مقاله

# قابلیت آنالیز ارتعاشات برای شناسایی خرابی چرخ‌دنده‌های آسیا مطالعه موردی در کارخانهٔ فرآوری مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر


سید مجتبی مداحی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان
madahimojtaba@gmail.com

اکبر جعفری*
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی سیرجان
jafari@sirjantech.ac.ir

رحیم ستوده بحرینی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
سرپرست واحد پایش وضعیت، مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر
rahim.sotoudeh@yahoo.com



تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۱



## چکیده

در این مقاله نتایج تحقیقی در رابطه با کاربرد روش ارتعاش‌سنجی از مجموعه روش‌های پایش وضعیت در پیش‌بینی عیوب محتمل در آسیای نیمه‌خودشکن ارائه شده است. در واقع در این مقاله از روش مذکور به‌طور خاص برای عیب‌یابی چرخ‌دنده‌های سیستم محرکه تجهیز استفاده شده است. داده‌برداری‌های انجام‌شده در حوزهٔ زمان است که با استفاده از تبدیل فوریهٔ سریع به حوزهٔ فرکانس منتقل شده است. با مطالعهٔ نتایج در حوزهٔ فرکانس مشخص شد که فرکانس‌های ظاهرشده به هارمونیک‌های اجزای مختلف از جمله الکتروموتور، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها مربوط می‌شود. با تفسیر نمودارهای روند دامنهٔ ارتعاشات به‌همراه تفسیر طیف فرکانس‌ها، وجود سایش در یکی از دنده‌ها پیش‌بینی گردید و به‌دنبال آن، بازرسی عینی این پیش‌بینی را تأیید نمود. با توجه به شدت سایش، برای جلوگیری از صدمه‌دیدن سایر اجزا، دندهٔ معیوب تعویض گردید. با این‌وجود، بعد از تعویض دندهٔ معیوب، داده‌برداری‌های ارتعاشی وجود نقص دیگری را در سیستم پیش‌بینی نمود که با نوع قبلی متفاوت بود. با تفسیر اطلاعات به‌دست آمده، عدم نصب صحیح و همچنین عدم سازگاری دندهٔ جدید با دندهٔ مقابل به‌عنوان دلائل احتمالی وجود مشکل معرفی گردید. در ادامه، با رفع مشکلات نصب، روند دامنه و همچنین طیف فرکانس‌ها به وضعیت طبیعی نزدیک گردید.

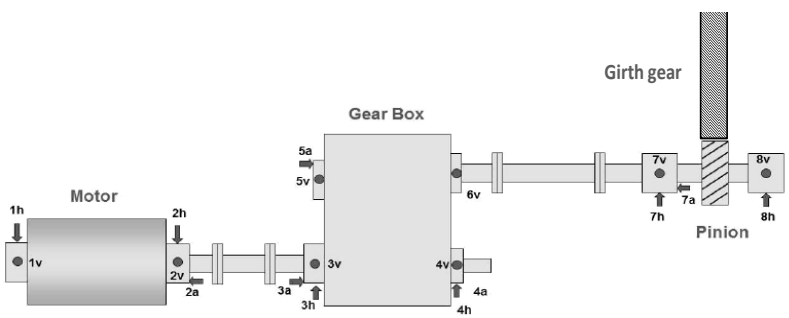


**واژگان کلیدی:** پایش وضعیت، ارتعاش‌سنجی، VCM، آسیای خودشکن، چرخ دنده


## ۱. مقدمه

همان‌گونه که برای تشخیص بیماری یک موجود زنده آزمایشات متنوعی انجام می‌شود؛ در تشخیص عیوب یک ماشین نیز اندازه‌گیری‌های متنوعی چون ثبت نوسانات و ارتعاشات، اندازه‌گیری میزان صدا، ثبت دما، ثبت فشار روغن، آنالیز عنصری روغن و جز این‌ها قابل انجام است. البته استفاده از این روش‌ها پس از بروز عیب موفقیت

کمتری داشته و در عمل باید ثبت این اطلاعات به‌صورت پیوسته در دوره‌های منظم انجام شود که در اینجا پایش وضعیت پیوسته نامیده می‌شود. در حقیقت، به‌کمک این نوع پایش، امکان رصد تغییرات کمیات مورد اندازه‌گیری وجود دارد؛ زیرا گاهی مقدار مرجع مشخصی برای کمیت‌های اندازه‌گیری شده قابل بیان نیست؛ بلکه تغییرات آن تعیین‌کنندهٔ وضعیت تجهیز است. مزیت دیگر پایش وضعیت پیوسته، تشخیص سریع عیوب و پیشگیری از گسترش آن است که به‌طور خلاصه می‌توان گفت نقش پیش‌بینانه دارد و راهکار مناسبی برای پیش‌گیری محسوب می‌شود. مرور مراجع منتشرشده نشان می‌دهد که تاکنون از روش ارتعاش‌سنجی، تجهیزات متنوعی مورد مطالعه و پایش قرار گرفته و قابلیت این روش اثبات شده است. به‌عنوان نمونه، بهزاد و همکاران از این روش برای پیش‌بینی وضعیت پمپ‌ها استفاده نموده‌اند [۱-۲]. خیری و همکاران نیز از آنالیز ارتعاشات در تحلیل عیوب پیش‌آمده در طی کارکرد فن‌های نیروگاه استفاده کرده‌اند [۳]. در تحقیق دیگری، کندی و دیلمی از ارتعاش‌سنجی در تحلیل وضعیت پمپ‌های مورد استفاده در نیروگاه استفاده نمودند [۴]. جعفری و همکاران از روش ارتعاش‌سنجی برای عیب‌یابی و همچنین اصلاح نصب پمپ‌های کارخانه گندله‌سازی آهن استفاده کردند [۵]. وزیری سرشک از آنالیز ارتعاشات به‌همراه تحلیل نظری برای اصلاح هندسهٔ پره‌های فن استفاده نمود [۶]. از جمله کاربردهای ارتعاش‌سنجی تشخیص اشکالات حین کارکرد جعبه‌دنده‌ها است که در برخی موارد بدون بازکردن آن می‌توان عیوب را پیش‌بینی نمود [۷-۹]. با این مقدمه، در جهت بهبود عملکرد تجهیزات و کاهش صدمات ناشی از خرابی و توقفات مربوطه، در مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر از ابزارهای متنوعی برای پایش وضعیت تجهیزات استفاده می‌شود. مقالهٔ حاضر به قسمتی از تحقیق مربوط به پایش وضعیت چرخ‌دنده‌های سیستم محرکه آسیای هوایی[1] در کارخانه فرآوری مجتمع، به‌ویژه با رویکرد ارتعاش‌سنجی اختصاص دارد. خردایش مواد در هر فرایند فرآوری اولین مرحلهٔ عملیاتی است و البته از لحاظ هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه و نیز هزینهٔ جاری در ردیف پرهزینه‌ترین بخش در فرایندهای فرآوری قرار دارد. معمولاً دست‌یابی به درجهٔ آزادی مناسب با استفاده از روش‌های سنگ‌شکنی مقدور نیست و نیاز است تا خردایش مواد معدنی در آسیاهای چرخان انجام شود. در آسیای خودشکن، خردایش مادهٔ معدنی در اثر برخورد مستقیم بین ذرات با اندازه‌های مختلف موجود در خوراک و نیز دیوارهٔ داخلی آسیا انجام می‌شود. از طرفی، در آسیاهای نیمه‌خودشکن برای افزایش نرخ کاهش ابعاد ذرات، گلوله‌هایی با جنس سخت نیز به داخل آسیا اضافه می‌شود و خردایش را تسریع و تشدید می نماید [۱۰]. در شکل ۱ نمایی از قسمت مولد قدرت آسیای مورد تحقیق جاری نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، حرکت دورانی پینیون که از طریق اتصال به یک الکتروموتور تأمین می‌گردد سبب چرخش چرخ‌دندهٔ حلقوی[2] شده که به محفظهٔ آسیا متصل است. در واقع محفظهٔ آسیا به‌همراه چرخ‌دندهٔ حلقوی روی یاتاقان‌های کفشکی (قطاعی) قرار داشته و محور آن معلق است [۱۱].




شکل ۱. نمایی شماتیک از نحوهٔ قرارگیری موتور، جعبه‌دنده و پینیون آسیا

این دستگاه به‌دلیل شرایط کاری سخت ممکن است دچار مشکلات پیش‌بینی نشده و جدی گردد و به‌دنبال آن باعث توقفات طولانی دستگاه و کاهش تولید و هزینه‌های سنگین تعمیرات شود. از اینرو پایش پیوستهٔ تجهیز به روش‌های متنوع در دستور کار قرار گرفته است. در این رابطه، پیشتر ستوده بحرینی و همکاران با استفاده از آنالیز روغن به پایش وضعیت یاتاقان‌های قطاعی این تجهیز پرداخته و دلائل بروز مشکلات مربوطه را با این روش مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. یکی دیگر از قسمت‌های حساس این تجهیز، مجموعهٔ پینیون و چرخدندهٔ حلقوی آسیا می‌باشد که حرکت دورانی تجهیز را فراهم می‌نمایند. به‌علت بزرگ بودن چرخدنده (قطر بیش از یازده متر) این مجموعه یک جعبه‌دندهٔ باز را تشکیل می‌دهد که شرایط کاری و تنظیمات آن به‌مراتب پیچیده‌تر از جعبه‌دنده‌های بسته است. حال این سئوال مطرح می‌شود که آیا آنالیز ارتعاشات می‌تواند در چنین مجموعه‌ای - که در شرایط نسبتاً پیچیده کار می‌کند - راهکار مناسبی برای عیب‌یابی باشد. دلیل استفاده از واژهٔپیچیده این است که عوامل متعددی بر عملکرد سیستم تأثیرگذارند. به‌عنوان نمونه، منابع متنوعی از جمله الکتروموتور، جعبه‌دندهٔ واسطه، یاتاقان‌ها، کوپلینگ‌ها و البته حرکات ضربه‌ای خردایش برای بروز سیگنال‌های ارتعاشی وجود دارد که می‌توانند روی هم اثر متقابل داشته باشند.

اطلاعات فنی و شرایط کاری قسمت‌های گوناگون این مجموعه بدین شرح می‌باشد:

۱. موتور الکتریکی با توان نامی ۳۰۰۰ کیلووات و سرعت دورانی ۹۹۰ دور بر دقیقه

۲. جعبه‌دندهٔ اولیه با یک مرحله تغییر دور با توان نامی ۳۰۰۰ کیلووات، سرعت دورانی محور ورودی ۹۹۰ دور بر دقیقه (۱۶/۵ هرتز) و محور خروجی ۱۹۵/۹۳ دور بر دقیقه (۳/۲۶۵۶ هرتز) و به بیانی نسبت انتقال ۱ به ۵/۰۵۸۲. چرخدنده‌های جعبه‌دنده از نوع مارپیچ دارای تعداد دندهٔ ۹۶ و ۱۹ می‌باشد.

۳. چرخدنده‌های پینیون و حلقوی از نوع مارپیچ با مدول نرمال ۳۰ میلی‌متر، زاویهٔ مارپیچ ۱۲ درجه، پهنای ۵۰۸ میلی‌متر بوده و به‌ترتیب دارای تعداد دندانهٔ ۲۳ و ۳۷۲ می‌باشند. سرعت چرخش پینیون ۱۹۵/۹۳ دور بر دقیقه (۳/۲۶۵۶ هرتز) و با توجه به نسبت انتقال ۲۳/۳۷۲، سرعت چرخش چرخدندهٔ حلقوی ۱۲/۱۱ دور بر دقیقه (۰/۲۰۱۹ هرتز) به‌دست می‌آید.

۴. بیرینگ‌های دو سمت پینیون، از نوع غلتشی با شمارهٔ 23264 CAK هستند.

## ۲. آنالیز ارتعاشات

برای استفاده مؤثر و مفید از روش آنالیز ارتعاشات بایستی اطلاعات کافی در مورد عوامل متنوع بروز ارتعاش و نوفه در سیستم فراهم گردد. در سیستم مورد مطالعهٔ جاری، اجزای متنوعی چوت الکتروموتور، جعبه‌دندهٔ اولیه متشکل از یک جفت دنده، جفت دندهٔ پینیون - چرخدندهٔ حلقوی، یاتاقان‌های غلتشی و یاتاقان‌های لغزشی نگه‌دارندهٔ تایرهای آسیا می‌توانند منشأ سیگنال‌های ارتعاشی باشند. در اینجا هشت نقطهٔ مختلف مطابق با نامگذاری شکل ۱ بر روی مجموعه تعریف گردید و به‌صورت دوره‌ای و پیوسته داده‌برداری ارتعاشی انجام گردید. در واقع در هر نقطهٔ معرفی‌شده در سه راستای عمودی[۳]، افقی[۴] و محوری[۵] اندازه‌گیری‌ها انجام شد. برای برداشت اطلاعات از حسگر شتاب‌سنج پیزوالکتریک با ضریب حساسیت ۱۰۰ *mv/g* استفاده گردید. از نقطه‌نظر بازهٔ فرکانس‌های ثبت‌شده، در ابتدا تاریخچهٔ اطلاعات ثبت‌شده مورد بازبینی قرار گرفت تا محدودهٔ فرکانس‌هایی که به‌طور معمول در آنها ظاهر شده مشخص گردد. براساس نتایج این بررسی، بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز برای ثبت انتخاب گردید. البته در مواردی برای اطمینان از عدم گم‌شدن فرکانس‌های احتمالی بازه‌های بزرگتری نیز برای ثبت انتخاب شد. لازم به‌ذکر است که برای داده‌برداری از پنجرهٔ *Hannig* استفاده شده

است. داده‌های ارتعاشی معمولاً پایدار نیستند و تغییر می‌کنند، لذا در این مقاله ۴ نمونه برداشت و سپس میانگین‌گیری انجام شده است. سخت‌افزار اجرای این تحقیق، دستگاه ارتعاش‌سنجی *RoZh* مدل *V4* بوده و اطلاعات برداشت‌شده برای پردازش به نرم‌افزار واسطه تحلیل ارتعاشی *MRS3000* منتقل گردید. لازم به‌ذکر است که سرعت ثبت اطلاعات دستگاه به‌گونه‌ای بوده که دقت یا به بیانی دیگر رزولوشن[۶] آن در حوزهٔ فرکانس ۰/۱۵ هرتز است. داده‌برداری سیگنال ارتعاشی به‌دست آمده در زمان‌های مختلف در حافظهٔ دستگاه و همچنین نرم‌افزار ذخیره شد تا در نهایت بتوان تمامی نتایج ارتعاشی را با هم مقایسه و آنها را تفسیر نمود. در هر بار داده‌برداری طی حدود ۵۰ ثانیه اطلاعات ارتعاشی ثبت و با استفاده از تحلیل فوریهٔ سریع به حوزهٔ فرکانس منتقل گردید.

به‌علاوه، در کنار اطلاعات پایش وضعیت، پروندهٔ سابقهٔ رخدادهای مختلف در بازهٔ زمانی طولانی از کارکرد تجهیز نیز در اینجا بازبینی و رصد گردید. در واقع می‌توان گفت که ثبت و مرور این پرونده کارآیی روش پایش وضعیت را افزایش می‌دهد و به بیانی دیگر مکمل یکدیگر می‌باشند. در جدول ۱ نمونه‌ای از خلاصه‌سازی اطلاعات پروندهٔ سابقهٔ تجهیز ذکر داده شده است. البته باید یادآوری نمود که برنامهٔ کامپیوتری لازم برای ثبت این اطلاعات تهیه شده که بتوان حجم زیاد اطلاعات را مدیریت و پردازش نمود. یکی از کارکردهای این ثبت اطلاعات، اعلام زمان‌های ضروری انجام پایش وضعیت در بازه‌های کوتاه پس از پایان توقف و راه‌اندازی مجدد تجهیز است.

## ۳. تفسیر داده‌ها و بحث

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، اطلاعات در دو حوزهٔ زمان و فرکانس ثبت شده و در اختیار می‌باشند. هرچند مطالعهٔ اطلاعات در حوزهٔ فرکانس راه‌کاری سریع و نسبتاً مؤثر است، اما در یک تحلیل ارتعاشی کامل بایستی به‌طور همزمان داده‌ها در دو حوزهٔ زمان و فرکانس بررسی و تفسیر شوند. با مرور فرکانس‌های مختلف ارتعاشی مشخص می‌شود که هرچند نوفه‌های زیادی در حوزهٔ زمان وجود دارد، اما فرکانس‌های موجود تفکیک‌شده در حوزهٔ فرکانس عمدتاً مرتبط با هارمونیک‌های ایجادشده ناشی از حرکت اجزای مختلف می‌باشد. از جمله می‌توان به فرکانس درگیری چرخ‌دندهٔ پینیون با چرخ‌دندهٔ حلقوی اشاره کرد که در همهٔ نقاط حتی در فاصلهٔ دور از آن نیز ظاهر شده است.

جدول ۱. نمونه‌ای از خلاصه‌سازی پروندهٔ سابقهٔ تجهیز

| تاریخ شروع توقف | مدت توقف (ساعت) | علت توقف | اقدام انجام‌شده | تاریخ آخرین پایش وضعیت قبلی |
|---|---|---|---|---|
| ۱۳۹۳/۱/۲۳ | ۱۶ | سایش بیش از حد پینیون | تعویض پینیون | ۱۳۹۳/۱/۲۰ |
| ۱۳۹۳/۱/۲۹ | ۸ | عدم هم‌محوری دنده‌ها | تنظیم پینیون با چرخ‌دندهٔ حلقوی | ۱۳۹۳/۱/۲۷ |
| ۱۳۹۳/۳/۱۳ | ۸ | تعویض بشکهٔ گریس | تعویض بشکهٔ گریس | ۱۳۹۳/۵/۳ |

در یک تحلیل ارتعاشی، مطالعهٔ تغییرات دامنهٔ کلی ارتعاش در طی زمان کارکرد تجهیز می‌تواند راهکار مناسبی برای تشخیص سریع نقص در سیستم باشد. برای این منظور روند تغییرات دامنهٔ کلی ارتعاش[۷] در نقاط مختلف و البته در هر سه راستا مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که در بین آنها، دامنهٔ ارتعاش نقطهٔ ۷ به‌مرور افزایش یافت؛ در حالی‌که بقیه دچار تغییرات قابل توجهی نشده‌اند. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۲ نشان داده شده است، بعد از

تاریخ ۱۳۹۳/۱/۱۰ دامنهٔ ارتعاش در هر سه راستا به‌تدریج افزایش یافته تا جایی‌که در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۰ این میزان به‌حدود دو برابر تاریخ داده‌برداری قبلی رسیده است. با این اوصاف با دقت مضاعف به بررسی وضعیت این نقطه و مقایسهٔ آن با سایر نقاط پرداخته شد. با توجه به راستای زاویهٔ مارپیچ پینیون و همچنین جهت چرخش آن، نیروی محوری القایی همواره از نقطهٔ ۸ به‌سمت نقطهٔ ۷ است، لذا یاتاقان نقطهٔ ۷ علاوه بر ظرفیت تحمل بار شعاعی، وظیفهٔ تحمل بار محوری را نیز برعهده دارد؛ در حالی‌که شانهٔ محور در محل تکیه‌گاه نقطهٔ ۸ به‌گونه‌ای بوده که در راستای محوری آزاد است. این شرایط تکیه‌گاهی می‌تواند عامل بزرگ‌بودن کلی دامنهٔ ارتعاش نقطهٔ ۷ نسبت به سایر نقاط باشد. از طرفی با مرور سابقهٔ تجهیز مشخص شد که این یاتاقان بیشترین آمار خرابی را در بین اجزای تجهیز به خود اختصاص داده است.

حال سئوال این است که چه عاملی می‌تواند سبب بروز این وضعیت شده باشد؟ برای پاسخ به این سئوال نمودارهای طیف فرکانسی نقاط مختلف و البته نقطهٔ ۷ مورد بررسی قرار گرفت. هارمونیک‌های متناظر با بیرینگ‌ها و همچنین جفت چرخدنده پینیون – چرخدندهٔ حلقوی به‌شرح زیر محاسبه می‌شوند.

فرکانس درگیری چرخدنده یا *GMF* برابر با تعداد دندانه در سرعت چرخش محور است. در تجهیز مورد مطالعه یک جعبه‌دندهٔ اولیه وجود دارد که فرکانس متناظر با آن از رابطهٔ ۱ برابر با ۳۱۳/۵ هرتز به‌دست می‌آید.

$$GMF = T.N(Hz) \qquad (۱)$$

$$19\times 16.5 = 3.265625\times 96 = 313.5Hz$$

در رابطهٔ۱ مقدار ۱۹ و ۹۶ به‌ترتیب برابر تعداد دندانه‌های چرخدنده اول و دوم درون جعبه‌دنده بوده و ضرایب هر یک، سرعت چرخش آنها برحسب هرتز است. به‌روشی مشابه فرکانس اول در جعبه‌دندهٔ دوم؛ یعنی ارتباط پینیون با چرخدندهٔ حلقوی از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود.

$$GMF = T.N(Hz)$$

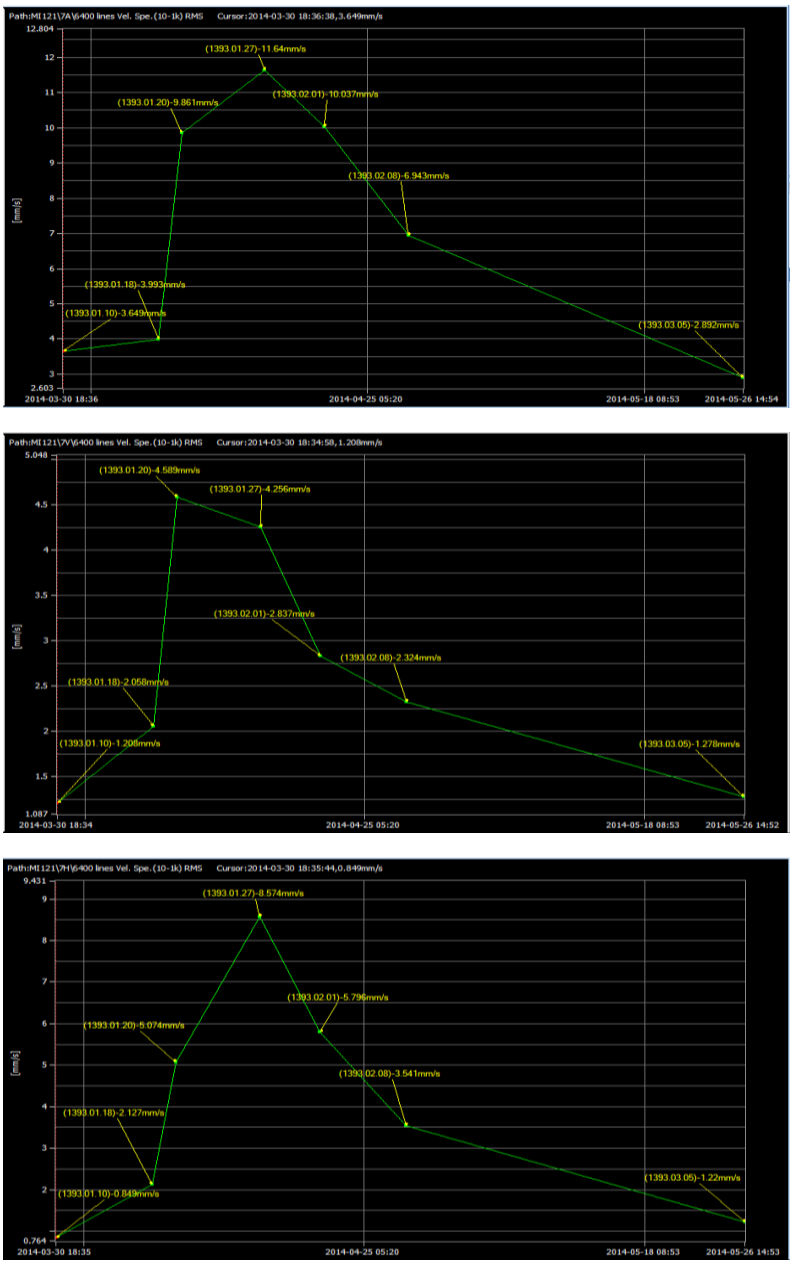
$$23\times 3.265625 = 372\times 0.1907 = 75.11Hz$$

در رابطهٔ اخیر ۲۳ و ۳۷۲ به‌ترتیب تعداد دندانه‌های پینیون و چرخدندهٔ حلقوی بوده و ضرایب آنها سرعت هرکدام برحسب هرتز است. فرکانس خرابی بیرینگ‌ها با استفاده از فزار اس. کا. اف.[۸] به‌دست آمده‌اند و نتایج نهایی آن به شرح جدول ۲ است. نمودارهای طیف فرکانسی ارتعاشات در راستاهای محوری، عمودی و افقی در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۰ در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که دومین هارمونیک *GMF* دارای دامنهٔ بیشتری نسبت به خود *GMF* و هارمونیک سوم آن است. با مرور الگوهای ارتعاشی گزارش‌شده در مراجع به‌ازای خرابی‌های مختلف چرخدنده‌ها [۱۳-۱۴] نتیجه می‌شود که این شکل‌ها با الگوی فرکانسی مشکلاتی از نوع لقی اضافی[۹] و همچنین سایش دنده‌ها مطابقت نزدیکی دارد. با این‌حال، با دقت بیشتر مشخص می‌شود که در اطراف فرکانس *GMF* و ضرایب دوم و سوم آن فرکانس‌های جانبی نسبتاً متقارن بروز نموده‌اند که احتمال وجود سایش را تقویت می‌نماید.

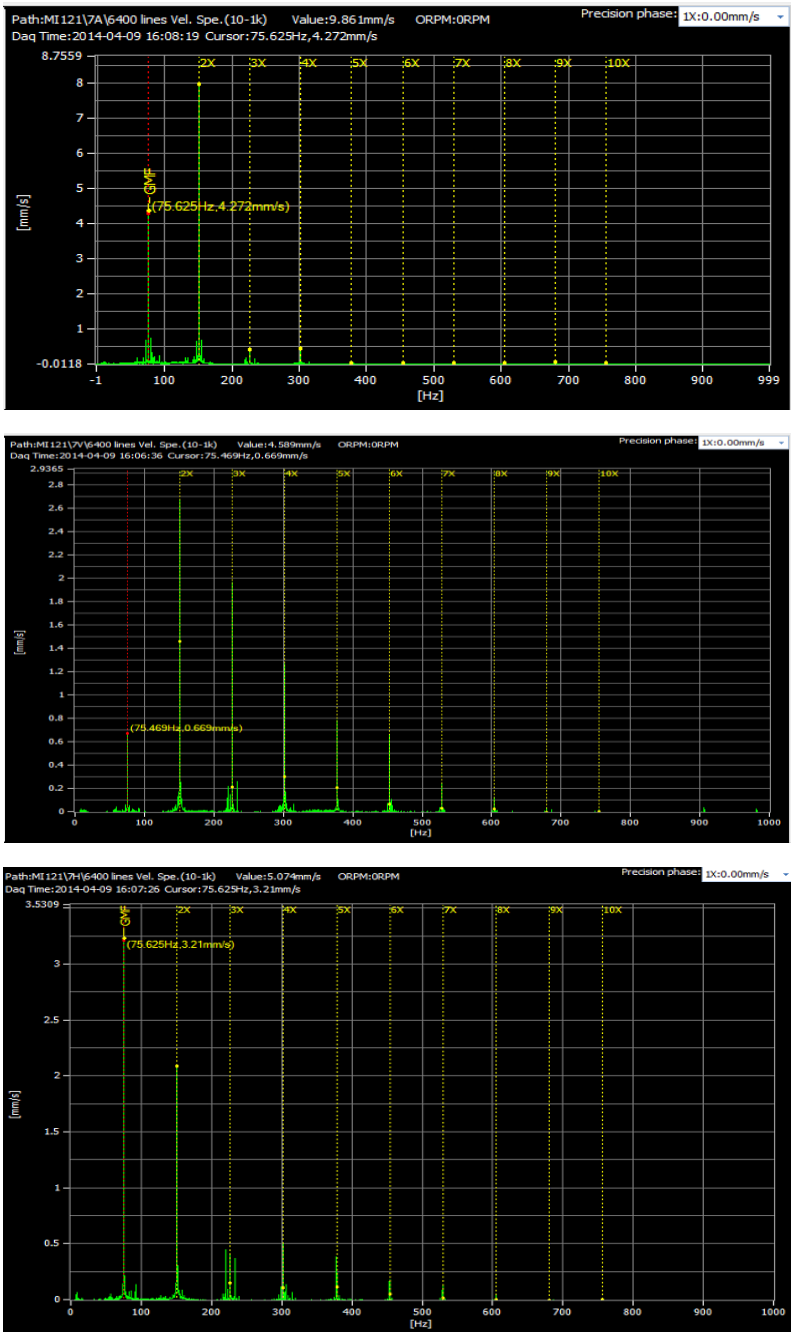
با توقف تجهیز و بررسی ظاهری دندانه‌های پینیون و چرخدندهٔ حلقوی مشخص شد که مطابق شکل ۴ دندانه‌های پینیون دچار ساییدگی شدید شده‌اند. با مقایسهٔ شکل این دندانه‌ها با دندانهٔ سالم، که در همین شکل آورده شده، میزان ساییدگی کاملاً محسوس بوده؛ به‌گونه‌ای که ضخامت دندانه روی تاج آن از مقدار طبیعی ۱۲ میلی‌متر به مقدار حدود ۳ تا ۴ میلی‌متر است. در عمل، این میزان سایش سبب افزایش لقی جانبی و به‌دنبال آن پس‌زنی شده و درگیری نامناسب آنها را به‌همراه داشته است. این حد از خرابی و نازک‌شدن دندانه می‌تواند منجر به شکست آن شده و به‌علاوه احتمال آسیب‌دیدگی چرخدندهٔ حلقوی بزرگ را زیاد می‌کند. از اینرو، از ادامهٔ کارکرد آن جلوگیری و پینیون در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۲ تعویض شد.

جدول ۲. فرکانس‌های مختلف بیرینگ‌های موجود در تجهیز (برحسب هرتز)

| نوع و محل بیرینگ | FRP | FEP | FIP |
|---|---|---|---|
| بیرینگ‌های دو طرف پینیون | 23 | 25.4 | 33.4 |
| بیرینگ 23072cc/w33 موجود در جعبه‌دندهٔ اولیه | 34.1 | 41.4 | 50 |
| بیرینگ 240QjN2MA موجود در جعبه‌دندهٔ اولیه | 110 | 138 | 176 |
| بیرینگ 2240Nu ECMA/C3 موجود در جعبه‌دندهٔ اولیه | 109 | 119 | 161 |



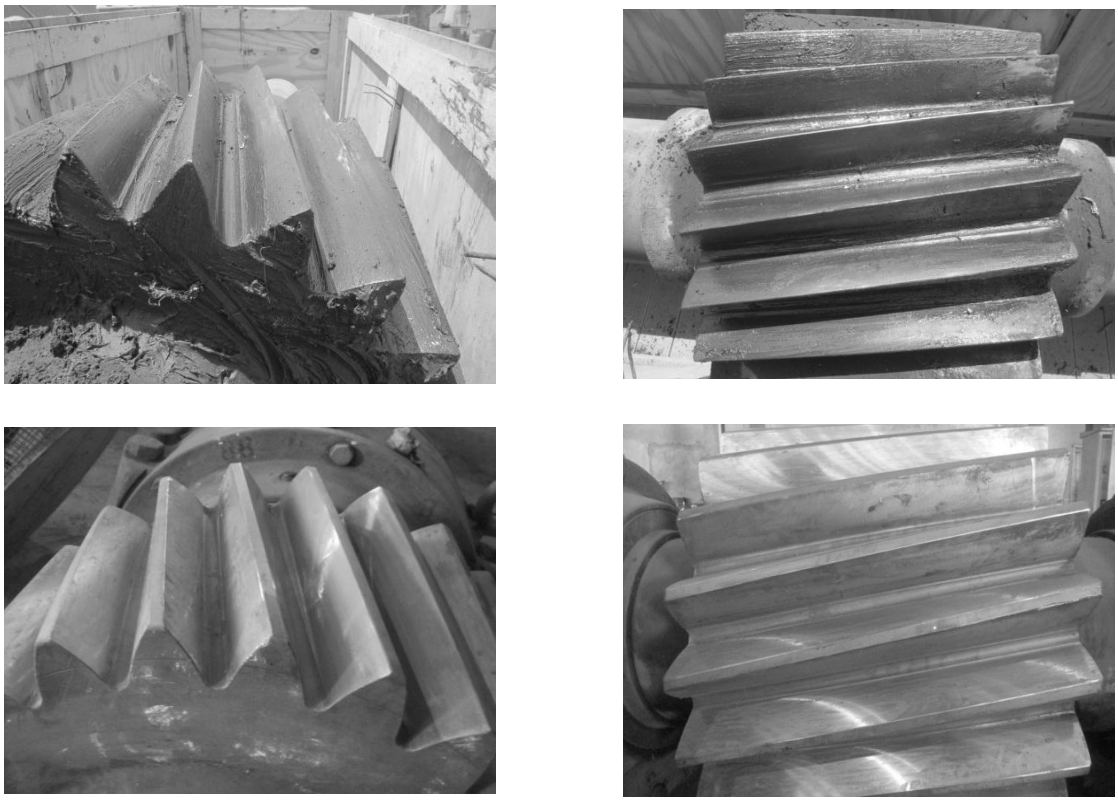

شکل ۲. نمودارهای ترند دامنهٔ ارتعاشی نقطهٔ داده‌برداری ۷ در راستاهای محوری: بالا، عمودی: وسط و افقی: پایین



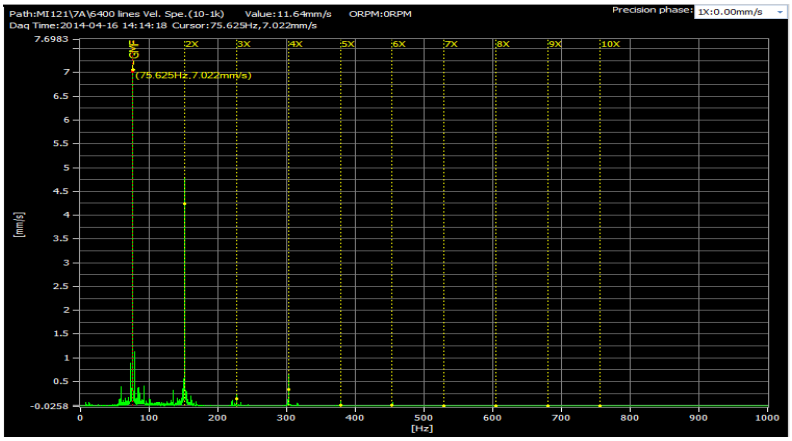

شکل ۳. نمودارهای طیف فرکانسی نقطهٔ داده‌برداری ۷ در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۰ در راستاهای محوری: بالا، عمودی: وسط و افقی: پایین

با تعویض پینیون، دامنهٔ ارتعاش در راستای عمودی کاهش یافته، اما کماکان در منحنی روند دامنهٔ ارتعاش، در راستاهای محوری و افقی افزایش دامنه ملاحظه گردید. باید یادآوری نمود که پینیون جدید نصب‌شده دارای پروفیل دندانهٔ استاندارد است، اما چرخ‌دندهٔ حلقوی مقابل که تعویض نشده، مقداری هرچند اندک ساییدگی دارد. بدین‌ترتیب، چرخ‌دندهٔ پینیون جدید با چرخ‌دندهٔ حلقوی موجود کاملاً سازگار نبوده که می‌تواند دلیلی برای بروز دامنهٔ ارتعاش نسبتاً زیاد و عدم کاهش دامنه باشد. با این‌همه، برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر، طیف‌های فرکانسی برداشت‌شده مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵ نمودار طیف فرکانسی نقطهٔ ۷ در راستای محوری مربوط به تاریخ

۱۳۹۳/۱/۲۷ نشان داده شده است. از ویژگی‌های شاخص در این نمودار، وجود فرکانس‌های جانبی[۱۰] در دو طرف سه هارمونیک اول است (تا حدی مشابه حالت قبل از تعویض پینیون) اما دقت بیشتر نشان می‌دهد که در اینجا این فرکانس‌های جانبی در دو طرف هر کدام از پیک‌ها کاملاً غیرمتقارن است و در هارمونیک اول، دامنهٔ هارمونیک‌های جانبی سمت راست بزرگتر از دامنهٔ سمت چپ است. با مقایسهٔ این نمودار با الگوهای شناخته‌شده می‌توان احتمال نقص‌هایی چون خروج از مرکزی یکی از چرخ‌دنده‌ها و البته با احتمال بیشتر ناهم‌محوری را پیش‌بینی نمود [۱۳-۴].

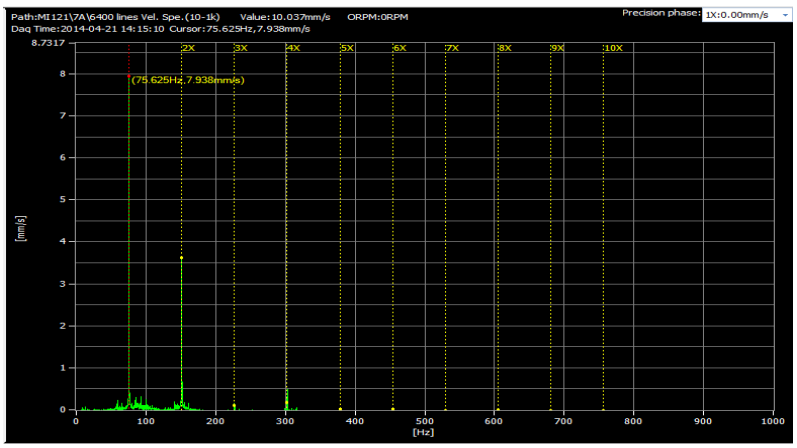


شکل ٤. تصاویری از پینیون با دنده‌های ساییده شده: بالا و دندهٔ سالم: پایین




شکل ۵. طیف فرکانس‌های ارتعاش محوری نقطهٔ ۷ در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۷

با هم‌محور کردن چرخ‌دنده‌ها به‌وسیلهٔ تنظیم پایه‌های بیرینگ‌های دو طرف پینیون و سازگار شدن تدریجی پینیون و چرخ‌دندهٔ حلقوی بعد از تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۷ دامنهٔ ارتعاشات با شیب زیادی سیر نزولی به‌خود گرفته است و در تاریخ ۱۳۹۳/۳/۵ روند دامنهٔ ارتعاشات در هر سه راستا به‌حد طبیعی و مجاز رسیده است. برای بررسی بیشتر، طیف فرکانس‌های ارتعاش محوری نقطهٔ ۷ مربوط به تاریخ ۱۳۹۳/۲/۱ در شکل ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود که هارمونیک اول بزرگتر از بقیه ظاهر شده است که حالتی طبیعی در الگوی فرکانسی چرخ‌دنده‌ها می‌باشد. با این‌همه، وجود هارمونیک دوم و البته نوسانات جانبی دو طرف پیک‌ها همچنان می‌تواند نشان از وجود ساییدگی در دندانه‌های چرخ‌دندهٔ حلقوی باشد، اما تقارن در شانه‌های پیک‌ها نشان‌دهندهٔ رفع ناهم‌محوری است.




شکل ٦. طیف فرکانس‌های ارتعاش محوری نقطهٔ ۷ در تاریخ ۱۳۹۳/۲/۱

## ٤. نتیجه‌گیری

در این مقاله آنالیز ارتعاشات، در پایش‌وضعیت اجزای یک آسیای نیمه‌خودشکن مخصوص خردایش سنگ آهن مورد استفاده قرار گرفت. هرچند ضربات ناشی از خردایش سبب بروز نوفه در داده‌های ارتعاشی شده، اما اطلاعات در حوزهٔ فرکانس با کیفیت مناسبی قابل استناد بودند. با این‌همه مشخص شد که ثبت سابقهٔ تجهیز، خلاصه‌سازی و رصد آن در تفسیر و بهره‌برداری بهتر از داده‌های ارتعاشی بسیار سودمند است و می‌تواند در تشخیص بهتر عیوب مؤثر باشد. در عمل مشخص شد که برای تفسیر اطلاعات ارتعاشی برداشت‌شده از سیستمی که منابع مختلفی برای بروز ارتعاشات وجود دارد بایستی دقت بیشتری صرف شود و برای این منظور باید بانک کامل انواع هارمونیک‌های سیستم با دقت تهیه گردد. با توجه به اینکه در اینجا تمرکز بر روی مطالعهٔ موردی خرابی چرخ‌دنده بوده، به‌نظر می‌رسد که تحقیقی جامع یا یک مرور از انواع مطالعات موردی برای سامان‌دهی و تکمیل انواع الگوهای فرکانسی مربوط به خرابی چرخ‌دنده‌ها ضروری باشد؛ زیرا بعضی عیوب دارای علائم ارتعاشی نزدیک به‌هم هستند و در اختیار بودن جزئیات بیشتر از انواع الگوها می‌تواند در تشخیص سریع‌تر و صحیح‌تر مفید باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری صمیمانهٔ مدیریت و کارکنان واحد فرآوری، پژوهشکدهٔ سنگ آهن و فولاد گل‌گهر و شرکت گهر روش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## ۵. مآخذ


[۱] بهزاد م.، ح. میرزایی رفسنجانی، ع.ر. ابراهیمی، م. محمدی، "امکان‌سنجی به‌کارگیری روش نگه‌داری پیش‌بینانه در تأسیسات آب و فاضلاب کشور"، *دومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی*، تهران، ۱۳۸۶.

[۲] بهزاد، م.، ع. روحانی بسطامی، م. علیخانی، ع. ا. قانع، ا. قاسم‌زاده، "ارزیابی وضعیت الکتروپمپ های تأسیسات آب و فاضلاب آران و بیدگل"، *سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف*، تهران، ۱۳۸۸.

[۳] خیری، ح.، ج. عظیم‌آبادی، ج. بابایی، "نمونه عیب‌یابی و رفع عیب به‌وسیله آنالیز ارتعاشات در فن‌های برج خنک‌کن نیروگاه تبریز"، *سومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین‌آلات تهران*، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.

[۴] کندی، ا.، م. غلامی دیلمی، "نمونه‌هایی از اجرای موفق برخی تکنیک‌های پایش وضعیت در نیروگاه حرارتی شازند"، *چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات*، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.

[۵] جعفری، ا.، ر. عباسی، م. مکی آبادی، "کاربرد آنالیز ارتعاشات در عیب‌یابی پمپ و الکتروموتور کارخانه گندله‌سازی مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر سیرجان"، *هشتمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی*، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۲.

[۶] وزیری سرشک، م. ر.، "اصلاح طراحی پره‌های فن بویلر نیروگاه به کمک آنالیز ارتعاشی"، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز ۱۳۹۱.

[۷] حیدربیگی، ک.، ح. احمدی، س. ا. طباطبایی فر، م. امید، "پایش وضعیت ارتعاشی جعبه‌دندهٔ تراکتور مسی فرگوسن"، *دومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات*، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.

[8] Loutas, T. H., G. Sotiriades, I. Kalaitzoglou, V. Kostopoulos, "Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements." *Applied Acoustics*, 70, 9, pp. 1148-1159, 2009.

[9] Bartelmus, W., R. Zimroz, "Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, 1, pp. 246-257, 2009.

[۱۰] نوع‌پرست، م.، م. قراباغی، ه. عبداللهی، *مقدمه‌ای بر آسیای خودشکن و نیمه خودشکن*، نوآور.

[۱۱] اسناد فنی مجتمع معدنی صنعتی گل گهر سیرجان.

[۱۲] ستوده بحرینی، ر.، ا. جعفری، و. ا. ژاله، ح. حیدری جامع بزرگی، ا. خیرمند پاریزی، م. ر. شهسواری، ا. رفیع‌زاده، "علت‌یابی سایش یاتاقان‌های کفشکی آسیای هوایی با استفاده از آنالیز روغن؛ مطالعه موردی در شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر"، *هشتمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی*، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۲.

[13] Charlotte, *Technical associates of Charlotte vibration diagnotic Handbook*.

[۱۴] تیلور، ج. *هندبوک آنالیز ارتعاشات*، ترجمه حمید کریمی، خلیل‌الله سیاوشی، اصفهان: کنکاش، ۱۳۹۰.

## پی‌نوشت

1. aerofall mill
2. Girth gear
3. vertical
4. horizontal
5. axial
6. resolution
7. trend
8. SKF
9. backlash
10. side band