



تشخیص عیب جعبه‌دنده با استفاده از تحلیل داده‌های صوتی به روش کپستروم

مهدی زمانی^۱، محمد ابونجمی^{۲*}، سیدرضا حسن بیگی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه فنی کشاورزی، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه فنی کشاورزی، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استاد، گروه فنی کشاورزی، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۳۳۹۱۶۳۳۷۵۵، abonajmi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ آذر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۹ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۷ فروردین ۱۴۰۲

کلیدواژه‌گان:

جعبه‌دنده

داده‌های آکوستیکی

تشخیص عیب

تحلیل کپستروم

چکیده

تشخیص عیب ماشین‌های دوار نقشی اساسی در قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های صنعتی جدید ایفا می‌کند. دنده‌ها به‌عنوان بخش حیاتی از اجزاء ماشین‌های صنعتی به‌شمار می‌آیند، به‌نحوی که عیوب این اجزاء موجب بروز آسیب‌های جبران‌ناپذیری در فرایندهای صنعتی می‌گردد. امروزه بسیاری از محققان در خصوص تشخیص عیب دنده‌ها با استفاده از تحلیل داده‌های آکوستیکی مطالعاتی انجام می‌دهند. در این پژوهش به‌منظور اخذ داده‌های آکوستیکی از یک جعبه‌دنده نمونه، سیستمی ساخته و توسعه داده شد؛ سپس برخی از عیوب شایع در دندانه جعبه‌دنده به‌صورت مصنوعی ایجاد گردید. در این پژوهش جهت تشخیص هارمونیک‌های فرکانس درگیری چرخ‌دنده و خانواده ساید باندهای ایجاد شده از روش تحلیل کپستروم استفاده شد. در بررسی اولیه انجام شده با روش تحلیل کپستروم و در بازه ۰ تا ۰/۲۵ ثانیه هارمونیک‌های مربوط به محور جعبه‌دنده مشخص گردید؛ سپس به‌منظور تشخیص عیب چرخ‌دنده، با تحلیل بازه ۰ تا ۰/۰۰۰۲ ثانیه عیوب مربوط به دندانه به وضوح قابل مشاهده و پیگیری گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با مشاهده افزایش دامنه در هارمونیک‌های اول و پنجم می‌توان عیوبی مانند شکستگی و سائیدگی دندانه یک چرخ‌دنده را تشخیص داد. نتایج به‌دست‌آمده، مؤثر بودن روش ارائه شده جهت تشخیص عیب در جعبه‌دنده و جلوگیری از هزینه‌های غیرمنتظره را نشان می‌دهد.

Gearbox fault diagnosis using acoustic data by cepstrum method

Mahdi Zamani, Mohammad Aboonajmi*, Seyed Reza Hassan Beygi

Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 3391633755 Tehran, Iran, abonajmi@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 3 December 2022
First Decision: 28 February 2023
Accepted: 6 April 2023

Keywords:

Gearbox
Acoustic Data
Fault Diagnosis
Cepstrum Analysis

Abstract

Fault diagnosis of rotary machines plays an essential role in reliability and safety of new industrial systems. Gears are considered as a vital part of the components of industrial machines, so that the defects of these components cause irreparable damages in industrial processes. Nowadays, many research workers conduct studies on the diagnosis of gear faults using data analysis. In this research, to acquire acoustic data from a sample gearbox, a system was fabricated and developed. Then, some common faults in the gearbox teeth were created artificially. In this research, cepstrum analysis method was used in order to detect the harmonics of gear mesh frequency and the family of sidebands created. In the primary investigation, the harmonics related to the gearbox shaft were identified with the cepstrum analysis method in the interval of 0 to 0.25 seconds. Then, in order to detect the faults of the gear, by analyzing in the interval of 0 to 0.0002 seconds, the faults related to the tooth were clearly visible and tracked. According to this research results by observing increase in amplitude of the first and fifth harmonics, it is possible to detect faults such as broken and worn teeth of gears. The obtained results show the effectiveness of the presented method to diagnose the fault in the gearbox and prevent unexpected costs.

۱- مقدمه

تحلیل آکوستیکی، تحلیل روغن و بازرسی گرمایی (ترموگرافی) اشاره نمود. ماشین‌های دوار نقش بسیار مهمی در حوزه صنعت ایفا می‌کنند. یکی از اجزاء اصلی که به‌منظور ایجاد و انتقال حرکت دورانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، جعبه‌دنده‌ها و چرخ‌دنده‌ها می‌باشند. پردازش سیگنال یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای طبقه‌بندی عیوب و پیش وضعیت است؛ به این معنی که از

امروزه، پیش وضعیت به‌عنوان روشی مؤثر و ارزان به‌منظور کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته می‌شود. برخی از اهداف اصلی پیش وضعیت، کاهش زمان خرابی خط تولید، لیست قطعات یدکی، هزینه تعمیر و خطر ایمنی می‌باشد. از روش‌های معمول پیش وضعیت می‌توان به تحلیل ارتعاشی،

آن به‌منظور یافتن تبدیلی مطلوب از سیگنال اولیه جهت استخراج ویژگی‌های مناسب، استفاده می‌شود. امروزه روش‌های بسیار زیادی جهت پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. سیگنال‌های آکوستیک به‌عنوان یک اثر انگشت در پایش وضعیت حاوی اطلاعات ذاتی می‌باشد که وضعیت تجهیزات مکانیکی را نشان می‌دهد؛ بنابراین تحلیل آکوستیکی به‌عنوان یک روش مؤثر برای تشخیص عیب ماشین‌های دوار به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

لو و همکاران در سال ۲۰۲۲ در تحقیقی تحت عنوان حذف اثرات تابع انتقال از اندازه‌گیری‌های خطای انتقال (TE) با استفاده از کپستروم^۲ بر اساس آنالیز مودال عملیاتی به بررسی خطای انتقال هندسی (GTE)^۳، خطای انتقال استاتیک (STE) و خطای انتقال دینامیک (DTE)^۴ و تأثیر این روش‌ها بر روی کنترل کیفیت و پایش وضعیت چرخ‌دنده پرداختند. در این پژوهش با استفاده از یک روش تحلیل عملیاتی مودال بر اساس کپستروم (OMA)^۵ یک روش جدید برای بازسازی معادل STE، GTE از یک اندازه مجزا DTE پیشنهاد شد که پس از بارگذاری دو یا چند مرحله، توانایی جداسازی و شناسایی اجزا TE مربوط به عدم تطابق و سختی مش را ممکن می‌ساخت [۲]. همچنین هانگ و ژانگ [۳] در بررسی انجام شده در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تحلیل کپستروم بر روی یک موتور توربوجت به شناسایی عیوب ارتعاشی پرداختند. در این مقاله داده‌های ارتعاشی یک موتور توربوجت در سه حالت آزمایش متفاوت با استفاده از روش کپستروم مورد تحلیل قرار گرفت. اجزاء دوره‌ای و خصوصیات سیگنال‌های پیچیده فرکانس جانبی چند جزئی در سیگنال‌های ارتعاشی اورتون^۶ جداسازی و استخراج گردید که این موارد خود نشان‌دهنده حساسیت موقعیت‌های دنده کمپرسور و محفظه توربین به اجزای ارتعاشی هارمونیک، روتورهای فشار بالا و پایین و تفاوت خصوصیات قطعات ارتعاشی مختلف می‌باشد. در سال ۲۰۲۰ وانگ و همکاران [۴] با استفاده از تحلیل کپستروم در آزمون برزلی جهت تخمین شکست سنگ، پارامتر آکوستیک امیش (AE)^۸ جدیدی را معرفی نمودند. در این بررسی ضرایب خطی کپستروم (LCC)^۹ به‌عنوان پارامتر مشخصه آکوستیک امیشن برای تحلیل همبستگی بین LCC و

¹ Transmission Error

² Cepstrum

³ Geometrical Transmission Error

⁴ Static Transmission Error

⁵ Dynamic Transmission Error

⁶ Operational Modal Analysis

⁷ Overtone

⁸ Acoustic Emission

⁹ Linear Cepstral Coefficient

¹⁰ Asymmetric Penalty Sparse

¹¹ Partial Discharge

¹² Artificial Neural Network

¹³ Bispectrum

¹⁴ Fourier Transform

¹⁵ High Spectrum Order

به‌دست آوردن مشخصه ویژه در عیوب ایجاد شده و مقایسه آن با سایر روش‌های موجود می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی و ساخت جعبه‌دنده

جهت انجام این پژوهش در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۳ در پردیس ابوریحان دانشگاه تهران سیستمی طراحی و ساخته شد. در ابتدا جعبه‌دنده‌ای با چرخ‌دنده‌های ساده جهت انجام آزمون‌های مختلف طراحی گردید (شکل ۱)؛ سپس جعبه‌دنده مذکور به همراه سایر اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم در نرم CATIA V5-R20 مدل و سرانجام نسبت به ساخت این سیستم اقدام شد. شکل ۲ اجزای سیستم ساخته شده را نشان می‌دهد که عبارت‌اند از: ۱- صداسنج، ۲- رایانه، ۳- اینورتر، ۴- اتاقک آکوستیک الکتروموتور، ۵- جعبه‌دنده، ۶- شاسی.

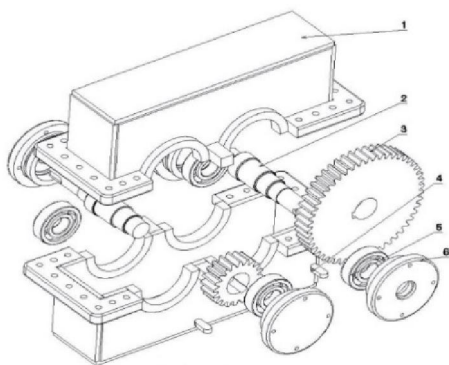


Fig. 1 Schematics view of the gearbox: 1-Gearbox Case, 2-Shaft, 3-Gear, 4-Key, 5-Ball bearing, 6-Ball bearing housing

شکل ۱ نمای شماتیک جعبه‌دنده: ۱- پوسته جعبه‌دنده، ۲- محور، ۳- چرخ‌دنده، ۴- خار، ۵- بلبرینگ، ۶- محفظه بلبرینگ



Fig. 2 Components of the fabricated system: 1-Sound level meter, 2-Laptop computer, 3-Inverters, 4-Electromotor acoustic chambers, 5-Gearbox, 6-Chassis

شکل ۲ اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم ساخته شده: ۱- صداسنج، ۲- رایانه دستی، ۳- اینورتر، ۴- اتاقک آکوستیک الکتروموتور، ۵- جعبه‌دنده، ۶- شاسی

اندازه‌گیری دامنه فرکانسی مرتبه سوم می‌باشد، درحالی‌که شامل اطلاعاتی می‌باشد که روش تحلیل طیف توان استاندارد نمی‌تواند آن‌ها را ارائه دهد. به‌خوبی شناخته شده است که شبکه‌های عصبی می‌توانند روابط پیچیده غیرخطی ارائه دهند؛ بنابراین آن‌ها به‌شدت برای شناسایی عیب و طبقه‌بندی مفید می‌باشند. وو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ تحقیقی بر روی تحلیل کپستروم ارتعاش طناب‌های مته و استخراج سیگنال‌های منبع مته دریل انجام دادند. تحلیل کپستروم یک روش فیلترینگ غیرخطی می‌باشد که می‌تواند سیگنال‌های کانال‌ها شده در حوزه زمان را به سیگنال‌های حوزه فرکانس تغییر دهد. این روش می‌تواند با حذف ساختار طنین‌دارا (اکودار) به‌وسیله انتخاب یک تابع پنجره به سیگنال منبع دقیق تبدیل نماید. در این پژوهش در مورد فیلترینگ اسپسترال و استخراج سیگنال‌های منبع دقیق گذرا بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده از طناب مته بحث شده است. در سال ۲۰۰۷ هانسون و همکاران [۹] یک روش جدید برای تحلیل مودال عملیاتی (OMA) از سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO) با حداقل یک ورودی چرخه ثابت با یک چرخه فرکانس منحصر به فرد ارائه نمودند. روش ارائه شده بر اساس دو مرحله جداسازی سیگنال است. ویژگی‌های چرخه ثابت ورودی برای تخمین چرخه چگالی طیفی، به‌طور مؤثر یک سیستم MIMO را به یک سیستم یک ورودی-چند خروجی (SIMO) کاهش می‌دهد و منحنی برازش یافته در حوزه کپستروم که اجازه جداسازی تابع ورودی و تابع خروجی را می‌دهد. این روش با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی تجهیزات آزمایش تیر فولادی و یک وسیله نقلیه ریلی اثبات شده است. بدائوی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۴ کاربرد جدیدی از اسپسترم حقیقی برای سیگنال‌های چرخ‌دنده، شامل تعریف یک شاخص عیب مقاوم ارائه نمودند. در این تحقیق امکانات ارائه شده توسط استفاده از کپستروم توان برای تشخیص ارتعاش جعبه‌دنده نشان داده شده است. در این روش کپستروم توان به‌صورت جزئی برای سیگنال‌های ایجاد شده به‌وسیله یک شتابسنجی محاسبه شد. این امر توسعه یک شاخص را که اثرپذیری اندکی از دامنه سیگنال، نسبت سیگنال به نویز یا موقعیت سیگنال داشته باشد، را ممکن می‌سازد.

با توجه به توانایی تحلیل کپستروم در شناسایی هارمونیک‌ها و باندهای جانبی یک سیگنال، هدف از این پژوهش بررسی تحلیل کپستروم در دقت شناسایی عیوب احتمالی جعبه‌دنده و

¹ Multi Input Multi Output

² Single Input Multi Output

دندانه‌های چرخ‌دنده مد نظر به‌طور کامل حذف شد. در خصوص عیب سائیدگی مقداری از لبه یکی از دندانه‌های چرخ‌دنده حذف گردید و در نمونه آخر به‌صورت همزمان یکی از دندانه‌ها به‌صورت کامل حذف و در یکی دیگر از دندانه‌ها به‌وسیله سنگ فرز مقداری از لبه یک دندانه برداشته شد. این موارد در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشند.



Fig. 4 A-Gear with a fractured tooth, B-Gear with a fractured and a worn tooth, C-Gear with a worn tooth

شکل ۴ الف- چرخ‌دنده با یک دندانه شکسته شده، ب- چرخ‌دنده با یک دندانه شکسته و یک دندانه سائیده شده و ج- چرخ‌دنده با یک دندانه سائیده شده

آزمایش انجام شده در سه دور الکتروموتور انجام شده است. میزان دور الکتروموتور به‌وسیله یک دستگاه اینورتر لنز مدل ۸۳۰۰ اندازه‌گیری شده است. دور بیشینه با فرکانس کاری ۵۰ هرتز اینورتر و معادل ۱۴۹۶ دور بر دقیقه، دور کاری متوسط با فرکانس کاری ۳۵ هرتز اینورتر و معادل ۱۰۵۰ دور بر دقیقه است و دور کاری کمینه با فرکانس کاری ۲۵ هرتز اینورتر حاصل شد که معادل ۷۴۹ دور بر دقیقه است. به منظور جلوگیری از بروز خطای احتمالی در هنگام پردازش داده‌های صوتی، سیگنال‌های به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف با یک شناسه منحصر به فرد نام‌گذاری شدند (برای مثال 0C1e4 که شرح آن در شکل ۵ آمده است).

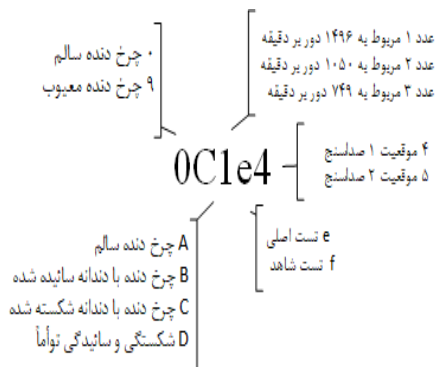


Fig. 5 Sound data coding

شکل ۵ نام‌گذاری فایل‌های صوتی

۲-۲- کالیبره کردن دور الکتروموتور

جهت کالیبره کردن دور الکتروموتور از یک عدد دورسنج نوری تماسی مدل Lutron DT-1236L که دارای دقتی معادل ± 1 rpm می‌باشد، به‌صورت تماسی استفاده گردید.

۲-۳- جمع‌آوری و ذخیره داده‌های صوتی

در این پژوهش از یک دستگاه صداسنج مدل HT-157 (با حساسیت اسمی معادل 50mV/Pa و قابلیت نرخ نمونه‌برداری ۴۸ کیلوهرتز در ثانیه) ساخت کشور ایتالیا برای اخذ داده‌های صوتی، از یک دستگاه لپ‌تاپ Lenovo-G550 جهت ذخیره و پردازش داده‌ها، نرم‌افزار Cool Edit Pro2.0 به‌منظور تبدیل داده‌ها به پسوند PCM و از نرم‌افزار MATLAB R2014a جهت پردازش داده‌ها استفاده شد.

به‌منظور بررسی عیوب چرخ‌دنده در جعبه‌دنده نمونه چهار عدد چرخ‌دنده با قطر ۸۰ میلی‌متر به‌عنوان پینیون و یک عدد چرخ‌دنده با قطر ۲۰۰ میلی‌متر به‌عنوان چرخ‌دنده تهیه گردید. مدول چرخ‌دنده‌ها ۴، تعداد دندانه چرخ‌دنده ۵۰ و تعداد دندانه پینیون ۲۰ عدد می‌باشد. برای هر چرخ‌دنده قبل از اعمال عیب صدای چرخ‌دنده در حالت کارکرد اخذ گردید. این امر موجب می‌شود که در صورت وجود عیوب هنگام ساخت یا سایر عیوب ساختاری چرخ‌دنده، این عیوب در تحلیل آکوستیکی مد نظر مشکلی ایجاد نکند. علاوه بر این به‌منظور حذف عوامل بیرونی در هنگام اخذ داده‌ها برای هر نمونه یک آزمایش اصلی و یک آزمایش به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد؛ همچنین دستگاه صداسنج در دو موقعیت مجزا جهت اخذ داده‌های آکوستیکی مورد استفاده قرار گرفته است تا اثر موقعیت در روش‌های مختلف بررسی گردد (شکل ۳).

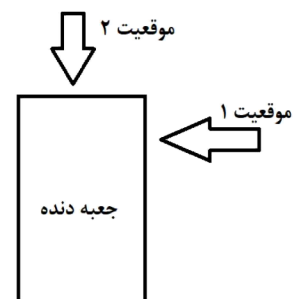


Fig. 3 The position of sound level meter in relation to the gearbox for data acquisition

شکل ۳ موقعیت دستگاه صداسنج نسبت به جعبه‌دنده جهت داده‌برداری

در این پژوهش عیوب مورد نظر بر روی پینیون اعمال گردید. به‌منظور بررسی عیب شکستگی دندانه، یکی از

۲-۴- پردازش داده‌ها

در این تحقیق داده‌های صوتی ثبت شده برای دستگاه، در شرایط سالم به‌عنوان اطلاعات پایه در نظر گرفته و داده‌های سایر شرایط نسبت به آن‌ها سنجیده شدند. تفاوت داده‌های به‌دست‌آمده در شرایط مختلف اندازه‌گیری با شرایط پایه نشان‌دهنده وجود عیب در چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از طریق روابط موجود در دوره‌های مختلف جعبه‌دنده محاسبه و از نظر عیوب احتمالی طبقه‌بندی شدند. مطابق رابطه ۱، داده‌های صوتی ناشی از عیوب چرخ‌دنده‌ها معمولاً در فرکانسی برابر با فرکانس درگیری چرخ‌دنده^۱ (GMF) به وجود می‌آیند که از حاصل ضرب تعداد دندانه‌ها (n) در سرعت دورانی چرخ‌دنده معیوب (N) بر حسب دور بر دقیقه محاسبه می‌گردد:

$$GMF = n \times N \quad (1)$$

به فرآیند تجزیه و تحلیل سیگنال‌های به‌دست‌آمده پردازش سیگنال گفته می‌شود که دارای دو شاخه‌ی پردازش سیگنال گسسته و پیوسته می‌باشد. سیستم‌های پایش وضعیت در حالت کلی دارای سه بخش: کسب داده، پردازش و استخراج ویژگی‌ها از سیگنال و تشخیص عیب می‌باشد. بخش پردازش و استخراج ویژگی‌ها از سیگنال، از مهم‌ترین بخش‌ها در روند پایش وضعیت می‌باشد 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 پنهان شده در یک سیگنال را نمایان سازد. در این پژوهش از روش کپستروم جهت استخراج ویژگی‌های مطلوب استفاده خواهد شد.

۲-۵- کپستروم

کپستروم طبق رابطه ۲ به‌عنوان «طیف توانی لگاریتم طیف توان» تعریف می‌شود [۱۱]:

$$C(\tau) = |\mathcal{F}\{\log F_{XX}(f)\}|^2 \quad (2)$$

که: $F_{XX}(f)$ طیف توانی سیگنال زمانی $F_X(f)$ بوده و $\mathcal{F}\{\}$ تبدیل فوریه تابع مذکور می‌باشد. در ادامه، تعریف جدیدی به‌عنوان «تبدیل معکوس لگاریتم طیف توان» طبق رابطه ۳ ارائه گردید:

$$C(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\log F_{XX}(f)\} \quad (3)$$

یکی از دلایل استفاده از این تعریف، برجسته کردن ارتباط بین کپستروم و تابع خودهمبستگی می‌باشد که می‌تواند از تبدیل معکوس طیف توانی به‌دست آید. به‌عنوان مثال:

$$R_{XX}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\log F_{XX}(f)\} \quad (4)$$

از آنجایی که طیف کپستروم از معکوس تابع طیف (اسپکترام) به‌دست آمده، لذا مشخصات طیفی مانند فرکانس، فیلتر، هارمونیک، فاز و ... از به هم ریختن این اصطلاحات حاصل می‌شوند و به ترتیب معادل کیوفرنس، لیفتر، راهمونیک، ساف و ... می‌باشند. تعریف بیان شده در رابطه ۳ با توجه به اینکه «تبدیل معکوس لگاریتم پیچیده طیف پیچیده» می‌باشد به «کپستروم پیچیده» نزدیک‌تر است و در حقیقت برای طیف‌های با فاز صفر یکسان می‌باشد. باید توجه داشت که متغیر مستقل در کپستروم دارای بعد زمان می‌باشد؛ اما به‌عنوان «کیوفرنس» شناخته می‌شود. این تعریف برای آن‌هایی که جهت تفسیر سیگنال‌های زمانی از مفهوم فرکانسی آن استفاده می‌کنند، مفید می‌باشد. «کیوفرنسی بالا» نوسانات سریع در طیف (اسپکتروم) یا همان «فاصله کم فرکانس» را ارائه می‌دهد. «کیوفرنسی پایین» تغییرات آهسته فرکانس (فاصله زیاد فرکانس) را بیان می‌کند. در جایی که قله در کپستروم از خانواده باندهای جانبی منتج می‌گردد، کیوفرنسی قله نشان‌دهنده زمان دوره مدولاسیون است و در مقابل فرکانس مدولاسیون می‌باشد. باید توجه داشت که کیوفرنسی چیزی در مورد فرکانس مطلق ارائه نداده و فقط در خصوص فاصله فرکانس‌ها می‌باشد.

با توجه به خطی بودن مقیاس در حوزه کپستروم، به‌منظور بررسی دقیق راهمونیک‌های مختلف خروجی تحلیل با جزئیات متفاوت و با بزرگنمایی در محدوده‌های مختلف انجام خواهد شد. برای مثال عیوب مربوط به محور در مقیاس کامل مشخص خواهد شد؛ اما عیوب مربوط به دندانه‌ها شامل عیب شکستگی و یا سائیدگی در راهمونیک‌های بسیار پایین قابل مشاهده خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

با توجه به مطالب گفته شده در بخش‌های قبل تحلیل کپستروم بر روی داده‌های اخذ شده از سیستم انجام گرفت. فرکانس درگیری با توجه به دور پینیون و تعداد دندانه‌های پینیون برای دوره‌های ۱۴۹۶ معادل ۴۹۸٫۶ هرتز، ۱۰۵۰ معادل ۳۵۰ هرتز و دور ۷۴۹ معادل ۲۴۹٫۶ می‌باشد. پس از اخذ داده‌های صوتی با نرخ نمونه‌برداری^۲ ۴۸۰۰۰ نمونه در ثانیه، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ابتدا مقدار ۵ ثانیه از هر نمونه جهت تحلیل جدا شد و در مرحله دوم صرفاً یک ثانیه (با توجه به سرعت ورودی

² Sample Rate¹ Gear Mesh Frequency

مربوط به اعمال عیب شکستگی یک دندانه و موقعیت داده‌برداری دو (9C1e5) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت از داده‌های حوزه زمان به جز محدود ویژگی‌های آماری که عملاً نشانی از عیوب مد نظر نخواهند داشت، ویژگی دیگری قابل حصول نیست؛ به همین دلیل از نمایش نتایج تحلیل حوزه زمان داده‌های کسب شده از سایر عیوب صرف‌نظر می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد حوزه زمان فاقد اطلاعاتی از نوع و محل عیب می‌باشند. از این رو جهت مشخص شدن ویژگی مربوط به نوع و محل عیب داده‌های حوزه زمان با روش تبدیل فوریه (تبدیل سریع فوریه^۲) به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود. در خصوص داده‌های صوتی از ویژگی تراز فشار صدا (SPL) استفاده می‌شود که حاوی اطلاعات مهمی مانند فرکانس درگیری چرخ‌دنده (GMF) و سایر هارمونیک‌های مربوط به فرکانس درگیری چرخ‌دنده می‌باشد. در شکل ۷ تحلیل داده‌های صوتی در این حوزه برای چرخ‌دنده سالم، چرخ‌دنده معیوب و موقعیت داده‌برداری یک و چرخ‌دنده معیوب و موقعیت داده‌برداری دو نشان داده شده است.

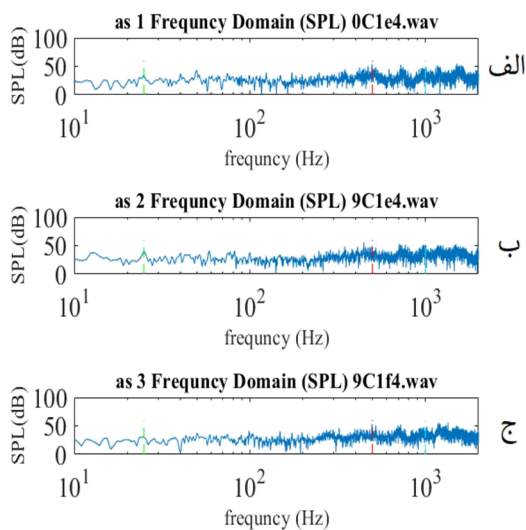


Fig. 7 Frequency domain data (SPL) at pinion speed of 1496 RPM
شکل ۷ داده‌های حوزه فرکانس (SPL) در سرعت پینیون ۱۴۹۶ دور بر دقیقه

در شکل ۷ داده‌های مربوط به چرخ‌دنده سالم و معیوب به همراه فرکانس کاری الکتروموتور (داده‌های مربوط به سرعت ۱۴۹۶ دور بر دقیقه)، فرکانس درگیری چرخ‌دنده و اولین هارمونیک آن نشان داده شده است. ویژگی‌های به‌دست‌آمده از

جعبه‌دنده و سرعت خروجی و همچنین نرخ نمونه‌برداری تمام ویژگی‌های لازم جهت تشخیص عیب در یک ثانیه از داده‌ها مشخص گردید) از این نمونه‌ها در تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. هر نمونه در حوزه زمان، حوزه فرکانس (SPL^۱) و حوزه کپستروم تحلیل شد که نتایج آن در ادامه آورده شده است. در خصوص حوزه کپستروم با توجه به مطلبی که پیش‌ازین نیز ذکر شد، برای هر نمونه، تحلیل‌ها در بازه‌های مختلف صورت گرفت. به این شکل که ابتدا بازه بین ۰ تا ۰/۵ ثانیه تحلیل شد که در این بازه راهمونیک‌های مربوط به شفت پینیون قابل مشاهده و پیگیری بود. در مراحل بعدی بازه‌های ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه و ۰ تا ۰/۰۰۰۲ ثانیه تحلیل و نتایج آن بررسی گردید. عیوب مد نظر در بازه ۰ تا ۰/۰۰۰۲ ثانیه قابل مشاهده بود.

در هر گروه تحلیل سه دسته داده مورد بررسی قرار گرفت: داده‌های مربوط به چرخ‌دنده سالم، داده‌های بعد از اعمال عیب و موقعیت ۱ داده‌برداری، داده‌های بعد از اعمال عیب و موقعیت ۲ داده‌برداری.

در شکل ۶ داده‌های مربوط به سرعت پینیون ۱۴۹۶ دور بر دقیقه و عیب شکستگی یک دندانه در حوزه زمان نشان داده شده است.

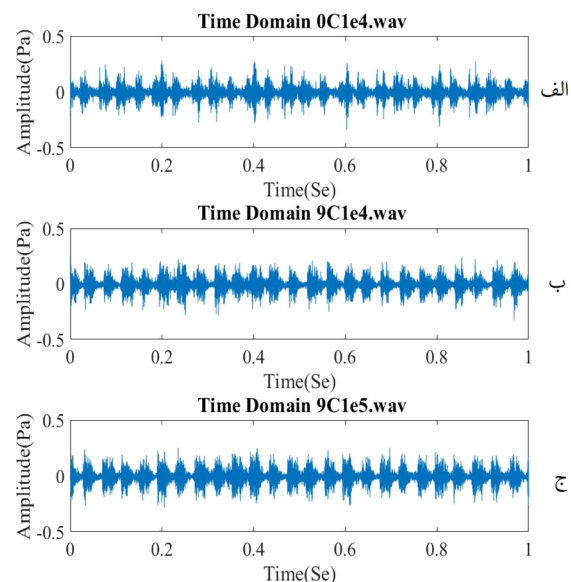


Fig. 6 Time domain data at pinion speed of 1496 RPM
شکل ۶ داده‌های حوزه زمان در سرعت پینیون ۱۴۹۶ دور بر دقیقه

در شکل ۶ داده‌های مربوط به حوزه زمان مربوط به چرخ‌دنده سالم (0C1e4)، چرخ‌دنده بعد از اعمال عیب شکستگی دندانه و موقعیت داده‌برداری یک (9C1e4) و در نهایت داده‌های

^۲ Fast Fourier Transform

^۱ Sound Pressure Level

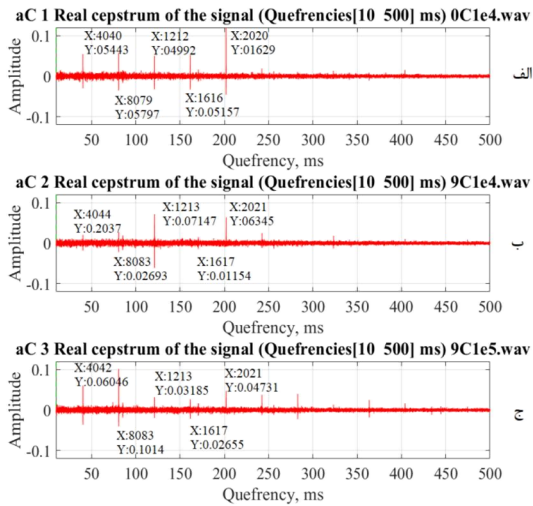


Fig. 8 Cepstrum domain data

شکل ۸ داده‌های حوزه کپستروم

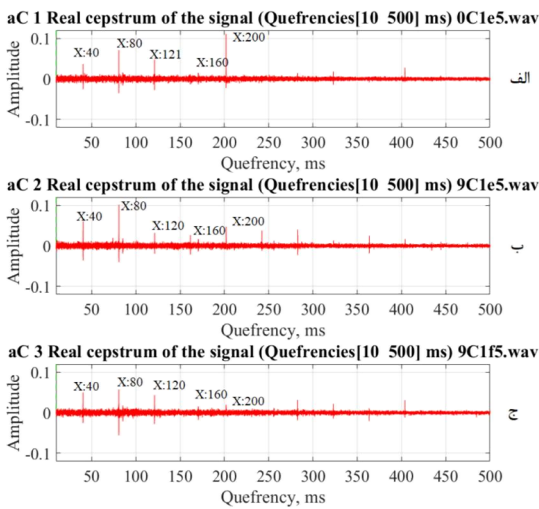


Fig. 9 Investigating the effect of the data acquisition position in Cepstrum domain

شکل ۹ بررسی تأثیر موقعیت داده‌برداری در حوزه کپستروم

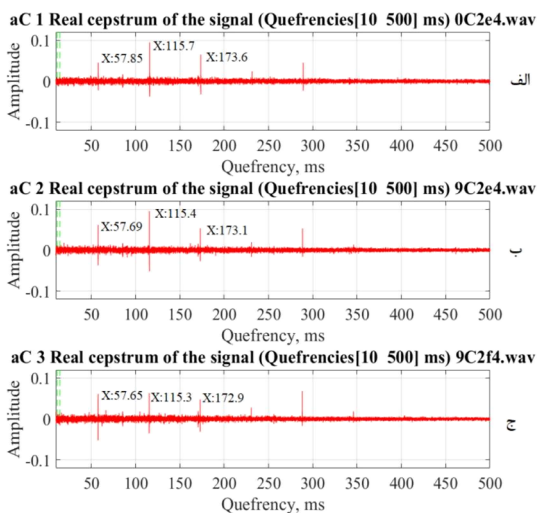


Fig. 10 Data related to fractured tooth at 1050 RPM pinion speed

شکل ۱۰ داده‌های مربوط به عیب شکستگی دندانه در سرعت پینیون RPM

۱۰۵۰

این شکل جهت نشان دادن نوع عیب نیاز به تخصص و دانش بالا دارد. به همین منظور باید داده‌ها را در حوزه دیگری تحلیل کرد تا بتوان ویژگی‌های بهتری جهت نشان دادن نوع عیب به دست آورد.

تحلیل داده‌ها در حوزه کپستروم به ما این اجازه را می‌دهد که علاوه بر شناسایی فرکانس درگیری چرخ‌دنده بتوان راهمونیک‌های این کیو فرانس و همچنین باندهای جانبی را تشخیص داد و رهگیری کرد. این ویژگی به علاوه عدم تأثیرپذیری تحلیل کپستروم از موقعیت داده‌برداری، از مزایای این حوزه می‌باشد. علاوه بر این ویژگی‌ها در پژوهش‌های جدید، کاربردهای جدیدی از تحلیل کپستروم به دست آمده است که کاربرد این تحلیل را در پژوهش‌های جدید بیش از پیش نموده است.

در شکل ۸ نمایش حوزه کپستروم مربوط به چرخ‌دنده‌های سالم (0C1e4)، چرخ‌دنده با دندانه شکسته در موقعیت داده‌برداری یک (9C1e4) و چرخ‌دنده با دندانه شکسته و موقعیت داده‌برداری دو (9C1e5) برای سرعت پینیون ۱۴۹۶ دور بر دقیقه در بازه بین ۰ تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه نشان داده شده است.

در شکل ۸ محور عمودی نشان‌دهنده دامنه و محور افقی نشان‌دهنده کیو فرنسی (برحسب میلی‌ثانیه) می‌باشد. به منظور شناسایی عیب نیاز به تحلیل داده‌ها در بازه‌های متفاوت می‌باشد. در شکل ۸ با توجه به بازه انتخاب شده (۱۰ تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه) کیو فرانس‌های مربوط به محور پینیون به وضوح قابل شناسایی و پیگیری می‌باشد. در سرعت ۱۴۹۶ دور بر دقیقه دوره تناوب راهمونیک‌ها معادل ۴۰ خواهد بود؛ در صورتی که عیب اعمال شده مربوط به محور باشد (مانند ناهم‌محوری) در این بازه قابل مشاهده خواهد بود. نکته دیگری که از شکل ۹ می‌توان دریافت عدم تأثیر موقعیت داده‌برداری در تحلیل کپستروم می‌باشد به این ترتیب که تحلیل داده‌های مربوط به موقعیت ۱ و موقعیت ۲ تفاوت محسوسی با یکدیگر نداشتند.

پس از تحلیل مشخص شد در بازه ۱۰ تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه عیوبی مانند شکستگی و یا سائیدگی دندانه‌ها قابل مشاهده و پیگیری نمی‌باشد.

در شکل ۱۰ داده‌های مربوط به عیب شکستگی دندانه در سرعت پینیون ۱۰۵۰ و در شکل ۱۱ داده‌های مربوط به سرعت پینیون ۷۴۹ دور بر دقیقه نشان داده شده است که نتایج مشابه آنچه توضیح داده شده است، قابل مشاهده می‌باشد.

به چرخ‌دنده با یک دندانه شکسته شده و 9C1f4 مربوط به آزمایش شاهد از چرخ‌دنده با یک دندانه شکسته شده می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در راهمونیک اول افزایش دامنه به‌صورت واضح قابل تشخیص می‌باشد. در ضمن تغییر محسوسی در راهمونیک‌های بعدی دیده نمی‌شود. این مشخصه در سایر موارد شامل داده‌برداری در موقعیت دو، در سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه و سرعت ۷۴۹ دور بر دقیقه نیز به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ لیانگ و همکاران [۷] افزایش دامنه کیو فرانس ۲۰ میلی‌ثانیه و راهمونیک‌های آن را در خصوص تشخیص عیب شکست در میله استاتور موتورهای القایی مشاهده کردند.

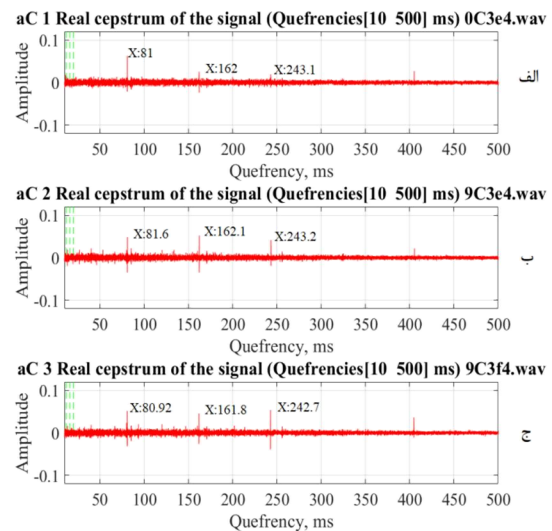


Fig. 11 Data related to fractured tooth at 749 RPM pinion speed

شکل ۱۱ داده‌های مربوط به عیب شکستگی دندانه در سرعت پینیون ۷۴۹ RPM

در شکل ۱۰ با توجه به اینکه نتیجه تحلیل داده‌ها مربوط به سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه می‌باشد، راهمونیک‌های ۵۷ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود؛ همچنین در شکل ۱۱ که از تحلیل داده‌های مربوط به سرعت ۷۴۹ دور بر دقیقه به‌دست آمده است، راهمونیک‌های ۸۱ میلی‌ثانیه قابل مشاهده است.

پس از تحلیل داده‌های مربوط به عیوب سائیدگی یک دندانه، و ترکیب عیب شکستگی و سائیدگی یک دندانه به‌صورت همزمان در بازه ۰ تا ۰/۲۵ ثانیه نتایج مشابه با شکل‌های ۱۰ و ۱۱ حاصل شد.

به‌منظور مشاهده و پیگیری ویژگی مربوط به عیوب شکستگی و سایش طیف کیو فرانس در بازه‌های مختلف بررسی شد. در هر مرحله بازه انتخاب شده نسبت به بازه قبلی کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. پس از بررسی بازه ۱۰ تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه، بازه‌های ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه و ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه نیز مورد بررسی قرار گرفت. در بازه ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه هیچ ویژگی که مربوط به عیوب مد نظر باشد مشاهده نشد و از آوردن نتایج مربوط به بازه ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه به دلیل عدم وجود ویژگی مطلوب به‌منظور شناسایی عیب مد نظر خودداری گردید؛ اما در بازه ۰ تا ۰/۰۰۲ ثانیه ویژگی مربوط به عیوب قابل مشاهده و پیگیری می‌باشد که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته شده است. در شکل ۱۲ نتیجه تحلیل داده‌های مربوط به عیب شکستگی یک دندانه چرخ‌دنده در سرعت ۱۴۹۶ RPM (دور بر دقیقه) که از موقعیت یک (شکل ۳) داده‌برداری شده، نشان داده شده است. 0C1e4 نشان‌دهنده چرخ‌دنده سالم، 9C1e4 مربوط

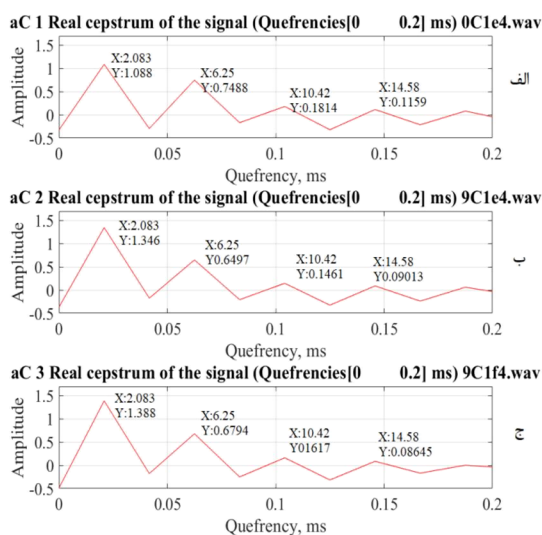


Fig. 12 Fault diagnosis of a fractured tooth, increasing the first rahmonic amplitude

شکل ۱۲ تشخیص عیب شکستگی یک دندانه، افزایش دامنه راهمونیک اول

در مورد عیب سایش طبق بررسی انجام شده برخلاف شکستگی دندانه افزایش باند راهمونیک اول مشهود نمی‌باشد و به‌جای آن در راهمونیک پنجم افزایش دامنه مشاهده می‌شود؛ این مورد در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل که مربوط به سرعت ۱۴۹۶ دور بر دقیقه و سائیدگی یک دندانه از چرخ‌دنده می‌باشد 0B1e4 مربوط به چرخ‌دنده سالم، 9B1e4 مربوط به چرخ‌دنده با یک دندانه سائیده شده می‌باشد که در راهمونیک پنجم افزایش دامنه تقریباً دو برابری مشاهده می‌گردد. خصوصیات ذکر شده برای داده‌های موقعیت دو و سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه و سرعت ۷۴۹ دور بر دقیقه هم مشاهده گردید.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش ارائه شده در تصدیق مطالعات قبلی نشان می‌دهد که روش تحلیل کپستروم یک روش مفید جهت تشخیص عیوب جعبه‌دنده می‌باشد. در این مطالعه از سیگنال‌های به‌دست‌آمده از امواج صدای جعبه‌دنده استفاده شده است. ویژگی‌های مد نظر از پردازش سیگنال در حوزه کپستروم به‌دست آمدند. با مقایسه بین حالت سالم و معیوب هر چرخ‌دنده مشخص شد که در بازه ۰ تا ۰/۰۰۰۲ ثانیه می‌توان با استفاده از راهمونیک اول و پنجم به ترتیب عیوب شکستگی یک دندانه و سائیدگی یک دندانه را تشخیص داد؛ همچنین مشخص شد کاهش سرعت دورانی محور ورودی و همچنین تغییر موقعیت داده‌برداری تأثیری در روند تشخیص عیب ایجاد نخواهد داشت. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد می‌توان از روش تحلیل کپستروم به‌منظور پیش وضعیت جعبه‌دنده استفاده نمود.

۵- منابع

- [1] Q. He, F. Kong, R. Yan, Subspace-based gearbox condition monitoring by kernel principal component analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 4, pp. 1755–1772, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.07.014>
- [2] R. Lu, M. R. Shahriar, P. Borghesani, R. B. Randall, Z. Peng, Removal of transfer function effects from transmission error measurements using cepstrum-based operational modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 165, p. 108324, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108324>
- [3] J. Huang, X. Zhang, Vibration fault identification of a turbojet engine based on cepstrum analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 236, No. 10, pp. 1961–1970, 2022. <https://doi.org/10.1177/09544100211047788>
- [4] H. Wang, Z. Li, X. He, D. Song, H. Guo, A novel acoustic emission parameter for predicting rock failure during Brazilian test based on cepstrum analysis, *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, p. 01004, 2020. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202019201004>
- [5] Y. Liu, Z. Jiang, H. Haizhou, J. Xiang, Asymmetric penalty sparse model based cepstrum analysis for bearing fault detections, *Applied Acoustics*, Vol. 165, p. 107288, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107288>
- [6] H. Illias, G. Altamimi, N. Mokhtar, H. Arof, Classification of multiple partial discharge sources in dielectric insulation material using Cepstrum analysis-artificial neural network, *IEEEJ*

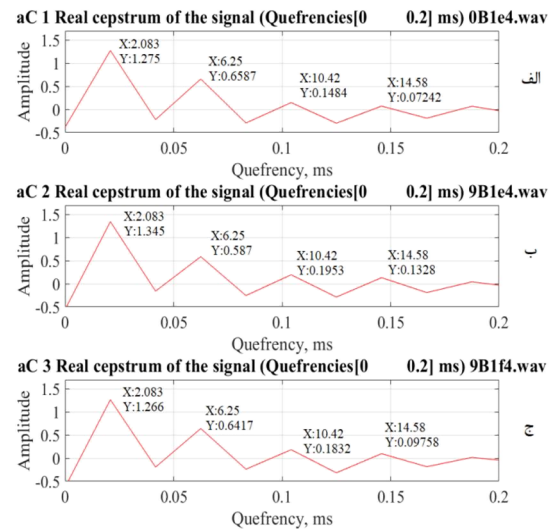


Fig. 13 Fault diagnosis of a worn tooth, increasing the fifth rahmonic amplitude

شکل ۱۳ تشخیص عیب سائیدگی یک دندانه، افزایش دامنه راهمونیک پنجم

در خصوص ترکیب دو عیب شکستگی یک دندانه و سائیدگی یک دندانه ترکیبی از خصوصیات شکستگی و سائیدگی یک دندانه مشاهده می‌شود. در شکل ۱۴ که مربوط به سرعت ۱۴۹۶ دور بر دقیقه می‌باشد، 0D1e4 مربوط به چرخ‌دنده سالم، 9D1e4 مربوط به چرخ‌دنده معیوب (شامل یک دندانه شکسته و یک دندانه سائیده شده) و 9D1f4 مربوط به آزمایش شاهد چرخ‌دنده معیوب می‌باشد که در مورد اخیر هم افزایش دامنه راهمونیک اول و هم افزایش دامنه در راهمونیک پنجم به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

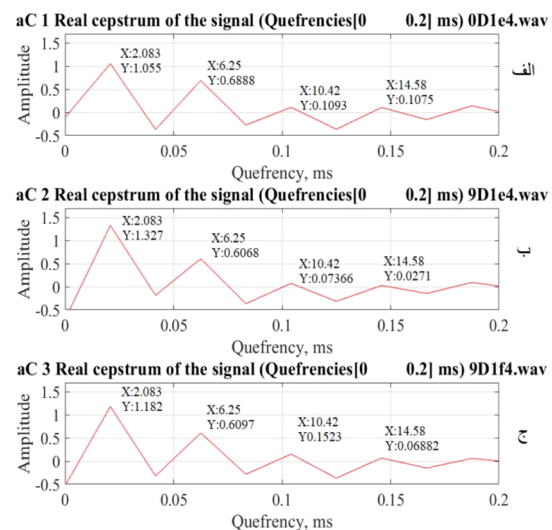


Fig. 14 Fault diagnosis of the fractured tooth and worn tooth, increasing the amplitude of the first and fifth rahmonics

شکل ۱۴ تشخیص عیب سائیدگی و شکستگی، افزایش دامنه راهمونیک‌های اول و پنجم

- Cyclostationarity and the cepstrum for operational modal analysis of mimo systems—Part I: Modal parameter identification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 6, pp. 2441–2458, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.11.008>
- [10] M. El. Badaoui, F. Guillet, J. Danière, New applications of the real cepstrum to gear signals, including definition of a robust fault indicator, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, No. 5, pp. 1031–1046, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.01.005>
- [11] P. Bogert B, The quefrency alanalysis of time series for echoes; Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking, *Time Series Analysis*, pp. 209-243, 1963. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570009749540907648>
- Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 357–364, 2017. <https://doi.org/10.1002/tee.22385>
- [7] B. Liang, S. D. Iwnicki, Y. Zhao, Application of power spectrum, cepstrum, higher order spectrum and neural network analyses for induction motor fault diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 39, No. 1–2, pp. 342–360, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.02.016>
- [8] H. Z. Wu, H. K. Ge, D. H. Yang, B. Lu, L. J. Han, M. A. Wel, Research on cepstrum analysis of drill string vibration and extraction of bit source signals, *Chinese Journal of Geophysics*, Vol. 53, No. 4, pp. 684–692, 2010. <https://doi.org/10.1175/0077JHM863.1>
- [9] D. Hanson, R. B. Randall, J. Antoni, D. J. Thompson, T. P. Waters, R. A. J. Ford,