

بررسی کارایی حسگرهای نشر فرا آوایی در مطالعه تخریب طبیعی یاتاقان تماس زاویه‌ای

محسن مطهری نژاد*

مربی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای،

تهران، ایران

mmotaharinezhad@tvu.ac.ir

سید محمد جعفری

استادیار

دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی،

تهران، ایران

m_jafari@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

چکیده

ماشین‌های دوار در صنعت بسیار پرکاربردند و از اجزای اصلی ماشین‌های دوار یاتاقان‌ها هستند. بنابراین پایش وضعیت یاتاقان‌ها از اهمیت زیادی در صنایع برخوردار است. در این پژوهش به بررسی تخریب طبیعی یاتاقان غلتشی براساس پردازش سیگنال‌های نشر فرا آوایی^۱ با کاربرد تبدیل موجک پرداخته شده است. به منظور استخراج سیگنال‌های نشر فرا آوایی یاتاقان از یک چیدمان آزمایشگاهی و تجهیزات داده‌برداری مناسب استفاده شده است. پردازش سیگنال‌های نشر فرا آوایی در حوزه‌های زمان-بسامد با استفاده از آنالیز تبدیل موجک^۲ انجام گرفته است. به منظور استخراج سیگنال‌های نشر فرا آوایی از سه حسگر متعلق به شرکت PAC با نام‌های Pico، WSα و R6α استفاده شده و کارایی آنها با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که روش نشر فرا آوایی روشی کارا برای تخمین تخریب طبیعی یاتاقان است. مقایسه مقادیر نسبت انرژی به آنتروپی شانون برای ۵۳ موجک مادر بررسی شده نشان می‌دهد که موجک مادر بیور ۳/۱ دارای بیشترین نسبت انرژی به آنتروپی شانون است و به عنوان بهترین موجک مادر انتخاب می‌شود. همچنین بررسی کارایی سه حسگر نشان داد که هر سه حسگر مورد استفاده برای بررسی تخریب طبیعی یاتاقان مناسب هستند، باین حال حسگر Pico امتیاز بالاتری را کسب کرد.

واژگان کلیدی: تخریب طبیعی، یاتاقان، حسگر نشر فرا آوایی، آنالیز تبدیل موجک، پردازش سیگنال

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری، تجهیزات صنعتی روزبه‌روز پیچیده‌تر می‌شوند که به موازات این پیچیدگی حساس‌تر شده و توجه بیشتری نیز می‌طلبند. بنابراین شکست و از کار افتادگی آنها ممکن است هزینه‌های فراوانی دربر داشته باشند. به همین دلیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و

کاهش هرچه بیشتر زمان از کارافتادگی و تعمیرات دارای اهمیت فراوانی است. در همین راستا پایش وضعیت به‌عنوان یک روش کارآمد و موثر برای افزایش شاخص‌های اطمینان، سلامت و عملکرد بهینه تجهیزات بنیان نهاده شده است. پایش وضعیت به معنای عیب‌یابی و نگهداری از ماشین‌ها بدون توقف در فعالیت آنها است و اجرای آن براساس

اطلاعات دقیق به دست آمده از وضعیت تجهیز انجام می‌پذیرد [۱]. در پایش وضعیت دیگر زمان پیش‌بینی شده‌ای برای نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه با داده‌برداری‌های منظم و پایش دائمی ماشین تلاش می‌گردد تا ضمن صرف کمترین هزینه، بهترین شرایط برای ادامه کار تجهیزات فراهم گردد [۲]. شالوده پایش وضعیت را دو عمل عیب‌یابی و پیش‌بینی رخ دادن عیب^۴ بدون آنکه توقف کار ماشین‌ها را باعث شود، تشکیل می‌دهد [۳]. هر سیستم دینامیکی، الکتریکی، هیدرولیکی یا گرمایی دارای علائم مشخصه‌ای است که وضعیت عادی آن دستگاه را در حین کار نشان می‌دهد. با تغییر این علائم، نشانه‌ای از بروز اشکال و خرابی در سیستم انتشار می‌یابد. منظور از پایش وضعیت، ابتدا تعیین وضعیت سیستم با اندازه‌گیری علائم مشخصه آن به کمک یک سری تحلیل‌های میدانی براساس دانش و تجربه فرد خبره و نیروی کارشناس است. سپس عیوب هر ماشین و وضعیت فعلی آن به‌طور دقیق مشخص و عمر دستگاه در شرایط مورد بحث، تخمین زده می‌شود. سپس تعمیرات اساسی و حیاتی مورد نیاز تعیین می‌شود، اطلاعات تجهیزات درباره نحوه عملکرد، نیازهای آنی و غیرآنی آنها و پیش‌بینی چگونگی عملکرد دستگاه در آینده و عمر مفید باقیمانده آن به کارشناس ارجاع داده می‌شود [۴].

خرابی یاتاقان‌های تماس زاویه‌ای را می‌توان معادل رخ دادن یکی از حالات به‌وجود آمدن چاله‌های ریزه^۵، تورق^۶، پولکی شده^۷ (بر اثر خستگی)، سایش اجزای آن، تغییر شکل پلاستیک، و خوردگی آن دانست. حالت واقعی خرابی یاتاقان‌های غلتشی نقش مهمی روی سیگنال‌های صوت و ارتعاشات اندازه‌گیری شده در بیرون آن دارد. خرابی یاتاقان‌های غلتشی می‌تواند در اثر خستگی، سایش، تغییر شکل پلاستیک، روانکاری ضعیف، حمل و نقل نادرست و طراحی و نصب اشتباه رخ دهد. حالت‌های خرابی یاتاقان‌ها به همراه دلایل مؤثر و راه‌های پیشگیری خرابی در استاندارد ISO 15243 دسته‌بندی شده‌اند [۵]. نکته مهم این است

که حالت‌های خرابی بسیار به هم وابسته هستند و یک حالت خرابی می‌تواند زمینه‌ساز حالت یا حالت‌های دیگر باشد. در اینجا به بررسی چند عامل مهم خرابی و تأثیر آنها بر عملکرد یاتاقان‌ها می‌پردازیم. شناخت نسبی این دلایل و حالت‌ها می‌تواند دید مناسب از نظر کیفی بر پایش وضعیت یاتاقان‌های غلتشی ایجاد کند. طبق تعریف انجمن آزمون‌ها و مواد آمریکا^۸، پدیده نشر فرا آوایی به تولید امواج الاستیکی گذرا در طی مدت زمان آزاد شدن انرژی از یک منبع موجود در ماده، اشاره دارد [۶]. منبع انتشار موج در فلزات تا حد زیادی به حرکت نابه‌جایی‌ها در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک و یا به آغاز و گسترش رشد ترک در سازه تحت تنش وابسته است. منابع دیگر نشر فرا آوایی شامل: ذوب شدن، تغییر فاز ماده، تنش‌های گرمای، نشتی، خوردگی و اصطکاک هستند. در زمینه کاربرد نشر فرا آوایی برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها، تحقیقات مختلفی انجام گرفته است. عبدالله و همکاران [۷]، توانایی دو روش ارتعاشات و نشر فرا آوایی را در تشخیص عیب در یاتاقان مقایسه کردند. در این مطالعه از روش نشر فرا آوایی به‌منظور تشخیص وجود و اندازه عیب بر روی یاتاقان با اعمال بار شعاعی استفاده شد. در این مقاله مطالعات روی یاتاقان غلتکی مسی با سرعت کارکرد ۱۰ تا ۴۰۰۰ دور در دقیقه و با حداکثر ظرفیت بار ۱۶ کیلونیوتن انجام گرفت. ایشان نشان دادند گرچه روش ارتعاشات برای تشخیص عیب یاتاقان یک روش متداول است اما روش نشر فرا آوایی بهتر عیب را تشخیص می‌دهد. امبا [۸]، به تخمین اندازه خرابی روی یاتاقان به‌وسیله روش نشر فرا آوایی پرداخت. او عمداً خراش‌هایی روی سطح یاتاقان ایجاد نمود و پس از آزمونی مشخص، تغییر اندازه عیب را یادداشت کرد. متین^۹ و همکاران [۹]، به بررسی و پایش وضعیت یاتاقان غلتشی روغن‌کاری شده با گریس آلوده با روش نشر فرا آوایی پرداختند. در این بررسی، نتایج آزمون با گریس تمیز و با گریس دارای آلودگی ارائه شد و همچنین اثر تمیز کردن و گریس‌کاری مجدد یاتاقان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج

نشان داد که اندازه‌گیری نشر فرا آوایی کمترین میزان آلودگی موجود در گریس را نیز که برابر با ۰/۰۲ درصد وزنی بود نشان می‌داد.

فنگ^{۱۰} [۱۰]، به بررسی روش‌های جدید پردازش سیگنال نشر فرا آوایی برای پایش وضعیت یاتاقان پرداخت. کارایی روش‌های پیشنهادی به‌طور تجربی برای تشخیص و عیب‌یابی عیوب موضعی و عیوب در مرحله اولیه یاتاقان غلتشی متعلق به تعدادی از ماشین آلات دوار صنعتی مانند پمپ خلاء خشک مورد بررسی قرار گرفت. الدوساری^{۱۱} و همکاران [۱۱]، به مشاهده تغییرات در شکل موج‌های نشر فرا آوایی برای اندازه‌های عیوب دانه‌ای متغیر در یاتاقان غلتکی مسی با توزیع بار شعاعی پرداختند. نتایج نشان داد که اندازه عیب هندسی حلقه بیرونی را می‌توان از شکل موج‌های نشر فرا آوایی مشخص کرد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر انرژی سیگنال با افزایش دور و بار و همچنین با افزایش اندازه عیوب افزایش می‌یابد. امبا^{۱۲} [۱۲]، به بررسی سلامت یاتاقان با استفاده از سیگنال نشر فرا آوایی پرداخت. نتایج نشان داد که صرف‌نظر از بار شعاعی، سرعت دورانی، سطح بالای نوفه‌های محیطی^{۱۳}، پارامترهای ساده نشر فرا آوایی نظیر ریشه میانگین مربعات^{۱۴} و شمارش تعداد عبور از حد آستانه نشانگرهای عیب در یاتاقان هستند. مورھین^{۱۵} و امبا [۱۳]، به بررسی تشخیص عیب در یاتاقان با استفاده از نشر فرا آوایی پرداختند. یک چیدمان آزمایشگاهی استفاده شد تا بتوان عیوب را بر روی حلقه‌های داخلی و بیرونی یاتاقان آزمون اعمال کرد. نتایج مطالعه آنها استفاده از ریشه میانگین مربعات، دامنه، انرژی و تعداد عبور از حد آستانه^{۱۶} نشر فرا آوایی برای تشخیص عیب را مناسب نشان داد. هی^{۱۷} و همکاران [۱۴]، به بررسی تشخیص عیب برای یاتاقان‌های غلتشی با استفاده از سیگنال نشر فرا آوایی پرداختند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای استخراج بسامد مشخصه واقعی یاتاقان توسط سیگنال نشر فرا آوایی بسیار کارآمد است. کاسارندرا^{۱۸} و همکاران [۱۵]، به مرور و بررسی

کاربردهای نشر فرا آوایی برای یاتاقان سرعت پایین پرداختند. در ابتدا چندین پارامتر نشر فرا آوایی به‌عنوان پارامترهای نظارتی برای تشخیص عیب یاتاقان مرور شدند. مرور انجام شده بر چندین بخش متمرکز است: (۱) کاربرد نشر فرا آوایی در یاتاقان‌های غلتشی در طبقه‌های مختلف سرعتی، یعنی پرسرعت (بالا تر از ۶۰۰ دور در دقیقه)، کم سرعت (۱۰-۶۰۰ دور در دقیقه) و بسیار کم‌سرعت (کمتر از ۱۰ دور در دقیقه)، (۲) پارامترهای معمول نشر فرا آوایی در یاتاقان‌های غلتشی و (۳) پردازش سیگنال نشر فرا آوایی، استخراج ویژگی و روش‌های تشخیص الگو. در بررسی تجربی، عیوب قریب الوقوع یاتاقان توسط پارامترهای نشر فرا آوایی پس از راه‌اندازی یاتاقان نو به‌طور پیوسته برای مدت زمان تقریبی ۱۵ ماه تشخیص داده شد. پس از آن قطعات یاتاقان از هم باز گردید و شواهد عیوب اولیه مورد بررسی قرار گرفت. ساندوال^{۱۹} و همکاران [۱۶]، به بررسی تشخیص عیب اولیه یاتاقان غلتشی با استفاده از نشر فرا آوایی پرداختند. این مطالعه شاخص‌های عیوب بر مبنای زمان مانند ریشه میانگین مربعات، مقدار پیک، شمارش تعداد عبور از حد آستانه و کشیدگی به‌دست آمده از سیگنال نشر فرا آوایی را مورد مطالعه قرار داد. آزمایشات بر روی یک چیدمان آزمایشگاهی مخصوص برای یاتاقان غلتکی دارای شدت مختلف عیوب روی حلقه‌های داخلی و خارجی صورت گرفت. ژو^{۲۰} و همکاران [۱۷]، به تخمین عمر باقیمانده یاتاقان غلتکی با استفاده از سیگنال ارتعاشات در حوزه زمان-بسامد با استفاده از تبدیل موجک و با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی چندبعدی^{۲۱} پرداختند. پس از استخراج سیگنال‌های تخریب یاتاقان در حوزه زمان، ویژگی‌های سیگنال در حوزه زمان-بسامد استخراج شد. از شبکه‌های عصبی پیچشی چندبعدی به‌منظور استخراج ویژگی‌های معنی‌دار برای تخمین عمر باقیمانده استفاده شد. با استفاده از لایه چندبعدی تمام ویژگی‌های کلی و ناحیه‌ای برای افزایش کارایی شبکه حفظ می‌شوند. در این مطالعه از روش درون‌یابی جهت

کاهش ابعاد ویژگی‌ها استفاده شده است. الفورجانی^{۲۲} و امبا [۱۸]، به بررسی عمر یاتاقان‌های سرعت پایین با استفاده از نشر فرا آوایی پرداختند. برای این منظور یک چیدمان آزمایشگاهی خاص ساخته شد که امکان ایجاد عیب طبیعی شتاب یافته بر روی حلقه یاتاقان را ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که روش تشخیص شروع ترک را می‌توان به‌عنوان ابزار کنترل کیفیت برای سازندگان یاتاقان مخصوصاً برای آزمون همگنی مواد یاتاقان به‌کار گرفت. بازرسی چشمی پس از گذشت ۲۰ ساعت از زمان شروع آزمون ایجاد عیوب سطحی در دو ناحیه حلقه یاتاقان را نشان دادند.

کاسارندرا^{۲۳} [۱۹]، به پایش وضعیت بر مبنای نشر فرا آوایی و ارتعاشات و بررسی روش‌های عیب‌یابی برای یاتاقان‌های با سرعت بسیار پایین پرداختند. به‌منظور دستیابی به خواسته‌های این تحقیق و استخراج ویژگی‌ها برای پایش وضعیت یاتاقان و عیب‌یابی، این تحقیق به سه بخش تقسیم شد: (۱) پایش وضعیت بر مبنای ارتعاشات، (۲) پایش وضعیت بر مبنای نشر فرا آوایی، و (۳) پایش وضعیت ترکیبی و روش عیب‌یابی ترکیبی. الفورجانی [۲۰] به تخمین عمر مفید باقیمانده یاتاقان‌های سرعت پایین با استفاده از سیگنال‌های نشر فرا آوایی پرداخت. در این مقاله کاربرد ویژگی شاخص شدت سیگنال^{۲۴} برای تشخیص عیب طبیعی یاتاقان غلتکی مورد استفاده قرار گرفت. از چالش‌های پیش‌رو در این تحقیق سرعت بخشیدن و روش کاهش زمان ایجاد علائم ترک طبیعی و ایجاد ترک در مراحل اولیه بوجود آمدن خرابی در آزمون بود. بدین منظور، ترکیبی از یاتاقان کف‌گرد ساچمه‌ای و یاتاقان کف‌گرد غلتکی استفاده شد. آیه^{۲۵} و هینس^{۲۶} [۲۱]، برای پایش‌بینی عمر باقیمانده یاتاقان غلتکی با سرعت کم با استفاده از سیگنال نشر فرا آوایی از روش رگرسیون گاوسی^{۲۷} استفاده کرد. این روش از ترکیب توابع مقدار متوسط^{۲۸} و کوواریانس^{۲۹} استفاده می‌کند. کوواریانس با پراکندگی و معیار واریانس^{۳۰} ارتباط دارد. البته واریانس مربوط به یک متغیر

است درحالی‌که محاسبه کوواریانس ارتباط بین دو متغیر را به‌وسیله پراکندگی‌هایشان نسبت به میانگین، نشان می‌دهد.

هرچه مقدار کوواریانس بین دو متغیر، بزرگ‌تر باشد، میزان وابستگی بین آنها بیشتر است و برعکس اگر میزان کوواریانس بین دو متغیر کم باشد، وابستگی خطی بین آنها کم خواهد بود. در این مطالعه به‌منظور تسریع در فرایند تخریب یاتاقان غلتکی در یک آزمون از اضافه کردن ذرات فلزی به یاتاقان غلتکی استفاده شد. همچنین در آزمونی دیگر عدم روغنکاری یاتاقان غلتکی به‌منظور تسریع در تخریب یاتاقان غلتکی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور کاهش ابعاد ویژگی‌ها از روش KPCA^{۳۱} استفاده شد. سپس داده‌های استخراج شده به‌عنوان ورودی مدل ترکیبی گاوسی^{۳۲} برای پردازش داده‌ها استفاده شد. این مدل توزیع چندبعدی داده‌ها را با محاسبه احتمال لگاریتمی با استفاده از مؤلفه‌های گاوسی توصیف می‌کند.

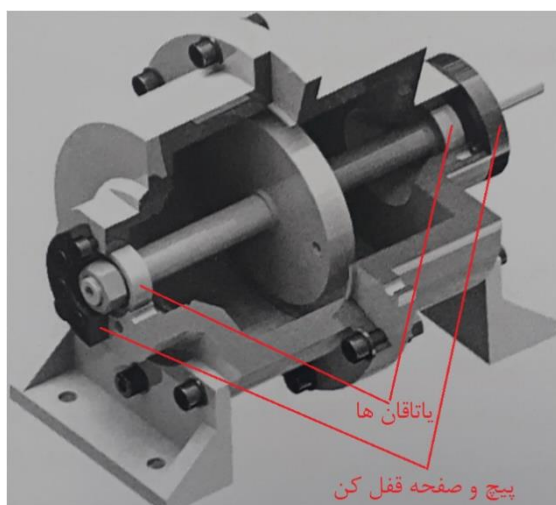
از مطالعات بررسی شده مشاهده می‌گردد که تاکنون مطالعات تخمین بروز عیب روی یاتاقان با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشات به‌طور گسترده انجام گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر روش نشر فرا آوایی نیز به‌عنوان روشی کارآمد برای تخمین بروز عیب روی یاتاقان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. باین‌حال اکثر مطالعات انجام گرفته در این حوزه ایجاد عیوب مصنوعی از قبل ایجاد شده بروی اجزای مختلف یاتاقان‌ها را مطالعه کرده‌اند و مطالعات ایجاد عیوب طبیعی بر روی یاتاقان‌ها با استفاده از سیگنال‌های مورد اشاره کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین مطالعات روی سیگنال نشر فرا آوایی در اکثر مطالعات با استفاده از سنسورهای کوچک Pico انجام شده و مطالعات با استفاده از سایر سنسورها در این حوزه به‌صورت محدود گزارش شده است. بنابراین در این مطالعه به بررسی ایجاد عیوب طبیعی روی یاتاقان تماس زاویه‌ای با استفاده از سه نوع حسگر کوچک، کم دامنه و پهن دامنه پرداخته شده است و نتایج به‌دست

آمده از مطالعه تجربی انجام شده در بخش نتایج و بحث گزارش شده است.

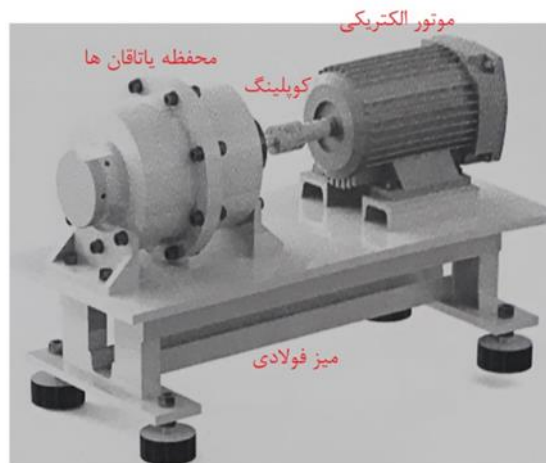
۲. چیدمان آزمایشگاهی

در این تحقیق بررسی تخریب طبیعی یاتاقان تماس زاویه‌ای مورد استفاده در دینامومترهای اتاق آزمون موتور احتراق داخلی انجام گرفته است. پیاده‌سازی آزمون‌ها و شرایط آن در یک دینامومتر واقعی بسیار هزینه‌بر است. بنابراین آزمون‌ها بر روی یک چیدمان آزمایشگاهی و میز آزمون تجربی انجام گرفته است. لازم به ذکر است که آزمون بررسی تخریب طبیعی یاتاقان بر روی چیدمان آزمایشگاهی موجود در شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) انجام شده است. این چیدمان آزمایشگاهی قبلاً توسط روحانی و همکاران [۲۲] در شرکت تحقیق موتور ایران خودرو ساخته شده است. باین حال در این تحقیق تغییراتی روی آن جهت اعمال شرایط مناسب این تحقیق صورت گرفته است. این تغییرات شامل تغییر در شیوه اعمال بار و

کنترل موتور الکتریکی مورد استفاده در چیدمان آزمایشگاهی جهت امکان انجام آزمون‌های طولانی مدت است. میز آزمون شامل یک موتور الکتریکی در یک سمت و محور دوار شامل شفت، دیسک و دو یاتاقان در سمت دیگر است. دو یاتاقان یکی در سمت موتور الکتریکی و دیگری در سمت مخالف قرار دارد و بررسی اعمال بار بر روی یاتاقان سمت مخالف موتور انجام می‌گیرد. یاتاقان‌ها در یک محفظه صلب نصب شده‌اند که قابلیت اعمال پیش‌بار را دارا هستند. دو سر شفت رزوه شده تا با سفت کردن مهره‌های قفل‌کن، موقعیت حلقه داخلی یاتاقان‌ها روی شفت تثبیت گردد. موتور الکتریکی و مجموعه دوار به وسیله یک اتصال انعطاف‌پذیر به یکدیگر متصل شده‌اند. این مجموعه روی یک میز فولادی نصب گردیده است که پایه‌های آن روی چهار لرزه‌گیر لاستیکی نصب شده است. در شکل ۱ نمای شماتیک میز آزمون و در شکل ۲ نمای برش خورده محفظه محور دوار و یاتاقان‌ها نشان داده شده است.



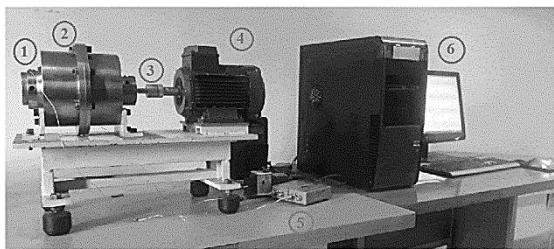
شکل ۲. نمای برش خورده محفظه، محور دوار و یاتاقان‌ها [۲۲]



شکل ۱. شماتیک میز آزمون [۲۲]

در شکل ۳ نحوه اعمال پیش‌بار روی یاتاقان‌ها نشان داده شده است.

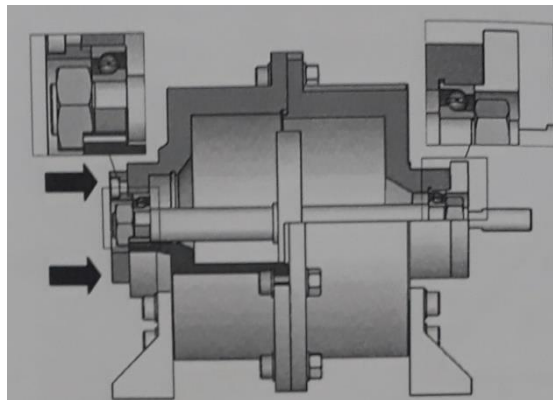
اعمال پیش‌بار به یاتاقان‌ها با سفت کردن پیچ‌های صفحه قفل‌کن سمت موتور و اعمال گشتاور مشخص به پیچ‌های صفحه قفل‌کن سمت مخالف انجام می‌گیرد.



۱. حسگرهای نشر فرا آوایی، ۲. محفظه یاتاقان‌ها، ۳. اتصال انعطاف‌پذیر، ۴. موتور الکتریکی، ۵. پیش تقویت‌کننده سیگنال، ۶. رایانه و کارت داده‌برداری
شکل ۴. میز آزمون به همراه تجهیزات داده‌برداری

در این آزمون‌ها سه نوع حسگر نشر آوایی با نام‌های Pico، $WS\alpha$ و $R6\alpha$ جهت داده‌برداری استفاده شده است. شکل ۵ حسگرهای مورد بررسی در این پژوهش که متعلق به شرکت PAC^{34} هستند را نشان می‌دهد. مشخصات این حسگرها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

روش‌های نصب حسگرهای نشر فرا آوایی به‌طور کلی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از [۲۳]: ۱- نصب فشاری: با استفاده از اعمال نیرو، که توسط فنرها، پیچ‌ها، آهنربا، نوار، یا نوارهای الاستیکی اعمال می‌شوند. ۲- نصب با چسب: حسگر به‌طور مستقیم به سازه با چسب مناسب متصل می‌شود. در این پژوهش حسگرها توسط چسب به محل مناسب تعبیه شده نصب می‌شوند. برای روانکاری، معمولاً یاتاقان‌ها در دینامومترها به‌صورت مادام‌العمر گریس‌کاری می‌شوند. در این پژوهش نیز گریس‌کاری یاتاقان یکبار در اول شروع آزمون انجام خواهد گرفت. گریس معدنی ساخت شرکت SKF با نام تجاری LGMT 3 که قابلیت تحمل دما بین ۳۰- تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد را دارد و توسط این شرکت جهت استفاده در شرایط کاری یاتاقان با ابعاد مورد آزمون پیشنهاد شده است، جهت گریس‌کاری یاتاقان استفاده شده است. مشخصات گریس مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳. مکانیزم اعمال پیش بار به یاتاقان‌های میز آزمون [۲۲]

مقدار پیش بار اعمالی یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد صحیح یاتاقان‌ها و بالابردن عمر آن بشمار می‌آید. در صورت لقی بیش از اندازه یاتاقان، ظرفیت بار مورد نظر آن قابل دستیابی نیست. همچنین باعث ایجاد سروصدا و حتی اثر لغزش در یاتاقان خواهد شد. برعکس این حالت، یعنی پیش بار زیاد نیز باعث افزایش اصطکاک و کاهش عمر آن خواهد شد. شرکت‌های سازنده یاتاقان براساس جنس، هندسه و دقت یاتاقان تولیدی خود مقادیر پیش بار مجاز را به مصرف‌کنندگان پیشنهاد می‌کنند. برای یاتاقان 7202 BEP ساخت شرکت SKF، حداکثر پیش بار اعمالی ۸۰ نیوتن اعلام شده است. در شکل ۴ میز آزمون به همراه تجهیزات داده‌برداری نشان داده شده است. برای تنظیم دور موتور الکتریکی با تنظیم بسامد جریان الکتریکی محدوده مناسبی از سرعت دورانی قابل دستیابی است که این قابلیت، بررسی رفتار سیستم در دوره‌های مختلف کاری را فراهم می‌سازد. با استفاده از یک اینورتر مدل Micromaster ساخت شرکت زیمنس^{۳۳} بسامد جریان الکتریکی را تنظیم می‌کنیم. به کمک حسگرهای نشر فرا آوایی و سیستم سخت افزاری اقدام به برداشت سیگنال نشر فرا آوایی خواهد شد.

داده‌برداری با دو کارت دو کاناله (با حداکثر ۴ کانال) و با نرخ داده‌برداری هر کانال، ۲ میلیون داده در ثانیه انجام شده است. کارت داده‌برداری از نوع PCI-2 PAC: با حد تفکیک 18 bit A/D ساخته شده توسط شرکت PAC است و نرم‌افزار ثبت داده‌ها نیز ساخت همان شرکت با نام AEwin است که ارتباطی کامل و مطمئن با تجهیزات دارد. سه نوع حسگر نشر فرا آوایی به همراه پیش‌تقویت کننده استفاده شده است. پیش‌تقویت کننده‌ها^{۳۶} از نوع PAC: $2/4/6 \text{ dB}$ هستند. جهت اتصال پیش‌تقویت کننده‌ها به کارت داده‌برداری از کابل هم‌محور^{۳۷} و رابط BNC مربوطه در محل اتصال کابل به پیش‌تقویت کننده استفاده شده است.



الف ب ج

شکل ۵. حسگرهای مورد استفاده (الف-حسگر Pico، ب- حسگر R6a، ج-حسگر W5a)

جدول ۱. مشخصات حسگرهای مورد استفاده در آزمون [۲۴]

مدل حسگر	ابعاد (قطر×ارتفاع) (mm)	وزن (گرم)	محدوده بسامدی (kHz)
R6a	۲۲×۱۹	۳۸	۱۰۰-۳۵
W5a	۲۱×۱۹	۳۲	۱۰۰۰-۱۰۰
Pico	۴×۵	۸	۷۵۰-۲۰۰

جدول ۲. مشخصات گریس مورد استفاده [۲۵]

مشخصه	محدوده دمای کاری (°C)	ویسکوزیته (mm ² /s)
LGMT 3	۳۰- تا ۱۲۰	۴۰ °C
		۱۲۰-۱۳۰

۳. مسئله‌بندی تحقیق

۳-۱. پردازش سیگنال در حوزه زمان - بسامد

تبدیل موجک پیوسته یکی از دو نوع مهم تبدیل موجک است. این روش برای پردازش هر دو نوع سیگنال‌های پایدار و ناپایدار مناسب است و همچنین از شفافیت زمانی و فرکانسی بسیار بالایی در شناسایی سیگنال‌ها برخوردار است. تبدیل موجک پیوسته به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد [۲۶].

$$\begin{aligned} \text{CWT}_{\psi}^x(\tau, s) &= \Psi_{\psi}^x(\tau, s) \\ &= \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادله τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال^{۳۸} و مقیاس^{۳۹} هستند. پارامتر انتقال طول پنجره را تعیین می‌کند و اطلاعات زمانی سیگنال را در بر دارد. پارامتر مقیاس به معنای معکوس فرکانس به کار می‌رود. باین حال استفاده از تبدیل موجک پیوسته در رایانه به صورت عملی امکان‌پذیر نیست. چراکه انتگرال‌گیری باید برای تمامی مقادیر مقیاس‌ها انجام گیرد و از طرفی نیز یک سیگنال پیوسته دارای بی‌نهایت مقدار است که ورود آنها به رابطه تبدیل موجک در رایانه سخت و مستلزم محاسبات بسیار سنگینی است. از این روی بسیار ضروری است تا از روشی برای تسریع محاسبات و از آن مهم‌تر قابلیت بارگذاری و کدگذاری تبدیل موجک بر روی رایانه استفاده شود. این روش که از جدیدترین ابداعات ریاضیات است را تبدیل موجک گسسته می‌نامند. تبدیل موجک گسسته با معادله زیر تعریف می‌شود [۲۶].

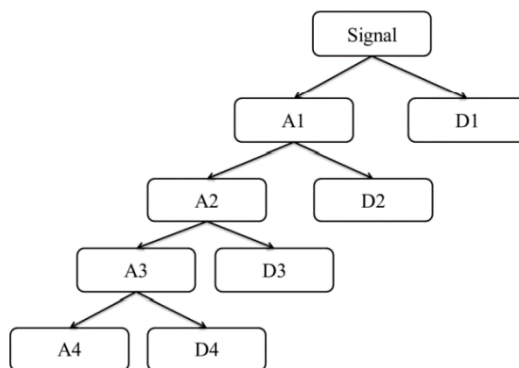
$$\begin{aligned} \text{DWT}_{\psi}^x(j, k) &= \Psi_{\psi}^x(j, k) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) dt \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله بالا شاخص‌های j و k شمارنده هستند. از مقایسه معادله‌های ۱ و ۲ مشخص می‌شود که در تبدیل موجک گسسته، پارامترهای $2^j k$ و 2^j به ترتیب جانشین

پارامترهای S و τ یعنی مقیاس و انتقال شده‌اند. این معادله به صورت دو فیلتر بالا گذر و پایین گذر بر یک سیگنال اثر می‌گذارد. در هر مرحله اعمال تبدیل، سیگنال به دو گستره فرکانس بالا و پایین تقسیم می‌شود. گستره فرکانسی پایین را تقریباً 40 و گستره فرکانسی بالا را جزئیات 41 می‌گویند. با هر بار اعمال این تبدیل، شفافیت زمانی نصف شده و شفافیت فرکانسی دو برابر می‌شود. در اکثر مواقع برای عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی استفاده از ۴ یا ۵ مرحله تجزیه در تبدیل موجک بهترین نتایج را ایجاد می‌کند. تبدیل موجک گسسته یک سیگنال با توجه به معادله ۳ از کنار یکدیگر قراردادن خروجی فیلترها ایجاد می‌شود [۲۶].

$$s = A_j + \sum_{i=1}^j D_i \quad (3)$$

در معادله ۳ شاخص A_j تقریب آخرین مرحله و D_i جزئیات هر مرحله از اعمال تبدیل هستند. در این پژوهش از ۴ مرحله تجزیه در تبدیل موجک استفاده شده است. شکل ۶ نمایی از اعمال یک تبدیل موجک گسسته در چهار مرحله بر روی یک سیگنال را نشان می‌دهد.



شکل ۶. اعمال تبدیل موجک گسسته تا چهار مرحله [۲۶]

یکی از محوری‌ترین مسائل در تبدیل موجک، انتخاب توابع موجک مادر است. در واقع این تابع موجک مادر است که انتقال می‌یابد و به مقیاس می‌رود. تبدیل موجک یک سیگنال بستگی زیادی به شباهت و همخوانی آن با موجک مادر دارد. خانواده‌های فراوانی از توابع موجک مادر معرفی

شده‌اند که هر یک برای پردازش سیگنال‌های متمایز، کاربردهای خاص خود را دارند. معروف‌ترین آنها تابع موجک هار 42 است که برای اولین بار آلفرد هار در پایان‌نامه دکترای خود در سال ۱۹۰۹ به آن اشاره نموده است. تابع موجک هار امروزه در واقع زیرمجموعه خانواده دوبشی 43 شناخته می‌شود. از دیگر خانواده‌های مهم موجک‌های مادر می‌توان به موجک‌های کویفلت 44 ، سیملت 45 ، دی‌می‌یر 46 ، بیور 47 و بیور معکوس 48 اشاره نمود. در این مطالعه تعداد ۵۳ موجک مادر جهت بررسی انتخاب شده است [۲۷]. در این پژوهش برای انتخاب موجک مادر، روش مقایسه نسبت انرژی به آنتروپی سیگنال تبدیل یافته با موجک‌های مادر استاندارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس تابع موجک مادری انتخاب می‌شود که بتواند حداکثر انرژی را، هنگامی که آنتروپی شانون ضرایب موجک سیگنال را حداقل می‌سازد، استخراج کند. در اینجا معیار حداکثر نسبت مقادیر انرژی به آنتروپی شانون ضرایب تبدیل موجک سیگنال برای انتخاب موجک مادر مناسب استفاده می‌شود [۲۸].

۳-۲. انرژی و آنتروپی شانون

انرژی و آنتروپی شانون به شرح زیر تعریف می‌گردند [۲۹]، [۳۰].

$$E = \sum_{n=1}^N x_i^2 \quad (4)$$

$$SE = - \sum_{i=1}^N P_i \times \log(P_i) \quad (5)$$

در رابطه بالا E آنتروپی شانون، x مقدار سیگنال را نشان می‌دهند. N تعداد نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین SE آنتروپی شانون و P مقدار احتمال را نشان می‌دهد.

۳-۳. معیار انتخاب کارایی مناسب برای حسگرها

به منظور انتخاب حسگر مناسب برای تخمین تخریب طبیعی باتاقان، سه شاخص روندپذیری 49 ، یکنواختی 50 ، و

$$\begin{aligned} \text{Cri} = \text{Prognosability} \\ + \text{Monotonicity} \\ + \text{Trendability} \end{aligned} \quad (9)$$

همه این شاخص‌ها و همچنین معیار نهایی دارای بازه تغییرات صفر تا یک هستند که یک نشان‌دهنده امتیاز بالا و صفر نشان‌دهنده مناسب نبودن آن پارامتر از دیدگاه شاخص است.

۴. نتایج و بحث

در این پژوهش سیگنال‌های نشر فرا آوایی در حوزه زمان - بسامد توسط اعمال تبدیل موجک گسسته بر سیگنال‌های حوزه زمان تولید می‌شوند. موجک مادری که در تجزیه سیگنال دارای بیشترین میانگین انرژی به آنتروپی شانون باشد، به‌عنوان مناسب‌ترین موجک مادر انتخاب می‌شود. در این تحقیق آزمایش‌های تخریب طبیعی یاتاقان از ابتدای نصب یاتاقان نو تا انتهای تخریب طبیعی یاتاقان ادامه می‌یابد و حسگرهای نشر فرا آوایی وضعیت سیگنال‌های نشر فرا آوایی استخراج شده از یاتاقان را از ابتدای راه اندازی یاتاقان تا ایجاد تخریب طبیعی روی یاتاقان ثبت می‌کنند. تخریب طبیعی در این تحقیق معادل دیدن چشمی عیب روی سطح یاتاقان و تعیین حد آستانه تخریب بر این اساس در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱. نتایج آزمون تجربی

شکل ۷ نمونه خرابی مشاهده شده در حلقه بیرونی یاتاقان روانکاری شده در انتهای آزمون را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، با توجه به اینکه خرابی کامل یاتاقان به علت محدودیت‌های چیدمان آزمایشگاهی و مشکلات مرتبط با ایمنی تجهیزات امکان‌پذیر نیست، مقدار حد آستانه خرابی یاتاقان برای سیگنال نشر فرا آوایی براساس مشاهده خرابی روی سطح حلقه یاتاقان در آزمون مشخص می‌گردد. معیار حد آستانه خرابی براساس ویژگی انرژی براساس مشاهده خرابی روی سطح یاتاقان حدود $5/5 \times 10^{-3}$ ژول انتخاب

قابل‌پیش‌بینی بودن^{۵۱} به‌عنوان شاخص‌های مورد بررسی برای ویژگی مدنظر پیشنهاد می‌شوند [۳۱]. تعاریف هر یک از شاخص‌های گفته شده به شرح زیر ذکر می‌گردند.

شاخص یکنواختی، مقدار افزایشی، کاهش یا ثابت بودن تغییرات ویژگی برحسب زمان را نشان می‌دهد. پارامتر دارای شاخص بالای یکنواختی دارای روند عمده تغییرات در یک راستا است. این شاخص بدین شرح تعریف می‌شود [۳۱].

$$\text{Monotonicity} = \left| \frac{\#\text{of}(d/dx) > 0}{N-1} - \frac{\#\text{of}(d/dx) < 0}{N-1} \right| \quad (6)$$

N تعداد مشاهدات یا آزمایش‌ها است. شاخص قابل‌پیش‌بینی بودن مقدار تغییرات ویژگی در آستانه خرابی را در آزمایش‌های مختلف راه‌اندازی تا تخریب نشان می‌دهد. حسگری که ویژگی استخراجی آن دارای شاخص بالاتر قابل‌پیش‌بینی بودن است، دارای تغییرات کمتر در آستانه تخریب در محدوده مقادیر ابتدایی و انتهایی خود است. شاخص بدین شرح تعریف می‌شود [۳۱].

$$\begin{aligned} \text{Prognosability} \\ = \exp \left(- \frac{\sigma(p_{\text{fail}})}{\text{mean}(p_{\text{fail}} - p_{\text{start}})} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

σ انحراف معیار داده‌ها و p مقدار ویژگی را نشان می‌دهد. شاخص روندپذیری مقدار شباهت شکل منحنی تخریب در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. این شاخص بدین شرح تعریف می‌شود [۳۲].

$$t_i = \frac{\#\text{of}(d/dx) > 0}{N-1} + \frac{\#\text{of}(d^2/dx^2) > 0}{N-2} \quad (8)$$

$$\text{Trendability} = 1 - \sigma(t_i)$$

N تعداد مشاهدات یا آزمایش‌ها است. معیار نهایی سه شاخص معرفی شده در مطالعات مختلف بدین شرح در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۱].

گردید و در آزمون‌ها خرابی سطح یاتاقان در این سطح انرژی مشاهده گردید. در آزمون‌های انجام شده مدت زمان آزمون تا مشاهده بروز عیب روی سطح یاتاقان برای آزمون‌های مختلف حدود ۱۹-۲۱ ساعت مشاهده گردید.

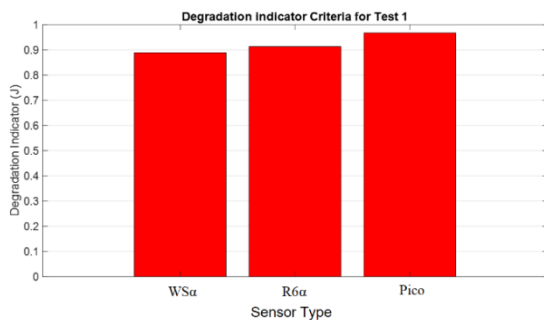


شکل ۷. خرابی مشاهده شده برای حلقه بیرونی یاتاقان در انتهای آزمون

۴-۲. مقایسه کارایی سه حسگر مورد استفاده در تشخیص تخریب طبیعی یاتاقان

در این پژوهش از لحظه شروع به کار موتور برقی تا زمان خاتمه آزمون، داده‌برداری با استفاده از نوع حسگر کوچک (Pico)، کم‌بسامد ($R6\alpha$) و نوار پهن ($WS\alpha$) انجام می‌گیرد. در ابتدا مقایسه عملکرد سه حسگر در تشخیص تخریب طبیعی یاتاقان مورد مقایسه قرار می‌گیرد و حسگر برتر برای استفاده در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه عملکرد سه حسگر، پارامتر حوزه زمانی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مقایسه عملکرد سه حسگر مورد استفاده، امتیاز معیار نهایی حاصل از شاخص‌های یکنواختی، قابل‌پیش‌بینی بودن، و روندپذیر بودن برای ویژگی انتخابی در سه حسگر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل ۸ و همچنین جدول ۳ مقایسه امتیاز معیار نهایی تجمیع شاخص‌ها برای ویژگی انرژی در سه حسگر برای آزمون‌های مختلف را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر سه حسگر مورد مطالعه برای تخمین عمیای یاتاقان مناسب هستند، با این حال حسگر کوچک Pico دارای میانگین امتیاز معیار تجمیع شاخص‌های بالاتر و برابر ۰/۹۷ است. پس از حسگر کوچک، حسگر کم‌بسامد با میانگین امتیاز ۰/۹۱ قرار می‌گیرد. در انتها نیز حسگر نوار پهن با میانگین امتیاز ۰/۸۹ قرار می‌گیرد.



شکل ۸. مقایسه عملکرد سه حسگر مورد استفاده بر مبنای ویژگی انرژی

جدول ۳. مقایسه عملکرد سه حسگر مورد استفاده بر مبنای ویژگی انرژی

نام حسگر	امتیاز معیار تجمیع شاخص‌ها (Cri)
WS α	۰/۸۹
R6 α	۰/۹۱
Pico	۰/۹۷

۴-۳. بررسی کارایی مدل‌های موجک مادر

تغییرات ویژگی انرژی سیگنال نشر فرا آوایی به دست آمده از یاتاقان تحت آزمایش از ابتدای آزمایش تا تخریب یاتاقان با استفاده از سیگنال‌های استخراج شده از حسگر انتخابی یعنی حسگر کوچک Pico در شکل ۹ دیده می‌شوند. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود کمترین سطح انرژی سیگنال در زمان سالم بودن یاتاقان یعنی تا حدود ساعت ۱۳ مشاهده می‌شود. پس از این ساعت مشاهده می‌شود که سطح انرژی سیگنال به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود در حدود ساعت ۱۹ تا ۲۱ برای آزمون‌های مختلف تا لحظه مشاهده خرابی روی سطح

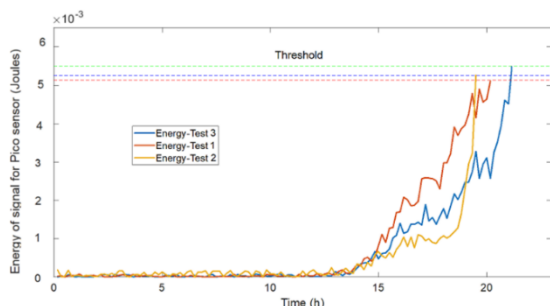
یاتاقان می‌رسد. همچنین مقایسه مقادیر نسبت انرژی به آنتروپی شانون برای ۵۳ موجک مادر آورده شده به دست آمده از تغییرات سیگنال نشر فرا آوایی از ابتدا تا انتهای آزمایش در جدول ۴ و شکل ۱۰ دیده می‌شوند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود موجک مادر بیور ۳/۱ دارای بیشترین نسبت انرژی به آنتروپی شانون می‌باشد و به عنوان بهترین موجک مادر در اینجا انتخاب می‌شود.

همچنین پس از آن بیور معکوس ۳/۱ دارای مقدار نسبت انرژی به آنتروپی بالایی است.

موجک مادر بیور ۳/۱ و پس از آن بیور ۳/۳ نسبت به سایر موجک‌های مادر پیچیده‌تر هستند. این موجک‌ها دارای تعداد بیشتری پالس نسبت به سایر سیگنال‌ها هستند. همچنین کمترین مقادیر نسبت انرژی به آنتروپی شانون به موجک

مادر بیور معکوس ۱/۳ و بیور معکوس ۱/۵ تعلق دارد. این موجک‌ها دارای ساده‌ترین شکل موج نسبت به سایر موجک‌ها هستند و کمترین شانس را برای انتخاب به عنوان موجک مادر خواهند داشت.

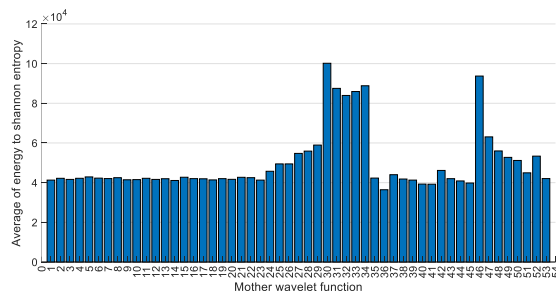


شکل ۹. تغییرات متغیر انرژی بر حسب زمان برای سه آزمون

مختلف

جدول ۴. نسبت انرژی به آنتروپی شانون

نسبت انرژی به آنتروپی	موجک مادر	نسبت انرژی به آنتروپی	موجک مادر	نسبت انرژی به آنتروپی	موجک مادر	نسبت انرژی به آنتروپی	موجک مادر
۳۹۲۷۹.۳	'rbio1.3'	۴۹۴۴۴.۶	'bior2.2'	۴۱۶۷۳.۴	'coif3'	۴۱۲۸۲.۹	'db1'
۳۹۲۱۴.۸	'rbio1.5'	۵۴۷۳۹.۴	'bior2.4'	۴۲۶۸۹.۹	'coif4'	۴۲۱۸۷.۷	'db2'
۴۶۱۵۴.۲	'rbio2.2'	۵۵۸۹۲.۶	'bior2.6'	۴۲۵۰۱.۸	'coif5'	۴۱۶۲۹.۹	'db3'
۴۲۰۰۰.۵	'rbio2.4'	۵۸۹۳۹.۵	'bior2.8'	۴۲۱۸۷.۷	'sym2'	۴۲۱۹۵.۶	'db4'
۴۰۸۶۰.۹	'rbio2.6'	۱۰۰۱۶۸.۴	'bior3.1'	۴۱۶۲۹.۹	'sym3'	۴۲۸۹۰.۷	'db5'
۳۹۸۱۱.۹	'rbio2.8'	۸۱۵۱۶.۵	'bior3.3'	۴۱۹۷۱.۸	'sym4'	۴۲۲۷۴.۹	'db6'
۹۳۷۲۷.۱	'rbio3.1'	۸۳۹۴۸.۵	'bior3.5'	۴۱۰۸۹.۶	'sym5'	۴۲۰۵۳.۳	'db7'
۶۳۰۶۷.۴	'rbio3.3'	۸۵۹۲۹.۳	'bior3.7'	۴۲۷۲۱.۷	'sym6'	۴۲۴۹۶.۵	'db8'
۵۵۹۷۹.۰	'rbio3.5'	۸۸۸۳۲.۱	'bior3.9'	۴۲۰۲۰.۳	'sym7'	۴۱۴۴۲.۱	'db9'
۵۲۷۳۵.۳	'rbio3.7'	۴۲۳۰۲.۸	'bior4.4'	۴۱۹۴۲.۳	'sym8'	۴۱۵۲۵.۶	'db10'
۵۱۱۸۶.۵	'rbio3.9'	۳۶۴۲۲.۱	'bior5.5'	۴۱۲۸۲.۹	'bior1.1'	۴۱۸۲۶.۱	'dmey'
۴۴۹۴۱.۲	'rbio4.4'	۴۴۰۰۱.۲	'bior6.8'	۴۵۷۳۳.۵	'bior1.3'	۴۱۳۷۴.۶	'coif1'
۵۳۳۶۰.۱	'rbio5.5'	۴۱۲۸۲.۹	'rbio1.1'	۴۹۴۴۴.۶	'bior1.5'	۴۲۰۱۱.۴	'coif2'
۴۲۰۴۸.۹	'rbio6.8'						



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر انرژی به آنتروپی شانون

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی کاربرد تبدیل موجک در تخریب طبیعی یاتاقان غلتشی براساس پردازش سیگنال‌های نشر فرا آوایی پرداخته شده است. به منظور استخراج سیگنال‌های نشر فرا آوایی یاتاقان از یک چیدمان آزمایشگاهی و تجهیزات داده برداری مناسب استفاده شده است. پردازش سیگنال‌های نشر فرا آوایی در حوزه‌های زمان-بسامد با استفاده از آنالیز تبدیل موجک انجام گرفته است. تخریب طبیعی یاتاقان از ابتدای راه اندازی تا مشاهده چشمی عیب روی سطح یاتاقان مورد بررسی قرار گرفت.

مقدار حد آستانه خرابی یاتاقان برای سیگنال نشر فرا آوایی براساس مشاهده خرابی روی سطح حلقه یاتاقان در آزمون مشخص می‌گردد.

معیار حد آستانه خرابی براساس ویژگی انرژی براساس مشاهده خرابی روی سطح یاتاقان حدود $5/5 \times 10^{-3}$ ژول انتخاب گردید و در آزمون‌ها خرابی سطح یاتاقان در این سطح انرژی مشاهده گردید. در آزمون‌های انجام شده مدت زمان آزمون تا مشاهده بروز عیب روی سطح یاتاقان برای آزمون‌های مختلف حدود ۱۹-۲۱ ساعت مشاهده گردید.

همچنین نتایج نشان داد که روش نشر فرا آوایی روشی کارا برای مشاهده روند تخریب طبیعی یاتاقان است. مقایسه

۷. مأخذ

کارایی سه حسگر مورد مطالعه نشان داد که هر سه حسگر $Pico$ ، $R6\alpha$ و $WS\alpha$ برای بررسی تخریب طبیعی یاتاقان مناسب هستند، با این حال حسگر $Pico$ دارای امتیاز بالاتری است.

مقادیر نسبت انرژی به آنتروپی شانون برای ۵۳ موجک مادر بررسی شده نشان می‌دهد که موجک مادر بیور ۳/۱ دارای بیشترین نسبت انرژی به آنتروپی شانون است و به عنوان بهترین موجک مادر انتخاب شد. همچنین پس از آن بیور معکوس ۳/۱ دارای مقدار نسبت انرژی به آنتروپی بالایی است.

در ادامه این کار پیشنهاد نویسندگان مقایسه روش‌های نشر فرا آوایی و روش ارتعاشات در بررسی تخریب طبیعی یاتاقان و استخراج مدل‌های کارا جهت بررسی تخریب طبیعی یاتاقان مدنظر است.

۶. قدردانی

نویسندگان از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، بابت حمایت‌های انجام شده جهت انجام آزمایش‌ها، نهایت تقدیر و تشکر را دارند.

[1] Jardine, Andrew KS, Daming Lin, and Dragan Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical systems and signal processing*, 2006, Vol.20, no.7, pp.1483-1510.

- [2] Muller, Alexandre, Adolfo Crespo Marquez, and Benoît Iung, "On the concept of e-maintenance: Review and current research", *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, Vol.93, no.8, pp.1165-1187.
- [3] Sikorska, Joanna Z., Melinda Hodkiewicz, and Lin Ma, "Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry", *Mechanical systems and signal processing*, 2011, Vol.25, no.5, pp.1803-1836.
- [4] Ahmadzadeh, Farzaneh, and Jan Lundberg, "Remaining useful life prediction of grinding mill liners using an artificial neural network", *Minerals Engineering*, 2013, Vol.53, pp.1-8.
- [5] ISO-15243, "Rolling bearing damage and failure terms, characteristics and causes", 2017.
- [6] Beattie, Alan G., "Acoustic emission, principles and instrumentation". No. SAND-82-2825. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1983.
- [7] Al-Ghamd, Abdullah M., and David Mba, "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, Vol.20, no.7, pp.1537-1571.
- [8] Mba, David, "The use of acoustic emission for estimation of bearing defect size", *Journal of Failure analysis and prevention*, 2008, Vol.8, pp.188-192.
- [9] Miettinen, Juha, and Peter Andersson, "Acoustic emission of rolling bearings lubricated with contaminated grease", *Tribology International*, 2000, Vol.33, no.11, pp.777-787.
- [10] Feng, Yanhui, "Novel acoustic emission signal processing methods for bearing condition monitoring", PhD diss., University of Leicester, 2008.
- [11] Al-Dossary, Saad, RI Raja Hamzah, and David Mba, "Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing", *Applied acoustics*, 2009, Vol.70, no.1, pp.58-81.
- [12] Mba, David, "Acoustic emissions and monitoring bearing health", *Tribology Transactions*, 2003, Vol.46, no.3, pp.447-451.
- [13] Morhain, A., and David Mba, "Bearing defect diagnosis and acoustic emission", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2003, Vol.217, no.4, pp.257-272.
- [14] He, Yongyong, Xinming Zhang, and Michael I. Friswell, "Defect diagnosis for rolling element bearings using acoustic emission", 2009, p.061012.
- [15] Caesarendra, Wahyu, Buyung Kosasih, Anh Kiet Tieu, Hongtao Zhu, Craig AS Moodie, and Qiang Zhu, "Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, Vol.72, pp.134-159.
- [16] Usgame Sandoval, Hector M., Camilo A. Pedraza Ramírez, and J. E. Quiroga Mendez, "Acoustic emission-based early fault detection in tapered roller bearings", *Ingeniería e Investigación*, 2013, Vol.33, no.3, pp.5-10.
- [17] Zhu, Jun, Nan Chen, and Weiwen Peng, "Estimation of bearing remaining useful life based on multiscale convolutional neural network", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, Vol.66, no.4, pp.3208-3216.

- [18] Elforjani, M. A. D. M., and D. Mba, "Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with acoustic emission", *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, Vol.77, no.1, pp.112-127.
- [19] Caesarendra, Wahyu, "Vibration and acoustic emission-based condition monitoring and prognostic methods for very low speed slew bearing", 2015.
- [20] Elforjani, M., "Estimation of remaining useful life of slow speed bearings using acoustic emission signals", *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, Vol.35, no.4, p.62.
- [21] Aye, Sylvester A., and P. S. Heyns, "An integrated Gaussian process regression for prediction of remaining useful life of slow speed bearings based on acoustic emission", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, Vol.84, pp.485-498.
- [22] ر. روحانی، "بررسی خرابی یاتاقان های غلتشی در دینامومترهای آزمون موتور و پایش وضعیت آنها با استفاده از آنالیز ارتعاشات"، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۳۹۴.
- [23] ASTM, E. "650." *Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors*, The American Society for Testing and Materials, 1997.
- [24] آ. مسرخانی، "تشخیص تجربی عیب یاتاقان غلتشی با استفاده از نشر آوایی با روش شبکه عصبی مصنوعی"، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۸.
- [25] S.B. Grease, "SKF general purpose industrial and automotive bearing grease", 2022, <https://www.skf.com/group/products/lubrication-management>.
- [26] م. خزایی، "پیش بینی عمر مفید باقیمانده تسمه زمانبندی موتور درونسوز براساس سیگنال های ارتعاشی و به کمک روش های هوش مصنوعی"، رساله برای دریافت درجه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۴.
- [27] Dixit, Abhinav, and Swatilekha Majumdar, "Comparative analysis of coiflet and daubechies wavelets using global threshold for image denoising", *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2013, Vol.6, no.5, p.2247.
- [28] Kankar, Pavan Kumar, Satish C. Sharma, and Suraj Prakash Harsha, "Fault diagnosis of rolling element bearing using cyclic autocorrelation and wavelet transform", *Neurocomputing*, 2013, Vol.110, pp.9-17.
- [29] Kahirdeh, Ali, Christine Sauerbrunn, and Mohammad Modarres, "Acoustic emission entropy as a measure of damage in materials", In *AIP Conference Proceedings*, 2016, Vol.1757, no.1, AIP Publishing, 2016.
- [30] Van Hecke, Brandon, Yongzhi Qu, and David He, "Bearing fault diagnosis based on a new acoustic emission sensor technique", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2015, Vol.229, no.2, pp.105-118.
- [31] Aziz, Nur Hakimah Ab, "A framework for developing a prognostic model using partial discharge data from electrical trees", 2018.
- [32] Wang, Jia, and Zhigang Li, "Degradation model of multi-signals based on a novel feature-selection criterion", *Structural Health Monitoring*, 2018, Vol.17, no.6, pp.1491-1502.

1. Acoustic Emission
2. Wavelet transform
- 3 Bior 3.1 mother wavelet
4. Fault Prognosis
5. Pitting
6. Spalling
7. Flaking
8. American Society for Testing and Materials (ASTM)
9. Miettinen
10. Feng
11. Al-Dossary
12. Mba
13. Background noise
14. RMS
15. Morhain
16. Count
17. He
18. Caesarendra
19. Sandoval
20. Zhu
21. Multiscale convolutional neural network (MSCNN)
22. Elforjani
23. Caesarendra
24. Signal intensity estimator
25. Aye
26. Heyns
27. Gaussian process regression (GPR)
28. Mean Value
29. Covariance
30. Variance
31. Polynomial kernel principal component analysis
32. Gaussian mixture model (GMM)
33. Siemens
34. Physical Acoustic Corporation (PAC)
35. Resolution
36. Pre-amplifiers
37. Coaxial cable
38. Translation
39. Scaling
40. Approximations
41. Details
42. Haar Wavelets
43. Daubechies
44. Coiflet
45. Symlet
46. Discrete Meyer
47. Biorthogonal
48. Reverse Biorthogonal
49. Trendability
50. Monotonicity
51. Prognosability