



تشخیص و طبقه‌بندی عیوب جعبه‌دنده با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان مبتنی بر تحلیل

تبدیل فوری سیگنال‌های صوتی

شیمایات^۱، محمد رضا ملکی^۲، کاوه ملازاده^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، shimabayat681@gmail.com

^۲استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، mrmaleki@uok.ac.ir

^۳استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، k.mollazade@uok.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های مهم برای به حداقل رساندن هزینه تعمیرات و نگهداری ادوات دوار، پایش وضعیت آن‌ها با استفاده از تحلیل صدا می‌باشد. در پژوهش حاضر تشخیص عیوب و پایش وضعیت جعبه‌دنده به کمک تحلیل صدا انجام شد. برای این کار سامانه‌ای شامل یک الکتروموتور به منظور تامین دوره‌های مختلف برای جعبه‌دنده متصل به آن طراحی و ساخته شد. ابتدا سامانه ساخته شده تحت شرایط متفاوت دور راه‌اندازی و بوسیله یک میکروفن سیگنال صدای حاصل از چرخ‌دنده‌های سالم در رایانه ذخیره گردید. سپس عیوب محتمل جعبه‌دنده به ترتیب روی جعبه‌دنده اعمال شد و سیگنال صدای حاصل از چرخ‌دنده جمع‌آوری و مجدداً در رایانه ذخیره گردید. خرابی‌های مورد بررسی شامل چرخ‌دنده با سائیدگی یک دندانه، چرخ‌دنده با شکستگی یک دندانه و نیز چرخ‌دنده با سائیدگی یک دندانه و شکستگی در دندانه دیگر بود. سیگنال‌های صوتی در دوره‌های موتور ۷۵۰، ۹۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که صحت طبقه‌بندی در ۷۵۰ دور در دقیقه بیش از ۹۰٪، در ۹۵۰ و ۱۲۰۰ دور در دقیقه صحت طبقه‌بندی بیش از ۹۸٪ و در ۱۸۰۰ دور در دقیقه صحت طبقه‌بندی بیش از ۹۵٪ بدست آمد. بررسی طیف فرکانسی سیگنال صوتی حاصل از چرخ‌دنده و همچنین نتایج حاصل بیانگر توانمندی این روش در پایش وضعیت جعبه‌دنده با صحت بالا در کوتاه‌ترین زمان می‌باشد.

کلمات کلیدی: تحلیل سیگنال، پایش وضعیت، سیگنال صوتی

Gearbox Fault Diagnosis and Classification using Support Vector Machines based on Fourier Transform Analysis of Acoustic Signals

Shima Bayat¹, Mohammad Reza Maleki², Kaveh Mollazade³

¹MSc graduated student in Mechanical Engineering of Biosystems, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, shimabayat681@gmail.com

²Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, mrmaleki@uok.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, k.mollazade@uok.ac.ir

Abstract

One of the most important ways to minimize the repair and maintenance cost of rotary equipment is to monitor their conditions using sound analysis. In the present study, defect detection and monitoring of gearbox conditions were carried out using the sound analysis. The sound signals emitted from both healthy and defected gears were collected by means of a microphone and later stored in a computer. Three malfunctions were considered including; a gear with a single wear tooth, a gear with a crack and a gear with both a single wear tooth and a crack in the other tooth. The potential defects were applied to the gearbox in a sequence and their sound signals were tested at rotational speeds of 750, 950, 1200, and 1800 rpm. Results showed that the classification accuracy was 90% at 750 rpm, 98% at both 950 and 1200 rpm, and 95% at 1800 rpm. The examination of spectrum frequency of the acoustic signals emitted from gears indicated the capability of this method in condition monitoring of the gearbox with a high accuracy and in a minimum time.

Keywords: Signal analysis, Condition monitoring, Sound signal



تکنیک‌های صوت‌شناسی یا آکوستیک یکی از شاخه‌های علم فیزیک است و موضوع آن بررسی موج‌های مکانیکی از جمله صوت، فراصوت و فرسایندگی در مایعات، جامدات و گازها می‌باشد. کاربردهای آکوستیک در بسیاری از جنبه‌های زندگی امروز دیده می‌شوند و ساده‌ترین نمونه آن صنایع صوتی و نیز کنترل نویز (مکانیکی) است. وقتی که به یک جسم جامد ضربه وارد می‌شود، تولید صدا می‌کند. این صدا بسته به جنس ماده تشکیل دهنده و ابعاد فیزیکی آن امواج مختلفی ایجاد خواهد کرد و نیز اگر ترک و یا شکستگی در این جسم وجود داشته باشد، فرکانس صدا متفاوت خواهد بود. بنابراین گاهی می‌توان مدت‌ها قبل از وقوع خرابی آن را پیش‌بینی کرد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در کاربرد تجهیزات صنعتی همواره مدنظر است، امکان بررسی صحت کار وسیله تولید شده می‌باشد. امروزه کنترل کیفیت به عنوان بخش لاینفک صنعت امروزی، یکی از مهم‌ترین کانون‌های مورد بررسی می‌باشد (Kong and Chen, 2004). پایش وضعیت مدت‌هاست که به عنوان روشی کارآمد و کم هزینه برای کنترل کیفی وسایل و ابزار تولید شده و نیز تعمیرات و نگهداری مورد توجه قرار گرفته است (Ahmadi and Mollazade, 2009). تخمین دقیق وضعیت دستگاه موجب کاهش دفعات از کار افتادگی دستگاه و کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و همچنین افزایش کیفیت محصول تولیدی می‌گردد. بنابراین در مدیریت صنایع می‌تواند به صورت بهینه از نیروی کار و تجهیزات استفاده کند (Zhan and Mechefske, 2007). در بسیاری از سامانه‌های جدید، هزینه تمام شده در اجزای معیوب بسیار زیاد بوده و باعث خسارات بعدی، کاهش کارایی سیستم و ضررهای جانی و اقتصادی می‌شود. تجهیزات دوار و جعبه‌دنده‌ها به طور گسترده‌ای در صنایع و کارخانه‌ها مانند وسایل نقلیه و ماشین ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرند. جعبه‌دنده به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل برای انتقال قدرت در ماشین‌های صنعتی به شمار می‌رود. نقش چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها در سالم بودن جعبه‌دنده و به تبع آن ماشین، واضح است. جعبه‌دنده‌ها به طور کلی از سه جزء اصلی تشکیل می‌شوند: چرخ‌دنده، بلبرینگ و شفت. حدود ۶۰ درصد از عیوب جعبه‌دنده در چرخ‌دنده‌ها اتفاق می‌افتد (Wuxing et al., 2004). بنابراین استفاده از امواج صوتی برای پایش این اجزاء به روشی متداول در صنعت تبدیل شده است (Zhan et al., 2006; Zhu et al., 2005). تغییرات صدای ناشی از عیوب احتمالی در ماشین‌های دوار توسط عده‌ای از محققین گزارش شده است. از ویژگی‌های سیگنال‌های صوت این است که در صورت بروز اختلال در عملکرد ماشین، ویژگی‌هایی تغییر می‌کند. بنابراین سیگنال‌های صوتی می‌توانند به طور موثر صحت کارایی یک ماشین و یا قسمتی از آن را توصیف کنند (Wu and Meng, 2006). سامانه‌های پایش وضعیت در حالت کلی دارای سه بخش کسب داده، پردازش و استخراج ویژگی‌ها از سیگنال و در نهایت تشخیص عیب می‌باشند. کسب داده یعنی دریافت سیگنال‌های ناشی از صوت با ابزار و وسایل متداول که شامل میکروفون‌های دقیق و وسایل عایق صدا می‌باشد. پردازش سیگنال به معنی تبدیلی مطلوب از سیگنال اولیه جهت استخراج ویژگی‌های مناسب از آن. پردازش سیگنال و بخش استخراج ویژگی، از مهم‌ترین بخش‌ها در روند پایش وضعیت می‌باشند که بر اساس آن ویژگی سیستم، اعم از سالم یا معیوب بودن و نوع آن مشخص می‌گردد. هدف اصلی روش‌های استخراج ویژگی، ارائه تبدیل، روش یا ترتیبی است که مؤلفه‌های عیب پنهان شده در یک سیگنال را نمایان سازد. با توجه به این که در سیگنال‌ها، دو ویژگی مهم فرکانس و زمان حائز اهمیت است؛ امروزه روش‌های بسیار زیادی جهت پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد (He et al., 2007). دلیل استفاده از تحلیل صوتی به جای تحلیل ارتعاشی، ارزان بودن تجهیزات صوتی در مقایسه با مبدل سیگنال‌های ارتعاشی (شتاب‌سنج‌ها) است و نیز استفاده از عیب‌یابی به کمک تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی در صنایع کوچک مقرون به صرفه نیست. همچنین در تحقیقی که بر روی یک جعبه‌دنده هلیکال انجام گرفت، نتایج نشان داد که آنالیز صدا قادر است عیوب یاتاقان‌ها را زودتر از آنالیز ارتعاشات و قبل از ظاهر شدن آثار قابل اندازه‌گیری با پراب شتاب سنج مشخص کنند (Takeo and Fujiwara, 1982). در مطالعه‌ای سه نوع پیشرفت عیب‌های موضعی بر روی یک چرخ‌دنده از گیربکس هلیکال دو مرحله‌ای، شامل دندانه شکسته، تراک دنده و فرسایش موضعی، شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که سیگنال‌های صوتی برای تشخیص زود هنگام عیب موثرترند و می‌توانند یک ابزار قدرتمند برای نشان دادن انواع مختلفی از عیب‌های در حال پیشرفت در گیربکس باشند (Baydar and Ball, 2001). در بررسی دیگر، تماس سایشی بین دو چرخ‌دنده در یک جعبه‌دنده به عنوان یک منبع قابل توجهی از سیگنال‌های صوتی بیان گردیده است. به طور کلی پذیرفته شده است که افزایش تنش درگیری باعث تولید دامنه بزرگتری از سیگنال‌های صوتی می‌شود (Tan and Mba, 2005).

هدف از این پژوهش، بررسی امواج صدای حاصل از جعبه‌دنده در شرایط خرابی و سلامت چرخ‌دنده و همچنین تحلیل داده‌ها و به دست آوردن ویژگی‌های مناسب جهت تشخیص عیوب مختلف جعبه‌دنده به منظور بکارگیری نتایج آن جهت پایش وضعیت جعبه‌دنده-های به کار رفته در ماشین‌های کشاورزی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای ساخت سامانه آزمایشگاهی داده برداری صدای جعبه‌دنده، از کوپلینگ یک الکتروموتور به یک جعبه‌دنده MTFRD105 استفاده شد. در (شکل ۱) تصویر شماتیک از سامانه پایش وضعیت جعبه‌دنده نشان داده شده است.

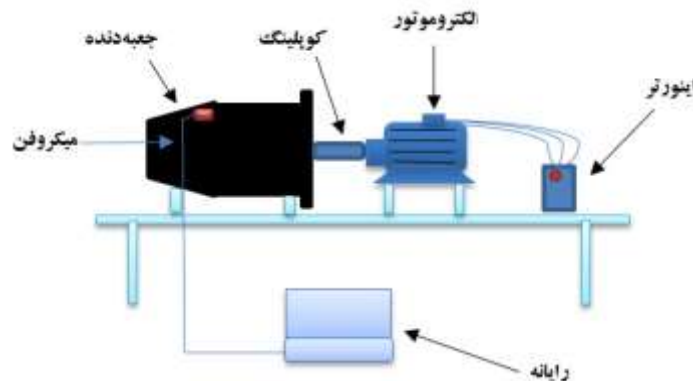


Figure 1. Schematic illustration of the gearbox monitoring system

شکل ۱- تصویر شماتیک از سامانه پایش وضعیت جعبه‌دنده

برای ایجاد دور در جعبه‌دنده از یک الکتروموتور سه فاز مدل Y-802-4 ساخت شرکت ASYNCHRONOUS MOTOR که مجهز به یک اینورتر به منظور ایجاد تغییر دورهای مختلف می‌باشد، استفاده گردید. برای انجام آزمایش از اینورتر LSis مدل SV008Ic5-1 استفاده گردید. این اینورتر تک فاز تا توان مصرفی ۰/۴ - ۲/۲ کیلو وات را پوشش می‌دهد. ویژگی این اینورتر شامل فرکانس خروجی از ۰/۱ هرتز تا ۴۰۰ هرتز، ورودی آنالوگ صفر تا ۱۰ ولت DC، امکان تقویت گشتاور در دورهای پایین به صورت دستی و اتوماتیک، پشتیبانی از عملکرد تغییر فرکانس به صورت پیوسته فقط با دو فرمان دیجیتال و پشتیبانی از عملکرد راه‌اندازی و توقف با استفاده از سیگنال‌های لحظه‌ای می‌باشد. کوپلینگ مورد استفاده برای اتصال بین خروجی الکتروموتور و ورودی جعبه‌دنده از نوع کوپلینگ صلب دارای طول شفت ۱۴۵ میلی متر و قطر بیرونی آن ۳۵ میلی متر است. شایان ذکر است که به علت حساسیت عملکرد کوپلینگ می‌بایست قبل از انجام هر بار داده برداری به این نکته دقت کرد که شفت خروجی الکتروموتور با شفت ورودی جعبه‌دنده در تراز کامل باشد. در غیر این صورت باعث لغزش و ایجاد سر و صدا می‌شود و داده برداری را با اختلال رو به رو می‌کند.

دنده مستقیم ساده‌ترین نوع دنده است. این دنده شامل یک چرخ و تعدادی دنده در محیط چرخ است. برای بررسی عیوب احتمالی چرخ‌دنده می‌توان هر کدام از دنده‌ها را در نظر گرفت. چرخ‌دنده‌ای که برای آزمایش در نظر گرفته شد، سنگین‌ترین دنده، که دنده یک جعبه‌دنده می‌باشد، بود. خرابی‌هایی که در این تحقیق بررسی شدند از نوع شکستگی یک دندانه، سایش یک دندانه و شکستگی یک دندانه و سایش دندانه دیگر می‌باشند. به منظور ایجاد سائیدگی به میزان ۳۰ درصد از یکی از دندانه‌ها به صورت مصنوعی و با استفاده از سنگ برش برداشته شد. همچنین برای ایجاد شکستگی، ۱۰۰ درصد از یک دندانه چرخ‌دنده با سنگ برش برداشته شد. برای ایجاد سائیدگی به همراه شکستگی دندانه، توسط سنگ برش ۳۰ درصد از دندانه هم جوار دندانه‌ای که ۱۰۰ درصد از آن برداشته شده بود، تراش داده شد (شکل ۲).



Figure 2. Generated defects in the gears

شکل ۲- عیوب ایجاد شده در چرخ‌دنده‌ها

میکروفن به عنوان حسگر صدا یکی از مهمترین بخش‌های سامانه‌ی ضبط صدا به شمار می‌رود. در تحقیق حاضر از میکروفن کندانسور مدل EM-۴۰۰ ساخت شرکت yoga تایوان با پاسخ فرکانسی ۱۰۰ هرتز تا ۱۶ کیلو هرتز و حساسیت $3 \text{ dB} \pm 72 \text{ dB}$ - استفاده شده است. با توجه به مشخصات میکروفن و ساختمان بدنه‌ی جعبه‌دنده، جایگاه میکروفن در فاصله ۱ سانتی‌متری از سوراخی که در بدنه‌ی جعبه‌دنده در کنار شافت خروجی وجود دارد، در نظر گرفته شد. مزیت این محل این است که علاوه بر اینکه شدت صدا توسط بدنه کمتر گرفته می‌شود و صدای شفاف‌تری به دست می‌آید، نیازی به باز کردن درپوش جعبه‌دنده برای قراردادن آن نیست. پس از قرار دادن میکروفن در محل موردنظر، فضای خالی و باز توسط فوم برای جلوگیری از دریافت هرگونه صدای اضافی پوشیده شد. سیگنال آنالوگ ارسالی توسط میکروفن بلافاصله (همزمان به روش سخت‌افزاری) توسط تراشه مبدل آنالوگ به دیجیتال تبدیل به کدهای صفر و یک می‌شود. برای جمع‌آوری داده‌های صوتی، ابتدا مکان‌های مختلف جهت قرارگیری میکروفن مورد بررسی قرار گرفت. سپس یکی از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده برای اعمال خرابی عمدی روی آن در نظر گرفته شد. این چرخ‌دنده از این جهت در نظر گرفته شد که تعمیرکاران عمدتاً برای این نوع جعبه‌دنده، احتمال خرابی آن را بیشتر می‌دانند. قبل از اعمال هرگونه خرابی، سیگنال‌های صوتی ناشی از جعبه‌دنده در دوره‌های مختلف الکتروموتور، که توسط اینورتر ایجاد شد، جمع‌آوری گردید. صدا برداری در تکرارهای مختلف و در زمان‌های متفاوت صورت گرفت تا تأثیر عوامل محیطی و نیز شرایط کاری یکسان برای تمامی حالت‌ها اعمال شده باشد. به منظور جمع‌آوری داده‌های صوتی، جعبه دنده بر روی بستر تست نصب شده و توسط الکتروموتور سه فاز در سرعت‌های ۷۵۰، ۹۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به چرخش درآمد. این محدوده دور از این جهت انتخاب شد که جعبه‌دنده تقریباً در این محدود سرعت کار می‌کند. محدوده سرعت مورد استفاده باید در محدود دور کاری مورد نظر یعنی حدود ۲ تا ۶ هزار دور در دقیقه در نظر گرفته شود، اما برای کنترل کیفی جعبه‌دنده که با توجه به نحوه‌ی قرارگیری آن بر روی شاسی است و همچنین برای جلوگیری از لرزش‌های احتمالی جعبه‌دنده، این محدوده سرعت کفایت خواهد کرد. در شکل (۳) تصویر کامل سامانه اخذ داده آکوستیکی نشان داده شده است.



Figure 3. The components of the monitoring system, 1- Desk 2- Gearbox 3- Electromotor 4- Inverter 5- Shaft

شکل ۳- اجزای سامانه پایش وضعیت: (۱) میز کار (۲) جعبه‌دنده (۳) الکتروموتور (۴) اینورتر (۵) شفت اتصال بین جعبه‌دنده و الکتروموتور



برای مقایسه داده‌ها در شرایط جعبه‌دنده قبل از خرابی داده‌های صوتی ثبت شده برای دستگاه در شرایط جعبه‌دنده سالم به عنوان اطلاعات پایه در نظر گرفته شدند و داده‌های سایر شرایط نسبت به آنها سنجیده شدند. تفاوت داده‌های به‌دست آمده در شرایط مختلف اندازه‌گیری با شرایط پایه نشان‌دهنده وجود مشکلی در کارکرد دستگاه می‌باشد. در اینجا چون عیوب عمدی ایجاد شده‌اند، با بررسی طیف فرکانسی شرایط معیوب و مقایسه آن با شرایط پایه می‌توان به نمونه طیف ثابتی برای یک عیب دست یافت. به این ترتیب اگر دستگاه در یک مجموعه پیچیده کار کند و پایش وضعیت صوتی روی آن انجام شود، در صورت مشاهده طیف فرکانسی مشابه آنچه در این پژوهش به‌دست آمده است، می‌توان به عیب دستگاه پی برد. در ادامه کار برای بالا بردن سرعت تشخیص عیوب می‌بایست تشخیص هوشمند و یا به اصطلاح طبقه‌بندی هوشمند عیوب نیز انجام می‌گرفت. برای این کار ویژگی‌های آماری میانگین، بیشینه دامنه سیگنال، انحراف معیار، کرسر فاکتور، درجه کشیدگی، چولگی، انرژی سیگنال و آنتروپی از طیف تبدیل فوریه استخراج گردید و به عنوان ورودی به مدل طبقه‌بند ماشین‌های بردار پشتیبان در نرم‌افزار WEKA داده شد. برای مدل سازی مطلوب ۷۰ درصد داده‌ها به طور تصادفی برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد مابقی برای آزمون مدل استفاده گردید که شامل ۵۰ تکرار برای مرحله آموزش و ۲۵ تکرار برای مرحله آزمون می‌باشد. در نهایت برای ارزیابی طبقه‌بندی از معیار صحت کل طبقه‌بندی استفاده گردید.

نتایج و بحث

در برنامه MATLAB سیگنال‌های زمانی بوسیله تبدیل فوریه سریع (FFT) به حوزه فرکانس برده شده شد. در نمودار FFT محور xها فرکانس‌های غالب و محور yها مقادیر اسپکتروم سیگنال‌ها هستند. معمولاً هر فرکانسی که مقادیر اسپکتروم آن دارای قله (پیک) بود را یک فرکانس غالب در نظر می‌گیرند. بنابراین در نمودارهای بدست آمده از تبدیل فوریه سریع، عیب سائیدگی بر روی چرخ‌دنده از افزایش طیف فرکانسی در فرکانس‌های غالب مشخص گردید که فرکانس درگیری و همچنین باندهای جانبی در این نمودارها از سیگنال‌های محتوی اطلاعات خرابی کاملاً متمایز بود. با توجه به نتایج، افزایش دامنه فرکانسی نسبت به حالت سالم و سائیده کاملاً مشهود است. افزایش دامنه فرکانسی به دلیل ایجاد صدای بیشتر دندانه معیوب به هنگام برخورد با دنده مقابل خود است که با افزایش دور، شدت صدای برخورد در هر دور افزایش خواهد داشت. بدیهی است که افزایش دامنه فرکانسی به دلیل افزایش دور جعبه‌دنده ناشی از شدت بیشتر برخورد دندانه معیوب با دندانه‌های مقابل خود می‌باشد. در اینجا می‌توان اظهار نمود که در دور پایین هیچ خرابی در جعبه‌دنده مشاهده نشود، با افزایش دور جعبه‌دنده احتمال یافتن عیوب دنده‌ها افزایش خواهد یافت. شکل ۴ نمایش اختلاف دامنه فرکانسی در چهار دور برای عیب سائیدگی را نشان می‌دهد. افزایش در طیف دامنه فرکانسی بعد از اعمال عیب سائیدگی دندانه مشاهده گردید و با در نظر گرفتن بالاترین قله در طیف فرکانسی ایجاد شده، برای ۷۵۰ دور بر دقیقه از ۰/۰۳۳ به ۰/۰۶۹ و برای ۹۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب از ۰/۰۲۸ به ۰/۱۷، از ۰/۰۷۴ به ۰/۳۲ و از ۰/۰۶۸ به ۰/۵۸ بدست آمد.

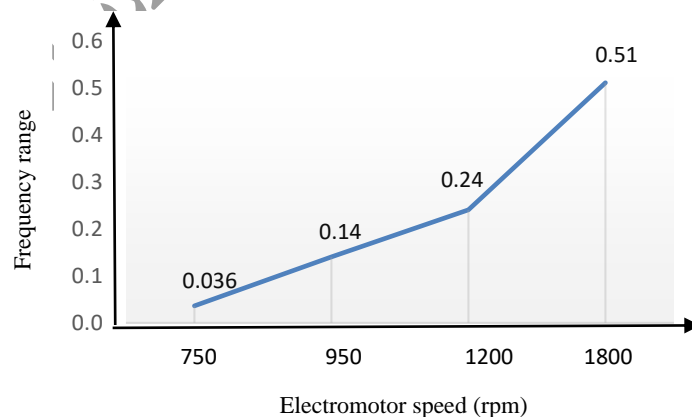


Figure 4. The frequency domain difference for wear in a tooth in four electromotor speeds

شکل ۴- نمایش اختلاف دامنه فرکانسی در چهار دور الکتروموتور برای عیب سائیدگی در یک دندانه.

در حالی که افزایش دامنه فرکانسی دنده سائیده در مقایسه با حالت دنده سالم مشاهده شد، افزایش دامنه فرکانسی در حالت دنده شکسته کاملاً بارزتر و حتی از حالت سائیده نیز بیشتر بود (شکل ۵). نتایج بدست آمده از اطلاعات حوزه فرکانسی به وضوح اختلاف دامنه فرکانسی نسبت به حالت سالم چرخ دنده و پس از ایجاد عیب بر روی آن را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن بالاترین قله حوزه فرکانسی در حالت دنده سالم به حالت شکسته به ترتیب در سرعت‌های ۷۵۰، ۹۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مقدار دامنه فرکانسی از ۰/۳۳ به ۰/۱۱، از ۰/۲۸ به ۰/۲۵، از ۰/۷۴ به ۰/۳۶ و از ۰/۶۸ به ۰/۳۵۴ افزایش می‌یابد.

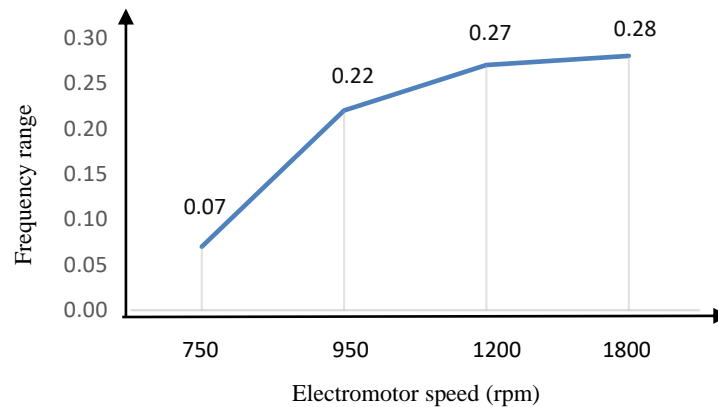


Figure 5. The frequency domain difference for crack in a tooth in four electromotor speeds
شکل ۵- اختلاف دامنه فرکانسی در حوزه فرکانس برای چهار دور الکتروموتور و برای عیب شکستگی در یک دندانه.

شکل ۶ نمایش اختلاف دامنه فرکانسی در چهار دور الکتروموتور برای چرخ دنده‌ای که ۳۰ درصد از یک دندانه و ۱۰۰ درصد از دندانه دیگر این چرخ دنده تراش خورده بود، که به عنوان دندانه سائیده همراه با دندانه شکسته در نظر گرفته شد، را نشان می‌دهد. بر اساس افزایش دامنه فرکانسی در بالاترین قله در چهار دور ۷۵۰، ۹۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مقدار دامنه فرکانسی به ترتیب از ۰/۳۳ به ۰/۲۵، از ۰/۲۸ به ۰/۳۳، از ۰/۷۴ به ۰/۴۳ و از ۰/۶۸ به ۰/۵۷ افزایش می‌یابد.

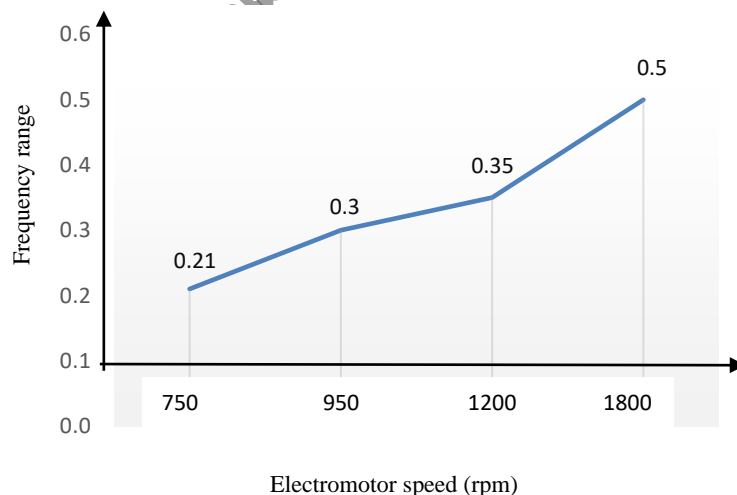


Figure 6. Displays the frequency domain difference for wear and crack in two tooth in four electromotor speeds

شکل ۶- نمایش اختلاف دامنه فرکانسی برای چهار دور الکتروموتور و برای عیب سائیدگی و شکستگی دو دندانه.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک

بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



از مقایسه داده‌های بدست آمده در شرایط معیوب و سالم و مقایسه طیف فرکانسی سیگنال‌های به‌دست آمده از آن‌ها می‌توان تشخیص داد که در اثر معیوب شدن چرخ‌دنده‌ها، تغییراتی در طیف فرکانسی مشاهده می‌شود یا خیر. این تغییرات به صورت افزایش دامنه فرکانسی در هر نوبت از آزمایش مشاهده گردید و نشان داد که طیف دامنه فرکانسی سائیده بیشتر از سالم و شکسته بیش از سالم و سائیده و همچنین سائیدگی به همراه شکستگی بیش از سالم و سائیده و شکسته می‌باشد.

طبقه‌بندی هوشمند

جدول ۱ تا جدول ۵ ماتریس اغتشاش مربوط به طبقه‌بندی عیوب چرخ‌دنده را در چهار دور نشان می‌دهد. داده‌ها در دو فاز آموزش و آزمون طبقه‌بندی شد. آنچه که در جداول مشخص است، در چهار دور الکتروموتور، حالت سالم به طور کامل از سه حالت دیگر مجزا شده است. در جدول ۱ برای سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه، در هر دو مرحله آموزش و آزمون برای دو حالت سالم و سائیده-شکسته در طبقه‌بندی به طور کامل از حالت‌های دیگر چرخ‌دنده تفکیک گردیده و برای حالت شکسته در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۶ و ۵ تکرار در طبقه‌بندی حالت شکسته قرار گرفته است. همچنین برای حالت سائیده در مرحله آموزش ۲ تکرار در طبقه‌بندی حالت شکسته تشخیص داده شد. در جدول ۲ برای سرعت ۹۵۰ دور بر دقیقه در مرحله آموزش چهار حالت چرخ‌دنده به طور کامل از یکدیگر مجزا گردید و فقط در مرحله آزمون برای حالت شکسته ۱ تکرار در طبقه‌بندی حالت سائیده قرار گرفت. در جدول ۳ برای سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه در هر دو مرحله آموزش و آزمون سه حالت به طور کامل مجزا گردیده است به جز برای حالت سائیده-شکسته که ۱ تکرار در مرحله آموزش و ۲ تکرار در مرحله آزمون در طبقه‌بندی حالت شکسته قرار گرفته است. در جدول ۴ برای سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه، برای حالت سائیده ۱ تکرار در مرحله آموزش و ۱ تکرار در مرحله آزمون در طبقه‌بندی حالت شکسته قرار گرفته است و برای حالت شکسته نیز ۴ تکرار در مرحله آموزش و ۴ تکرار در مرحله آزمون در طبقه‌بندی حالت سائیده قرار گرفت. همچنین برای حالت شکسته فقط ۱ تکرار در مرحله آموزش در طبقه‌بندی حالت سائیده قرار گرفته است. صحت مربوط به طبقه‌بندی مراحل آموزش و آزمون نیز در هر بار بارگذاری استخراج گردید (جدول ۵). نتایج بیانگر توانایی روش استفاده شده در این پژوهش در طبقه‌بندی عیوب جعبه دنده با صحت بیش از ۹۰٪ در هر گروه می‌باشد.

جدول ۱- ماتریس اغتشاش مربوط به طبقه‌بندی عیوب چرخ‌دنده در ۷۵۰ دور بر دقیقه

Table 1. Confusion matrix for classification of gear defects at 750 rpm

	Training stage				Test stage			
	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken
Healthy	50	0	0	0	25	0	0	0
Wear	0	48	2	0	0	25	0	0
Broken	0	6	44	0	0	5	20	0
Wear & Broken	0	0	0	50	0	0	0	25

جدول ۲- ماتریس اغتشاش مربوط به طبقه‌بندی عیوب چرخ‌دنده در ۹۵۰ دور بر دقیقه

Table 2. Confusion matrix for classification of gear defects at 950 rpm

	Training stage				Test stage			
	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken
Healthy	50	0	0	0	25	0	0	0
Wear	0	50	0	0	0	25	0	0
Broken	0	0	50	0	0	1	24	0
Wear & Broken	0	0	0	50	0	0	0	25



جدول ۳- ماتریس اغتشاش مربوط به طبقه‌بندی عیوب چرخ‌دنده در ۱۲۰۰ دور بر دقیقه

Table 3. Confusion matrix for classification of gear defects at 1200 rpm

	Training stage				Test stage			
	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken
Healthy	50	0	0	0	25	0	0	0
Wear	0	50	0	0	0	25	0	0
Broken	0	0	50	0	0	0	25	0
Wear & Broken	0	0	1	49	0	0	2	23

جدول ۴- ماتریس اغتشاش مربوط به طبقه‌بندی عیوب چرخ‌دنده در ۱۸۰۰ دور بر دقیقه

Table 4. Confusion matrix for classification of gear defects at 1800 rpm

	Training stage				Test stage			
	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken	Healthy	Wear	Broken	Wear & Broken
Healthy	50	0	0	0	25	0	0	0
Wear	0	49	1	0	0	24	1	0
Broken	0	4	46	0	0	4	21	0
Wear & Broken	0	1	0	49	0	0	0	25

جدول ۵- نتایج مربوط به طبقه‌بندی عیوب جعبه‌دنده در دورهای مختلف

Table 5. The results of the classification of gearbox defects in different speeds

Rotational speed (rpm)	Classification accuracy	
	Training stage	Test stage
	750	94
950	100	98
1200	99,5	98
1800	97	95

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از سیگنال‌های اکتسابی از امواج صدای تولید شده از جعبه‌دنده به منظور بررسی و تشخیص عیوب آن استفاده گردید. سیگنال ضبط شده در حوزه زمان و در حوزه فرکانس پردازش شده و سپس ویژگی‌های استخراج شده سیگنال جهت تشخیص عیوب مورد تحلیل قرار گرفت. روند تشخیص عیوب در حوزه فرکانس در مقدار فرکانس‌های غالب نمایان‌گر عیوب در چرخ‌دنده بود و با افزایش در دور الکتروموتور و نیز افزایش عیب در چرخ‌دنده، طیف فرکانسی و یا همان فرکانس‌های غالب نیز افزایش پیدا کرد. این افزایش در عیب سائیدگی یک دندانه همراه با شکستگی در دندانه دیگر بیش از سائیدگی دندانه و شکستگی دندانه به صورت مجزا می‌باشد. نتایج حاکی از کارایی این روش برای پایش وضعیت جعبه دنده‌ها و تشخیص قبل از خرابی کامل می‌باشد. در طبقه‌بندی هوشمند، صحت طبقه‌بندی عیوب، بیش از ۹۰٪ برای ۷۵۰ دور بر دقیقه، بیش از ۹۸٪ برای ۹۵۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و بیش از ۹۵٪ برای ۱۸۰۰ دور بر دقیقه در چهار وضعیت چرخ‌دنده بود. در نهایت می‌توان اظهار نمود که بدون اینکه جعبه‌دنده باز و مورد بررسی بصری قرار گیرد، می‌توان بوسیله سیگنال‌های صوتی جمع‌آوری شده، حداقل تا ۹۰ درصد عیوب مورد مطالعه در این پژوهش برای جعبه‌دنده را تشخیص داد.

منابع

- Ahmadi, H., & Mollazade, K. (2009). A practical approach to electromotor fault diagnosis of Imam Khomaynei silo by vibration condition monitoring. *African Journal of Agricultural Research*, 4, 383-388.
- Baydar, N., & Ball, A. (2001). A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(6), 1091-1107.
- He, Q., Kong, F., & Yan, R. (2007). Subspace-based gearbox condition monitoring by kemel principal component analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27, 1755-1772.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



- Kong, F., & Chen, R. (2004). A combined method for triplex pump fault diagnosis based on wavelet transform, fuzzy logic and neuro-networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18, 161-168.
- Takeo, Y., & Fujiwara, T. (1982). A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue. *Wear*, 81(1), 183-186.
- Tan, C. K., & Mba, D. (2005). Experimentally established correlation between AE activity, load, speed, and asperity contact of spur gears under partial elastic hydrodynamic lubrication. *Journal of Engineering Tribology*, 219(6), 401-409.
- Wu, F. Q., & Meng, G. (2006). Feature extraction based on the 3D spectrum analysis of acoustic signals to identify rotor malfunction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 1146-1151.
- Wuxing, L., TsePeter, W., Guicai, Z., & Tielin, S. (2004). Classification of gear faults using cumulates and the radial basis function network. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(2), 381-389.
- Zhan, Y., & Mechefske, C. K. (2007). Robust detection of gearbox deterioration using compromised autoregressive modeling and Kolmogorov-Smirnov test statistic-Part I: Compromised autoregressive modeling with the aid of hypothesis tests and simulation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), 1953-1982.
- Zhan, Y., Makis, V., & Jardine, A. K. (2006). Adaptive state detection of gearbox under varying load conditions based on parametric modelling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 188-22.
- Zhu, Z., Feng, Z., & Kong, F. (2005). Cyclostationarity analysis for gearbox condition monitoring: approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 467-482.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران