

مقایسه عملکرد سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی در عیب‌یابی یاتاقان غلطشی

امیرحسین خیبری‌نژاد^ا، مائده سعادت^ب، حسام الدین ارغند^ج*

^ا ایران، زنجان، بلوار دانشگاه، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک.

^ب ایران، زنجان، بلوار دانشگاه، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک.

^ج ایران، زنجان، بلوار دانشگاه، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، استادیار مهندسی مکانیک.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: arghnad@znu.ac.ir

چکیده

یاتاقان‌های غلطشی از اجزای کلیدی ماشین‌های دوار هستند و عیوب آن‌ها می‌تواند منجر به توقف سیستم شود. این پژوهش عملکرد سیگنال‌های صوتی (غیرتماسی) و ارتعاشی (تماسی) را در تشخیص عیوب یاتاقان‌های غلطشی با استفاده از مجموعه داده‌ای آزمایشگاهی مقایسه کرده است. داده‌های مورد استفاده شامل وضعیت سالم و معیوب یاتاقان غلطشی (عیب در رینگ داخلی و خارجی) بوده است. بدین منظور ۱۲ ویژگی آماری در حوزه‌های زمان و فرکانس از سیگنال‌های صوت و ارتعاشات استخراج شده است. نتایج نشان داده است که ویژگی‌های بدست آمده از سیگنال ارتعاشات نسبت به تغییر وضعیت سلامت حساس‌تر بوده‌اند، اما ویژگی‌هایی مانند ریشه میانگین مربعات و پیک بدست آمده از سیگنال‌های صوتی نیز به خوبی نسبت به تغییر وضعیت سلامت یاتاقان واکنش نشان داده‌اند. تحلیل زمانی و فرکانسی نیز تفاوت‌های واضح دامنه و الگوی سیگنال را در سیگنال صوتی و ارتعاشی نشان داده است. مشخص گردید که اگر شرایط نویز محیط تأثیر زیادی روی سیگنال‌های صوتی نداشته باشد، استفاده از روش تحلیل صوتی توانسته است به خوبی تحلیل ارتعاشات، وضعیت سلامت تجهیز را مشخص کند.

کلمات کلیدی: عیب‌یابی یاتاقان غلطشی؛ سیگنال ارتعاشات؛ سیگنال صوتی؛ ویژگی‌های آماری.

۱- مقدمه

یاتاقان‌های غلطشی از اجزای مهم ماشین‌های دوار محسوب می‌شوند و وظیفه‌ی اصلی آن‌ها تحمل بار و کاهش اصطکاک میان اجزای دوار ماشین است. هرگونه تغییر در شرایط کاری یا بروز عیب در این اجزا می‌تواند منجر به افزایش سطح ارتعاشات، تولید نویز و در نتیجه افت کارایی یا توقف عملکرد سیستم شود. از این‌رو، پایش وضعیت و تشخیص به‌موقع عیوب یاتاقان‌ها نقش اساسی در پیشگیری از خرابی‌های ثانویه و همچنین توقف‌های پیش‌بینی نشده تجهیزات ایفا می‌کند. از روش‌های مختلف پایش وضعیت می‌توان

به آنالیز ارتعاشات، آنالیز جریان الکتریکی، آنالیز روانکار، آنالیز صوت و ... اشاره کرد. در میان روش‌های گوناگون پایش وضعیت، تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی به دلیل ارتباط مستقیم با رفتار دینامیکی سیستم، به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین و رایج‌ترین ابزارهای شناسایی عیوب مکانیکی مطرح است. با این حال، استفاده از حسگرهای ارتعاشی به تماس فیزیکی با سطح ماشین نیاز دارد و در برخی شرایط صنعتی یا سازه‌های بسته، نصب آن‌ها با دشواری همراه است. در مقابل، تحلیل سیگنال‌های صوتی به‌عنوان روشی غیرتماسی، مقرون‌به‌صرفه و آسان در سال‌های اخیر مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. سیگنال‌های صوتی نیز حاوی اطلاعات ارزشمندی از وضعیت عملکردی سیستم هستند، هرچند دقت و پایداری آن‌ها تحت تأثیر عواملی مانند نویز محیطی و موقعیت حسگر قرار دارد. از این منظر، مقایسه‌ی عملکرد داده‌های صوتی و ارتعاشی در فرآیند تعیین وضعیت سلامت و عیب‌یابی تجهیزات دوار و حتی موتور خودروها می‌تواند درک دقیق‌تری از قابلیت اعتماد و اثربخشی هر روش فراهم سازد [۱ و ۲].

پژوهش‌های متعددی به بررسی کارایی داده‌های صوتی و ارتعاشی در تشخیص عیوب تجهیزات دوار و خصوصاً یاتاقان‌ها انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش‌ها، توسعه‌ی رویکردهای کارآمدتر برای پایش وضعیت ماشین‌های دوار و ارتقای دقت در شناسایی خطاهای ضعیف بوده است. میا و همکاران [۳] با استفاده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال مانند تجزیه مودهای تجربی^۱ نشان دادند که تضعیف انرژی سیگنال‌های صوتی در نقاط مختلف اندازه‌گیری یکی از دلایل اصلی کاهش دقت تشخیص عیب است؛ هرچند ادغام اطلاعات حسگرهای ارتعاشی و صوتی می‌تواند این مشکل را تا حد زیادی برطرف سازد. پاچکو و همکاران [۴] با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ماشین بردار پشتیبان^۲ و جنگل تصادفی^۳، عملکرد داده‌های صوتی و ارتعاشی را در تشخیص عیب یاتاقان‌های غلتشی مقایسه کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که ادغام دو نوع سیگنال صوتی و ارتعاشی، دقت طبقه‌بندی عیب یاتاقان را به بیش از ۹۸ درصد می‌رساند. همچنین در برخی شرایط، داده‌های صوتی به‌تنهایی عملکرد بهتری نسبت به داده‌های ارتعاشی داشتند، که این امر نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بالای روش‌های غیرتماسی در پایش وضعیت است. شی و همکاران [۵] با تمرکز بر تأثیر نویز محیطی و وابستگی مکانی بر عملکرد حسگرهای صوتی، یک چارچوب پایش وضعیت با استفاده از ادغام داده‌های صوتی و ارتعاشی برای عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی ارتعاشی ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این چارچوب معرفی شده سبب افزایش نسبت نویز به سیگنال^۴ در ویژگی‌های^۵ استخراج شده از سیگنال صوت می‌گردد و دقت سیستم‌های تشخیص عیب را افزایش می‌دهد. برای عیب‌یابی توسط تحلیل صوتی روی تجهیزات واقعی، شوبیتا و همکاران [۶] از صدای یک دریل در چهار وضعیت سلامت مختلف (سالم، خرابی یاتاقان، خرابی فن و خرابی چرخ‌دنده) استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داد که با رعایت ملاحظات کلیدی مانند مشاهدات کافی، الگوریتم‌های پیش‌پردازش مناسب و استخراج ویژگی‌های دقیق، یادگیری ماشین می‌تواند برای تشخیص آنالیز شرایط ماشین‌آلات دوار بر اساس سیگنال صوتی مؤثر واقع شود. در مطالعه‌ای مشابه، ونگ و همکاران [۷] با ترکیب ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌های صوتی و ارتعاشی، دقت مدل‌های تشخیص خرابی روی یاتاقان غلتشی را افزایش دادند. هرچند آن‌ها گزارش کردند که عملکرد سیستم تشخیص عیب به موقعیت حسگر صوتی وابسته است و این وابستگی می‌تواند در برخی شرایط موجب افت دقت مدل گردد.

برآیند مطالعات نشان می‌دهد که چالش‌هایی نظیر نسبت بالای نویز به سیگنال در داده‌های صوتی و وابستگی عملکرد به موقعیت حسگر همچنان از موانع اصلی در کاربرد صنعتی تحلیل صوت در عیب‌یابی تجهیزات دوار به شمار می‌روند. از این رو می‌توان با بکارگیری تحلیل صوت در کنار تحلیل ارتعاشات، فرآیند عیب‌یابی را با دقت بالاتری انجام داد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی در تشخیص عیوب یاتاقان‌های غلتشی انجام می‌شود. در این مطالعه، ویژگی‌های مؤثر در حوزه‌های زمان و فرکانس استخراج و تحلیل می‌شوند تا توانایی هر نوع سیگنال در تفکیک وضعیت‌های سالم و معیوب مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند مبنایی برای انتخاب مجموعه ویژگی مناسب برای استفاده در تحلیل دقیق‌تر و قابل اعتمادتر وضعیت سلامت و عیب‌یابی تجهیزات دوار توسط روش‌های پایش تماسی و غیرتماسی فراهم آورد.

¹ Empirical Mode Decomposition (EMD)

² Support Vector Machine (SVM)

³ Random Forrest (RF)

⁴ Noise to Signal Ratio (NSR)

⁵ Features

۲- معرفی ویژگی سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی

به منظور استفاده از سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی اندازه‌گیری شده جهت بررسی عملکرد آنها در عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی نیاز است تا ویژگی‌های آماری مختلف از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده استخراج گردد. پس از استخراج ویژگی‌های آماری به مقایسه سیگنال‌های ارتعاشات و صوت در حالت سالم و معیوب با نمودارهای زمانی و طیف فرکانسی پرداخته خواهد شد.

۱-۲ معرفی ویژگی‌های آماری سیگنال صوت و ارتعاشات

ویژگی‌های آماری عموماً از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در حوزه زمان و حوزه فرکانس محاسبه می‌شوند و برای تعیین وضعیت سلامت تجهیزات و عیب‌یابی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های رایج آماری که توسط بیشتر محققان نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد در منابع [۴ و ۸] معرفی شده‌اند. تعدادی از ویژگی‌های رایج پیشنهاد شده در مراجع مذکور که در مقاله حاضر مورد استفاده قرار خواهد گرفت در جدول (۱) معرفی شده‌اند که در آن نام هر ویژگی، نماد، رابطه ریاضی محاسبه آن و نیز مرجع استخراج آن ارائه شده است. همچنین نشان داده شده است که ویژگی آماری از کدام حوزه بررسی سیگنال استخراج گردیده است.

جدول ۱. معرفی ویژگی‌های آماری قابل استخراج از سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی [۴ و ۸]

ردیف	نام ویژگی	نماد ویژگی	مرجع استخراج	رابطه ریاضی
۱	ریشه میانگین مربعات	RMS	حوزه زمان	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i ^2}$
۲	کورتوسیس	Ku	حوزه زمان	$Ku = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N \sigma_x^4}$
۳	پیک	Peak	حوزه زمان	$Peak = \max(x)$
۴	فاکتور کرس	Xcf	حوزه زمان	$Xcf = \frac{Peak}{RMS}$
۵	چولگی ^۱	Ske	حوزه زمان	$Ske = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N \sigma_x^3}$
۶	فاکتور ضربه	IF	حوزه زمان	$IF = \frac{Peak}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$
۷	فاکتور حاشیه ^۲	MF	حوزه زمان	$MF = \frac{Peak}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i } \right)^2}$
۸	فاکتور شکل	SF	حوزه زمان	$SF = \frac{RMS}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$
۹	فاکتور لقی ^۳	CLF	حوزه زمان	$CLF = \frac{\max(x)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i } \right)^2}$
۱۰	تلف	Talaf	حوزه زمان	$Talaf = \log \left(Ku + \frac{RMS}{RMS(healthy)} \right)$
۱۱	ریشه میانگین مربعات فرکانسی	fms	حوزه فرکانس	$fms = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s(k)}$
۱۲	انولوپ توان ^۴	Pw	حوزه فرکانس	$Pw = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s^2(k)$

در روابط فوق x_i سیگنال زمانی اندازه‌گیری شده، N طول سیگنال زمانی، $s(k)$ سیگنال فرکانسی بدست آمده از اعمال تبدیل فوریه سریع روی سیگنال زمانی و K طول سیگنال فرکانسی می‌باشد.

¹ Skewness

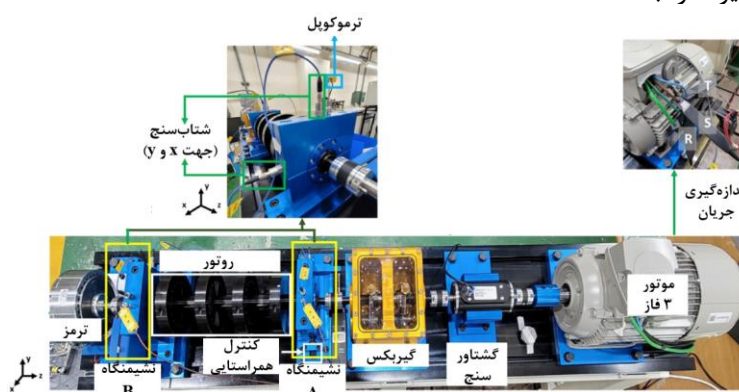
² Margine Factor

³ Clearance Factor

⁴ Power Envelope

۳- معرفی مجموعه داده آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، از داده‌های ارتعاشات و صوت یک مجموعه داده جامع از یک چیدمان دوار برای مقایسه روش‌های تشخیص عیب تحت شرایط بارگذاری متغیر و در سرعت چرخشی ثابت استفاده شده است. این مجموعه داده، در مرکز توسعه تکنولوژی کره جنوبی^۱، توسط جونگ و همکاران [۹] منتشر شده است. مجموعه داده منتشر شده شامل اندازه‌گیری‌های داده‌های ارتعاشات، صوت، دما و جریان موتور می‌باشد. چیدمان آزمایشگاهی در شکل (۱) ارائه شده است. این چیدمان شامل یک موتور القایی سه‌فاز چهار قطبی با قدرت نامی ۳ اسب بخار، اندازه‌گیر گشتاور، جعبه‌دنده با نسبت افزایش سرعت ۲/۰۷ برابر، دو نشیمنگاه یاتاقان غلتشی (A و B)، چندین روتور و ترمز هیستریز^۲ برای اعمال بار است. سرعت کاری برای تمام اندازه‌گیری‌ها در این مجموعه داده ۳۰۱۰ دور بر دقیقه بوده و اندازه‌گیری‌های انجام شده در ۳ حالت بارگذاری متفاوت (صفر نیوتن‌متر، ۲ نیوتن‌متر و ۴ نیوتن‌متر) انجام گرفته است. لازم به ذکر است که داده‌های صوتی تنها تحت بار صفر نیوتن‌متر جمع‌آوری شده‌اند تا آلودگی نویز ناشی از کارکرد سیستم خنک‌کننده ترمز روی داده‌های اندازه‌گیری شده تأثیرگذار نباشد.



شکل ۱. چیدمان آزمایشگاهی معرفی شده مرجع [۹] و اجزای آن

در چیدمان معرفی شده، داده‌های ارتعاشات با استفاده از چهار شتابسنج PCB 352C34 که در جهت‌های X و Y روی هر دو نشیمنگاه یاتاقان‌های A و B نصب شده‌اند، ثبت گردیده است. سیگنال‌های صوتی نیز با یک میکروفون (PCB 378B02) که نزدیک نشیمنگاه یاتاقان A قرار گرفته شده، اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های صوت و ارتعاشات انجام شده توسط سیستم اندازه‌گیری SIEMENS SCADAS Mobile 5PM50 صورت گرفته است. فرکانس نمونه‌برداری سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی به ترتیب برابر با ۵۱/۲ و ۲۵/۶ کیلوهرتز می‌باشد. اندازه‌گیری‌های دما و جریان الکتریکی نیز به ترتیب توسط دو ترموکوپل و سه ترانسفورمر جریان Hioki CT6700 ثبت شده‌اند. مجموعه داده معرفی شده شامل وضعیت‌های مختلف سلامت تجهیزات دوار از جمله وضعیت عادی، عیب در رینگ داخلی^۳ و عیب در خارجی^۴ یاتاقان‌های غلتشی، عیب نامیزانی و عیب ناهمراستایی است. عیوب یاتاقان غلتشی روی یاتاقان استاندارد NSK 6205 که در نشیمنگاه A نصب شده است، ایجاد شده‌اند. برای ایجاد عیب در رینگ داخلی و خارجی، شکاف با اندازه‌های ۰/۳، ۱/۰ و ۳/۰ میلی‌متر توسط ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به ترتیب روی رینگ داخلی و خارجی ایجاد شده است (شکل (۲)). عیب نامیزانی از طریق اتصال وزنه به جرم‌های ۵۸۳، ۱۱۶۹، ۱۷۵۱، ۲۲۳۹ و ۳۳۱۸ میلی‌گرم روی دیسک نزدیک به نشیمنگاه یاتاقان A ایجاد شده است. همچنین برای ایجاد وضعیت ناهمراستایی در تجهیز، شفت سوار بر نشیمنگاه یاتاقان A در ۳ سطح مختلف (۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌متر) به صورت موازی جابجا شده است.

¹ Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)

² Hysteresis Brake

³ Inner Race Fault

⁴ Outer Race Fault



شکل ۲. عیوب مصنوعی ایجاد شده روی یاتاقان غلتشی NSK 6205 (الف تا ج: عیب رینگ داخلی در ۳ سطح مختلف و د تا ی: عیب رینگ خارجی در ۳ سطح مختلف) [۹]

در پژوهش حاضر، داده‌های صوت و ارتعاش متناسب با جدول (۲) جهت پیشبرد اهداف پژوهش انتخاب شده‌اند. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، ایجاد بارگذاری سبب افزایش نویز بوده و داده‌های صوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، از این رو سیگنال‌های صوت و ارتعاش مورد استفاده تنها شامل حالت بدون بارگذاری (صفر نیوتون‌متر) هستند. همچنین اندازه‌گیری صوت فقط برای عیوب یاتاقان‌های غلتشی انجام شده است.

جدول ۲. مجموعه داده مورد استفاده در پژوهش حاضر [۹]

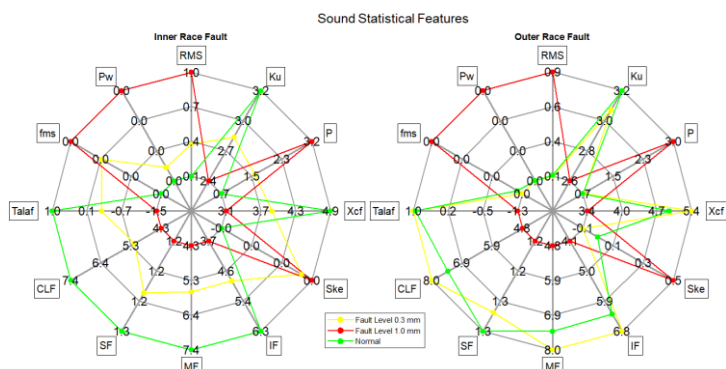
نوع داده	وضعیت سلامت	محل عیب	شدت عیب	بارگذاری (نیوتون‌متر)	طول سیگنال (ثانیه)	سرعت دورانی (rpm)	فرکانس نمونه‌برداری (kHz)
ارتعاشات	عادی	-	-	صفر	۱۲۰	۳۰۱۰	۲۵/۶
	یاتاقان معیوب	رینگ داخلی یاتاقان	۰/۳ میلی‌متر		۶۰		۲۵/۶
		رینگ خارجی یاتاقان	۱/۰ میلی‌متر		۶۰		۲۵/۶
		رینگ خارجی یاتاقان	۰/۳ میلی‌متر		۶۰		۲۵/۶
		یاتاقان	۱/۰ میلی‌متر		۶۰		۲۵/۶
	عادی	-	-		۶۰		۵۱/۲
صوت	یاتاقان معیوب	رینگ داخلی یاتاقان	۰/۳ میلی‌متر	صفر	۶۰	۳۰۱۰	۵۱/۲
		رینگ خارجی یاتاقان	۱/۰ میلی‌متر		۶۰		۵۱/۲
		رینگ خارجی یاتاقان	۰/۳ میلی‌متر		۶۰		۵۱/۲
		یاتاقان	۱/۰ میلی‌متر		۶۰		۵۱/۲
	عادی	-	-		۶۰		۵۱/۲
		-	-		۶۰		۵۱/۲

۴- نتایج

در این قسمت، ابتدا ویژگی‌های آماری معرفی شده در بخش ۲ از سیگنال‌های صوت و ارتعاشات استخراج می‌شوند. در ادامه عملکرد ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های صوت و ارتعاش نسبت به تغییر در وضعیت سلامت یاتاقان غلتشی چیدمان آزمایشگاهی بررسی می‌شوند. در انتها سیگنال زمانی و طیف فرکانسی سیگنال‌های مورد استفاده در این پژوهش ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که در بررسی انجام شده روی داده‌های صوت و ارتعاش، رفتار پایا در سیگنال‌های صوت و ارتعاش مشاهده شده است. از این رو برای افزایش سرعت محاسبات، ۱۰ ثانیه (ثانیه ۲۵ تا ۳۵) از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در محاسبات استفاده شده است.

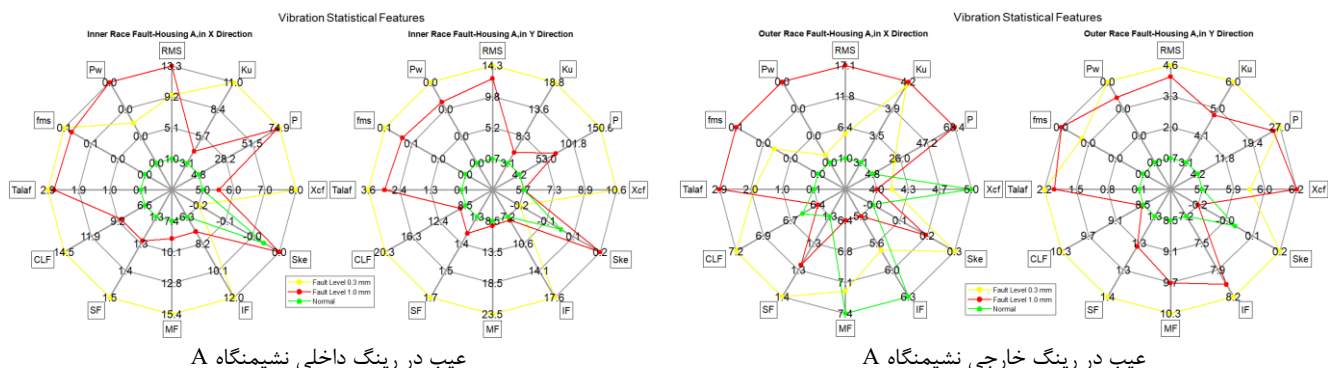
۴-۱ مقایسه ویژگی‌های سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی

در شکل (۳)، تغییرات ویژگی‌های آماری استخراج شده از سیگنال صوت در حالت سالم و عیوب یاتاقان غلتشی به صورت نمودار تارنکبوتی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ویژگی‌های ریشه میانگین مربعات، پیک و چولگی از حوزه زمان و ویژگی‌های fms و انولوپ توان از حوزه فرکانس به خوبی نسبت به تغییر در وضعیت سلامت یاتاقان غلتشی واکنش نشان داده‌اند. ویژگی‌های مذکور در حالت سالم مقدار کمتری نسبت به وضعیت متوسط و شدید عیب در رینگ داخلی و خارجی دارند و با افزایش شدت عیب، مقادیر آنها افزایش می‌یابد. در بعضی از ویژگی‌های ارائه شده مانند فاکتور ضربه، لزوماً افزایش شدت عیب و همچنین معیوب شدن یاتاقان سبب افزایش مقادیر ویژگی نشده است.



شکل ۳. مقایسه مقادیر ویژگی‌های آماری استخراج شده از سیگنال صوت در حالت عادی و معیوب (چپ: عیب در رینگ داخلی یاتاقان، راست: عیب در رینگ خارجی یاتاقان)

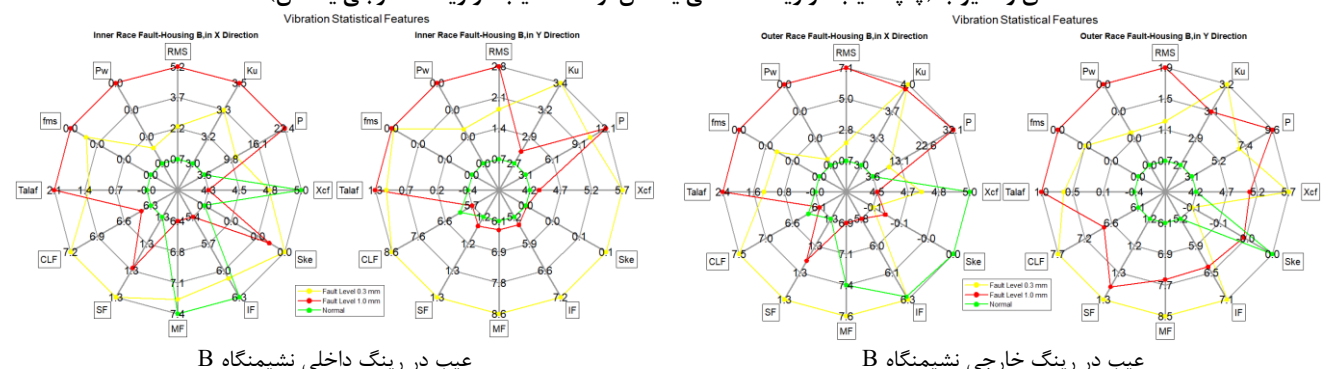
به طور مشابه در شکل (۴)، تغییرات ویژگی‌های آماری بدست آمده از سیگنال‌های ارتعاشات یاتاقان A ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که ویژگی‌های ارائه شده در نیمه بالایی نمودارها، مانند ریشه میانگین مربعات، کورتوسیس، پیک، تلف و fms نسبت به تغییرات وضعیت سلامت یاتاقان غلتشی حساس می‌باشند ولی نسبت به تغییرات شدت عیب تمایز مناسبی صورت نگرفته است؛ به گونه‌ای که مقدار ویژگی‌های نیمه پایینی مانند فاکتور ضربه و فاکتور شکل مربوط به شدت عیب $0.3/0$ میلی‌متر بیشتر از شدت عیب $1.0/0$ میلی‌متر است. رفتار مشابهی نیز در شکل (۵) مشاهده می‌شود با این تفاوت که در بعضی از ویژگی‌های آماری مانند فاکتور ضربه، حالت سالم مقدار بیشتری از حالت معیوب دارد. لازم به ذکر است که عیوب یاتاقان غلتشی تنها در یاتاقان A ایجاد شده است. از این رو نمی‌توان انتظار داشت که داده‌های ارتعاشات اندازه‌گیری شده از یاتاقان دیگر، نسبت به تغییرات ایجاد شده در یاتاقان معیوب حساسیت بیشتری داشته باشد. با این وجود، اندازه‌گیری ارتعاشات در یاتاقان B اعتبار تشخیص عیب انجام شده را تقویت می‌کند، چرا که بیشتر ویژگی‌ها به خوبی تمایز وضعیت سالم از معیوب را نشان داده‌اند و تنها نسبت دامنه آنها کمتر از دامنه ویژگی‌های یاتاقان A است.



عیب در رینگ داخلی نشیمنگاه A

عیب در رینگ خارجی نشیمنگاه A

شکل ۴. مقایسه مقادیر ویژگی‌های آماری استخراج شده از سیگنال ارتعاشات حسگر شتاب‌سنج روی نشیمنگاه یاتاقان غلتشی A در حالت عادی و معیوب (چپ: عیب در رینگ داخلی یاتاقان، راست: عیب در رینگ خارجی یاتاقان)



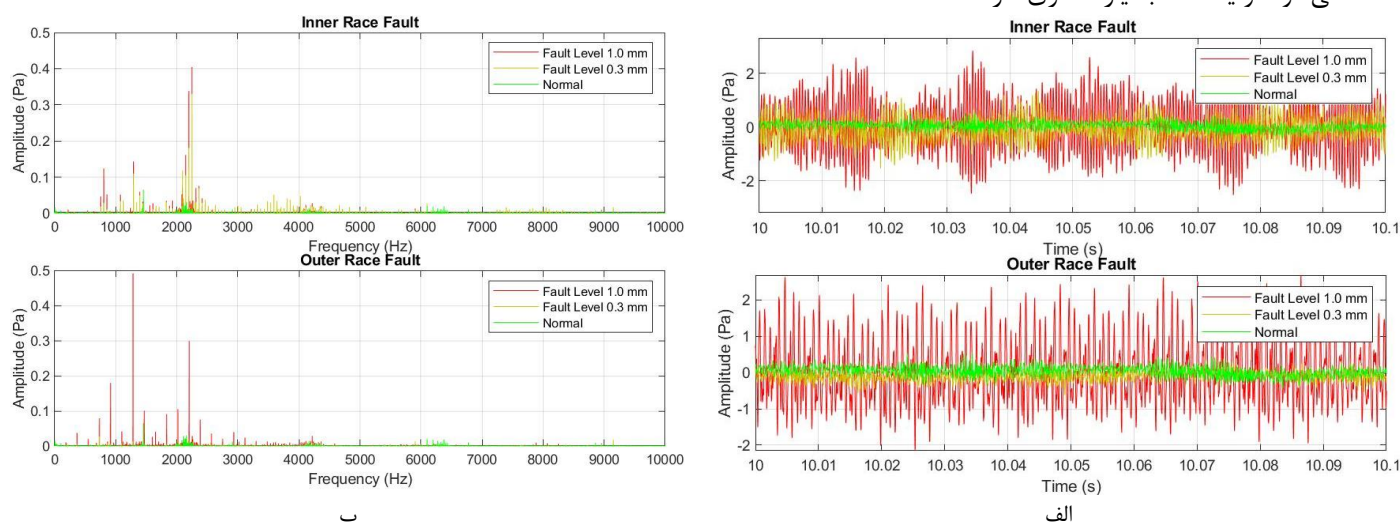
عیب در رینگ داخلی نشیمنگاه B

عیب در رینگ خارجی نشیمنگاه B

شکل ۵. مقایسه مقادیر ویژگی‌های آماری استخراج شده از سیگنال ارتعاشات حسگر شتاب‌سنج روی نشیمنگاه یاتاقان غلتشی A در حالت عادی و معیوب (چپ: عیب در رینگ داخلی یاتاقان، راست: عیب در رینگ خارجی یاتاقان)

۲-۴ مقایسه سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی در حوزه زمان و حوزه فرکانس

در ادامه تحلیل سیگنال‌های صوتی مربوط به حالت‌های سالم و معیوب یاتاقان غلتشی ارائه می‌شود. در شکل (۶)، سیگنال صوتی در حوزه‌ی زمان و فرکانس برای دو وضعیت سالم و معیوب نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت سالم، دامنه‌ی نوسانات نسبتاً یکنواخت می‌باشد، در حالی که در حالت معیوب، مقدار دامنه ارتعاشات حدود ۳ تا ۴ برابر نسبت به دامنه سیگنال سالم افزایش یافته است. همچنین الگوی سیگنال صوتی در دو حالت عیب رینگ خارجی و داخلی یاتاقان نیز متفاوت می‌باشد. مطابق انتظار، در حوزه‌ی فرکانس، دامنه فرکانس‌های مختلف خصوصاً در محدوده ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز بسیار پایین‌تر از حالت معیوب می‌باشد. از طرفی می‌توان به تفاوت الگوی ظاهر شده در طیف فرکانسی عیب رینگ داخلی و خارجی یاتاقان نیز توجه نمود. در عیب رینگ داخلی، باندهای کناری در فرکانس‌های مشخصه عیب قابل مشاهده است که این باندهای کناری در عیب رینگ خارجی مشاهده نمی‌شوند و یا دامنه بسیار کمتری دارند.



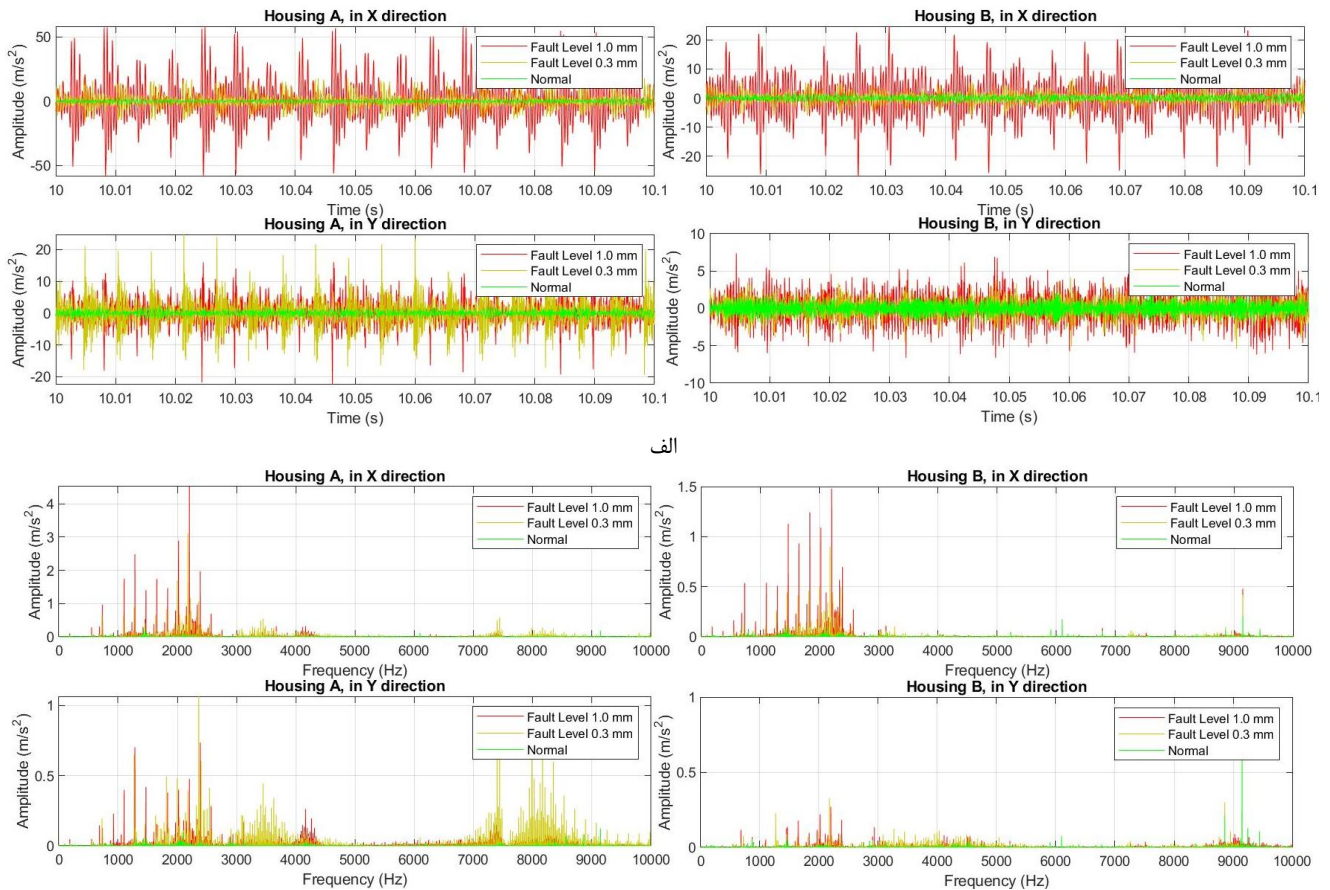
شکل ۶. سیگنال زمانی (الف) و طیف فرکانسی (ب) صوت برای وضعیت سلامت مختلف (بالا: عیب رینگ داخلی، پایین: عیب رینگ خارجی)

سیگنال زمانی و طیف فرکانسی ارتعاشات اندازه‌گیری شده در حالت سالم (سبز) و عیب رینگ خارجی (زرد و قرمز) در یاتاقان‌های A و B در شکل (۷) ارائه شده است. همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، دامنه ارتعاشات در یاتاقان A از یاتاقان B بیشتر بوده و به طور واضح، تفاوت سطح ارتعاشات در وضعیت سالم و معیوب قابل تشخیص است. در طیف فرکانسی نیز که در محدوده صفر تا ۱۰ کیلوهرتز ارائه شده است، دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های بالا (۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز و ۷۰۰۰ تا ۹۰۰۰ هرتز) به صورت باند پهن قابل مشاهده است. باند پهن در طیف فرکانسی به دلیل ماهیت ضربه‌ای بودن عیوب یاتاقان با رخداد فرکانسی بالا است که انرژی ارتعاشی را در یک محدوده وسیع از فرکانس‌ها پخش می‌کند. برای تحلیل دقیق‌تر عیوب یاتاقان‌های غلتشی، معمولاً از روش تحلیل پوش^۱ یا تحلیل فرکانسی با رزولوشن بالا استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که به خاطر محدودیت در صفحات مقاله، سیگنال زمانی و طیف فرکانسی ارتعاشات عیب رینگ داخلی یاتاقان ارائه نشده است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، عملکرد سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی در تشخیص عیوب یاتاقان غلتشی در یک مجموعه داده آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ویژگی‌های آماری بدست آمده از هر دو سیگنال، توانایی تفکیک وضعیت‌های سالم و معیوب را دارند. سیگنال ارتعاشی، به دلیل تماس مستقیم حسگر با بدنه، نسبت به تغییر رفتار ناشی از عیب در یاتاقان حساس‌تر بوده و دقت بیشتری دارد. از طرفی، سیگنال صوتی با وجود غیرتماسی بودن، نسبت به تغییرات وضعیت سلامت به خوبی واکنش نشان داده است و ویژگی‌های آماری بدست آمده از آن در وضعیت‌های معیوب مقادیر بیشتری نسبت به وضعیت سالم داشته‌اند. در مجموع، نتایج این مقایسه بیانگر آن است که سیگنال صوتی می‌تواند به عنوان ابزاری مکمل و قابل اعتماد در کنار داده‌های ارتعاشی برای ارزیابی وضعیت سلامت یاتاقان‌های غلتشی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در صورت در دسترس نبودن امکان اندازه‌گیری ارتعاشات، اندازه‌گیری صدا به عنوان یک ابزار کارآمد می‌تواند تا حد مناسبی برای تشخیص وضعیت سلامت به کار رود.

¹ Envelope Analysis



شکل ۷. سیگنال زمانی (الف) و طیف فرکانسی (ب) ارتعاشات در وضعیت سلامت مختلف، روی باتاقان A (چپ) و باتاقان B (راست) در جهات X (بالا) و Y (پایین)

مراجع

1. Saimurugan, M., and K. I. Ramachandran. "A comparative study of sound and vibration signals in detection of rotating machine faults using support vector machine and independent component analysis." *International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies* 6.2 (2014): 188-204.
2. Strantzalis, Konstantinos, et al. "Operational state recognition of a DC motor using edge artificial intelligence." *Sensors* 22.24 (2022): 9658.
3. Mia, Mozammel, et al. "Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning." *Measurement* 129 (2018): 156-166.
4. Pacheco-Chérrez, Josué, et al. "Bearing fault detection with vibration and acoustic signals: Comparison among different machine learning classification methods." *Engineering Failure Analysis* 139 (2022): 106515.
5. Shi, Huaitao, et al. "A two-stage sound-vibration signal fusion method for weak fault detection in rolling bearing systems." *Mechanical Systems and Signal Processing* 172 (2022): 109012.
6. Shubita, Rashad R., Ahmad S. Alsadeh, and Ismail M. Khater. "Fault detection in rotating machinery based on sound signal using edge machine learning." *IEEE Access* 11 (2023): 6665-6672.
7. Wang, Tianhao, et al. "Fault Detection of Wheelset Bearings through Vibration-Sound Fusion Data Based on Grey Wolf Optimizer and Support Vector Machine." *Technologies* 12.9 (2024): 144.
8. Ahmed, Hosameldin, and Asoke K. Nandi. *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. John Wiley & Sons, 2020.
9. Jung, Wonho, et al. "Vibration, acoustic, temperature, and motor current dataset of rotating machine under varying operating conditions for fault diagnosis." *Data in brief* 48 (2023): 109049.