



Experimental Detection and Size Classification of Defects on Outer Race of Angular Contact Ball Bearing Using Acoustic Emission Signals with Artificial Neural Network

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Meserkhani A.¹ MSc,
Jafari S.M.^{*1} PhD,
Rahi A.¹ PhD

How to cite this article

Meserkhani A, Jafari S.M, Rahi A. Experimental Detection and Size Classification of Defects on Outer Race of Angular Contact Ball Bearing Using Acoustic Emission Signals with Artificial Neural Network. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(8):1991-2000.

ABSTRACT

In this paper, experimental defect diagnosis and the classification of its size in the outer race of angular contact ball bearing with acoustic emission method and artificial neural network are presented. In an experimental system, bearings are loaded at four speeds of 600, 900, 1200, and 1500rpm with four loads from low to high. Loads are applied to the outer race with the help of four bolts with equal and specific torques. Since the bearing is angular type, this type of loading is converted to radial and axial combined loading simultaneously and differs from conventional loads in deep groove bearings. Acoustic emission waves are recorded using broadband sensors in two states, healthy and defective. Therefore, to diagnose the defect, different states can be compared with the healthy. The spark method was used to create an artificially seeded defect. In analyzing the results, a new parameter called "the total time above threshold" was introduced to increase the efficiency of defect diagnosis and classification of its size. With the help of the introduced parameter and 4 conventional acoustic emission parameters and using an artificial neural network, the performance of the artificial intelligence system was 95.1% in defect diagnosis and 94.4% in defect size classification.

Keywords Experimental Defect Detection; Size Classification; Angular Contact Ball Bearing; Acoustic Emission; Artificial Neural Network

CITATION LINKS

[1] Quantitative acoustic emission and failure mechanics of composite materials [2] Practical acoustic emission testing [3] The use of acoustic emission for estimation of bearing defect size [4] Acoustic emissions and monitoring bearing health [5] Artificial neural network for bearing defect detection based on acoustic emission [6] Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring [7] Application of acoustic emission in diagnostic of bearing faults within a helicopter gearbox [8] Parameter comparison of acoustic emission signals for condition monitoring of low-speed bearings [9] A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size [10] Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings [11] Artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithm for bearing fault detection [12] Low speed bearing fault diagnosis using acoustic emission sensors [13] Influence of operational variables in a hydrodynamic bearing on the generation of acoustic emission [14] Operational bearing parameters and acoustic emission generation [15] Estimation of bearing defect size with acoustic emission [16] Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning [17] Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm [18] A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique [19] Modelling of acoustic emission generated in rolling element bearing [20] Statistical and frequency analysis of acoustic signals for condition monitoring of ball bearing [21] Bearing fault diagnosis based on convolutional neural networks with kurtogram representation of acoustic emission signals

¹Applied Design Department, Mechanical & Energy Systems Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Shahid Beheshti University, Daneshjoo Boulevard, Velenjak, Tehran, Iran. Postal Code: 1983969411
Phone: +98 (21) 73932723
Fax: +98 (21) 77311446
m.jafari@sbu.ac.ir

Article History

Received: September 11, 2019
Accepted: April 27, 2020
ePublished: August 15, 2020

تشخیص تجربی عیب و دسته‌بندی اندازه آن در حلقه خارجی یاتاقان غلتشی تماس زاویه‌ای با روش نشر صوتی و شبکه عصبی مصنوعی

آرمی مسرخانه MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سیدمحمد جعفری* PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

عباس رهی PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، تشخیص تجربی عیب و دسته‌بندی اندازه آن در حلقه خارجی یاتاقان غلتشی تماس زاویه‌ای با روش نشر صوتی و شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. در یک سیستم آزمایشگاهی، یاتاقان‌ها در چهار سرعت ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه با چهار بارگذاری از کم به زیاد بارگذاری شدند. بارگذاری به کمک ۴ عدد پیچ با گشتاورهای مساوی و مشخص به حلقه خارجی اعمال شدند. این نوع بارگذاری به دلیل اینکه یاتاقان تماس زاویه‌ای است به بارگذاری ترکیبی شعاعی و محوری به صورت همزمان تبدیل می‌شود و با بارگذاری‌های مرسوم در یاتاقان‌های شیار عمیق متفاوت است. امواج نشر صوتی به کمک حسگرهای باند پهن، در دو حالت سالم و معیوب ثبت می‌شود. بنابراین برای تشخیص عیب، می‌توان حالت‌های مختلف را با حالت سالم مقایسه کرد. برای ایجاد عیب‌کنندگی به صورت مصنوعی، از روش اسپارک استفاده شد. در بررسی نتایج پارامتر جدیدی به منظور افزایش بازده تشخیص عیب و دسته‌بندی اندازه آن، به نام مجموع زمان بالای حد آستانه معرفی شد. با کمک پارامتر معرفی شده و ۴ پارامتر نشر صوتی و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، عملکرد سامانه هوش مصنوعی در تشخیص عیب ۹۵/۱٪ و در دسته‌بندی اندازه عیب ۹۴/۴٪ بود.

کلیدواژه‌ها: تشخیص تجربی عیب، دسته‌بندی اندازه، یاتاقان غلتشی تماس زاویه‌ای، نشر صوتی، شبکه عصبی مصنوعی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

*نویسنده مسئول: m_jafari@sbu.ac.ir

مقدمه

روش‌های آزمون‌های غیرمخرب برای شناسایی عیوب می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، بازرسی جریان ادی، بازرسی مایع نافذ، و فراصوت (التراسونیک) روش‌هایی هستند که می‌توانند برای تشخیص عیوب کوچک مورد استفاده قرار گیرند. روش دیگر، نشر صوتی (Acoustic Emission) است و به طور گسترده‌ای برای تشخیص عیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه نشر صوتی به عنوان یک روش نظارت غیرمخرب مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از فواید اساسی نشر صوتی، شناسایی مشخصه‌های آسیب دینامیکی و به طور دقیق‌تر برای نظارت بر رشد ترک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. امروزه تشخیص عیب اهمیت زیادی دارد،

چرا که وجود عیب در یک قطعه باعث ایجاد ترک در آن و در نتیجه باعث خرابی کل سیستم می‌شود. بدین منظور تشخیص عیب در قطعه خیلی پیش‌تر از وقوع هر گونه حادثه‌ای، چه از لحاظ مالی و چه از لحاظ ایمنی و امنیت جانی، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. تشخیص عیب با استفاده از نشر صوتی بر روی یاتاقان‌های غلتشی نیز می‌تواند مهم باشد، چرا که در بسیاری از صنایع از یاتاقان غلتشی استفاده می‌شود که وجود عیب در آنها می‌تواند باعث خرابی شود و عواقب برگشت‌ناپذیری را در پی داشته باشد[1].

هنگامی که قطعه‌ای تحت تأثیر یک نیروی محرکه خارجی (اعم از مکانیکی و حرارتی) قرار می‌گیرد، منابع متمرکز انرژی در آن شروع به آزادسازی امواج مکانیکی (الاستیکی) می‌کنند، این امواج به سطح قطعه گسیل داده می‌شوند. این پدیده فیزیکی را نشر صوتی می‌نامند. همچنین می‌توان این گونه بیان کرد که نشر صوت، مربوط به تولید سریع امواج الاستیکی، همزمان با آزادشدن سریع انرژی کرنشی در مواد جامد است. این امواج را می‌توان توسط گیرنده‌های (حسگرها) مناسبی، که بر روی سطح قطعه نصب می‌شوند، ثبت و بررسی و تفسیر نمود. این گیرنده‌ها اطلاعات ارزشمندی را در ارتباط با منبع صوتی که همان عیب یا ناپیوستگی است به شخص بازرس ارائه می‌دهد. این یک روش قدرتمند برای آزمایش رفتار مواد تغییر شکل‌داده تحت تنش است و از روش‌های جدید در زمینه آزمون‌های غیرمخرب است که از اوایل دهه ۸۰ میلادی به صورت تجاری و صنعتی به کار می‌رود[2].

آزمون نشر صوتی یک روش متمرکز و موضعی نیست و لزوماً نباید نزدیک منبع انتشار باشد. درمقایسه با روش‌های دیگر از جمله ارتعاشات که باید در نزدیکی منبع قرار گیرد، حجم بالاتری را بررسی می‌کند و اغلب قادر به شناسایی عیوب مختلفی مانند عیوب جوشکاری، ترک و غیره در فواصل بیش از چندین متر تا حسگر است. علاوه بر این، قادر است یک سازه را با چند حسگر محدود به صورت کامل و در شرایط عملیاتی آن ارزیابی نموده و علاوه بر موارد ذکر شده که در مورد سازه‌های گوناگون صادق است، در مورد تجهیزاتی نظیر مخازن بزرگ و در مواردی که دلیلی برای بازرسی داخلی وجود ندارد، می‌توان بدون بازکردن تجهیزات از این روش برای شناسایی و موقعیت‌یابی عیوبی مانند نشتی و خوردگی استفاده کرد[1].

پژوهش‌های بسیاری در زمینه تشخیص عیب به کمک نشر صوتی انجام شده است. امبا، در زمینه تخمین اندازه عیب به کمک نشر صوتی تحقیقی انجام داده است. او به کمک مدت زمان یک ضربه، اندازه عیب را تخمین زد. او همچنین تحقیق تجربی نیز برای تشخیص عیب ارائه کرد. تمرکز او در این تحقیق بر روی مقدار حد آستانه بود به طوری که به این نتیجه رسید که پارامترهای ساده و ابتدایی نشر صوتی از جمله مقدار میانگین مربعات و همچنین شمارش می‌توانند در تشخیص عیب یاتاقان غلتشی شیار عمیق بسیار کارساز باشد[3,4].

انجام دادند. به این نتیجه رسیدند که نشر صوتی بسیار توان‌تر از ارتعاشات در تشخیص عیب در مراحل اولیه است. همچنین به این نتیجه رسیدند که نشر صوتی برخلاف ارتعاشات برای تشخیص اندازه عیب اطلاعات مفیدی در اختیار می‌گذارد[9].

چودهری و تاندن، بر کاربرد نشر صوتی در تشخیص عیب بر روی حلقه داخلی و عضو غلتنده آزمایش‌هایی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که شمارش روند افزایشی را نسبت به افزایش عیب دارد و برای تشخیص عیب می‌تواند مفید باشد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که این روند افزایشی پس از یک اندازه عیب مشخص متوقف می‌شود و دیگر افزایش پیدا نمی‌کند[10].

سامانتا و همکاران، برای تشخیص عیب از شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌های بردار پشتیبان همراه با الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند. آنها از داده‌های سیگنال‌های ارتعاشی برای استخراج ویژگی کمک گرفتند. نتایج توانایی کاربرد الگوریتم ژنتیک در انتخاب ویژگی و دسته‌بندی پارامترها را نشان می‌دهد[11].

ون هک و همکاران، در ارایه یک روش نو برای تشخیص عیب یاتاقان سرعت‌های پایین‌تر از ۱۰ هرتز تحقیقاتی انجام دادند. در این مطالعه، روش پردازش سیگنال در ابتدا برای تشخیص عیوب یاتاقان و سپس بعد از آن طیف فرکانسی برای دسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. با وجود تأثیرگذاری، این روش نیاز به بازرسی چشمی طیف فرکانسی برای دستیابی به تشخیص عیب دارد. تنها عیب حلقه داخلی مشاهده شد و تشخیص تمامی عیوب مختلف به‌ترتیب با استفاده از باند فیلتر و شاخص‌های حالت، قابل تصدیق نخواهد شد. با این حال، در مجموع تعداد ۳۰ شاخص حالت بررسی شد که چهار عدد از آنها تمامی چهار عیوب یاتاقان را به خوبی نشان دادند[12].

میرهادی‌زاده و همکاران، در درک تأثیر متغیرهای عملیاتی (سرعت، بارگذاری، و غیره) در تولید نشر صوتی در یاتاقان‌های هیدرودینامیکی تحقیق تجربی ارایه دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که اتلاف انرژی یاتاقان به‌طور مستقیم با سطح نشر صوتی مرتبط است. هدف این مطالعه اطمینان‌یافتن از ارتباط بین سرعت دورانی، بار، ضخامت فیلم روغن، اتلاف قدرت، تنش برشی و انتشار آوایی برای یک یاتاقان هیدرودینامیکی است[13].

کاتیر و امبا، آزمایش‌های تجربی در شرایط تقریباً ایزوله حرارتی، برای درک تأثیر سرعت و بارگذاری در تولید امواج نشر صوتی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در شرایط روغن‌کاری الاستوهیدرودینامیکی، تولید امواج نشر صوتی به‌طور مستقیم به ضخامت فیلم روغن که به‌صورت تئوری پیش‌بینی شده بود، مرتبط است. همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت نسبت به افزایش بارگذاری تأثیر بیشتری در تولید امواج دارد[14].

لعمدی و همکاران، در ارتباط کاربرد نشر صوتی برای تخمین اندازه عیب حلقه خارجی یاتاقان با بار محوری تحقیق کردند. مطالعه آنها نشان داد که مدت زمان انفجار نشر صوتی به‌طور مستقیم به طول عیب مرتبط است و نسبت دامنه به نویز به عرض عیب مرتبط

طاها و ویدیاتی، به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص عیب براساس نشر صوتی مطالعه کردند. آنها از دو روش تخمین تابع و بازشناسی الگو برای تشخیص عیب بهره گرفتند. هدف از این مطالعه توسعه‌دادن روشی قوی برای نظارت بر عیب‌های یاتاقان‌ها با استفاده از نشر صوتی در شبکه عصبی است. داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه، از مطالعات تجربی امواج ارتعاشات و نشر صوتی استخراج‌شده از مطالعه‌ای دیگر، گرفته شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که هر دو روش برای تشخیص عیب یاتاقان ساچمه‌ای مناسب است. ثابت می‌شود که روش آموزش تقریب تابع، دقیق‌تر از روش آموزش تشخیص الگو برای نظارت بر عیب یاتاقان ساچمه‌ای است[5].

لی و لی، در زمینه نظارت بر وضعیت یاتاقان‌ها با استفاده از نشر صوتی مطالعاتی انجام دادند. دو ویژگی نرمال و بی‌بعدشده با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال زمان کوتاه استخراج شدند. به‌کمک این دو ویژگی توابع مجزا خطی برای تشخیص عیب در حلقه خارجی و جزء غلتنده معرفی شدند. با استفاده از این زوج اعداد استخراج‌شده، نمودار خطی در صفحه همین زوج اعداد رسم کردند به‌طوری که آنها به این نتیجه رسیدند که به‌کمک این دو پارامتر بی‌بعدشده نقاطی در صفحه که بالای خط، معیوب و نقاطی که پایین خط و نزدیک مبدأ باشند، سالم هستند[6].

لاشا و همکاران، کاربرد نشر صوتی را در تشخیص عیوب یاتاقان در جعبه دنده بالگرد مورد بررسی قرار دادند. روش‌های استفاده‌شده در این مطالعه به‌طور معمول برای مواقعی که نویز بزرگ زمینه نشانه عیب را می‌پوشاند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از روش‌های پردازش سیگنال برای استخراج اثر عیب یاتاقان، فیلتر انطباقی، کشیدگی طیفی و تحلیل پوش انجام شده است. ترکیب این روش‌ها توانایی شناسایی وجود اندازه‌های متفاوتی از عیوب یاتاقان در مقایسه با طیف فرکانسی معمول را نشان می‌دهد. از نتایج ارایه‌شده به‌وضوح مشخص می‌شود که نشر صوتی نشانه‌ای نخستین از عیب را ارایه می‌دهد[7].

کیم و همکاران، بر مقایسه پارامترهای متفاوت در نظارت بر وضعیت یاتاقان‌های سرعت پایین تحقیق انجام دادند. آنالیز متداول براساس ضربه نشر صوتی، پارامترهای آماری حوزه زمان و فرکانس با نسبت قله اصلاح‌شده محاسبه و برای نظارت بر وضعیت یاتاقان مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که انرژی مطلق، نظر به این که بیشترین تفاوت‌ها را در تمامی سرعت‌ها نشان می‌دهد، بهترین پارامتر برای پایش وضعیت است. همچنین مشاهده شد که بیشینه مقدار پارامترها نسبت به مقدار میانگین برای تشخیص عیب یاتاقان‌های سرعت پایین، تأثیر بیشتری دارند. در آنالیز حوزه زمان، کشیدگی (Kurtosis) بهترین پارامتر پس از چولگی (Skewness) است[8]. در این تحقیق نیز بر پایه همین استدلال از همین دو پارامتر نیز استفاده شده است.

لعمدی و امبا، مطالعه‌ای تجربی و مقایسه‌ای در استفاده از نشر صوتی و ارتعاشات برای شناسایی عیب یاتاقان با بارگذاری شعاعی

است. همچنین به این نتیجه رسیدند که مدت زمان به بارگذاری اعمالی مرتبط نیست [15].

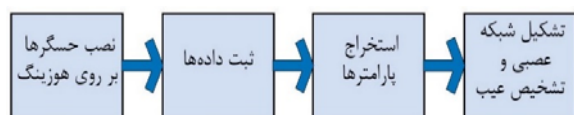
افورجانی و سنبر سه روش ماشین نظارت شده (Supervised) رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، مدل چندلایه شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون فرآیند گوسی را برای تشخیص ارتباط میان ویژگی‌های نشر صوتی و سایش طبیعی متناظر با یاتاقان سرعت پایین آزمایش انجام دادند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی نسبت به دو روش دیگر مفیدتر بود [16]. حسینی و همکاران، بر طبقه‌بندی سیگنال‌های نشر صوتی تولید شده از یاتاقان ژورنال در شرایط روغن کاری متفاوت براساس آنالیز موجک در ترکیب با شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک تحقیقاتی انجام دادند. آنها به کمک آزمایش به این نتیجه رسیدند که روش ارایه شده توانایی استخراج ویژگی‌ها از سیگنال‌های نشر صوتی و همچنین دسته‌بندی انواع مختلف شرایط روغن کاری را دارد [17]. چاکن و همکاران، ترکیب موجک پاکت را برای دینویز کردن سیگنال‌های نشر صوتی و انتقال هیلبرت برای استخراج پوش و تابع همبستگی برای پیدا کردن الگوها در سیگنال نشر صوتی استفاده کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که روش پیشرفته پوش قادر به تشخیص عیب در مراحل اولیه با ضریب سیگنال به نویز کمتر از ۹ دسی‌بل نسبت به روش معمولی پوش است [18].

تحقیقات تجربی برای درک بهتر تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر بار، سرعت، و غیره بر روی نشر صوتی تولید شده حین وضعیت انجام کار یاتاقان، انجام شده‌اند. *شارما و پاری*، یک مدل سازی تئوری برای درک تأثیرات پارامترهای عملیاتی بر روی انرژی نشر صوتی تولید شده در المان غلتشی یاتاقان، ارایه داده‌اند. مدل براساس اثرات متقابل زبری‌های بین سطوح حلقه داخلی، حلقه خارجی و المان غلتشی یاتاقان، با استفاده از تئوری تماسی هرترز، مفاهیم آماری، توزیع نیروی تماسی در منطقه بارگذاری و تأثیرات روان کننده، ایجاد شده است. مدل برای یاتاقان عیب دار با توجه به عیب در حلقه داخلی، حلقه خارجی و المان غلتشی برای درک فیزیک تأثیر عیب بر روی نشر صوتی، توسعه یافته است. مدل ایجاد شده با مطالعات تجربی، تصدیق شده است و نتایج رضایت بخشی به دست آمده است. آنها به این نتیجه رسیدند که مدل ارایه شده، توانایی درک نشر صوتی تولید شده را دارد [19]. *کومار و همکاران*، برای تشخیص عیب به کمک نشر صوتی، آنالیزهای آماری و فرکانسی را انجام دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای آماری برای تشخیص انواع مختلف عیب یاتاقان شیار عمیق مفید است. آنالیز طیفی قدرت نشان می‌دهد که یاتاقان‌ها در شرایط کاری متفاوت با سرعت‌های متفاوت، امواج صوتی را با طیف قدرت متفاوت را نشر می‌دهند [20].

پروسویرین و همکاران، به کمک امواج نشر صوتی براساس شبکه‌های عصبی هم‌گشت (Convolution) همراه با کرتوگرام (Kurtogram) تحقیق کردند. برای اعمال این نوع شبکه آنها

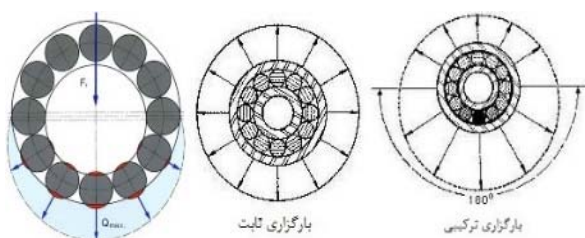
امواج یک بعدی نشر صوتی را به کرتوگرام دوبعدی انتقال دادند. نتایج تجربی با استفاده از ۸ نوع مختلف شرایط یاتاقان، نشان داد که رویکرد ارایه شده به کمک کرتوگرام و شبکه‌های عصبی مصنوعی کانولوشن دقت دسته‌بندی بالایی را به دست آورد [21].

تفاوت اصلی که روش نشر صوتی با سایر روش‌های آزمون‌های غیرمخرب دارد غیرفعال بودن این روش است، در حالی که سایر روش‌ها در اکثر موارد فعال هستند. به طور مثال روش التراسونیک یا رادیوگرافی یا سایر روش‌ها برای به دست آوردن اطلاعات در مورد قطعه مورد نظر نیاز به اعمال انرژی خارجی یا تغییری بر روی ماده مورد نظر هستند ولی در روش نشر صوتی، انرژی آزاد شده در داخل ماده مرجعی برای کار بازرسی است [1]. در این تحقیق نیز امواج نشر صوتی از برخورد عضو غلتنده با عیب تولید می‌شود و این داده‌ها ثبت و آماده تحلیل می‌شوند که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ روند عیب‌یابی یاتاقان

با توجه به تحقیقات پیشین مشاهده شد که بیشتر موارد در بررسی عیب بر روی یاتاقان‌های شیار عمیق انجام شده‌اند. در مقاله حاضر، یاتاقان از نوع تماس زاویه‌ای است و بارگذاری آن با دیگر بارگذاری‌ها تفاوت دارد. در این نوع یاتاقان، بارگذاری ترکیبی از بارهای شعاعی و محوری است. همچنین بار شعاعی خود ناشی از مجموع وزن محور و بخشی از بار محوری است که به خاطر تماس زاویه‌ای بودن یاتاقان، به بار شعاعی تبدیل می‌شود که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲ بارگذاری ترکیبی در یاتاقان آزمون

همچنین با توجه به پارامتر جدید تعریف شده که برای تشخیص عیب کمک فراوانی انجام می‌دهد و با کمک شبکه عصبی، زمان تشخیص عیب کم می‌شود. از جمله برتری‌هایی که روش نشر صوتی نسبت به روش مشابه تحلیل ارتعاشاتی دارد این است که روش نشر صوتی با توجه به انرژی کرنشی که ترک در مراحل اولیه رشد است به وجود می‌آید، قابل تشخیص است و همچنین قابلیت تشخیص ترک‌های کوچک و ریز را دارد.

نوع بارگذاری	مقدار بارگذاری (نیوتون متر)
بسیار کم	۰/۷
کم	۱/۷
متوسط	۲/۷
زیاد	۳/۷

سیستم گرد آوری داده

مبدل‌های (حسگر) داده‌برداری به کمک گریس همه‌منظوره ساخت شرکت SKF به‌عنوان انتقال‌دهنده موج یا کوپلنت (Couplant) از جسم به حسگر به پایه‌های یاتاقان متصل شده‌اند. حسگر نشر صوتی از نوع باند فرکانسی پهن مدل $WS\alpha$ از جنس پیزوالکتریک با حوزه‌های فرکانسی عملیاتی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز استفاده شده است. تمامی امواج دریافتی از حسگر پیش از داده‌برداری به کمک پیش‌تقویت‌کننده‌ها، ۴۰ دسی‌بل تقویت شده‌اند. کارت داده‌برداری این سیستم تا ۱۰ مگاهرتز را پشتیبانی می‌کند که در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل (۵) میز آزمون و محل قرارگیری حسگر

تمامی آزمایش‌ها با نرم‌افزار AEwin و با نرخ نمونه‌برداری ۲ میلیون نمونه در هر ثانیه، به دلیل داده‌برداری بهتر و واقعی‌تر و مقدار بیشینه داده‌برداری که سیستم در اختیار کاربر می‌گذارد، داده‌برداری شده‌اند. همچنین پیش و پس از انجام هر یک از آزمایش‌ها، آزمون سنجش حسگرهای نشر صوتی AST ، گرفته شده است. این آزمون معیاری برای سنجش و آزمایش حسگرها است، طوری که اگر اختلاف نتایج پیش و پس از آزمایش زیاد باشد، نشان‌دهنده آن است که شرایط داده‌برداری در طی آزمون یکسان نبوده است (مثلاً اتفاقی برای حسگرها پیش آمده است) و باید از ابتدا آزمایش را شروع کرد. این آزمون برای گردآوری داده‌ها و محاسبه پارامترها بسیار مهم است. نمونه‌هایی از سیگنال‌های دریافتی را در تمامی حالات عیوب در بارگذاری زیاد و سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه را در نمودار ۱ مشاهده می‌کنید.

پردازش داده‌ها

برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار متلب استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌ها تمامی پارامترهای آماری و مرسوم نشر صوتی با نرم‌افزار استخراج و آماده بررسی شد. در جدول ۳ از مهم‌ترین پارامترهایی که در تشخیص عیب سودمند واقع شدند ذکر شده است. با توجه به بررسی‌هایی که با هر یک از پارامترها انجام شد و همچنین با توجه به بررسی‌هایی که در تحقیقات پیشین انجام شده است، تنها تعدادی از پارامترها مورد استفاده قرار گرفت.

دستگاه آزمون تجربی و یاتاقان مورد آزمایش

یاتاقان‌های غلتشی در این آزمایش از نوع تماس زاویه‌ای ساخت شرکت SKF نوع بی‌ای پی ۷۲۰۲ با قطر داخلی و خارجی ۱۵ و ۳۵ میلی‌متر است. از چهار یاتاقان سالم، معیوب کوچک، معیوب متوسط و معیوب بزرگ که در راستای یاتاقان به کمک دستگاه اسپارک یا ماشین تخلیه الکتریکی (EDM) و بر روی حلقه خارجی ایجاد شده‌اند، استفاده شده است که در شکل ۳ و جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل (۳) حلقه خارجی یاتاقان غلتشی

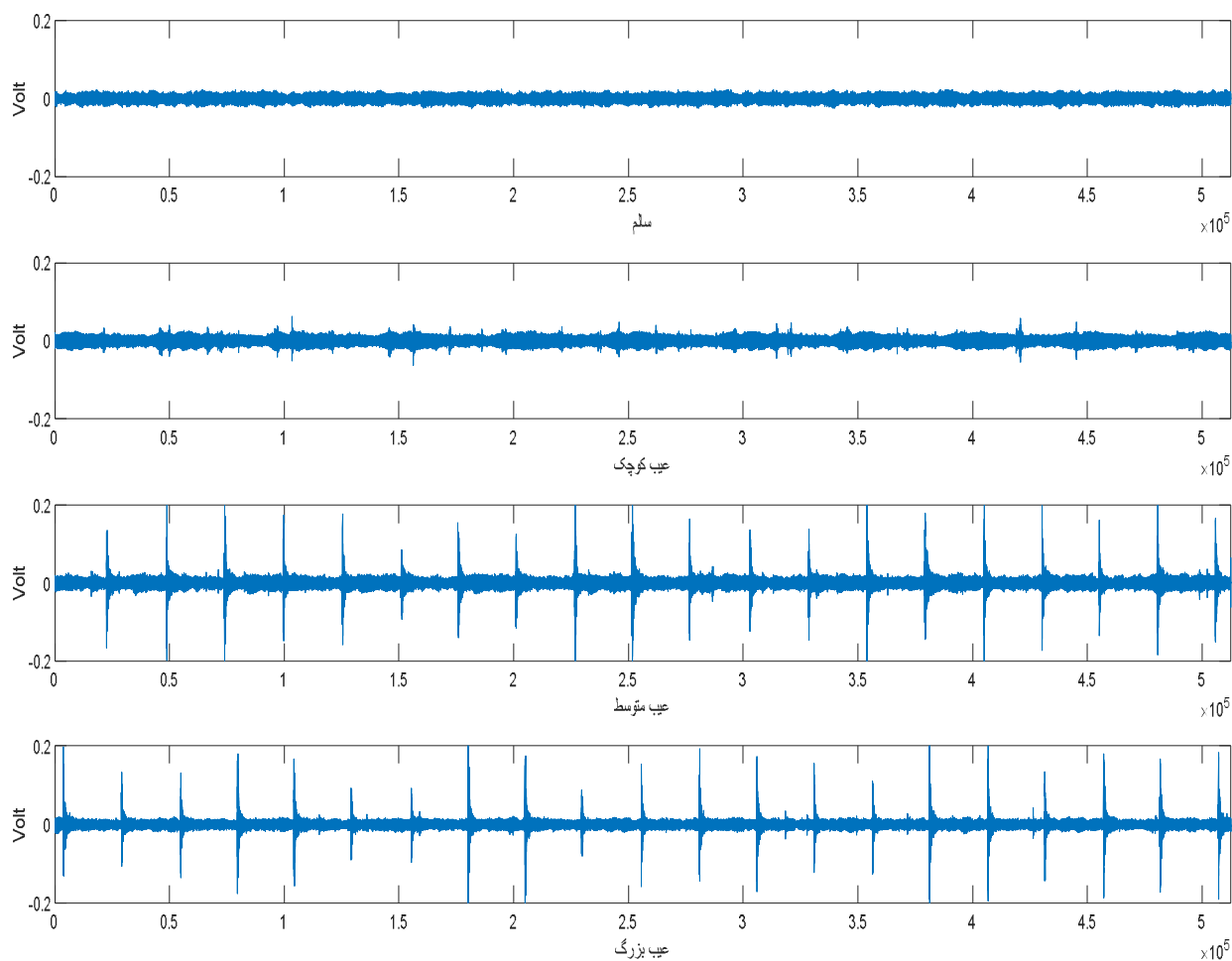
جدول (۱) عیب حلقه خارجی یاتاقان غلتشی در راستای محور و اندازه عیوب

نوع عیب	اندازه عیب (میلی‌متر)
عیب کوچک	۰/۱
عیب متوسط	۰/۴
عیب بزرگ	۰/۷

یاتاقان‌ها در چهار سرعت ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه با چهار بارگذاری از کم به زیاد که به کمک چهار عدد پیچ با گشتاورهای مساوی و مشخص به حلقه خارجی اعمال شده‌اند، که در شکل ۴ نشان داده شده است. این نوع بارگذاری به دلیل اینکه یاتاقان تماس زاویه‌ای است به بارگذاری ترکیبی شعاعی و محوری به‌صورت همزمان تبدیل می‌شود. نوع و مقدار بارگذاری یاتاقان‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۴) محل قرارگیری حسگر و اعمال بار



نمودار ۱) نمونه سیگنال‌های دریافتی در بارگذاری زیاد و دور ۱۲۰۰ دور در دقیقه

جدول ۳) پارامترهای مرسوم در نشر صوتی

توضیحات	معادله	نام پارامتر	مطالعات پیشین
مقدار ریشه دوم میانگین مجموع مربعات را محاسبه می‌کند.	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}$	ریشه میانگین مربعات	ون هک و همکاران ^[12]
مقدار بیشینه داده‌ها است.	$\frac{(y_{max} - y_{min})}{2}$	بیشینه	ون هک و همکاران ^[12]
فاصله بین مقدار بیشینه و کمینه را محاسبه می‌کند.	$y_{max} - y_{min}$	قله به قله	ون هک و همکاران ^[12]
فاصله زمانی بین نخستین و آخرین ضربه است.	-	مدت زمان	گروس و هتسو ^[1]
تعداد شمارش‌ها را در مدت زمان روپداد را محاسبه می‌کند.	-	فرکانس متوسط	گروس و هتسو ^[1]
تعداد دفعاتی که موج از حد آستانه فراتر می‌رود.	-	شمارش	گروس و هتسو ^[1]
قدرت قله موج را در یک شکل موج توصیف می‌کند.	$\frac{y_{peak}}{y_{rms}}$	عامل قله	ون هک و همکاران ^[12]
قله‌ای بودن و تیزی داده‌ها را توصیف می‌کند.	$N \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^4 / [\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2]^2$	کشیدگی	ون هک و همکاران ^[12]
مقدار نامتقارنی داده در نزدیکی میانگین را توصیف می‌کند.	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^3 / \left[\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right]^3$	چولگی	ون هک و همکاران ^[12]

بحث و بررسی

با توجه به نمودار ۲ که مربوط به انرژی یاتاقان‌ها در شرایط کاری متفاوت (اعداد محور سرعت ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشان‌دهنده سرعت‌های ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و همچنین اعداد محور بارگذاری از ۱ تا ۴ به ترتیب نشان‌دهنده بارگذاری بسیار کم، کم، متوسط و زیاد) است، مشخص می‌شود که به‌طور تقریبی با افزایش اندازه عیب، مقدار متوسط انرژی نیز در حال افزایش است (در مواقعی این افزایش به دلیل تصادفی بودن پدیده و یکسان نبودن شرایط آزمایش (از جمله دمای آزمایش، گرانروی و پخش شدن روان‌کار در داخل یاتاقان و امواج گردآوری شده از محیط و غیره) به‌طور کامل، رخ نداده است. با توجه به نمودار ۲ مشاهده می‌شود که در بسیاری از حالات با افزایش بارگذاری در سرعت ثابت مقدار متوسط انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت سالم مقدار بیشینه انرژی $5/5 \times 10^{-5}$ است اما در دیگر حالات معیوب بیشینه مقدار به‌طور تقریبی دو برابر این مقدار است.

همچنین با توجه به نمودارها کشیدگی و چولگی به این موضوع پی خواهیم برد که با توجه به افزایش اندازه عیب مقدار متوسط پارامتر کشیدگی نیز افزایش می‌یابد که در نمودار ۳ نشان داده شده است. همچنین با توجه به شکل یاتاقان در حالات معیوب (کوچک، متوسط و بزرگ) با افزایش سرعت و بارگذاری مقدار این پارامتر نیز در حال افزایش است، و این نیز با توجه به این که کشیدگی معیاری است که میزان قله‌ای بودن یا صافی نمودار را نشان می‌دهد و امواج گردآوری شده نشر صوتی از حالات معیوب که در نمودار ۱ نیز مشاهده شد، قابل استناد است، اما در حالت سالم با توجه به شرایط آزمایش ممکن است تغییر کرده باشد.

پیش از محاسبه پارامترها، تمامی فایل‌ها با استفاده از تابع بی‌بعد نام‌گذاری شده "اصلاح" تغییر یافتند. این تابع با توجه به سرعت دورانی، تعدادی از نمونه‌های پیوسته در یک فایل را آماده محاسبه پارامتر می‌کند به‌طوری که مدت زمان آن تعداد نمونه برابر با یک دور باشد. این کار برای یکسان‌سازی در وضعیت است و بدین منظور است که پارامتری که محاسبه می‌شود مقدار آن در یک دور است. این تابع از معادله ۱ به‌دست می‌آید. نرخ نمونه‌برداری ۲ میلیون نمونه بر ثانیه است و فرکانس عیب قفسه، FTF است.

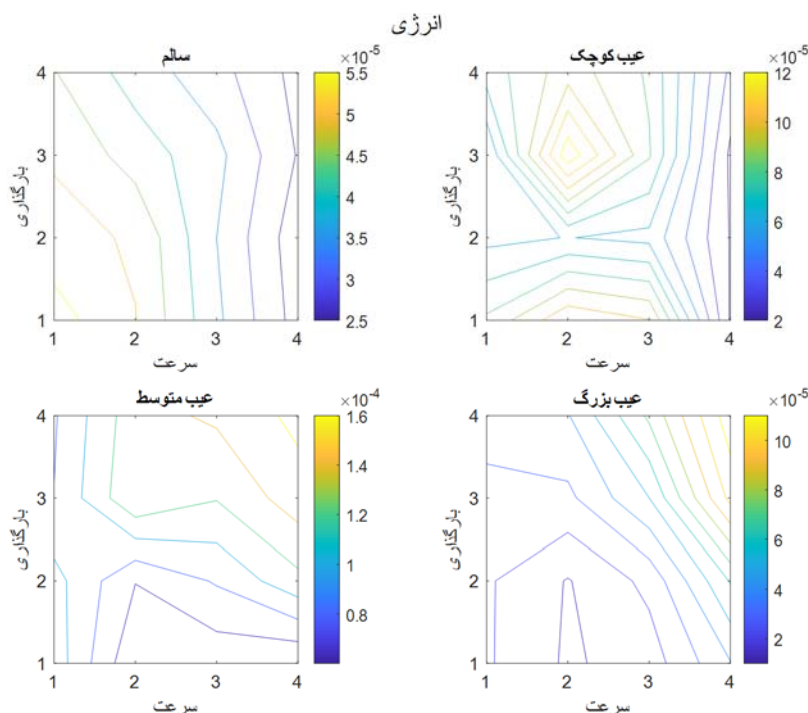
$$(1) \text{ نرخ نمونه‌برداری} \times (1/FTF) = \text{تابع اصلاح}$$

فرکانس‌های عیب

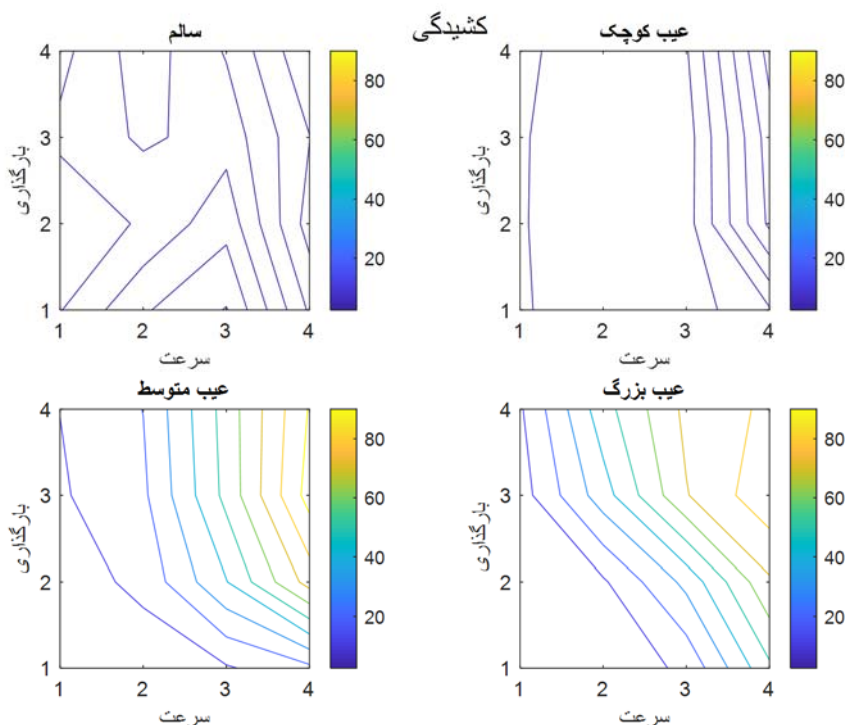
هر یاتاقان غلتشی فرکانس‌های عیب دارد که در جدول ۴ نشان داده شده است. فرکانس‌های عیب یک یاتاقان غلتشی نشانه سرعت دورانی آن است. به‌طوری که F فرکانس دورانی محور به هرتز و B قطر گوی یا ساچمه و P قطر گام و N تعداد ساچمه‌های یاتاقان و θ زاویه تماس است که در یاتاقان مورد آزمایش این تحقیق 40° درجه است. با توجه به این نکته که یاتاقان‌ها در تمامی آزمون‌ها و در تمامی حالت‌ها از یک نوع هستند پس فرکانس‌های عیب تنها به سرعت دورانی محور وابسته هستند.

جدول ۴) فرکانس‌های عیب یاتاقان غلتشی

نام فرکانس عیب	معادله	نام اختصاری علمی
فرکانس عیب قفسه	$\frac{F}{2} \left(1 - \frac{B}{P} \cos \theta \right)$	FTF
فرکانس چرخش ساچمه	$\frac{P}{2B} F \left[1 - \left(\frac{B}{P} \cos \theta \right)^2 \right]$	BSF-BPD
فرکانس عیب حلقه داخلی	$\frac{N}{2} F \left(1 + \frac{B}{P} \cos \theta \right)$	BPFI
فرکانس عیب حلقه خارجی	$\frac{N}{2} F \left(1 - \frac{B}{P} \cos \theta \right)$	BPFO

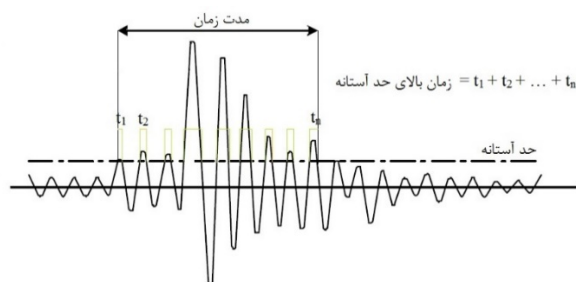


نمودار ۲) پارامتر انرژی برای حالات سالم، معیوب کوچک، معیوب متوسط، معیوب بزرگ



نمودار ۳) پارامتر کشیدگی برای حالات سالم، معیوب کوچک، معیوب متوسط، معیوب بزرگ

اما با توجه به کافی نبودن این پارامترها برای تشخیص اندازه عیب، پارامتر جدیدی به نام مجموع زمان بالای حد آستانه معرفی می‌شود. بدین صورت که مجموع زمانی که ضربه بالای حد آستانه باشد را خواهد داد. با توجه به این نکته که پارامتر مدت زمان، فاصله زمانی نخستین و آخرین عبور از حد آستانه است، پس با این تابع یکی نبود و به طور یقین بزرگ‌تر نیز هست که در نمودار ۴ قابل مشاهده است.



نمودار ۴) مجموع زمان بالای حد آستانه و تفاوت آن با مدت زمان

با آموزش دوباره شبکه عصبی با همان پارامترهای قبلی به همراه پارامتر مجموع زمان بالای حد آستانه به نتایج بهتری دست خواهیم یافت که در نمودار ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که با استفاده از تابع اصلاح که پیش‌تر بیان شده بود، تعدادی از نمونه‌ها تحلیل می‌شوند که بیان‌گر یک دور هستند و این نیز باعث می‌شود که با افزایش سرعت تعداد داده‌های کمتری تحلیل شوند. با توجه به نمودار و با توجه به این نکته، با افزایش سرعت، مقدار مجموع زمان بالای حد آستانه نیز کاهش می‌یابد.

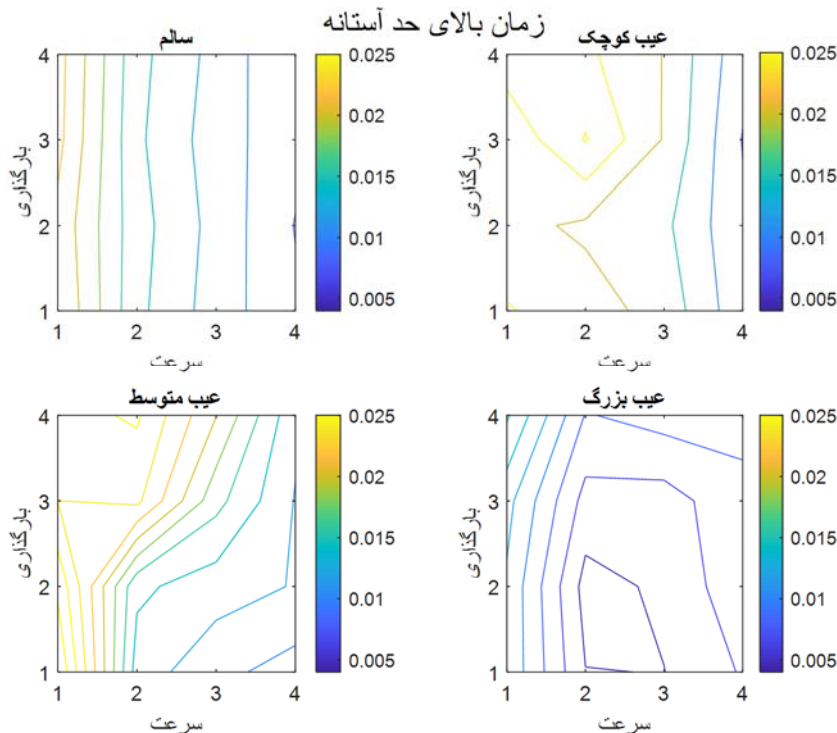
شبکه عصبی

برای تشخیص عیب و دسته‌بندی اندازه از یک شبکه عصبی دولایه به تعداد ۱۰ نورون مخفی تابع سیگموئیدی و نورون‌های خروجی تابع خطی استفاده شد. آموزش آن به کمک الگوریتم انتشار پس‌رو مارگارت-لونبرگ بود. پارامترهای انرژی و عامل قله و چولگی و کشیدگی به عنوان ورودی و اندازه عیوب به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. برای آموزش، تصدیق و آزمایش شبکه عصبی به ترتیب از ۷۰، ۱۵ و ۱۵٪ نمونه‌ها استفاده شد. تعداد کل نمونه‌ها نیز در مجموع برابر با ۲۱۳۸ عدد است.

با تشکیل شبکه عصبی و مقایسه نتایج در جدول ۵- الف مشاهده می‌شود که این پارامترها به ۸۸/۵٪ درستی در تشخیص عیب کمک کرده‌اند. به این مفهوم که ۸۸/۵٪ از مواردی را که سالم تشخیص داده است در واقعیت نیز سالم بوده‌اند، اما شبکه عصبی ۱۱/۵٪ از مواردی را که سالم تشخیص داده است در حقیقت سالم نبوده‌اند و سالم تشخیص داده است که این اعداد به عنوان تشخیص عیب به کار می‌روند. البته با توجه به جدول ۵- الف نیز مشاهده می‌شود که شبکه عصبی در مواردی نیز حالات سالم را معیوب تشخیص داده است. به طور مثال در جدول ۵- الف تعداد ۵ عدد یا ۰/۲٪ از کل نمونه‌ها که سالم بودند را شبکه عصبی به عنوان عیب کوچک تشخیص داده است، که این موارد تنها صرف زمان و هزینه‌هایی برای باز و بست یاتاقان است. اما در تشخیص اندازه عیب به خوبی عمل نکرده‌اند و به درستی ۷۷/۳٪ در تشخیص اندازه عیب کوچک رسیده است که این می‌تواند در تشخیص اندازه عیب در مراحل نخستین رشد ترک زیان‌آور باشد (جدول ۵- الف).

عیب تشخیص در اندازه عیب به کمک شبکه عصبی تشکیل شده راحت‌تر امکان‌پذیر است و در مجموع شبکه عصبی به‌درستی ۹۵/۱٪ در دسته‌بندی اندازه عیب دست یافته است که این اعداد قابل ملاحظه هستند (جدول ۵-ب).

مشاهده می‌شود که درستی در تشخیص عیب به میزان تقریبی ۱۰٪ افزایش و به مقدار قابل ملاحظه ۹۷/۱٪ درستی می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که در دسته‌بندی اندازه عیب کوچک به ۹۱/۲٪ و عیب متوسط ۹۴/۲٪ و عیب بزرگ ۹۷/۹٪ درستی دست خواهد یافت. که این نشان‌دهنده این است که با افزایش اندازه



نمودار ۵) پارامتر مجموع زمان بالای حد آستانه برای حالات سالم، معیوب کوچک، معیوب متوسط، معیوب بزرگ

جدول ۵) نتایج عملکرد شبکه عصبی با و بدون پارامتر حد آستانه

بازده کل	کلاس خروجی				کلاس هدف
	معیوب بزرگ	معیوب متوسط	معیوب کوچک	سالم	
عملکرد شبکه عصبی بدون پارامتر حد آستانه					
۹۹/۱%-۱۰۰/۹%	۰	۰	۵ ۰/۲%	۵۳۰ ۲۴/۸%	سالم
۸۱/۲%-۱۸/۸%	۴۰ ۱/۹%	۱۷ ۰/۸%	۴۳۶ ۲۰/۴%	۴۴ ۲/۱%	معیوب کوچک
۸۱/۶%-۱۸/۴%	۱۷ ۰/۸%	۴۳۰ ۲۰/۱%	۷۲ ۳/۴%	۸ ۰/۴%	معیوب متوسط
۸۰/۷%-۱۹/۳%	۴۳۵ ۲۰/۳%	۳۶ ۱/۷%	۵۱ ۲/۴%	۱۷ ۰/۸%	معیوب بزرگ
۸۵/۶%-۱۴/۴%	۸۸/۴% ۱۱/۶%	۸۹/۰% ۱۱/۰%	۷۷/۳% ۲۲/۷%	۸۸/۵% ۱۱/۵%	بازده کل
عملکرد شبکه عصبی با پارامتر حد آستانه					
۹۸/۷%-۱/۳%	۰	۰	۷ ۰/۳%	۵۲۸ ۲۴/۷%	سالم
۹۲/۹%-۷/۱%	۴ ۰/۲%	۲۰ ۰/۹%	۴۹۹ ۲۳/۳%	۱۴ ۰/۷%	معیوب کوچک
۹۲/۲%-۷/۸%	۷ ۰/۳%	۴۸۶ ۲۲/۷%	۳۴ ۱/۶%	۰ ۰/۰%	معیوب متوسط
۹۶/۵%-۳/۵%	۵۲۰ ۲۴/۳%	۱۰ ۰/۵%	۷ ۰/۳%	۲ ۰/۱%	معیوب بزرگ
۹۵/۱%-۴/۹%	۹۷/۹% ۲/۱%	۹۴/۲% ۵/۸%	۹۱/۲% ۸/۸%	۹۷/۱% ۲/۹%	بازده کل

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;50(1-4):289-296.

6- Li CJ, Li SY. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. Wear. 1995;185(1-2):67-74.

7- Elasha F, Greaves M, Mba D, Addali A. Application of acoustic emission in diagnostic of bearing faults within a helicopter gearbox. Procedia CIRP. 2015;38:30-36.

8- Kim YH, Tan ACC, Yang BS. Parameter comparison of acoustic emission signals for condition monitoring of low-speed bearings. Australian Journal of Mechanical Engineering. 2008;6(1):45-52.

9- Al-Ghamd AM, Mba D. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006;20(7):1537-1571.

10- Choudhury A, Tandon N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. Tribology International. 2000;33(1):39-45.

11- Samanta B, Al-Balushi KR, Al-Araimi SA. Artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithm for bearing fault detection. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2003;16(7-8):657-665.

12- Van Hecke B, Yoon J, He D. Low speed bearing fault diagnosis using acoustic emission sensors. Applied Acoustics. 2016;105:35-44.

13- Mirhadizadeh SA, Moncholi EP, Mba D. Influence of operational variables in a hydrodynamic bearing on the generation of acoustic emission. Tribology International. 2010;43(9):1760-1767.

14- Couturier J, Mba D. Operational bearing parameters and acoustic emission generation. Journal of Vibration and Acoustics. 2008;130(2):024502.

15- Al-Ghamdi AM, Cole P, Such R, Mba D. Estimation of bearing defect size with acoustic emission. The British Institute of Non-Destructive Testing. 2004;46(12):758-761.

16- Elforjani M, Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017;65(7):5864-5871.

17- Hosseini S, Ahmadinajafabadi M, Akhlaghi M. Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm. Tribology International. 2016;95:426-434.

18- Chacon JLF, Kappatos V, Balachandran W, Gan TH. A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique. Applied Acoustics. 2015;89:88-100.

19- Sharma RB, Parey A. Modelling of acoustic emission generated in rolling element bearing. Applied Acoustics. 2019;144:96-112.

20- Kumar S, Goyal D, Dhama SS. Statistical and frequency analysis of acoustic signals for condition monitoring of ball bearing. Materials Today: Proceedings. 2018;5(2 Pt 1):5186-5194.

21- Prosvirin A, Kim J, Kim JM. Bearing fault diagnosis based on convolutional neural networks with kurtogram representation of acoustic emission signals. In: Park DS, Chao HCh, Jeong YS, Park JJ. Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing. Singapore: Springer; 2017.

در این تحقیق به کمک انجام آزمایش‌های مکرر مشاهده شد که انتخاب به‌جا و درست و نه لزوماً تعداد زیاد پارامترهای نشر صوتی به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی در پاسخ و عملکرد شبکه بسیار می‌تواند مؤثر باشد. از پارامترهای متداول نشر صوتی تنها ۴ عدد انرژی، چولگی، کشیدگی و فاکتور قله برای دسته‌بندی اندازه عیب کمک گرفته شد. مشاهده شد که این چهار پارامتر تا ۸۵/۶٪ در تشخیص اندازه عیب مفید بوده است اما در تشخیص عیب کوچک به درصدی معادل ۷۷/۳٪ دست یافته است که این عدد می‌تواند باعث تشخیص اشتباه در اندازه عیب و در نتیجه همراه با روشن‌بودن سیستم و کارکرد ناصحیح و خرابی سیستم شود و هزینه‌های هنگفتی را در برگیرد. همچنین پارامتر جدیدی به‌نام مجموع زمان بالای حد آستانه معرفی شد. این پارامتر به میزان تقریبی ۱۰٪ به تشخیص بهتر عیب و به میزان تقریبی ۱۳٪ در دسته‌بندی اندازه عیب کوچک کمک فراوانی کرد. با معرفی این پارامتر بازدهی دسته‌بندی اندازه عیب در مجموع با افزایش تقریبی ۱۰ درصدی به میزان قابل توجه ۹۵/۱٪ رسید. در این تحقیق نتایج نشان دادند که به‌کمک انتخاب پارامترهای درست و تشکیل شبکه عصبی مصنوعی دولایه می‌توان اندازه عیب حلقه خارجی یاتاقان غلتشی را دسته‌بندی کرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو)، بابت فراهم‌آوردن تجهیزات آزمایش و حمایت‌های مالی نهایت تشکر را دارند.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: مورد خاصی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: آرمی مسرخی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)، سیدمحمد جعفری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/نگارنده بحث (۴۰٪)، عباس رهی (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۱۰٪).

منابع مالی: منابع مالی توسط دانشگاه شهیدبهبشتی و شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو تامین شده است.

منابع

- 1- Sachse W, Kim KY. Quantitative acoustic emission and failure mechanics of composite materials. Ultrasonics. 1987;25(4):195-203
- 2- Inaba H, Nakamura H, Enoki M, Nakano M, Shigeishi M, Yuyama S, et al. Practical acoustic emission testing. Tokyo: Springer; 2016.
- 3- Mba D. The use of acoustic emission for estimation of bearing defect size. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2008;8(2):188-192.
- 4- Mba D. Acoustic emissions and monitoring bearing health. Tribology Transactions. 2003;46(3):447-451.
- 5- Taha Z, Widiyati K. Artificial neural network for bearing defect detection based on acoustic emission. The