rotating machines, which are important in condition monitoring and reliability of these systems.

6. References

[1] I. Bashir, L. Wang, T. Harvey, B. Zaghari, A. Weddell, N. White, Integrated smart bearings for next generation aero-engines Part 1: Development of a sensor suite for automatic bearing health monitoring. 1st. World Congress on Condition Monitoring, (2017).

[2] Y. Zhang, W. Wang, X. Wu, Y. Lei, J. Cao, C. Bowen, S. Bader, B. Yang, A comprehensive review on self-powered smart bearings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183 (2023) 113446.

[3] Y. Miao, S. Gao, Y. Kong, Z. Jiang, Q. Han, F. Chu, Variable reluctance bearing generators applicable in condition monitoring of bearing cages, Mechanical Systems and Signal Processing, 194 (2023) 110249.

[4] Z. Jiang, S. Gao, Y. Kong, P. Pennacchi, F. Chu, Q. Han, Ultra-compact triboelectric bearing based on a ribbon cage with applications for fault diagnosis of rotating machinery, Nano Energy, 99 (2022) 107263.

ACCEPTED MANUSCRIPT

تشخیص عیب هوشمند برمبنای یادگیری عمیق در روتورهای انعطاف‌پذیر به وسیله یک یاتاقان پیزوالکتریک جدید

رضا ابراهیمی[۱ و ۲*]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

اخیراً سلامت‌سنجی سازه‌ها به خاطر اهمیت زیادش در افزایش طول عمر و بهبود قابلیت اعتماد ماشین‌آلات صنعتی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. عمدتاً روش‌های تشخیص عیب رایج، به حسگرهایی که از باتری‌ها تغذیه می‌شوند وابسته هستند. روش‌های تشخیص عیب خودتوان، ایده جدیدی را برای تشخیص عیب بدون استفاده از حسگرهای سیمی یا متکی به باتری، فراهم می‌کنند. بنابراین این مطالعه، یک یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک جدید را برای تولید سیگنال‌های ولتاژ از ارتعاشات روتور، ارائه کرده است. این سیگنال‌های ولتاژ می‌توانند برای تأمین توان واحدهای پایش وضعیت و تشخیص عیب استفاده شوند. برای این منظور یک نمونه، ساخته شده و به صورت آزمایشگاهی با محورهای مختلف تست گردیده است. هر محور دارای یک دیسک مرکزی و یک ترک عرضی تنفس‌کننده در وسط آن است. همه مشخصات محورها به جز عمق ترک، مشابه هستند. سپس الگوریتم شبکه عصبی پیچشی ایجاد و بر اساس ولتاژ خروجی یاتاقان هوشمند برای عمق‌های مختلف ترک، آموزش دیده است. نتایج نشان می‌دهد که عیب ترک می‌تواند به سه دسته‌ی نام‌گذاری شده (سطح I، سطح II و سطح III) طبقه‌بندی شود. همچنین دقت طبقه بندی این روش می‌تواند به ٪۹۹/۹ برسد که برای کاربردهای عملی امکان‌پذیر است. بنابراین یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک ارائه شده، چشم‌انداز کاربردی خوبی را برای تشخیص عیب خودتوان ماشین‌های دوار خواهد داشت.

کلمات کلیدی

یادگیری عمیق، یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک، شبکه عصبی پیچشی، تشخیص عیب، روتور داینامیک.

* نویسنده مسئول: rebrahimi@yu.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت هوشمندسازی صنایع، یاتاقان‌های هوشمند به دلیل کاهش هزینه‌های تعمیرات ناشی از خرابی‌های ناگهانی و افزایش قابلیت اعتماد سیستم‌های دوار، توجه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. ساختار یاتاقان هوشمند متشکل از یک یاتاقان غلتشی، حسگرها/عملگرهای کوچک و مدار الکتریکی است که می‌تواند در پایش وضعیت/کنترل فعال روتور استفاده شود. از آنجایی که حسگرها در داخل این یاتاقان‌ها و نزدیک به منبع عیب جاسازی می‌شوند، سیگنال‌های دقیق‌تری به کمک این یاتاقان‌ها در محیط‌های با نویز بالا قابل دستیابی است. رایج ترین سیگنال‌های استفاده شده برای تشخیص عیب، سیگنال‌های ارتعاشی، دما، نیرو و سرعت هستند [۱ و ۲]. یکی از مهمترین چالش‌ها در طراحی یاتاقان‌های هوشمند، به کارگیری تکنولوژی‌های خودتوان در ساختار آنها بدون تغییرات مخرب در المان‌های غلتشی یاتاقان است. به کمک این قابلیت، امکان پایش وضعیت، پردازش داده‌ها و انتقال داده‌ها بدون سیم و منبع تامین توان خارجی (باتری) امکان پذیر است [۳]. درحالی‌که روش‌های متداول مستلزم استفاده از باتری هستند و شارژ یا تعویض دوره‌ای باتری می‌تواند منجر به توقف پایش وضعیت دستگاه شود [۴].

تکنولوژی خودتوان یا برداشت انرژی الکتریکی از منابع محیط شامل خورشید [۵]، گرما [۶]، انرژی مکانیکی [۷ و ۸]، باد [۹ و ۱۰] و امواج رادیویی [۱۱] هستند. در محیط کاری یک یاتاقان هوشمند، گرمای ناشی از اصطکاک و ارتعاشات روتور به عنوان دو منبع انرژی اصلی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین برداشت انرژی با توجه به اثر ترموالکتریک، نه تنها باعث جلوگیری از افزایش دمای یاتاقان شده، بلکه به عنوان یک منبع در دسترس الکتریسیته نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برداشت انرژی از ارتعاشات روتور نیز می تواند به کمک سه اثر پیزوالکتریک [۱۲ و ۱۳] الکترومغناطیس [۱۴ و ۱۵] و تریبوالکتریک [۱۶] انجام شود. در ادامه، ساز و کارهایی که می‌تواند برای تأمین توان از ارتعاشات روتور در یاتاقان‌های هوشمند به کار گرفته شود، معرفی می‌گردد. این ساز و کارها شامل پیزوالکتریسیته، الکترومغناطیس و تریبوالکتریک هستند.

۱-۱- روش پیزوالکتریسیته

با وارد شدن تنش مکانیکی به مواد پیزوالکتریسیته و نتیجتاً تغییر ساختار قطبی[1] آن، ولتاژ الکتریکی در آن ماده تولید می‌شود. آمبور و ریندرکنچ [۱۷] از مونتاژ المان‌های پیزوالکتریک در مجاورت یاتاقان‌ها برای تشخیص عیب نابالانسی روتور استفاده نمودند. شرکت شورون آمریکا[2]، یک دستگاه تولید توان پیزوالکتریک را که شامل یک روتور و استاتور است طراحی نمود. هنگامی که بازوهای دستگاه در حین حرکت دورانی، در تماس با المان پیزوالکتریک قرار می‌گیرند، توان الکتریکی تولید می‌شود [۱۸]. مؤسسه علوم و تکنولوژی کره[3]، یک ساختار کمانی شکل انعطاف‌پذیری را برای جاسازی المان پیزوالکتریسیته طراحی نمودند. هنگام تغییرشکل این ساختار انعطاف‌پذیر در اثر ارتعاشات یاتاقان، المان پیزوالکتریک می‌تواند ولتاژی را تولید کند [۱۹]. آنها همچنین یک ساختار فراکتالی[4] را به عنوان یک سازه انعطاف‌پذیر معرفی کردند که به کمک اثر پیزوالکتریسیته می‌تواند ارتعاشات یاتاقان را به توان الکتریکی تبدیل کند [۲۰]. ژانگ و همکاران [۲۱] طرحی از یک یاتاقان هوشمند مجهز به صفحات کمانی شکل پیزوالکتریک را ارائه کردند. پس از مدل‌سازی الکترومکانیکال و ساخت نمونه آزمایشگاهی، اثر پارامترهای کاری مختلف از جمله سرعت دورانی، وزن روتور و مقاومت بار[5] روی عملکرد دستگاه مورد نظر بررسی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد که دستگاه مورد نظر ضمن قابلیت تشخیص عیوب ایجاد شده در یاتاقان، می‌تواند ولتاژ مؤثر[6] ۲۵ ولت و توان مؤثر ۶۰ تا ۱۳۱ میکروووات را در محدوده سرعت‌های دورانی ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه تولید کند. صفیان و همکاران [۲۲] یک حسگر پیزوالکتریک کوچک را در یک یاتاقان غلتشی جاسازی نمودند. شبیه‌سازی آنها در نرم‌افزار انسیس[7] انجام شده است. سپس عملکرد دستگاه در سه مرحله مورد آزمایش قرار گرفت. مرحله اول آزمایش، با ایجاد عیب

[1] Polarization
[2] Chevron USA company
[3] Korea institute of science and technology
[4] Fractal
[5] Resistive loads
[6] Root Mean Squared (RMS)
[7] ANSYS

ACCEPTED MANUSCRIPT

در رینگ خارجی و یکی از المان‌های غلتشی انجام شد. مرحله دوم آزمایش با قرار دادن دستگاه در یک محیط با سطح نویز بالا انجام شد. در مرحله سوم تست نیز با اعمال بارهای زیاد روی محور تا ۴۰۰۰ نیوتن، دوام یاتاقان هوشمند طراحی شده مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد رضایت‌بخش یاتاقان طراحی شده در شرایط کاری مختلف است. شی و همکاران [۲۳] یک روش تشخیص عیب خودتوان را به کمک یک ژنراتور پیزوالکتریک برای تشخیص عیب در یاتاقان‌ها ارائه کردند. در روش آنها هیچ تغییر مخربی در ساختار یاتاقان صورت نمی‌گیرد. ولتاژ خروجی ژنراتور پیزوالکتریک در شرایط کاری مختلف، برای آموزش[1] شبکه عصبی پیچشی[2] استفاده شده است. نتایج نشان آنها داد که دقت طبقه‌بندی عیوب این روش برای سرعت‌های کاری ۱۲۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۸۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۸۸/۳۸، ۹۸/۹۹ و ۹۸/۴۳ درصد می‌باشد. چیو و همکاران [۲۴] روشی را برای پایش وضعیت تجهیزات دوار بر مبنای آرایشی از حسگرهای پیزوالکتریک و الگوریتم شبکه عصبی پیچشی ارائه کردند. نتایج نشان دهنده دقت ۸۴٪ الگوریتم چندلایه طراحی شده، در تشخیص و طبقه بندی عیوب در موقعیت‌های مختلف است. شاو و همکاران [۲۵] با مونتاژ یک یاتاقان غلتشی در رینگ پیزوالکتریک، یاتاقان هوشمندی را برای تشخیص عیوب کم، طراحی نمودند. سپس عیوب را بر مبنای شبکه حافظه طولانی-کوتاه‌مدت[3] طبقه‌بندی نمودند. کین و همکاران [۲۶] یک پایه یاتاقان هوشمند خودتوان را با المان‌های پیزوالکتریک طراحی نمودند. سپس یک مدل الکترومکانیکال برای توصیف رفتار سیستم با یاتاقان‌های سالم و معیوب ارائه شد. نتایج نشان داد که سیستم مورد نظر علاوه بر تشخیص عیب، قابلیت تولید توان ۵۲۹/۹ میکروووات را در سرعت دورانی ۱۸۰۰ دور بر دقیقه دارد.

۲-۱- روش الکترومغناطیس

هنگامی که یک حرکت نسبی بین یک آهنربا و سیم‌پیچ ایجاد شود، مطابق با قانون فارادی[4] شار مغناطیسی در سیم‌پیچ تغییر کرده که منجر به تولید ولتاژ در سیم‌پیچ می‌شود. ژانگ و همکاران [۲۷] یک برداشت‌کننده انرژی الکترومغناطیس را برای پایش وضعیت یاتاقان‌ها طراحی نمودند. سیم‌پیچ‌ها روی قفسه[5] یاتاقان مونتاژ شده‌اند. آهنرباها نیز با چیدمان هالباخ[6] روی درپوش انتهایی یاتاقان نصب شده‌اند. این چیدمان که با یک بردار میدان مغناطیسی چرخشی مرتب می‌شود، باعث قوی‌تر شدن میدان در یک طرف (سمت سیم‌پیچ‌ها) و صفر شدن میدان در طرف دیگر می‌شود. نتایج پژوهش آنها نشان داد که سیستم مورد نظر می‌تواند توان ۵۰/۸ تا ۱۳۱/۱ میلی‌وات را در سرعت‌های دورانی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه تولید نماید. شرکت skf نیز در رابطه با یاتاقان‌های هوشمند الکترومغناطیس، ساختاری را ارائه کرده است که در آن آهنرباها و سیم‌پیچ‌ها به ترتیب روی آب‌بندهای ثابت و دوار نصب شده‌اند [۲۸]. زو و همکاران [۲۹] یک برداشت‌کننده الکترومغناطیس mشکل با ریلاکتانس[7] متغییر را طراحی نمودند. تغییر ریلاکتانس با تغییر فاصله هوایی بین آهنربا و سیم‌پیچ انجام می‌شود. ساختار mشکل دستگاه، چگالی توان را برای سرعت‌های دورانی پایین بهبود می‌بخشد. این دستگاه قادر به تولید توان ۰/۱۲ تا ۲۲ میلی‌وات در سرعت دورانی ۵ تا ۶۰ دور بر دقیقه می‌باشد. گانگ و همکاران [۳۰] نیز یک برداشت‌کننده الکترومغناطیس nشکل ریلاکتانس متغییر را برای یاتاقان‌های هوشمند سرعت بالا ارائه نمودند. این ساختار قادر به تامین توان ۴/۲۶ وات، در سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و فاصله هوایی ۲ میلیمتر می‌باشد. میاو و همکاران [۳۱] یک یاتاقان هوشمند با ریلاکتانس متغییر را برای پایش وضعیت ماشین‌های دوار طراحی نمودند. این ساختار از یک سیم‌پیچ، هسته آهنی و یک آهنربای دائم تشکیل شده است که در یک سمت روی رینگ خارجی یاتاقان نصب شده است. یک قفس نواری[8] فرومغناطیس نرم روی ساچمه‌ها قرار گرفته است و همراه آنها دوران می‌کند. هنگامی که برآمدگی‌های روی قفسه از روبه روی سیم‌پیچ و آهنربا عبور می‌کنند، چگالی شار مغناطیسی تغییر کرده و یک جریانی را در سیم‌پیچ القا می‌کند. نتایج حاکی از آن است که

[1] Train
[2] Convolutional neural network (CNN)
[3] Long Short-Term Memory network (LSTM)
[4] Faraday's law
[5] Cage
[6] Halbach
[7] Reluctance
[8] Ribbon-shaped Cage

ACCEPTED MANUSCRIPT

با ترکیب تبدیل فوریه و الگوریتم شبکه عصبی پیچشی، ترک‌های روی قفسه یاتاقان هوشمند تا دقت ٪۹۹ قابل تشخیص و طبقه‌بندی هستند.

۳-۱- روش تریبوالکتریک

هنگامی که دو ماده به یکدیگر مالش داده می‌شوند یا با هم تماس می‌گیرند و سپس از هم جدا می‌شوند، الکترون‌ها بین مواد منتقل می‌شوند و در نتیجه یک بار الکتریکی خالص در هر سطح ایجاد می‌شود. با قطع تماس دو عضو، بارهای مثبت و منفی جدا شده و یک اختلاف پتانسیل یا ولتاژ الکتریکی ایجاد می‌شود. چن و همکاران [۳۲] یک نانوژنراتور هیبریدی (متشکل از ساختار تریبوالکتریک و الکترومغناطیس) را برای کار در یک محدوده فرکانسی گسترده ارائه نمودند. هان و همکاران [۳۳] طرح جدیدی از یک یاتاقان هوشمند را با بکارگیری مواد تریبوالکتریک پیشنهاد نمودند. الکترودها روی سطح خارجی رینگ خارجی چسبانده شده‌اند. حرکت ساچمه‌ها داخل شیار رینگ خارجی، باعث تحریک الکترودها با ضربه و نتیجتاً تولید ولتاژ می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم توان ۲۰ میکرو وات در مقاومت بار بهینه ۱۰ مگا اهم و سرعت دورانی ۱۶۵۸ دور بر دقیقه حاصل می‌شود. جیانگ و همکاران [۳۴] یک یاتاقان هوشمند تریبوالکتریک را برای تشخیص عیب ماشین‌های دوار طراحی کردند. در این طرح، یک پوشش تفلنی عایق روی قفسه یاتاقان اسپری شده است. الکترودها نیز روی سطح داخلی درپوش نصب شده‌اند تا ساختار یک نانوژنراتور تریبوالکتریک تشکیل شود. اثر پارامترهای مختلف از جمله دی‌الکتریک، ضخامت لایه و تعداد الکترودها روی خروجی سیستم بررسی شد. نتایج نشان داد که عیب در سیستم دوار می‌تواند با استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق روی سیگنال‌های ولتاژ تولید شده، تشخیص داده شود.

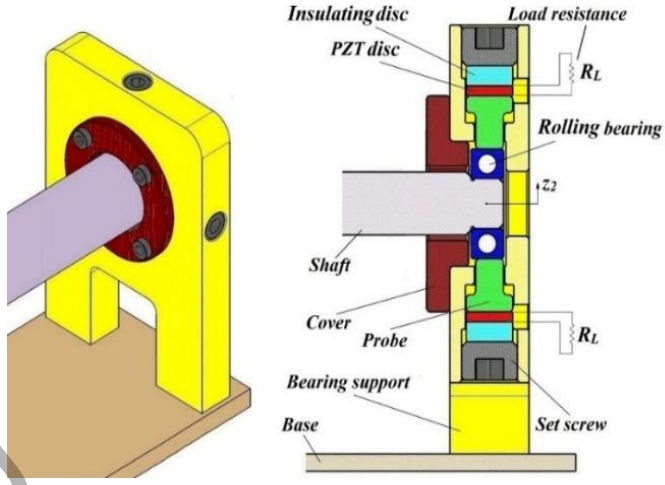
همان‌طور که مرور تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد، مطالعات قبل عمدتاً روی یاتاقان‌های هوشمند خودتوانی ارائه گردیده است که ساختار المان غلتشی برای نصب حسگرها دچار تغییرات مخرب شده است. علاوه بر این، مطالعات تجربی روی روتورهای انعطاف‌پذیر که در آنها به طور همزمان ترک عرضی تنفس‌کننده، نیروی نابالانسی و کوپل الکترومکانیکی ناشی از یاتاقان‌های هوشمند پیزوالکتریک در نظر گرفته شده باشد، وجود ندارد. لذا طراحی یک یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک جدید بدون تغییر مخرب در ساختار المان‌های غلتشی یاتاقان، ارائه یک الگوریتم شبکه عصبی پیچشی برای پردازش داده های آزمایشگاهی حاصل از روتور انعطاف‌پذیر ترکدار همراه با این یاتاقان‌ها و نهایتاً تشخیص عیب به کمک الگوریتم مورد نظر، از جنبه‌های نوآورانه کار حاضر محسوب شده و می تواند از اهمیت خاصی برخوردار باشد.

۲- ساختار یاتاقان هوشمند طراحی شده

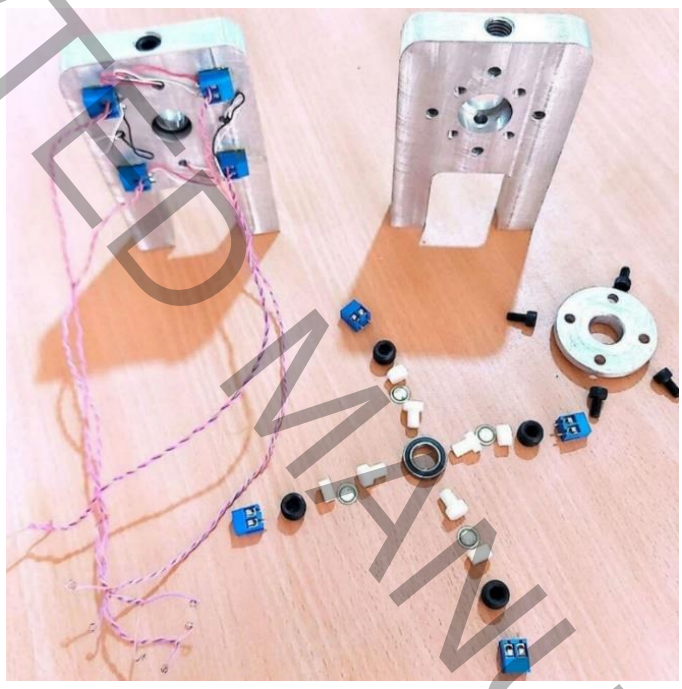
شکل ۱ قطعات و ساختار یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک طراحی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این ساختار از یک تکیه‌گاه نگهدارنده، یک یاتاقان غلتشی، یک درپوش، چهار میله رابط[1] ، چهار دیسک پیزوالکتریک، چهار دیسک عایق[2] و چهار پیچ تنظیم تشکیل شده است. هوزینگ (جایگاه) یاتاقان غلتشی در بدنه نگهدارنده تعبیه شده است. به خاطر لقی[3] در نظر گرفته شده، یاتاقان غلتشی قادر است که در راستای شعاعی داخل فضای هوزینگ حرکت نماید. اما حرکت محوری یاتاقان غلتشی توسط درپوش پیچ شده روی نگهدارنده، مقید می‌شود. یاتاقان غلتشی به وسیله چهار میله رابط احاطه شده است. سوراخ‌های راهنمای میله‌های رابط عمود بر طول محور در بدنه نگهدارنده تعبیه شده‌اند به طوری که میله‌های رابط بتوانند داخل سوراخ‌های راهنمای ایجاد شده به راحتی حرکت نمایند. در انتهای هر سوراخ راهنما یک پیچ تنظیم نصب شده است تا هر دیسک پیزوالکتریک را از یک سمت در تماس با میله رابط و از سمت دیگر در تماس با دیسک عایق مربوطه‌اش قرار دهد. بنابراین در حین کار، ارتعاشات عرضی منتقل شده به میله‌های رابط، کرنش‌های محوری را در دیسک‌های پیزوالکتریک ایجاد می‌کند. لذا دیسک‌های پیزوالکتریک، شارژ الکتریکی را تولید می‌کنند که می توانند به عنوان سیگنال ولتاژ برای تشخیص عیب به کار گرفته شوند.

[1] Probes
[2] Insulating disc
[3] Clearance

ACCEPTED MANUSCRIPT



الف)



ب)

شکل ۱: یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک الف) مدل طراحی شده ب) نمونه‌های ساخته شده

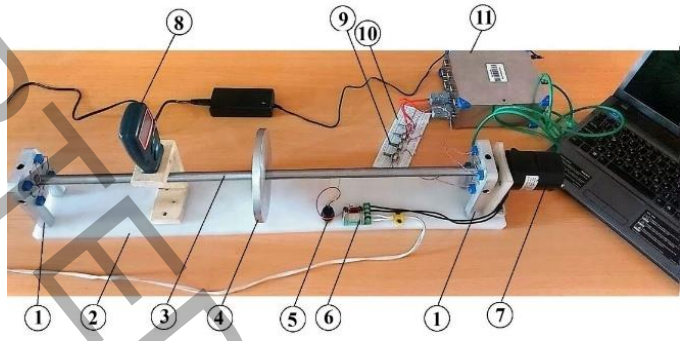
Figure 1. Assembly of the piezoelectric smart bearing components: a) Structure diagram and b) Physical model.

۳- دستگاه تست

شکل ۲ نمای کلی دستگاه تست روتور ترکدار با یاتاقان‌های هوشمند پیزوالکتریک ساخته شده را نشان می‌دهد. مجموعه روتور مورد نظر در این پژوهش، شامل یک دیسک صلب، یک محور به شعاع R و یک کوپلینگ انعطاف‌پذیر است. کوپلینگ انعطاف‌پذیر در واقع یک لوله لاستیکی انعطاف‌پذیر است که برای انتقال گشتاور بین موتور و محور نصب شده است. این کوپلینگ در راستای عرضی دارای سختی بسیار ناچیزی است. بنابراین روتور می‌تواند در شرایط کاری، آزادانه در راستای عرضی حرکت کند. پانزده نمونه محور فولادی یکسان به طول‌های ۷۲/۴ سانتی‌متر و با شعاع‌های ۷/۹۴ میلی‌متر تراشیده شده است. در قسمت میانی هرکدام از آنها یک ترک با عمق‌های مختلف قرار گرفته است. این ترک در واقع یک شیار با ضخامت ناچیز است که به وسیله دستگاه وایرکات ایجاد شده است تا رفتار غیرخطی ترک تنفس‌کننده را شبیه‌سازی نماید (شکل ۳). یک دیسک صلب فولادی به شعاع ۷۶/۲ میلی‌متر و ضخامت ۱۱/۷۲ میلی‌متر نیز در وسط محور (کنار لبه ترک) نصب گردیده است (به کمک دو پیچ مغزی M5). تکیه‌گاه نگهدارنده یاتاقان و

ACCEPTED MANUSCRIPT

درپوش از آلومینیوم و با فرز سی‌ان‌سی ساخته شده است. شاسی، نگهدارنده موتور، میله‌های رابط و دیسک‌های عایق از تفلون تراشیده شده‌اند. حرکت محوری یاتاقان غلتشی (۶۱۸۰۱) توسط درپوش پیچ شده روی نگهدارنده، مقید می‌شود، در حالی که حرکت آن در راستای شعاعی از طریق میله‌های رابط به دیسک‌های پیزوالکتریک منتقل می‌شود. دیسک‌های پیزوالکتریک بین میله‌های رابط و دیسک‌های عایق قرار دارند و در انتهای آنها پیچ‌های کورکن (M12) مونتاژ شده‌اند تا هر دیسک پیزوالکتریک را کاملاً در تماس با میله رابط و دیسک عایق مربوطه‌اش قرار دهد. خروجی دیسک‌های پیزوالکتریک نیز از طریق لحیم‌کاری دو رشته سیم (عبوری از سوراخ‌های تعبیه شده روی نگهدارنده یاتاقان)، به یک ترمینال متصل شده‌اند. در اثر ارتعاشات عرضی منتقل شده از محور به میله‌های رابط، کرنش‌های محوری در دیسک‌های پیزوالکتریک ایجاد شده که منجر به تولید شارژ الکتریکی در آنها و نتیجتاً تولید سیگنال ولتاژ برای تشخیص عیب در سیستم مورد نظر می‌گردد.



شکل ۲: چیدمان کلی دستگاه تست روتور با یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک: (۱) یاتاقان هوشمند (۲) شاسی (۳) محور (۴) دیسک (۵) پتانسیومتر تنظیم دور (۶) مدار دیمر (۷) موتور (۸) تاکومتر لیزری (۹) پتانسیومترهای متصل به دیسک‌های پیزوالکتریک (۱۰) بردبورد (۱۱) دیتالاگر

Figure 2. Smart bearing test rig used for shaft crack testing: (1) smart bearing (2) base (3) shaft (4) disc (5) speed control (6) dimmer circuit (7) motor (8) tachometer (9) potentiometer (10) breadboard (11) data acquisition system.



شکل ۳: نمای نزدیک از ترک ایجاد شده روی شافت

Figure 3. Close view of the crack in the shaft.

نگهدارنده‌های یاتاقان هوشمند، پایه نگهدارنده موتور و پایه نگهدارنده تاکومتر هر کدام از طریق دو پیچ آلن (M8) در جای خود روی شاسی دستگاه محکم می‌گردند. موتور به کار رفته در این پروژه، یک الکتروموتور تک فاز (FDM نوع FM-20100) است. برای تنظیم سرعت الکتروموتور از یک مدار دیمر به همراه یک پتانسیومتر[1] (مقاومت متغیر) استفاده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت دورانی دستگاه نیز از یک تاکومتر لیزری دیجیتال (مدل DT-2234C) استفاده شده که از طریق یک پایه نگهدارنده روی شاسی مونتاژ گردیده است. حال با اتصال مدار دیمر به برق می‌توان موتور را روشن کرده و سرعت مورد نیاز روتور را تنظیم نمود. پس از گذر از

[1] Potentiometer

ACCEPTED MANUSCRIPT

حالت شروع به کار روتور و پایدار شدن سیستم می‌توان ولتاژ تولید شده در هر دیسک پیزوالکتریک را به کمک دستگاه دیتالاگر[1] (MA-DR300-AV08, Mahda Co.)، جمع‌آوری و ذخیره‌سازی نمود. لازم به ذکر است که با توجه به آزمون جاروب فرکانس[2] انجام شده، اولین فرکانس طبیعی دستگاه تست که وابسته به عمق ترک شافت می‌باشد، از مقدار $\omega_{n1}=377.2$ Hz (برای عمق ترک $\mu=0.0$) تا مقدار $\omega_{n1}=338.1$ Hz (برای عمق ترک $\mu=0.6$) می‌تواند تغییر کند. لذا کلیه سیگنال‌های مورد استفاده در ساختار شبکه عصبی، در دورهای قبل از سرعت بحرانی ضبط شده‌اند.

۴- جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، آزمایش‌هایی به ازای پانزده مقدار مختلف عمق ترک h، در چهل و پنج مرحله روی دستگاه انجام شد (پانزده محور یکسان با عمق ترک‌های متفاوت). در پانزده مرحله اول، پانزده مرحله دوم و پانزده مرحله سوم به ترتیب سرعت روتور در ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. سپس تعداد ۹۰۰۰۰۰ داده از ولتاژ خروجی تولید شده در یاتاقان پیزوالکتریک، ثبت گردید. شکل ۴ یک نمونه از سیگنال ولتاژ ضبط شده را در فاصله زمانی ۱۰ تا ۱۲/۵ ثانیه نشان می‌دهد. مطابق جدول ۱، برحسب پارامتر عمق ترک بدون بعد $\mu=h/R$، داده‌های حاصل از آزمایش در سه کلاس سطح I ($0\leq\mu<0.20$)، سطح II ($0.20\leq\mu<0.40$) و سطح III ($0.40\leq\mu\leq0.60$) طبقه‌بندی شدند.

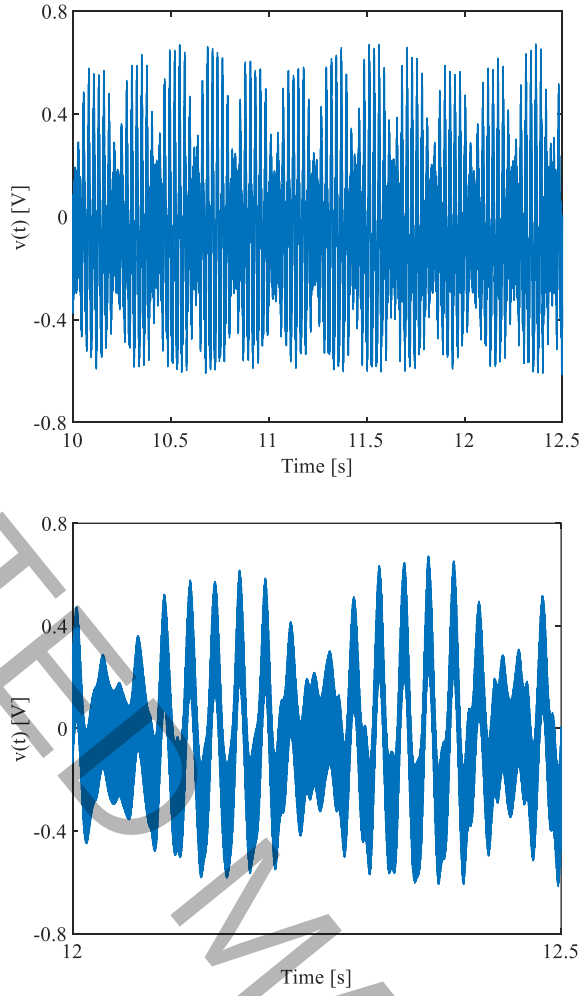
جدول ۱: مجموعه حالت‌های مختلف تست آزمایشگاهی

Table 1. Description of different experiments.

کلاس	پارامتر عمق ترک بدون بعد μ	سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه	سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه	سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه
		شماره آزمایش		
سطح I	۰/۰	۳۱	۱۶	۱
	۰/۰۴	۳۲	۱۷	۲
	۰/۰۸	۳۳	۱۸	۳
	۰/۱۲	۳۴	۱۹	۴
	۰/۱۶	۳۵	۲۰	۵
سطح II	۰/۲۰	۳۶	۲۱	۶
	۰/۲۵	۳۷	۲۲	۷
	۰/۲۸	۳۸	۲۳	۸
	۰/۳۲	۳۹	۲۴	۹
	۰/۳۶	۴۰	۲۵	۱۰
سطح III	۰/۴۰	۴۱	۲۶	۱۱
	۰/۴۴	۴۲	۲۷	۱۲
	۰/۴۸	۴۳	۲۸	۱۳
	۰/۵۰	۴۴	۲۹	۱۴
	۰/۶۰	۴۵	۳۰	۱۵

[1] Data logger
[2] Frequency sweep test

ACCEPTED MANUSCRIPT



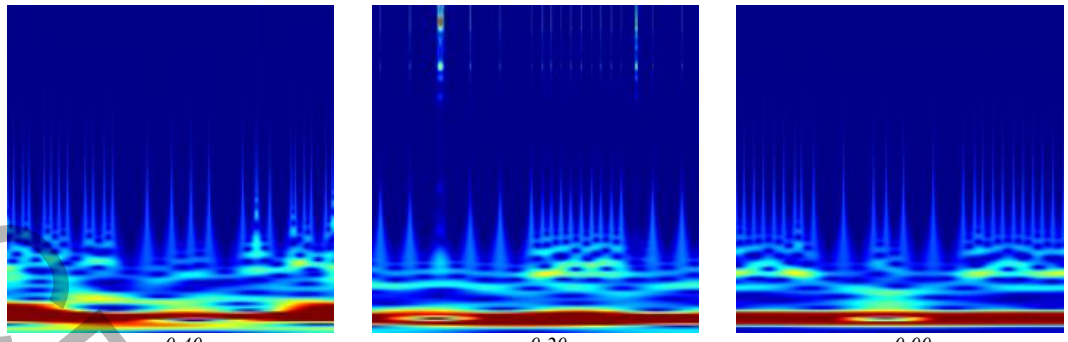
شکل ۴: یک نمونه سیگنال ولتاژ ضبط شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه و عمق ترک $\mu=0.50$ الف) محدوده $10\leq t\leq 12.5$ ب) محدوده $12\leq t\leq 12.5$

Figure 4. A typical voltage signal at the rotational speed *300* rpm and non-dimensional crack depth $\mu=0.5$ in the range of a) $10\leq t\leq 12.5$ b) $12\leq t\leq 12.5$.

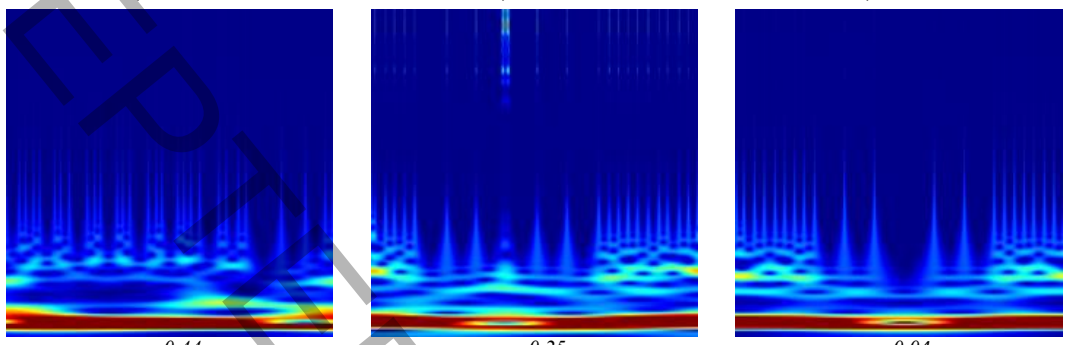
در ادامه، سیگنال‌های ولتاژ ضبط شده از یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک در حوزه زمان (تک بعدی) به تصاویری با اندازه‌های یکسان (۲۲۴×۲۲۴ پیکسل) در حوزه زمان – فرکانس (دو بعدی) تبدیل می‌شوند. این کار با استفاده از تبدیل موجک[1] انجام شده و تصاویر حاصل، اسکیلوگرام[2] سیگنال نامیده می‌شوند. شکل ۵، تصاویر اسکیلوگرام حاصل از سیگنال‌های ولتاژ ضبط شده در هر مرحله از آزمایش را به ازای سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. در قسمت بعد، از این تصاویر برای یادگیری، اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی طراحی شده استفاده خواهد شد.

[1] Wavelet transform
[2] Scalogram

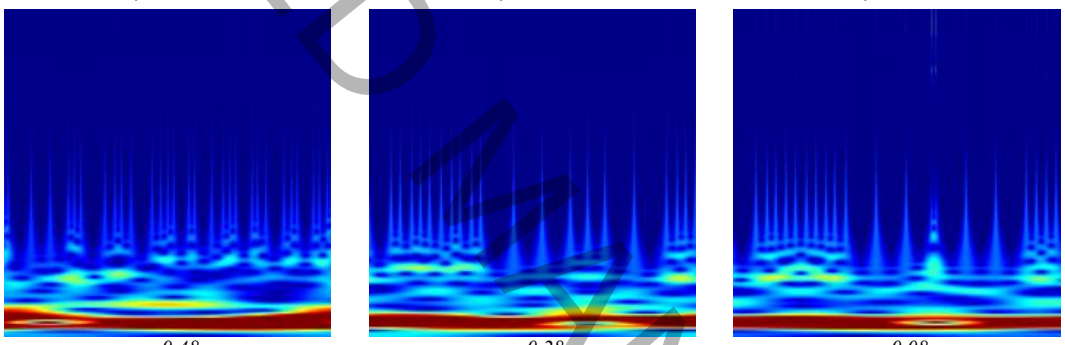
ACCEPTED MANUSCRIPT



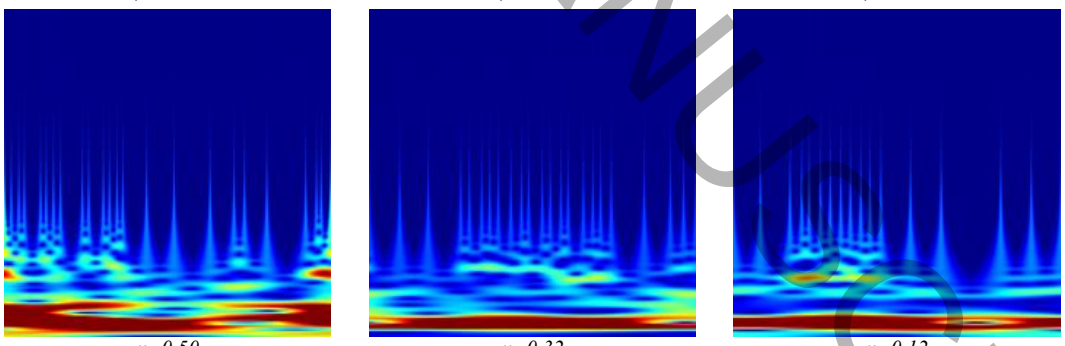
μ=0.40 μ=0.20 μ=0.00



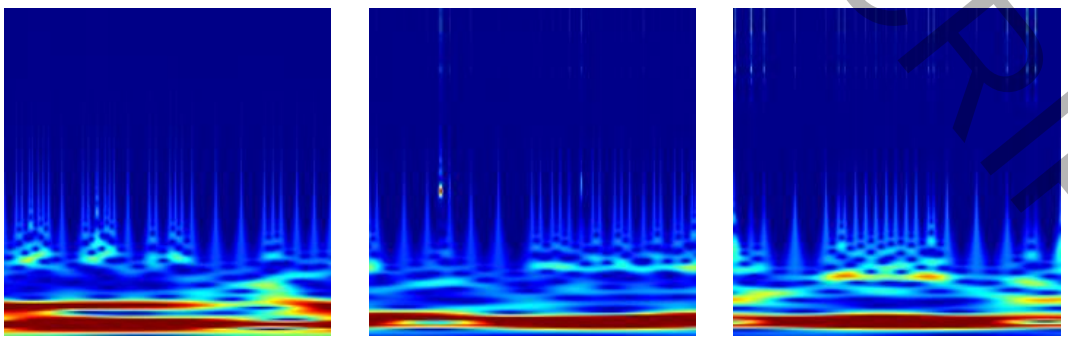
μ=0.44 μ=0.25 μ=0.04



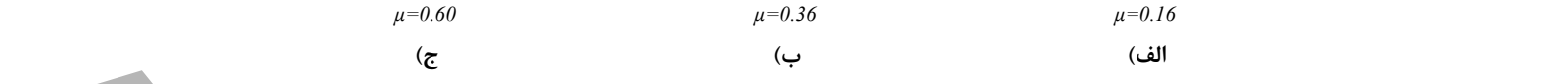
μ=0.48 μ=0.28 μ=0.08



μ=0.50 μ=0.32 μ=0.12



ACCEPTED MANUSCRIPT



الف) ب) ج)

شکل ۵: تصاویر اسکیلوگرام حاصل از سیگنال‌های ولتاژ ضبط شده در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه الف) سطح I ب) سطح II ج) سطح III

Figure 5. Scalograms generated from the recorded voltage signals at the rotational speed *300* rpm a) level I b) level II c) level III.

۵- طراحی شبکه عصبی پیچشی

شبکه عصبی مصنوعی، یک سامانه پردازشی داده‌ها است که از شبکه عصبی زیستی ایده گرفته و پردازش داده‌ها را به کمک پردازنده‌های کوچک که به صورت شبکه‌ای به هم متصل هستند انجام می‌دهد. این پردازنده‌های کوچک به پرسپترون معروف هستند و در واقع نوعی مدل ریاضی از نورون زیستی هستند که ورودی‌ها را پردازش کرده، از آن‌ها یاد گرفته و محاسبات لازم را انجام می‌دهد.

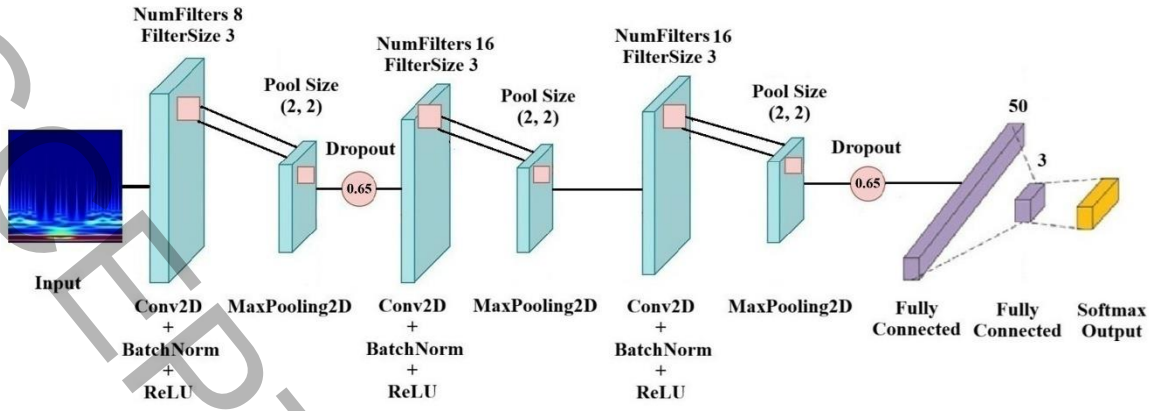
شبکه عصبی پیچشی، یک الگوریتم یادگیری عمیق است که عموماً برای یادگیری بر روی مجموعه داده‌های بصری (مانند تصاویر و عکس‌ها) استفاده می‌شود. در این فرایند، هر تصویر مانند یک ماتریس با مقادیر پیکسل‌های مشخص در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌های عصبی پیچشی به منظور کمینه کردن پیش‌پردازش‌ها از گونه‌ای از پرسپترون‌های چندلایه استفاده می‌کنند. در معماری این لایه‌ها از عملیات‌های مختلف مانند عملیات پیچش یا کانولوشن برای استخراج ویژگی‌ها، عملیات فعالسازی[1] برای یادگیری، عملیات ادغام[2] برای کاهش اندازه و عملیات کاملاً همبند[3] برای تبدیل نقشه‌های ویژگی دوبعدی به بردار ویژگی یک بعدی استفاده می‌گردد. ترکیبات مختلفی از عملیات فوق، منجر به معماری‌های گوناگون شبکه‌های عصبی پیچشی می‌شود. برخی از معماری‌های معروف و پیش‌ساخته نیز وجود دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به گوگل‌نت[4]، رزنت[5] و الکس‌نت[6] اشاره نمود.

در این تحقیق برای پیاده‌سازی تمامی مراحل پردازش تصویر، توسعه و آموزش شبکه عصبی عمیق از محیط برنامه‌نویسی متلب استفاده گردید. شکل ۶، ساختار شبکه عصبی طراحی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، سیگنال‌های ولتاژ ضبط شده از یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک به تصاویری با اندازه‌های یکسان در حوزه زمان – فرکانس تبدیل شده و این تصاویر به عنوان ورودی برای ساختار شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شوند. در این ساختار، سه لایه کانولوشن برای استخراج ویژگی در نظر گرفته شده است. لایه کانولوشن اول از هشت فیلتر با اندازه سه تشکیل شده است. لایه‌های کانولوشنی دوم و سوم نیز از تعداد شانزده فیلتر با اندازه سه ایجاد گردیده‌اند. در هر سه لایه از تابع نرمال‌ساز[7] برای نرمال کردن داده‌ها با هدف تسریع در فرایند یادگیری و همگرایی شبکه استفاده شده است. همچنین در هر سه لایه، تابع فعالساز رلو[8] برای یادگیری شبکه در نظر گرفته شده است. پس از هر لایه کانولوشن، یک عملیات ادغام در نظر گرفته شده است. این کار به این دلیل است که مقادیر زائد و دارای اطلاعاتِ کم که ممکن است توسط عملیات کانولوشن در تصویر ایجاد شده باشد از بین برود و اطلاعاتِ ساده‌تر و مفیدتری به لایه‌های بعدی ارسال شود. بعد از اولین و آخرین مرحله ادغام، عملیات رهاسازی[9] با نرخ ۰/۶۵ لحاظ شده است. عملیات رهاسازی، یک رویکرد تنظیم کردن[10] در شبکه‌های عصبی است که باعث کاهش یادگیری‌های تکراری میان نورون‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، هنگامی که شبکه‌های عصبی عمیق، مدت زیادی آموزش ببینند، دچار بیش‌برازش[11] می‌شوند که یک روش برای حل این مشکل، عملیات رهاسازی است. در ادامه، از دو لایه همبند استفاده شده است. این لایه‌ها قابلیت یادگیری شبکه و تطبیق با الگوهای پیچیده را فراهم می‌کنند. از طرفی ممکن

[1] Activation
[2] Pooling
[3] Fully connected
[4] GoogLeNet
[5] ResNet
[6] AlexNet
[7] Batch normalization
[8] ReLU
[9] Dropout
[10] Regularization
[11] Overfitting

ACCEPTED MANUSCRIPT

است باعث افزایش زمان محاسبه و بیش‌برازش در سیستم گردد. در نهایت، یک تابع فعالساز سافت‌مکس[1] در لایه خروجی لحاظ گردیده است تا به شبکه کمک کند که تمایز واضح‌تری بین کلاس‌ها قائل شود.

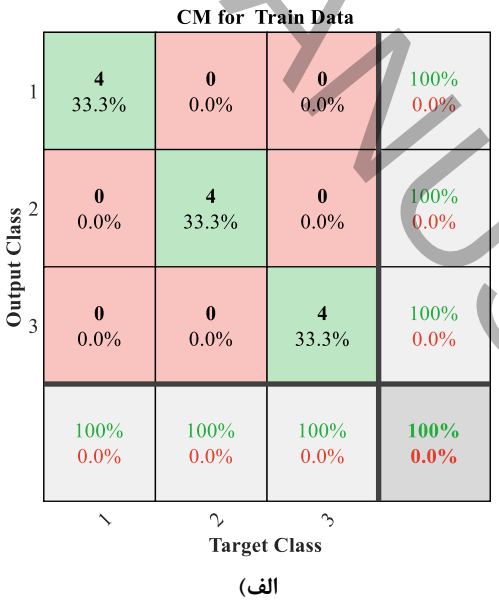


شکل ۶: ساختار شبکه عصبی طراحی شده در این مطالعه

Figure 6. Structure of the constructed CNN model in this study.

به این ترتیب، داده‌ها در سه کلاس اشاره شده در جدول ۱، به عنوان ورودی به شبکه عصبی طراحی شده وارد و شبکه بر روی بانک داده حاصله، آموزش دیده است. بانک داده به صورت ٪۸۰ برای آموزش و اعتبارسنجی (چهار سیگنال ضبط شده در هر کلاس) و ٪۲۰ برای تست (یک سیگنال ضبط شده در هر کلاس) در نظر گرفته شده است. کیفیت این شبکه پس از انجام مراحل مختلف آموزش، اعتبارسنجی و تست عملکرد، توسط ماتریس‌های سردرگمی[2] مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

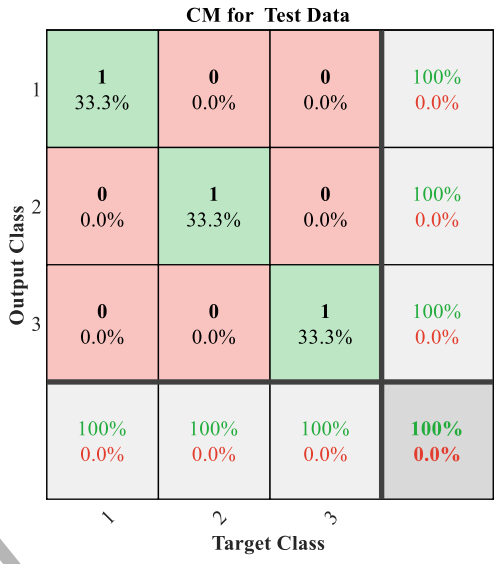
شکل ۷ ماتریس‌های سردرگمی را برای داده‌های یادگیری و تست نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک طراحی شده همراه با شبکه عصبی کانولوشنی ارائه شده قادر است عیب ترک در محور را به طور کامل (دقت ٪۹۹/۹) شناسایی نموده و در سه کلاس سطح I، سطح II و سطح III طبقه‌بندی نماید.



الف)

[1] Softmax
[2] Confusion matrix

ACCEPTED MANUSCRIPT

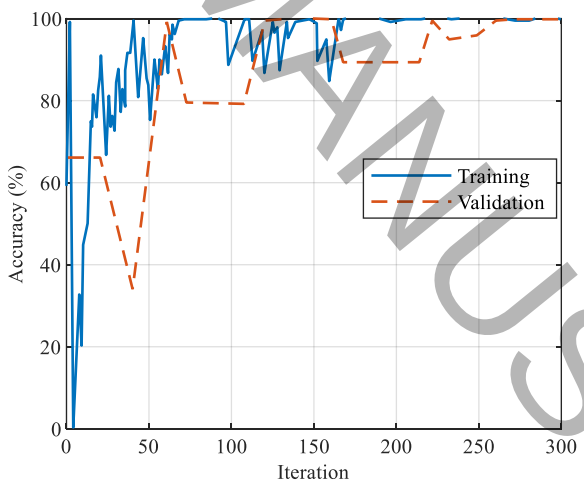


ب)

شکل ۷: ماتریس سردرگمی برای الف) آموزش ب) تست شبکه عصبی طراحی شده

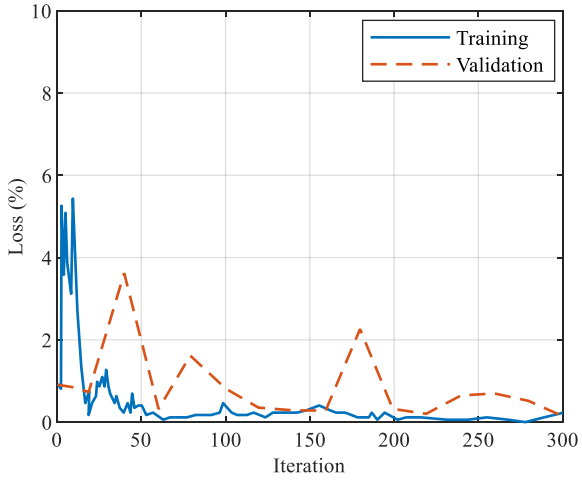
Figure 7. The confusion matrix based on the output voltages a) training b) test.

شکل ۸ مقادیر خطا و دقت طبقه‌بندی برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی در هر دوره آموزش را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که شبکه عصبی پیچشی طراحی شده می‌تواند به سرعت همگرا شده و از عملکرد تشخیصی بالایی برخوردار است. همچنین بهترین عملکرد مدل از دوره ۲۶۰ به بعد حاصل شده است.



الف)

ACCEPTED MANUSCRIPT



ب)

شکل ۸: روند یادگیری شبکه عصبی کانولوشنی طراحی شده در دوره‌های مختلف آموزش

Figure 8. The loss function and accuracy curves of the classification model.

علاوه بر شبکه عصبی طراحی شده در این مطالعه (شکل ۶)، داده‌های حاصل از آزمایش با دو شبکه از پیش طراحی شده و معروف اینسپشن‌وی‌تری[1] و اینسپشن‌رزنت‌وی‌تو[2] نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده روی سه مدل شبکه عصبی، در جدول ۲ ارائه شده است. بهترین عملکرد مربوط به معماری اینسپشن‌وی‌تری به دقت ٪۹۹/۹۴ می‌باشد. همچنین مدل اینسپشن‌وی‌تری سریعتر از دو مدل دیگر همگرا شده و نیازمند دوره های آموزش کمتری می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه مدل‌های شبکه عصبی استفاده شده

Table 2. Comparison of the neural network models which are used in this study.

مدل شبکه عصبی	دقت (٪)
مدل ارائه شده در مطالعه حاضر	۹۹/۹
اینسپشن‌وی‌تری	۹۹/۹۴
اینسپشن‌رزنت‌وی‌تو	۹۹/۹۲

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک جدید طراحی و ساخته شد. به ازای ترک‌هایی با عمق‌های مختلف روی محور، پاسخ ولتاژ این یاتاقان، اندازه‌گیری و ضبط شد. سپس تبدیل حوزه فرکانس – زمان (موجک) همراه با یک الگوریتم شبکه عصبی پیچشی به کار گرفته شد تا عیب ترک در محور را به سه دسته سطح I، سطح II و سطح III طبقه‌بندی کند. نتایج نشان داد که ولتاژ خروجی یاتاقان هوشمند پیزوالکتریک طراحی شده، می‌تواند برای تشخیص عیب سیستم‌های دوار به کارگرفته شود. همچنین الگوریتم شبکه عصبی ارائه شده می‌تواند خطای ترک در سیستم دوار را تا دقت ٪۹۹/۹ طبقه‌بندی نماید. بنابراین یاتاقان پیزوالکتریک خودتوان طراحی شده همراه با وجود ترک تنفس‌کننده در محور و همچنین ارائه معماری یک شبکه عصبی دقیق از نوآوری‌های این پژوهش محسوب شده که یک روش سریع و غیرمخرب را برای شناسایی ترک در سیستم‌های دوار ارائه می‌نماید. نتایج این مطالعه، می‌تواند در پایش وضعیت و افزایش قابلیت اعتماد سیستم‌های دوار به کار گرفته شود.

[1] InceptionV3
[2] InceptionResNetV2

ACCEPTED MANUSCRIPT

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

h	عمق ترک (mm)
R	شعاع محور (mm)
$v(t)$	پاسخ ولتاژ زمانی (V)

علائم یونانی

μ	عمق ترک بدون بعد (--)

۸- منابع

[1] I. Bashir, L. Wang, T. Harvey, B. Zaghari, A. Weddell, N. White, Integrated smart bearings for next generation aero-engines Part 1: Development of a sensor suite for automatic bearing health monitoring. 1st. World Congress on Condition Monitoring, (2017).

[2] B. Zaghari, A. Weddell, N. White, I. Bashir, T. Harvey, L. Wang, Integrated smart bearings for next generation aero-engines.: Part II: energy harvesting and wireless communication development. 1st. World Congress on Condition Monitoring, (2017).

[3] Y. Zhang, W. Wang, X. Wu, Y. Lei, J. Cao, C. Bowen, S. Bader, B. Yang, A comprehensive review on self-powered smart bearings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183 (2023) 113446.

[4] I. Ahmad, L. M. Hee, A. M. Abdelrhman, S. A. Imam, M. S. Leong, Scopes, challenges and approaches of energy harvesting for wireless sensor nodes in machine condition monitoring systems: A review, Measurement, 183 (2021) 109856.

[5] A. Mohammadnia, A. Rezania, B. M. Ziapour, F. Sedaghati, L. Rosendahl, Hybrid energy harvesting system to maximize power generation from solar energy, Energy conversion and management, 205 (2020) 112352.

[6] O. A. Junior, A. L. Maran, N. C. Henao, A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91 (2018) 376-93.

[7] C. Wei, X. Jing, A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74 (2017) 1-8.

[8] Z. Lai, J. Xu, C. R. Bowen, S. Zhou, Self-powered and self-sensing devices based on human motion, Joule, 6 (2022) 1501-65.

[9] L. C. Zhao, H. X. Zou, G. Yan, F. R. Liu, T. Tan, W. M. Zhang, Z. K. Peng, G. Meng, A water-proof magnetically coupled piezoelectric-electromagnetic hybrid wind energy harvester, Applied Energy, 239 (2019) 735-46.

[10] X. Ma, S. Zhou, A review of flow-induced vibration energy harvesters, Energy Conversion and Management, 254 (2022) 115223.

[11] M. Cansiz, D. Altinel, G. K. Kurt, Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review, Energy, 174 (2019) 292-309.

[12] H. Fu, E. M. Yeatman, A methodology for low-speed broadband rotational energy harvesting using piezoelectric transduction and frequency up-conversion, Energy, 125 (2017) 152-61.

[13] W. Kwak, Y. Lee, Optimal design and experimental verification of piezoelectric energy harvester with fractal structure, Applied Energy, 282 (2021) 116121.

[14] T. T. Toh, P. D. Mitcheson, A. S. Holmes, E. M. Yeatman, A continuously rotating energy harvester with maximum power point tracking, Journal of Micromechanics and Microengineering, 18 (2008) 104008.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[15] Z. Wang, W. Wang, F. Gu, C. Wang, Q. Zhang, G. Feng, A. D. Ball, On-rotor electromagnetic energy harvester for powering a wireless condition monitoring system on bogie frames, Energy Conversion and Management, 243 (2021) 114413.

[16] S. Gao, Q. Han, Z. Jiang, X. Zhang, P. Pennacchi, F. Chu, Triboelectric based high-precision self-powering cage skidding sensor and application on main bearing of jet engine, Nano Energy, 99 (2022) 107387.

[17] R. Ambur, S. Rinderknecht, Self-sensing techniques of piezoelectric actuators in detecting unbalance faults in a rotating machine, Procedia Engineering, 144 (2016) 833-40.

[18] N. Kim, P. P. Anderson, inventor Chevron USA Inc, assignee. Piezoelectric power generation system. United States patent US 9,837,937. (2017).

[19] Y. B. Lee, W. Kwak, inventors; Korea Advanced Institute of Science, Technology KAIST, assignee. System of condition monitoring of self-power-generated bearing module. United States patent US 11,513,032. (2022).

[20] Y. B. Lee, W. Kwak, B. S. CHOE, J. KIM, inventors; Korea Advanced Institute of Science, Technology KAIST, assignee. Fractal structure for power-generation of bearing rotating vibration. United States patent US 11,525,477. (2022).

[21] L. Zhang, F. Zhang, Z. Qin, Q. Han, T. Wang, F. Chu, Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring, Energy, 238 (2022) 121770.

[22] A. Safian, N. Wu, X. Liang, Development of an embedded piezoelectric transducer for bearing fault detection, Mechanical Systems and Signal Processing, 188 (2023) 109987.

[23] R. Shi, Z. Yan, S. Fang, Z. Qiao, S. Xiao, J. Lei, Z. Wang, B. Xu, Z. Lai, Research on a self-powered rolling bearing fault diagnosis method with a piezoelectric generator for self-sensing, Applied Energy, 376 (2024) 124206.

[24] Y. C. Chiu, Y. C. Lo, M. F. Lumentut, Y. C. Shu, Spatial condition monitoring in rotating machinery using LC-tuned piezoelectric arrays and multi-task CNN, Smart Materials and Structures, 34 (2025) 095024.

[25] Y. Xiao, D. Song, N. Wu, Development of compact smart bearing and novel hybrid feature assessment for weak defect identification, Nondestructive Testing and Evaluation, 40 (2025) 4669-4695.

[26] Z. Qin, L. Qin, Q. Zhu, P. Wang, F. Zhang, F. Chu, An ultrasensitive self-powered smart bearing pedestal with fault locating capability, Mechanical Systems and Signal Processing, 235 (2025) 112924.

[27] Y. Zhang, J. Cao, H. Zhu, Y. Lei, Design, modeling and experimental verification of circular Halbach electromagnetic energy harvesting from bearing motion, Energy conversion and management, 180 (2019) 811-21.

[28] E. SIGAL, A. C. Van Der Ham, inventors. Power generator integrated with bearing. United States patent application US 13/995,962. (2014).

[29] Y. Xu, S. Bader, B. Oelmann, Design, modeling and optimization of an m-shaped variable reluctance energy harvester for rotating applications, Energy Conversion and Management, 195 (2019) 1280-94.

[30] Y. Gong, S. Wang, Z. Xie, Y. Shao, W. Huang, Design, modeling and optimization of an N-shape electromagnetic energy harvester for smart bearing of high speed train, Smart Materials and Structures, 30 (2021) 075026.

[31] Y. Miao, S. Gao, Y. Kong, Z. Jiang, Q. Han, F. Chu, Variable reluctance bearing generators applicable in condition monitoring of bearing cages, Mechanical Systems and Signal Processing, 194 (2023) 110249.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[32] J. Chen, H. Guo, G. Liu, X. Wang, Y. Xi, M. S. Javed, C. Hu, A fully-packaged and robust hybridized generator for harvesting vertical rotation energy in broad frequency band and building up self-powered wireless systems, Nano Energy, 33 (2017) 508-14.

[33] Q. Han, Z. Ding, Z. Qin, T. Wang, X. Xu, F. Chu, A triboelectric rolling ball bearing with self-powering and self-sensing capabilities, Nano Energy, 67 (2020) 104277.

[34] Z. Jiang, S. Gao, Y. Kong, P. Pennacchi, F. Chu, Q. Han, Ultra-compact triboelectric bearing based on a ribbon cage with applications for fault diagnosis of rotating machinery, Nano Energy, 99 (2022)

ACCEPTED MANUSCRIPT