



ISAV2022

دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



طراحی و ساخت چیدمان آزمایشگاهی برای مطالعه ارتعاشات ناشی از عیوب گیربکس

حسام الدین ارغندا*، امیرحسین خیبری نژاد^ب، یاشار امانی^ب

^ا ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، استادیار

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

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

چکیده

گیربکس‌ها از جمله تجهیزات دوار بسیار پرکاربرد در صنایع مختلف هستند. عملکرد صحیح این تجهیزات و قابلیت اطمینان کافی برای بهره‌برداری صحیح از آنها حائز اهمیت است. پایش وضعیت ارتعاشات یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای شناخت وضعیت سلامت و تشخیص عیوب گیربکس‌ها است. در این مقاله طراحی یک گیربکس آزمایشگاهی به منظور امکان بررسی عیوب مختلف گیربکس‌ها تشریح گردیده است. طراحی این چیدمان با ملاحظات مختلف از جمله امکان ایجاد عیوب مختلف و ترکیب آنها، امکان مونتاژ و ديمونتاژ ساده برای تغییر وضعیت سلامت، امکان تغییر شرایط کاری صورت گرفته است. سپس، در مرحله بعدی اقدام به ساخت تجهیز شده است و نتایج اندازه‌گیری و تحلیل اولیه ارتعاشات گیربکس در وضعیت سالم و همچنین در دو وضعیت ساییدگی و لب‌پریدگی چرخدنده ارائه شده است. نتایج ارائه شده حاکی از تحقق هدف مورد نظر در طراحی این تجهیز آزمایشگاه بوده است.

کلمات کلیدی: پایش وضعیت ارتعاشات؛ گیربکس؛ عیوب چرخدنده؛ چیدمان آزمایشگاهی

۱- مقدمه

آنالیز ارتعاشات یکی از تکنیک‌های بسیار کارآمد تجهیزات دوار از جمله گیربکس‌هاست. سیگنال‌های ارتعاشی گیربکس‌ها اغلب بسیار پیچیده و حاوی اطلاعات متنوعی از وضعیت شفت‌ها، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌های آنهاست. عیوب متنوع گیربکس‌ها می‌توانند علائم منحصر به فردی در سیگنال ارتعاشی ایجاد کند. در کنار این موضوع، با توجه به حساسیت و اهمیت این تجهیزات در بسیاری از صنایع و نیاز به داشتن قابلیت اطمینان بالا، پایش وضعیت گیربکس‌ها برای تشخیص زودهنگام عیوب‌شان بسیار حائز اهمیت و مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در این راستا بسیاری از محققین برای مطالعه رفتار ارتعاشی عیوب گیربکس‌ها، چیدمان‌های

آزمایشگاهی را توسعه داده‌اند و تحقیقات خود را روی داده‌های بدست آمده از آنها متمرکز کرده‌اند. همچنین داده‌های خام مربوط به برخی چیدمان‌های آزمایشگاهی نیز به صورت عمومی برای استفاده محققین منتشر شده است.

یکی از داده‌های منتشر شده عمومی مربوط به آزمایشگاه قابلیت اطمینان دانشگاه آبرتا است [۱]. در این مجموعه داده، نتایج مربوط به داده‌های ثبت شده در یک آزمایش کار تا خرابی یک گیربکس دو مرحله‌ای موجود است. در این آزمایش، یک الکتروموتور با توان $2.24 kW$ توسط تسمه و پولی به یک گیربکس با سه محور کوپل شده است. توان توسط چرخ‌دنده ۱ و ۲ از شفت ورودی به شفت دوم منتقل می‌شود و سپس توسط چرخ‌دنده ۵ و ۶ از شفت ۲ به شفت ۳ انتقال می‌یابد. این گیربکس در وضعیت سالم پس از نصب شروع به کار کرده است و پس از حدود ۳۵ ساعت کار کردن (در چهار مرحله) سرانجام به خاطر خرابی چرخ‌دنده‌های ۵ و ۶ متوقف شده و آزمایش پایان یافته است. سیگنال‌های ارتعاشات افقی و قائم توسط دو سنسور با فرکانس نمونه‌برداری 5120 هرتز در این آزمایش ثبت شده و داده‌های آن منتشر گردیده است و محققین مختلفی تحقیقات خود را روی داده‌های مربوط به این گیربکس انجام داده‌اند [۲ تا ۴].

یکی دیگر از داده‌های منتشر شده عمومی مربوط به گیربکس سه محوره دیگری است که داده‌های آن در کنفرانس *PHM2009* به عنوان مسابقه عیب‌یابی انتشار یافت [۵]. در این آزمایش انواع عیوب مختلف (شامل شکستگی دندان، لب‌پریدگی دندان، خروج از مرکزیت شفت و عیوب یاتاقان) به صورت مصنوعی در گیربکس اعمال شده است و سیگنال‌های ارتعاشی آن در شرایط کاری مختلف ثبت گردیده است. ارتعاشات این گیربکس در دو سمت ورودی و خروجی با فرکانس نمونه برداری $66/7 kHz$ ثبت شده است. نکته جالب توجه در مورد این گیربکس این است که دو حالت مختلف، یکی با استفاده از چرخ‌دنده‌های ساده و دیگری با به کار بردن چرخ‌دنده‌های مارپیچی روی گیربکس سوار شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. این مجموعه داده نیز مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است و تحقیقات خود را روی این داده‌ها متمرکز کرده‌اند [۶ تا ۹].

در مقاله حاضر، توسعه یک چیدمان آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار ارتعاشی گیربکس‌ها در شرایط ایجاد عیوب مختلف مورد نظر است که بر اساس تجارب قبلی محققین و اهداف و ملاحظات مربوطه دنبال می‌گردد. پس از طراحی و ساخت این چیدمان آزمایشگاهی، سناریویی برای مقایسه وضعیت سالم و معیوب گیربکس طرح‌ریزی و انجام می‌گردد و نتایج آن ارائه خواهد شد.

۲- طراحی چیدمان آزمایشگاهی مطالعه ارتعاشات گیربکس معیوب

۱-۲ هدف طراحی چیدمان

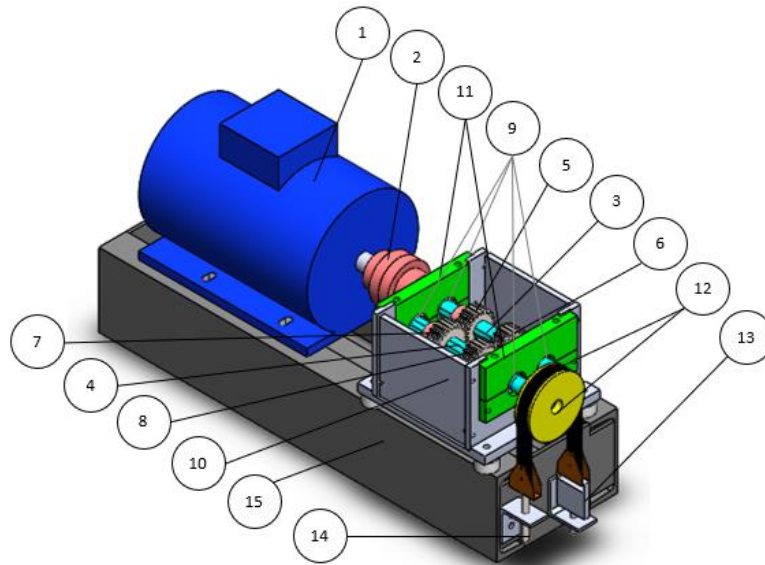
با مطالعه و بررسی چیدمان‌های آزمایشگاهی متعدد در زمینه مطالعه ارتعاشات گیربکس‌ها [۱ و ۵] طرح‌ریزی برای ساخت یک چیدمان آزمایشگاهی با قابلیت انجام آزمایش‌های مختلف در نظر گرفته شد. عیوب مورد نظر برای این منظور شامل مواردی از قبیل عیوب مختلف چرخ‌دنده‌ها (مانند لب‌پریدگی، سایش، شکستگی دندان، کندگی دندان، پوسته‌پوسته شدن سطح دندان، ترک دندان و ...)، لقی دندان‌ها، ناهمراستایی محورها، ناهمراستایی طولی چرخ‌دنده‌های درگیر، عیوب یاتاقان‌ها و ... می‌شود.

همچنین علاوه بر انجام آزمایش‌های عیب‌یابی (روی عیب‌های طبیعی یا مصنوعی ایجاد شده)، انجام آزمایش‌های کار تا خرابی^۱ و مطالعه رفتار ارتعاشاتی در حین رشد عیوب گیربکس نیز در این چیدمان مورد نظر است. در هر دو دسته مذکور امکان تغییر شرایط کاری شامل گشتاور مصرفی و سرعت کاری نیز مد نظر قرار گرفته است. سادگی امکان مونتاژ و دیمونتاژ و اعمال تغییرات مختلف شامل تغییر سناریوهای ایجاد عیب مصنوعی، تغییر اندازه و نوع چرخ‌دنده‌ها (به عنوان مثال چرخ‌دنده‌های ساده و مارپیچی) نیز از دیگر ملاحظات مهم مورد نظر در طراحی این چیدمان آزمایشگاهی است.

۲-۲ طرح‌ریزی و طراحی اولیه چیدمان آزمایشگاهی

بر اساس اهداف تعیین شده در چیدمان آزمایشگاهی مورد نظر، اجزای مورد نیاز تعیین و با در نظر گرفتن ملاحظات مورد نظر، مدل‌سازی اولیه سه بعدی در محیط نرم‌افزار سالیدورک انجام گردید. در شکل (۱) مدل مونتاژی سه‌بعدی این چیدمان نشان داده شده

است. اجزای مدل نیز در جدول (۱) معرفی شده است. لازم به توضیح است به علت حجیم بودن محاسبات مهندسی طراحی اجزاء، از بیان جزئیات در این خصوص صرف نظر می گردد و صرفاً به مشخصات اجزای انتخاب شده در جدول (۱) و توضیحاتی مختصر در خصوص ایده های اصلی و ملاحظات مهم تأمین شده در خصوص طراحی این چیدمان اکتفا می گردد.



شکل ۱. مدل سه بعدی مونتاژ شده چیدمان آزمایش عیوب گیربکس

جدول ۱. لیست اجزای چیدمان آزمایشگاهی طراحی شده و مشخصات آنها

ردیف	نام قطعه	مشخصات/توضیحات
۱	الکتروموتور محرک	الکتروموتور سه فاز با توان ۲ اسب بخار و سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه
۲	کوپلینگ پنجه ای	دارای رابط میانی لاستیکی برای جبران ناهمراستایی جزئی
۳	شفت ورودی	قطر ۲۲ میلی متر روی محل نصب چرخ دنده ها (با تثبیت توسط پیچ های مغزی)
۴	شفت خروجی	قطر ۲۰ میلی متر در محل یاتاقان ها، قطر ۱۸ میلی متر در محل پولی و کوپلینگ
۵	چرخ دنده سالم شفت ورودی	چرخ دنده با مدول ۲ و تعداد ۲۲ دندانه و عرض ۲۰ میلی متر
۶	چرخ دنده معیوب شفت ورودی	چرخ دنده با مدول ۲ و تعداد ۲۲ دندانه و عرض ۲۰ میلی متر دارای عیب مصنوعی لب پریدگی (به میزان یک سوم عرض دندانه)
۷	چرخ دنده سالم شفت خروجی	چرخ دنده با مدول ۲ و تعداد ۲۵ دندانه و عرض ۲۰ میلی متر
۸	چرخ دنده معیوب شفت خروجی	چرخ دنده با مدول ۲ و تعداد ۲۵ دندانه و عرض ۲۰ میلی متر دارای عیب مصنوعی ساییدگی سطح روی یک دندانه
۹	یاتاقان های غلتشی	یاتاقان شیار عمیق با کد ۶۸۰۴ (قطر داخلی ۲۰ میلی متر، قطر خارجی ۳۲ میلی متر)
۱۰	بدنه گیربکس	ساخته شده از چهار دیوار جانبی از ورق فولادی کم کربن ۸ میلی متر و کف از تسمه فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
۱۱	نگهدارنده یاتاقان ها	هر نگه دارنده از دو فک تشکیل شده است که امکان سهولت مونتاژ و ديمونتاژ را فراهم می کند.
۱۲	تسمه و پولی	پولی با قطر ۹۰ میلی متر جهت عملکرد ترمزی و تلف کردن توان به کار رفته است.
۱۳	نیروسنج	نیروسنج ۵۰ کیلو گرمی با دقت ۰/۱ کیلو گرم به منظور اندازه گیری نیروی کشش تسمه
۱۴	پیچ تنظیم بار	جهت تنظیم میزان کشش تسمه و به تبع آن تغییر نیروی اصطکاک و گشتاور وارد بر شفت خروجی
۱۵	شاسی	ساخته شده از پروفیل ناودانی سایز ۱۲۰ میلی متر

در چیدمان طراحی شده، امکان مونتاژ کردن دو چرخ دنده روی هر شفت در نظر گرفته شده است و در این راستا، یک چرخ دنده سالم و یک چرخ دنده معیوب روی هر شفت سوار می گردد. لازم به توضیح است که در حین انجام هر آزمایش تنها یک جفت چرخ دنده درگیر خواهند بود. اما هدف از مونتاژ دو چرخ دنده به طور هم زمان روی هر شفت این است که بدون نیاز به باز و بسته کردن گیربکس، امکان درگیر کردن حالت های مختلف چرخ دنده ها فراهم شود. چرا که معمولاً عدم قطعیت های مختلف در حین باز و بسته

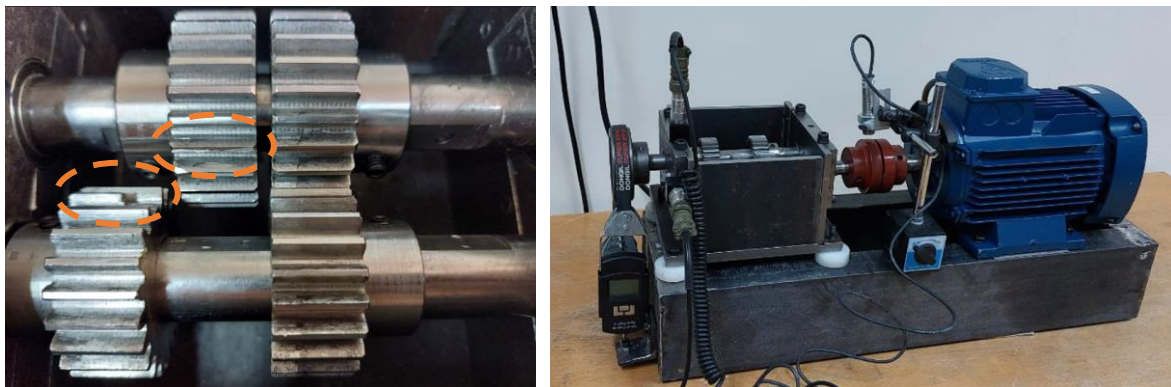
کردن مجموعه باعث تغییر سطح ارتعاش می‌گردد. یاتاقان‌های غلتشی در نظر گرفته شده در این چیدمان نیز همان یاتاقان‌های غلتشی مورد استفاده در مجموعه آزمایش‌های کار تا خرابی موسوم به پرونوستیا [۱۰] است که داده‌های مربوط به آنها به صورت آزاد در اختیار محققین است [۱۱]. از این رو، در صورت انجام آزمایش با یاتاقان غلتشی معیوب، می‌توان نتایج را با نتایج آزمایش مذکور نیز مقایسه کرد. در این چیدمان از یک پولی و تسمه به عنوان مکانیزم تلف‌کننده توان استفاده شده است. انتخاب این مکانیزم بیشتر به جهت سادگی و هزینه پایین اجرای آن بوده است. استفاده از تجهیزاتی مانند ترمز مغناطیسی یا دینامومتر برای این منظور می‌تواند جایگزین گردد. در مکانیزم مورد استفاده، از یک نیروسنج دیجیتال برای اندازه‌گیری نیروی کشش تسمه و یک پیچ تنظیم برای تغییر نیروی کشش تسمه استفاده می‌گردد که نحوه قرارگیری آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. مشکل بسیار مهم در مکانیزم مورد استفاده گرم شدن سریع آن در آزمایش‌های طولانی و در وضعیت‌های اعمال کشش زیاد روی تسمه است. با اضافه کردن یک سیستم خنک‌کاری پولی می‌توان تا حدی این مشکل را مرتفع کرد. با این حال برای انجام آزمایش‌های کار تا خرابی روی این گیربکس راهکار مناسبی برای این منظور بایستی لحاظ گردد.

۳- اندازه‌گیری ارتعاشات

برای اندازه‌گیری ارتعاشات در چیدمان آزمایشگاهی از دستگاه آنالایزر تجاری دو کاناله *Technikon* مدل *STD 3300* استفاده می‌گردد [۱۲]. دو سنسور شتاب‌سنج با ضریب حساسیت $10/2 \text{ mv/m/s}^2$ و یک تاکومتر لیزری برای اندازه‌گیری سرعت دوران شفت ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازه فرکانسی ۵ تا ۴۰۰۰ هرتز برای انجام اندازه‌گیری تنظیم می‌گردد و طول هر سیگنال اندازه‌گیری شامل ۶۳۴۸۸ نمونه در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری ارتعاشات یک سنسور در جهت قائم و سنسور دیگر در جهت افقی، در سمت شفت خروجی گیربکس نصب می‌گردد و اندازه‌گیری ارتعاشات به صورت کاملاً هم‌زمان انجام می‌گردد.

۴- انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری ارتعاشات عیوب چرخ‌دنده

پس از تکمیل مراحل ساخت چیدمان طراحی شده، مونتاژ قطعات به طور کامل انجام گردید. چیدمان نهایی در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین در این مرحله روی شفت ورودی یک چرخ‌دنده سالم و یک چرخ‌دنده با لب‌پریدگی روی یک دندانه (به میزان یک سوم عرض دندانه) مونتاژ گردیده است. روی شفت خروجی نیز یک چرخ‌دنده سالم و یک چرخ‌دنده با عیب ساییدگی جزئی روی یک دندانه سوار شده است. شکل (۲) همچنین وضعیت چرخ‌دنده‌های سوار شده روی گیربکس و عیوب آنها را نشان می‌دهد. پس از آماده کردن کامل چیدمان آزمایشگاهی، آزمایش اندازه‌گیری ارتعاشات در سرعت حدود 638 rpm شفت ورودی انجام گردید.



شکل ۲. راست: چیدمان آزمایشگاهی ساخته شده برای آزمایش ارتعاشات عیوب گیربکس، چپ: وضعیت چرخ‌دنده‌های سوار شده روی گیربکس (لب‌پریدگی روی دندانه نشان داده شده روی شفت پایین سمت چپ و ساییدگی روی دندانه نشان داده شده روی چرخ‌دنده سمت چپ شفت بالا)

این آزمایش یک بار به ازای درگیری چرخ‌دنده‌های سالم و بار دیگر به ازای درگیری چرخ‌دنده معیوب شفت ورودی و چرخ‌دنده سالم شفت خروجی انجام شده است و ارتعاشات در دو جهت افقی و قائم توسط سنسورهای شتاب‌سنج نصب شده روی صفحه

نگهدارنده یاتاقان‌ها در سمت خروجی گیربکس ثبت گردیده است. نتایج مربوط به مقایسه این سیگنال‌ها در بخش بعدی ارائه و تشریح می‌گردد.

۵- نتایج تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی

پیش از ارائه نتایج آزمایش‌های انجام شده، لازم است مشخصات دینامیکی گیربکس مورد مطالعه معرفی گردد. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل ارتعاشات گیربکس‌ها، دامنه ارتعاشات در فرکانس درگیری دندانه‌ها و همچنین دامنه ارتعاش در باندهای کناری فرکانس مذکور است. فرکانس درگیری دندانه‌ها (GMF) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$GMF = n_p N_p = n_g N_g \quad (1)$$

که در آن N_g و N_p به ترتیب تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده کوچک و چرخ‌دنده بزرگ درگیر با هم و n_g و n_p به ترتیب سرعت‌های دوران چرخ‌دنده کوچک و چرخ‌دنده بزرگ است. لازم به ذکر است که برای یک جفت چرخ‌دنده درگیر یک فرکانس درگیری دندانه وجود دارد. به طور معمول انتظار می‌رود که قله کوچکی در دامنه ارتعاش در فرکانس درگیری دندانه‌ها و ضرایب صحیح آن وجود داشته باشد. چرا که سفتی مجموعه با همین فرکانس در حال نوسان است و لذا پاسخ دینامیک مجموعه نیز با همین فرکانس تغییرات جزئی خواهد داشت. همچنین فرکانس باندهای کناری مربوط به چرخ‌دنده کوچک (SB_p) و باندهای کناری مربوط به چرخ‌دنده بزرگ (SB_g) از روابط زیر بدست می‌آید:

$$SB_p = n \times GMF \pm m \times n_p \quad (2)$$

$$SB_g = n \times GMF \pm m \times n_g \quad (3)$$

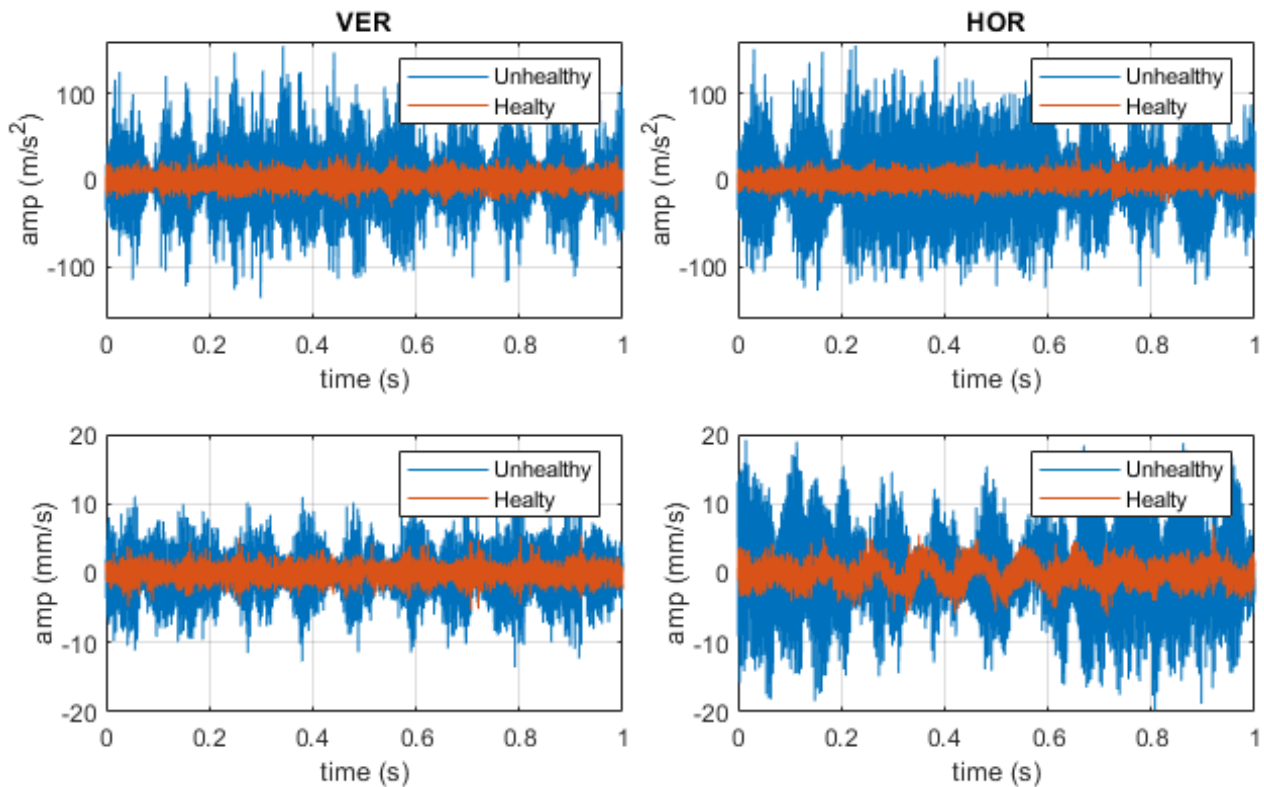
که در آن n و m اعداد صحیح مثبت هستند. به طور معمول در صورت وجود عیب در یک دندانه، انتظار می‌رود افزایش دامنه در باندهای کناری چرخ‌دنده معیوب افزایش قابل توجه یابد. در این خصوص در عمل ضرایب صحیح ۱ تا ۳ به ازای پارامترهای n و m بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. لازم است توجه گردد که باندهای کناری برای یک جفت چرخ‌دنده درگیر (در صورتی که تعداد دندانه‌هایشان یکسان نباشد) متمایز از هم است و به کمک دامنه ارتعاش در این فرکانس می‌توان تعیین کرد که عیب ایجاد شده مربوط به کدام چرخ‌دنده است. در خصوص گیربکس مورد مطالعه فرکانس‌های شفت، درگیری دندانه‌ها و باندهای کناری محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده‌اند. پارامترهای LSB و RSB به ترتیب فرکانس باندهای کناری سمت چپ و سمت راست GMF برای هر چرخ‌دنده است. با در دست داشتن فرکانس‌های مربوط به گیربکس مورد نظر، در ادامه مطالعه سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان و در حوزه فرکانس انجام خواهد شد.

جدول ۲. مشخصات فرکانس‌های گیربکس چیدمان آزمایشگاهی مورد مطالعه

Motor Speed		Shaft Inp		Pinion (Shaft Inp)				Shaft Out		Gear (Shaft Out)			
RPM	Hz	RPM	Hz	Teeth No	GMF	LSB	RSB	RPM	Hz	Teeth No	GMF	LSB	RSB
639	10.65	639	10.65	22	234.3	223.65	244.95	562.32	9.372	25	234.3	224.93	243.7

۱-۵ حوزه زمان

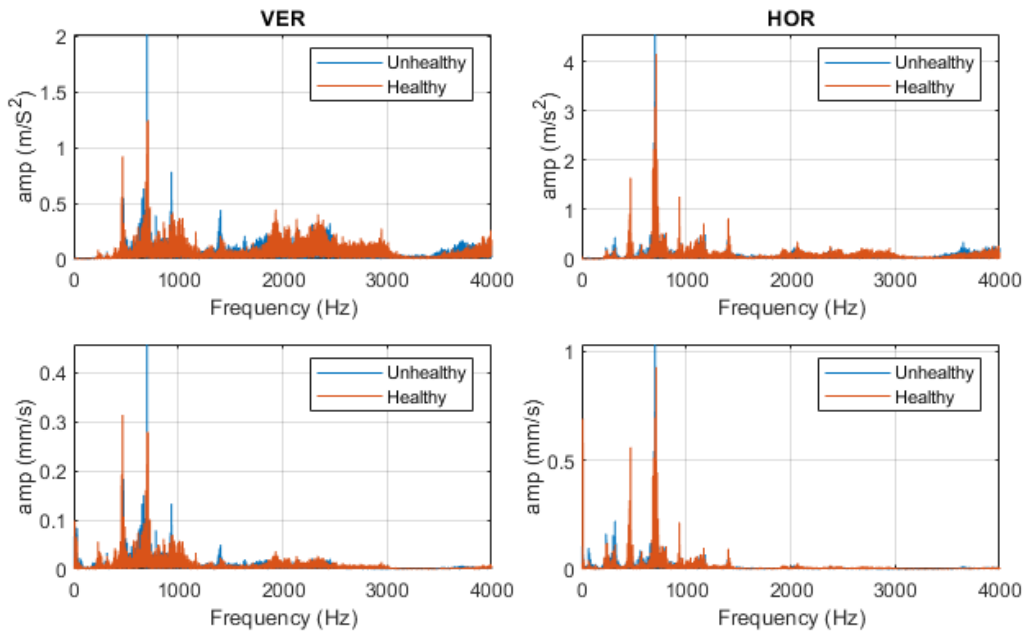
سیگنال زمانی شتاب و سرعت ثبت شده در جهت‌های افقی و قائم در حالت درگیری چرخ‌دنده‌های سالم هر دو شفت و درگیری چرخ‌دنده با عیب لب‌پریدگی دندانه روی شفت ورودی با چرخ‌دنده سالم روی شفت خروجی در شکل (۳) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که علاوه بر عیب چرخ‌دنده، عیوب دیگری از جمله نامیزانی جزئی و ناهمراستایی بین شفت موتور و شفت ورودی گیربکس نیز در مجموعه وجود دارد که می‌تواند باعث افزایش ارتعاش در فرکانس‌های مشخصی گردد که مطالعه آنها خارج از هدف این مقاله است. در هر یک از نمودارهای شکل (۳) سیگنال‌های حالت سالم و معیوب روی هم و در یک نمودار رسم شده‌اند تا امکان مقایسه راحت‌تر آنها فراهم گردد. افزایش سطح و دامنه ارتعاش در سیگنال‌های مربوط به حالت معیوب به طور کامل مشهود است.



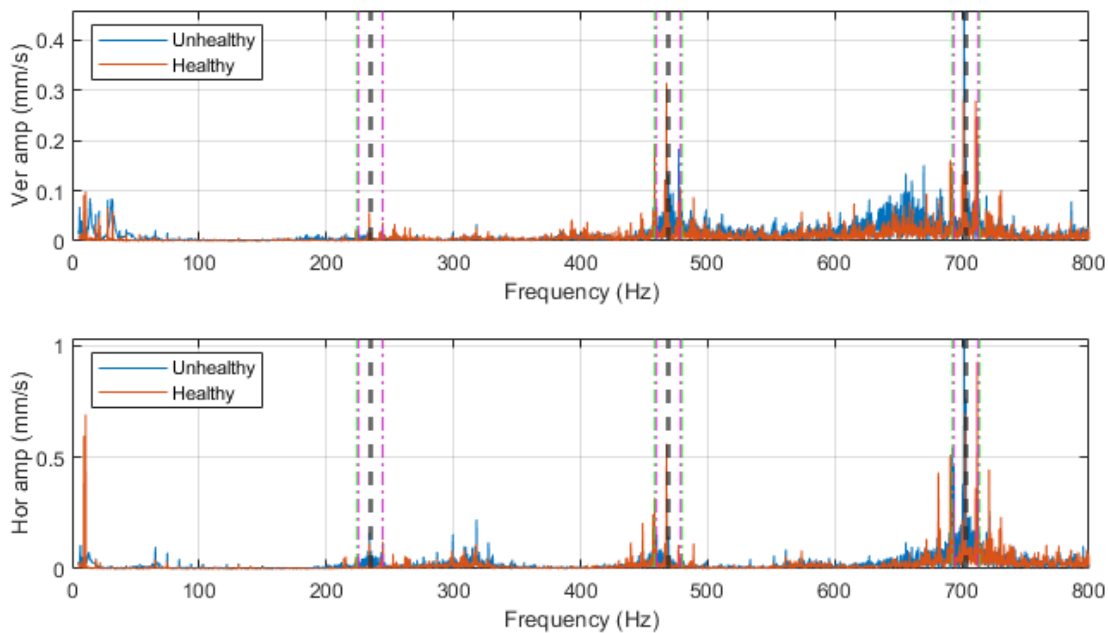
شکل ۳. مقایسه سیگنال زمانی حالت سالم و حالت معیوب گیربکس (سطر بالا: سیگنال‌های شتاب، سطر پایین: سیگنال‌های سرعت، ستون چپ: سنسور جهت قائم، ستون راست: سنسور جهت افقی)

۲-۵ حوزه فرکانس

برای مطالعه سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه فرکانس از تبدیل فوریه سریع استفاده می‌گردد که الگوریتمی با حجم محاسباتی کاهش یافته برای اعمال تبدیل فوریه روی سیگنال‌های گسسته است. با اعمال این تبدیل روی سیگنال‌های زمانی شتاب و سرعت، طیف فرکانسی این سیگنال‌ها به دست آمده است که در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. طیف‌های فرکانسی نشان داده شده در این شکل در کل بازه فرکانسی اندازه‌گیری شده (از ۵ تا ۴۰۰۰ هرتز) را شامل می‌شود. از این رو، در این نمودارها محدوده‌های فرکانسی که ارتعاشات غالب مربوط به آنهاست، قابل تشخیص است. همچنین محدوده‌های رزونانسی مربوط به سیستم نیز در این نمودارها دیده می‌شود که متناظر با نواحی گسترده افزایش دامنه هستند. نمودارهای آبی رنگ که مربوط به حالت معیوب با عیب لب‌پریدگی دندان هستند، در فرکانس‌های مشخصی دارای دامنه بیشتری نسبت به نمودار قرمز رنگ (حالت سالم) هستند. این فرکانس‌ها غالباً مربوط به ضرایب صحیح فرکانس‌های متناظر با عیب چرخ‌دنده است. برای مطالعه دقیق‌تر دامنه در فرکانس‌های درگیری چرخ‌دنده‌ها و باندهای کناری، نمودارهای طیف فرکانسی سرعت در محدوده کمتر (۵ تا ۸۰۰ هرتز) و با وضوح بهتر در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل خطوط راهنمای متناظر با مضارب صحیح اول تا سوم فرکانس درگیری دندانها و همچنین باندهای کناری متناظر با هر چرخ‌دنده حول فرکانس‌های درگیری نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد که مطابق انتظار در حالت معیوب بودن چرخ‌دنده، افزایش دامنه در فرکانس‌های باندهای کناری رخ داده است. انجام تحلیل‌های تکمیلی (از جمله تحلیل پوش [۱۳]) می‌تواند به حذف فرکانس‌های اضافی و نمایش بهتر دامنه فرکانس‌های عیوب چرخ‌دنده کمک کند.



شکل ۴. مقایسه طیف فرکانسی حالت سالم و حالت معیوب گیربکس (سطر بالا: سیگنال‌های شتاب، سطر پایین: سیگنال‌های سرعت، ستون چپ: سنسور جهت قائم، ستون راست: سنسور جهت افقی)



شکل ۵. مقایسه طیف فرکانسی سرعت‌ها در جهات قائم و افقی در حالت سالم و حالت معیوب در محدوده ۵ تا ۸۰۰ هرتز (خطوط راهنما به صورت خط چین سیاه نشان دهنده مضارب اول تا سوم فرکانس درگیری دندانه‌ها و نقطه‌خط‌های بنفش و سبز نشان دهنده باندهای کناری هر یک از مضارب فرکانس درگیری دندانه‌ها هستند)

۶- جمع‌بندی

در مقاله حاضر، طراحی یک چیدمان آزمایشگاهی با قابلیت اعمال عیوب مختلف مربوط گیربکس تشریح گردید. ملاحظات متعددی از جمله امکان ایجاد انواع عیوب مانند عیوب چرخ‌دنده، عیوب یاتاقان، عیوب مونتاژی و ... و در عین حال تا حد ممکن ساده بودن اعمال تغییرات در این خصوص لحاظ شده است. پس از ساخت گیربکس طراحی شده، یک سناریو آزمایش شامل درگیری یک

جفت چرخ‌دنده سالم و بار دیگر یک چرخ‌دنده معیوب (وجود عیب لب‌پریدگی در یکی از دندانه‌های چرخ‌دنده شفت ورودی) با چرخ‌دنده سالم روی چیدمان آزمایشگاهی اعمال گردید و اندازه‌گیری ارتعاشات در دو حالت انجام شد. سپس با تحلیل‌های حوزه زمان و حوزه فرکانس، تفاوت سیگنال‌های مربوط به حالت معیوب نسبت به حالت سالم مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات آینده، انواع عیوب مختلف مورد نظر روی این گیربکس اعمال خواهد شد و تحلیل‌های متنوعی برای مطالعه عیوب گیربکس‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از آقای محمدرضا کریمی، مسئول محترم کارگاه ماشین‌ابزار دانشگاه زنجان بابت همکاری صمیمانه در ساخت چیدمان آزمایشگاهی این مقاله، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

مراجع

- 1- <https://sites.ualberta.ca/~mzuo/RRL/html/RESOURCES.html> (2022).
- 2- H. Enayet B., Sirish L. Shah, Ming J. Zuo, and MAA Shoukat Choudhury. "Fault detection of gearbox from vibration signals using time-frequency domain averaging." In *2006 American Control Conference*, pp. 6-pp. IEEE, (2006).
- 3- Tian, Zhigang, and Ming J. Zuo. "Health condition prediction of gears using a recurrent neural network approach." *IEEE transactions on reliability* 59, no. 4, 700-705, (2010).
- ۴- ح. ارغند، ا. خیبری‌نژاد، ی. امانی، " مطالعه رفتار ارتعاشی روند رشد عیب در گیربکس‌ها در حوزه زمان و مقایسه آن با حوزه فرکانس"، یازدهمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، تهران، ایران، ۱۴۰۰.
- 5- <https://phmsociety.org/public-data-sets/>
- 6- Al-Atat, Hassan, David Siegel, and Jay Lee. "A systematic methodology for gearbox health assessment and fault classification." *Int J Prognostics Health Manage Soc* 2, no. 1, 16, (2011).
- 7- Han, Te, Chao Liu, Wenguang Yang, and Dongxiang Jiang. "Learning transferable features in deep convolutional neural networks for diagnosing unseen machine conditions." *ISA transactions* 93, 341-353, (2019).
- 8- Wang, Yiwei, Jian Zhou, Lianyu Zheng, and Christian Gogu. "An end-to-end fault diagnostics method based on convolutional neural network for rotating machinery with multiple case studies." *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-22, (2020).
- 9- Liang, Pengfei, Chao Deng, Jun Wu, Zhixin Yang, Jinxuan Zhu, and Zihan Zhang. "Single and simultaneous fault diagnosis of gearbox via a semi-supervised and high-accuracy adversarial learning framework." *Knowledge-Based Systems* 198, 105895, (2020).
- 10- Nectoux, Patrick, Rafael Gouriveau, Kamal Medjaher, Emmanuel Ramasso, Brigitte Chebel-Morello, Nouredine Zerhouni, and Christophe Varnier. "PRONOSTIA: An experimental platform for bearings accelerated degradation tests." In *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM'12.*, pp. 1-8. IEEE Catalog Number: CPF12PHM-CDR, (2012).
- 11- <https://www.nasa.gov/content/prognostics-center-of-excellence-data-set-repository/>
- 12- www.technekon.com
- 13- Behzad, Mehdi, Amirmasoud Kiakojouri, Hesam Addin Arghand, and Ali Davoodabadi. "Inaccessible rolling bearing diagnosis using a novel criterion for Morlet wavelet optimization." *Journal of Vibration and Control* 28, no. 11-12, 1239-1250, (2022).