

امکان‌سنجی استفاده از آنالیز صوت برای عیب‌یابی یک جعبه‌دنده هلیکال با یاتاقان‌های لغزشی

هادی همائی
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه شهرکرد
hadi-h@eng.sku.ac.ir

خیام صفری*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه شهرکرد
khayam.safari@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۶

چکیده

در این مقاله طیف زمانی و فرکانسی صدای یاتاقان‌های یک جعبه‌دنده هلیکال با یاتاقان‌های لغزشی، در حالت پایدار، استخراج و با طیف‌های به‌دست آمده از آنالیز ارتعاشات مقایسه شده است. برای این منظور، به‌جای استفاده از تجهیزات خاص آنالیز صوت، توسط یک میکروفن متصل به یاتاقان و دستگاه ضبط صدا، صدای هر یاتاقان ضبط شده و سیگنال صوتی دیجیتال توسط یک برنامه محاسباتی پردازش می‌شود. به‌منظور محاسبه سرعت ارتعاشات در یاتاقان‌ها، سطح فشار صوت، اندازه‌گیری و سرعت ذره متناظر با آن محاسبه می‌شود. سیگنال ارتعاشی دستگاه، توسط یک دستگاه شتاب‌سنج نمونه‌برداری شده، توسط آنالایزر ارتعاشات تحلیل می‌شود. با مقایسه طیف فرکانسی ارتعاشی هر یاتاقان و طیف فرکانسی صدای آن مشاهده می‌شود که هر دو طیف شکل یکسانی دارند و حداکثر دامنه در هر دو طیف، در فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها رخ می‌دهد و سرعت ذره به سرعت ارتعاشات بسیار نزدیک است. همچنین مشاهده می‌شود که در مورد عیوب سایش در دندانه، نامیزانی جرمی و لقی در اتصال‌دهنده، هر دو طیف علائم یکسانی بروز می‌دهند. بنابراین با پردازش سیگنال صوت می‌توان پایش وضعیت و عیب‌یابی جعبه‌دنده‌ها را با هزینه کمتری انجام داد.

واژگان کلیدی: صوت، ارتعاش، پردازش سیگنال، طیف فرکانسی، پایش وضعیت

۱. مقدمه

خواص دینامیکی آن نیز تغییر می‌کند و علاوه بر تغییر سطح ارتعاشات، خصوصیات طیف سیگنال ارتعاشی در حوزه زمان و فرکانس تغییر خواهد کرد. از جمله

امروزه آنالیز ارتعاشات به عنوان یکی از روش‌های اصلی پایش وضعیت ماشین‌های دوار مورد پذیرش قرار گرفته و به‌کار می‌رود. با رشد هرگونه عیب مکانیکی در ماشین،

پارامترهایی که برای تعیین وضعیت ماشین‌ها به کار می‌رود، صدای آنهاست که اصطلاحاً ارتعاش صوتی نامیده می‌شود. عیوب ایجادشده در ماشین‌ها، علائمی در صدای ماشین ایجاد می‌کنند که از آن جمله می‌توان به مشکلات مربوط به یاتاقان‌ها، جعبه‌دنده‌ها، پمپ‌ها و کمپرسورها و همچنین به پدیده کاپیتاسیون در پمپ‌ها اشاره کرد.

یوشی یوکا و فوجی وارا (۱۹۸۴ م) نشان دادند که آنالیز صدا قادر است عیوب یاتاقان‌ها را زودتر از آنالیز ارتعاشات و قبل از ظاهر شدن آثار قابل اندازه‌گیری با پراب شتابسنج مشخص کند [۱]. منابع تحقیقاتی نشان می‌دهند که آنالیز صوت برای تشخیص عیوب جعبه‌دنده‌ها نیز عملکرد مفیدی داشته است. میواچیکا و همکاران (۲۰۰۲ م) نیز از آنالیز صوت برای مطالعه پدیده خستگی خمشی دندانه‌های چرخ‌دنده استفاده کردند [۲]. ویتنر (۱۹۹۳ م) انتشار صوت در لحظه ایجاد ترک در دندانه‌های چرخ‌دنده را بررسی نمود [۳]. سایورس و نگرو (۱۹۹۷ م) در مورد عیب‌یابی جعبه‌دنده‌ها با آنالیز صوت تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند [۴]. در سال‌های اخیر، آنالیز صدا مورد توجه محققان قرار گرفته است. لوئیس و همکاران (۲۰۱۵ م) عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتکی را با استفاده از تبدیل هیلبرت روی سیگنال صوتی بررسی نمودند [۵]. پرزل و همکاران (۲۰۱۳ م) نیز سرعت ارتعاش یک ورقه نازک را با استفاده از تئوری میدان صوتی خیلی نزدیک، از طریق اندازه‌گیری فشار صوت، محاسبه نمودند [۶]. بری و همکاران (۲۰۰۴ م)

(م) با بیان تئوری یک میدان صوتی خیلی نزدیک با اندازه‌گیری فشار صوت، سرعت ذره را محاسبه کردند [۷]. لوئیس و همکاران (۲۰۱۴ م) نیز با استفاده از تبدیل هیلبرت روی سیگنال صوتی نشان دادند که علائم عیب نامحوری زاویه‌ای در سیگنال صوتی ماشین‌های دوار مشابه با علائم ارتعاشی آن است [۸].

در این مقاله، پردازش سیگنال صوتی مانند یک سیگنال ارتعاشی انجام و مشاهده می‌شود که از طیف فرکانسی صدا می‌توان همانند طیف فرکانسی ارتعاشات برای پایش وضعیت ماشین مورد بحث استفاده کرد.

۲. مشخصات کلی دستگاه

دستگاه تحت بررسی یک جعبه‌دنده هلیکال با توان ۵۰۰ کیلووات است که با سرعت ورودی اسمی ۳۶۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد. این دستگاه یک جعبه‌دنده کاهنده با یک جفت چرخ‌دنده جناغی ماریپج شیاردار است و روغن به محل تماس دو چرخ‌دنده پمپ می‌شود. تعداد دندانه‌های پینیون ۲۷ عدد و تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده بزرگ ۱۲۴ عدد می‌باشد. یاتاقان‌های جعبه‌دنده نیز از نوع لغزشی می‌باشند. در شکل ۱ تصویر جعبه‌دنده و در شکل ۲ تصویر چرخ‌دنده‌ها نمایش داده شده است. یاتاقان سمت محرک، یاتاقان شماره ۳ و یاتاقان سمت متحرک - که یک فن است - یاتاقان شماره ۶ نامگذاری می‌شوند؛ سایر یاتاقان‌ها نیز براساس آنها نام‌گذاری می‌شوند.



شکل ۲. چرخ‌دنده‌های مورد بحث



شکل ۱. نمایی از جعبه‌دنده

دستگاه نمونه‌برداری صدا شامل یک میکروفن الکترونیک است. ام. ام. ۱۲۳۱ و دستگاه ضبط صدای ام. ای. وی. ۲۲ می‌باشد. مشخصات میکروفن در جدول ۱ و مشخصات دستگاه ضبط صدا در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات میکروفون

پاسخ فرکانسی ^۳	۲۵ تا ۱۵۰۰۰ هرتز
حساسیت ^۴	۵ میلی‌ولت بر پاسکال
امپدانس ^۵	۱۰۰۰ اهم

جدول ۲. مشخصات دستگاه ضبط صدا

منبع ضبط ^۶	میکروفن خارجی ^۷
نرخ نمونه‌برداری ^۸	۴۴/۱ کیلوهرتز
تبدیل آنالوگ به دیجیتال ^۹	۱۶ بیت
فرمت فایل	MP3

نمونه‌برداری ارتعاشی توسط یک حسگر شتاب‌سنج و ارتعاش‌سنجی با استفاده از دستگاه ایزی وایبر^{۱۰} و نرم‌افزار مکمل اسپکترا پرو^{۱۱} انجام می‌شود.

۳. کمیت‌های اندازه‌گیری صوت

نوسان ممتد یک محیط الاستیک سبب ارتعاش ملکول‌های هوای مجاور و تغییر مداوم فشار هوا شده و موج ایجاد می‌شود. این موج به صورت طولی در محیط اطراف منتشر شده و در محدوده معینی از نظر فرکانس و دامنه برای انسان قابل درک است که به آن صوت می‌گویند. میکروفون دستگاهی است که کمیت فیزیکی فشار صوت را به ولتاژ تبدیل می‌کند. سطح فشار صوت از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\text{SPL (dB)} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad (1)$$

$$P_{ref} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

در هر میدان صوتی، فشار صوت سرعت ذره و امپدانس ویژه اکوستیک به هم وابسته‌اند. در یک میدان دور اکوستیک، امپدانس ویژه اکوستیک از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه ρ دانسیته محیط انتشار صوت و C سرعت انتشار صوت در محیط انتشار صوت است [۷]:

$$Z = \frac{P}{U} = \rho \times C \quad (2)$$

در میدان دور اکوستیک، سطح سرعت ذره و فشار صوت هم‌فازند و سطح فشار صوت با سطح سرعت ذره برابر است. در این حالت سطح سرعت ذره از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۷].

$$\text{SPL (dB)} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20 \log_{10} \frac{U \rho C}{P_{ref}}$$

$$\text{SPL (dB)} = 20 \log_{10} \frac{U}{U_{ref}} = \text{PVL (dB)} \quad (3)$$

سرعت ذره مرجع (U_{ref}) نیز از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$U_{ref} = \frac{P_{ref}}{\rho C} = \frac{20(\mu \text{Pa})}{\rho C} \approx 50 \times 10^{-9} \text{ m/s} \quad (4)$$

در این حالت، سطح سرعت ذره با اندازه‌گیری سطح فشار صوت از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$\text{SPL} = \text{PVL} \rightarrow U(\text{m/s}) \approx 10^{\frac{\text{SPL}}{20}} \times 5 \times 10^{-8} \quad (5)$$

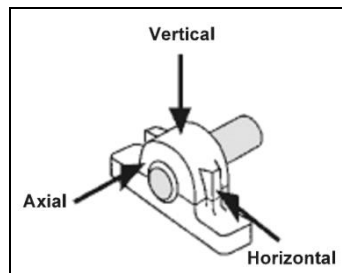
با توجه به روابط فوق سرعت ذره برحسب میلی‌متر بر ثانیه با داشتن فشار صوت از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$U(\text{m/s}) \approx P(\text{Pa}) \times 2.5 \quad (6)$$

۴. تحلیل میدان اکوستیک

در این مقاله، نمونه صدای مورد نظر برای تحلیل، صدایی است که توسط میکروفن متصل به سطح یاتاقان یا پایه دستگاه و از همان نقاط اندازه‌گیری ارتعاشات به دست می‌آید. وقتی حسگر اندازه‌گیری در تماس با سطح است، یک میدان صوتی بسیار نزدیک بین سطح نمونه‌برداری صدا و میکروفن ایجاد می‌شود. اما باید توجه داشت که در ماشین‌های دوار، همان‌گونه که در شکل ۳ نمایش داده شده است، پوسته خارجی یاتاقان به‌عنوان سطح نمونه‌برداری، منبع تولید صدا یا ارتعاش نیست و محیط

انتقال محسوب می‌شود. در واقع با اندازه‌گیری صدا از روی یاتاقان، محیط انتقال صدا بین منبع صوت و میکروفن به‌جای هوای محیط، یک جسم جامد فلزی است.



شکل ۳. نقاط اندازه‌گیری

در این حالت یک میدان دور اکوستیک و یک محیط انتقال جامد بین منبع مرتعش‌کننده و حسگر مشاهده‌کننده ایجاد می‌شود. بنابراین سطح سرعت ذره و سطح فشار صوت با هم برابرند و با استفاده از معادله ۶ می‌توان سرعت ارتعاشات را با استفاده از فشار صوت محاسبه کرد.

۵. نمونه‌برداری و پردازش سیگنال

در حالت کلی، سیستم‌های پایش وضعیت دارای سه بخش کسب داده، پردازش و استخراج ویژگی‌ها از سیگنال و تشخیص عیب می‌باشند. کسب داده یا نمونه‌برداری در واقع همان دریافت سیگنال‌های ناشی از ارتعاش، صوت، تغییرات جریان الکتریکی یا هر سیگنالی که به‌نحوی بیانگر مشخصه‌ای از سیستم باشد است. نمونه‌برداری یکی از مهم‌ترین مباحث در پردازش سیگنال‌های گسسته است. در نظریه پردازش سیگنال گسسته اثبات می‌شود که حداقل فرکانس نمونه‌برداری می‌بایست دو برابر پهنای باند فرکانسی سیگنال نمونه‌برداری شده باشد تا بتوان سیگنال پیوسته را از سیگنال نمونه‌برداری شده بازسازی نمود. قضیه نمونه‌برداری نایکوئیست - شانون بیان می‌کند که اگر فرکانس نمونه‌برداری بزرگتر از دو برابر بالاترین مؤلفه فرکانسی سیگنال باشد، سیگنال را می‌توان از روی سیگنال نمونه‌برداری شده به‌طور دقیق بازسازی کرد. پردازش

سیگنال و بخش استخراج ویژگی از مهمترین بخش‌ها در روند پایش وضعیت می‌باشند، که بر اساس آن ویژگی سیستم اعم از سالم یا معیوب‌بودن و نوع آن مشخص می‌شود. هدف اصلی روش‌های استخراج ویژگی ارائه تبدیل، روش یا ترتیبی است که مؤلفه‌های عیب پنهان‌شده در سیگنال را نمایان سازد. یکی از مهمترین روش‌های تحلیل سیگنال ارتعاشی آنالیز طیف فرکانسی می‌باشد.

۱-۵. الگوریتم فوریه سریع

یک تبدیل فوریه سریع تجزیه رشته‌ای از مقادیر به مؤلفه‌هایی با فرکانس‌های متفاوت است. تبدیل فوریه سریع، تبدیل فوریه گسسته را محاسبه می‌کند و دقیقاً همان نتایج حاصل می‌شود که مستقیماً با تعریف تبدیل فوریه گسسته به‌دست می‌آید. تنها تفاوت آن این است که بسیار سریع‌تر است. اگر سیگنال اولیه $x(n)$ شامل N پالس باشد، سری فوریه گسسته $X(k)$ از رابطه Y محاسبه می‌شود.

$$x(n) = x(0), x(1), \dots, x(N-1)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (7)$$

$$W_N = e^{-\frac{2\pi i}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

رایج‌ترین الگوریتم تبدیل فوریه سریع، الگوریتم کولی - توکی^{۱۲} است که یک الگوریتم تقسیم و حل است و به‌صورت بازگشتی یک مسئله تبدیل فوریه گسسته را به سبب مرکب از $N=N_1 N_2$ می‌شکند و به مسئله تبدیل فوریه گسسته با اندازه‌های N_1 و N_2 تبدیل می‌کند که به ضرب ریشه‌های مختلط واحد نیاز دارد. این الگوریتم در هر مرحله مسئله را به دو تکه با اندازه $N/2$ تقسیم می‌کند و به اندازه توان ۲ محدود است [۹]. بنابراین سیگنال اولیه به‌گونه‌ای بازسازی می‌شود که N توانی از ۲ باشد.

۶. عیب‌یابی جعبه‌دنده‌ها با استفاده از تحلیل طیف فرکانسی ارتعاشی

عیوب موضعی، ناهم‌واری در سطح تماس دندانه‌ها، خوردگی سطح دندانه‌ها، شکستن دندانه‌ها و یا جدا شدن قسمتی از آنها، ایجاد و رشد ترک در ریشه دندانه‌ها و جز این‌ها، جملگی از عوامل اصلی و رایج ایجاد ارتعاش و صدا در جعبه‌دنده‌ها هستند. یکی از عوامل ایجاد ارتعاش در چرخ‌دنده‌ها سایش دندانه‌هاست. سایش دندانه‌ها سبب افزایش لقی بین دنده‌ها و ایجاد ضربه می‌شود. وجود لقی بیش از حد مجاز بین دندانه‌ها نیز تأثیری مانند سایش دندانه‌ها دارد. وقتی در محل درگیری دو چرخ‌دنده با پهنای زیاد روغن وجود داشته باشد امکان گیرافتادن روغن بین دندانه‌های درگیر وجود دارد. در این صورت چون روغن نمی‌تواند به سرعت از این فضا خارج شود، فشار آن افزایش می‌یابد. این افزایش فشار سبب تحریک دو دنده و ارتعاشی با فرکانسی معادل فرکانس درگیری دو چرخ‌دنده ایجاد می‌گردد. از دیگر عوامل اصلی ارتعاش در چرخ‌دنده‌ها، تفاوت بین موقعیت حقیقی چرخ‌دنده با موقعیت ایده‌آل آن است که خطای انتقال نام دارد. معمولاً تمام چرخ‌دنده‌ها خطای انتقال دارند. منابع ایجادکننده خطای انتقال عدم دقت کافی در ساخت و خرابی پروفیل دندانه‌هاست.

۶-۱. فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها

فرکانس درگیری دنده‌ها برابر با حاصل ضرب تعداد دندانه‌های یک چرخ‌دنده در فرکانس چرخش شافت چرخ‌دنده می‌باشد. به‌طور کلی وجود هر عیب در چرخ‌دنده‌ها باعث ایجاد جهش دامنه در فرکانس درگیری، در طیف فرکانسی می‌شود. در عمل برای جعبه‌دنده‌های سالم نیز این جهش در طیف فرکانسی مشاهده می‌شود که البته دامنه آن کوچک است. اساساً انحراف پروفیل دندانه‌های درگیر از حالت ایده‌آل، یکی از علل اصلی بروز این فرکانس در طیف فرکانسی است. این انحراف را می‌توان ناشی از دو عامل دانست: تغییر شکل دندانه‌های

تحت بار که به میزان بار وارد بر آنها وابسته است و سایش یکسان در دندانه‌ها. علاوه بر عیوب مربوط به ساختار چرخ‌دنده‌ها عوامل دیگری چون عدم هم‌محوری جعبه‌دنده با محرک، ناهم‌راستایی داخلی یاتاقان‌های جعبه‌دنده، خمش شافت محرک، نابالانسی، لقی محوری چرخ‌دنده و جز این‌ها نیز می‌توانند در فرکانس درگیری ظاهر شوند. وقتی در چرخ‌دنده‌ها، لقی بین دنده‌ها بیش از حد مجاز می‌گردد، دندانه‌ها در حین درگیری به هم ضربه می‌زنند و این ضربه‌ها سبب تحریک فرکانس‌های تشدید مجموعه می‌شوند. وجود هارمونیک‌های فرکانس درگیری در طیف فرکانسی را می‌توان ناشی از این پدیده دانست.

۶-۲. باندهای جانبی در طیف فرکانسی

در طیف فرکانسی اطراف فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن همواره مجموعه‌ای از فرکانس‌ها، با فاصله یکسان از آنها وجود دارد. این باندهای جانبی در حقیقت ناشی از مدولاسیون دامنه یا فرکانس یا هر دو به صورت همزمان می‌باشند. هرگونه عیب در یک چرخ‌دنده سبب مدوله شدن فرکانس درگیری مربوطه با دور آن چرخ‌دنده می‌شود. معمولاً باندهای جانبی اطراف فرکانس درگیری همیشه وجود دارند، اما وقتی عیبی در چرخ‌دنده وجود نداشته باشد، اندازه آنها خیلی کوچک و در حد نویز است.

۶-۳. فرکانس چرخش چرخ‌دنده‌ها

وقتی در چرخ‌دنده‌ها عیب‌های نقطه‌ای مثل ترک یا شکستن قسمتی از یک دندانه رخ می‌دهد، فرکانس چرخش آن چرخ‌دنده در طیف فرکانسی مشهود است. البته این فرکانس در چرخ‌دنده‌های بدون عیب نیز به دلیل نامیزانی باقی‌مانده در آنها، هرچند با دامنه کوچک مشاهده می‌شود.

۷. نمونه‌برداری و نتایج

با اتصال میکروفون به صورت عمود بر پوسته جعبه‌دنده در محل هر یاتاقان ده ثانیه از صدای یاتاقان ضبط می‌شود.

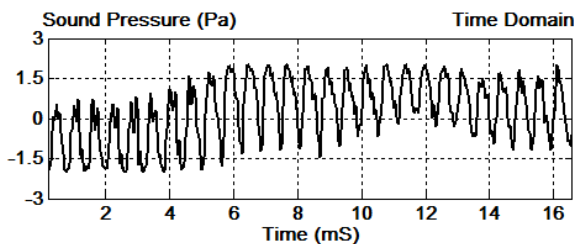
سیگنال صوتی اولیه هر یاتاقان به صورت یک سیگنال گسسته با ۴۴۱۰۰ پالس در ثانیه است. چون ۴۴۱۰۰ توانی از ۲ نیست و $۳۲۷۶۸ < ۴۴۱۰۰ < ۶۵۵۳۶$ و به عبارت دیگر $۲۱۶ < ۴۴۱۰۰ < ۲۱۵$ می باشد. تعداد نقاط تبدیل فوریه سریع (NFFT) برابر با ۶۵۵۳۶ در نظر گرفته می شود و با استفاده از الگوریتم کولی - توکی طیف فرکانسی سیگنال صوتی رسم می شود.

۱-۷. آنالیز صوت و ارتعاش یاتاقان شماره ۳

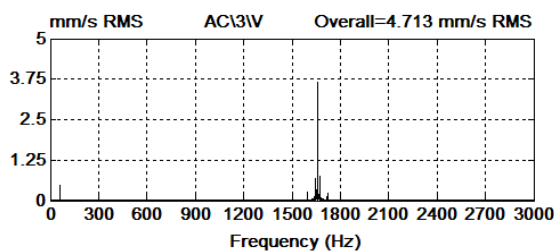
با توجه به شکل ۱، یاتاقان شماره ۳ نخستین یاتاقان بعد از کویلینگ ورودی جعبه نده است. طیف فرکانسی آنالیز ارتعاشات یاتاقان ۳، خروجی نرم افزار اسپکترا پرو در شکل ۴ و مشخصات طیف فرکانسی در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که حداکثر دامنه $۳/۶۴۴$ میلی متر بر ثانیه است و در فرکانس درگیری؛ یعنی $۱۶۵۸/۷$ هرتز رخ می دهد. سیگنال صوتی به صورت یک بردار یک بعدی و شامل ۴۴۱۰۰ نقطه در زمان یک ثانیه

می باشد. در شکل ۵، شکل موج سیگنال صوتی در محدوده صفر تا ۱۵ کیلوهرتز برای یک دور ماشین نمایش داده شده است.

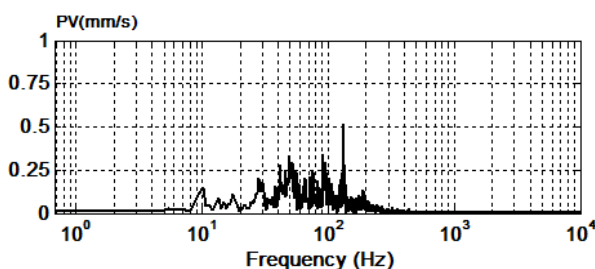
با توجه به اینکه دور ماشین برابر با ۳۶۸۰ دور بر دقیقه است، زمان یک دور ماشین $۱۶/۳$ میلی ثانیه می باشد. شکل موج سیگنال اولیه نشان می دهد که در یک دور ماشین ۲۷ قله وجود دارد. با توجه به اینکه پینیون ۲۷ دندانه دارد، هر موجک مربوط به یکی از دندانه های پینیون است. با اعمال فیلتر فرکانس و با بررسی این نمودار می توان عیوب ترک، شکستگی و جز اینها دندانه را آشکار ساخت. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳ در جهت عمودی، در شکل ۶ و مشخصات طیف فرکانسی در محدوده فرکانس درگیری، در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می شود که طیف فرکانسی صدا، در فرکانس درگیری (۱۶۵۸/۷ هرتز) دارای حداکثر دامنه $۳/۶۱۵۱$ میلی متر بر ثانیه است که به طیف فرکانسی ارتعاشات (شکل ۴) بسیار نزدیک است.



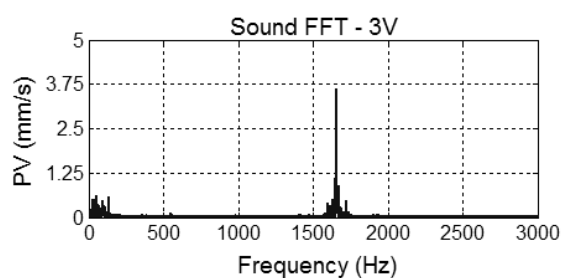
شکل ۵. طیف زمانی سیگنال صدای یاتاقان ۳



شکل ۴. طیف فرکانسی ارتعاشی یاتاقان ۳



شکل ۷. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳ در حالت خاموش



شکل ۶. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳

جدول ۳. مشخصات طیف فرکانسی آنالیز ارتعاشات یاتاقان ۳

فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	دامنه (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۶۵۸/۶۸	۹۹۵۲۰/۹	۳/۶۴۴
۱۶۷۱/۸۸	۱۰۰۳۱۲/۶	۰/۷۴۹
۱۶۴۵/۴۸	۹۸۷۲۸/۸	۰/۶۸۶

جدول ۴. مشخصات طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳

فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	فشار صوت (پاسکال)	سرعت ذره (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۶۵۹/۴۰	۹۹۵۶۴/۱۵	۱/۴۴۶۰	۳/۶۱۵۱
۱۶۴۵/۹۴	۹۸۷۵۶/۶۵	۰/۴۳۹۷	۱/۰۹۹۲
۱۶۷۲/۸۶	۱۰۰۳۷۱/۶۴	۰/۳۵۳۸	۰/۸۸۴۶

جدول ۵. مشخصات طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳ در حالت خاموش

فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	سرعت ذره (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۳۳/۲۳	۷۹۹۴/۲	۰/۵۱۸۵
۹۰/۱۷	۵۴۱۰/۲۱	۰/۳۴۱۲
۴۹/۱۲	۲۹۴۷/۳۵	۰/۳۳۱۶
۵۱/۸۱	۳۱۰۸/۸۵	۰/۲۹۳۱
۹۴/۸۸	۵۶۹۲/۸۴	۰/۲۹۰۸
۴۱/۷۲	۲۵۰۳/۲۳	۰/۲۷۶۱
۴۵/۷۵۸	۲۷۴۵/۴۸	۰/۲۴۵۴
۷۶/۰۳	۴۵۶۲/۳۴	۰/۲۴۲۹
۵۵/۸۵	۳۳۵۱/۱	۰/۲۴۰۱
۲۸/۲۶	۱۶۹۵/۷۳	۰/۲۰۳۵
۶۵/۹۴	۳۹۵۶/۷۲	۰/۲۰۳۰

در شکل ۶ پیک‌هایی در فرکانس‌های پایین مشاهده می‌شود. برای بررسی هویت این پیک‌ها، نمونه‌برداری از همان محل و در حالتی که دستگاه خاموش است انجام می‌گیرد و مشاهده می‌شود که این پیک‌ها مربوط به صداهای زمینه - که یک محیط صنعتی بسیار شلوغ است - می‌باشند. طیف کامل فرکانسی صدای یاتاقان ۳ در جهت

عمودی در حالت خاموش بودن دستگاه، در مقیاس لگاریتمی در شکل ۷ و مشخصات طیف فرکانسی در جدول ۴ نشان داده شده است. در شکل ۸ نیز طیف فرکانسی یاتاقان ۳، در حالتی که دستگاه روشن است در مقیاس لگاریتمی نمایش داده شده است. در حالت روشن بودن ماشین، چنانچه در جدول ۶ نشان داده شده است، در

فرکانس‌های پائین، بیک‌هائی با دامنه ۰/۳۷ در حوالی فرکانس یک برابر دور پینیون، یعنی ۶۱ هرتز، در طیف فرکانسی ظاهر می‌شود. با اعمال فیلتر فرکانسی ده درصد در اطراف فرکانس ۶۱ هرتز نویزهای زمینه حذف شده و طیف فرکانسی خالص یاتاقان ۳ به صورت شکل ۹ حاصل می‌شود که مشابه طیف فرکانسی ارتعاشات (شکل ۴) است.

۲-۷. آنالیز صوت و ارتعاش یاتاقان شماره ۴

طیف فرکانسی آنالیز ارتعاشات یاتاقان ۴ در شکل ۱۰ و مشخصات طیف فرکانسی در جدول ۷ نشان داده شده است. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۴ برای سیگنال یک ثانیه‌ای نیز در شکل ۱۱ و مشخصات طیف فرکانسی در جدول ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حداکثر دامنه در فرکانس ۱۶۶۰ هرتز رخ می‌دهد که به طیف فرکانسی ارتعاشی بسیار نزدیک است و فاصله باندهای جانبی تا فرکانس درگیری تقریباً برابر با فرکانس خروجی جعبه‌دنده؛ یعنی ۱۳ هرتز است که نشانه سایش کم در دندانه‌های چرخ‌دنده سرعت‌پایین است. همچنین با توجه به جدول‌های ۷ و ۸ سرعت به دست آمده از آنالیز صوت ۳/۴۷۸ میلی‌متر بر ثانیه، به سرعت ارتعاشات ۳/۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، بسیار نزدیک است. با انجام آنالیز ارتعاشات و صوت روی یاتاقان‌های شماره ۵ و ۶ این جعبه‌دنده و

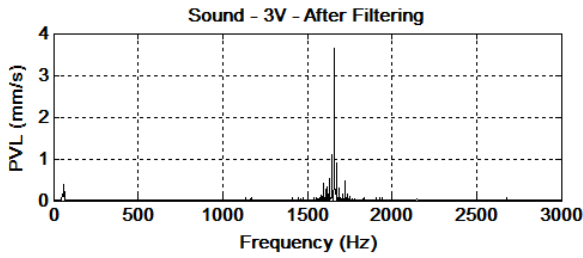
آزمایش روی سه جعبه‌دنده مشابه، نمودارهای طیف فرکانسی ارتعاشات و طیف فرکانسی صدا به دست آمد و مشاهده شد که دو نمودار، رفتار مشابهی دارند.

۳-۷. پایش وضعیت با آنالیز طیف فرکانسی صدا

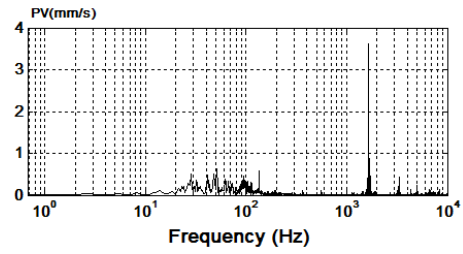
برای یک جعبه‌دنده هلیکال با محرک توربین بخار و سرعت ورودی ۶۵۴۰ دور بر دقیقه و توان ۶۰۰ کیلووات و با یاتاقان‌های لغزشی، طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳، در جهت عمودی و در محدوده فرکانس صفر تا ۶۰۰۰ هرتز برحسب سرعت ذره، در شکل ۱۲ و در محدوده صفر تا ۱۰۰۰ هرتز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به طیف فرکانسی، دامنه حداکثر در فرکانس یک برابر دور ماشین رخ می‌دهد. چنین رفتاری نشانه نابالانسی جرمی و یا ترک و شکستگی یک دندانه پینیون است. برای بررسی بیشتر طیف زمانی سیگنال صوتی در محدوده فرکانس یک برابر دور ماشین استخراج می‌گردد (شکل ۱۰). با توجه به اینکه در طیف زمانی پالس‌های ضربه‌ای وجود ندارد و تقریباً یک موج یکنواخت سینوسی است، افزایش دامنه در فرکانس یک برابر دور، نشانه نامیزانی جرمی است. برای بررسی بیشتر، وضعیت محرک جعبه‌دنده بررسی می‌گردد. طیف فرکانسی یاتاقان ۲ توربین در جهت‌های افقی و عمودی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. مشخصات طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳ در حالت روشن

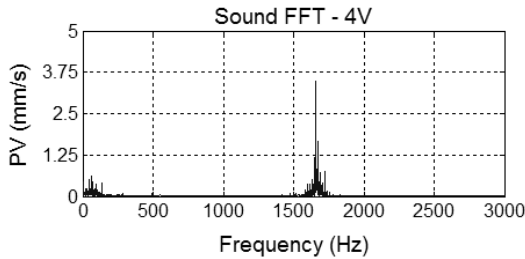
فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	سرعت ذره (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۳۳/۹۰۹	۸۰۳۴/۵۷۶	۰/۵۶۸۸
۴۷/۷۷	۲۸۶۶/۶	۰/۵۱۱۵
۲۸/۲۶	۱۶۹۵/۷۳	۰/۴۹۶۴
۴۱/۷۲	۲۵۰۳/۲۳	۰/۴۸۳۴
۹۳/۵۳	۵۶۱۲/۰۹	۰/۴۵۵۳
۶۱/۹	۳۷۱۴/۴۷	۰/۳۷۸۴
۶۱/۲۳	۳۶۷۴/۱	۰/۳۷۶۶
۳۱/۶۲	۱۸۹۷/۶۱	۰/۳۶۵۶
۹۶/۲۲	۵۷۷۳/۵۹	۰/۳۵۱۶
۴۹/۷۹	۲۹۸۷/۷۳	۰/۳۴۳۶
۶۲/۵۸	۳۷۵۴/۸۵	۰/۲۹۷۱



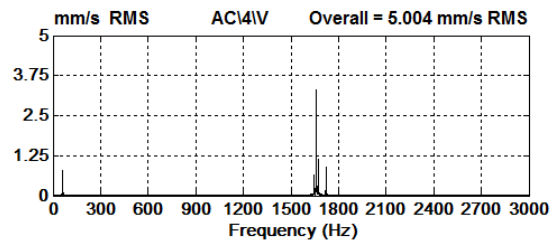
شکل ۹. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳



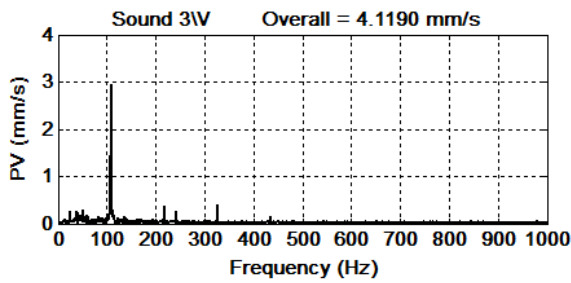
شکل ۸. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۳



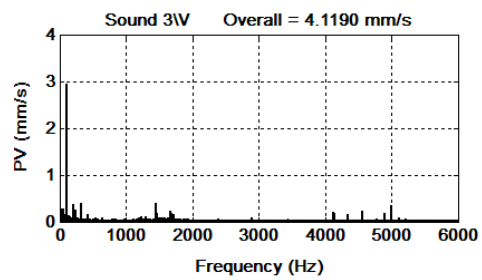
شکل ۱۱. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۴



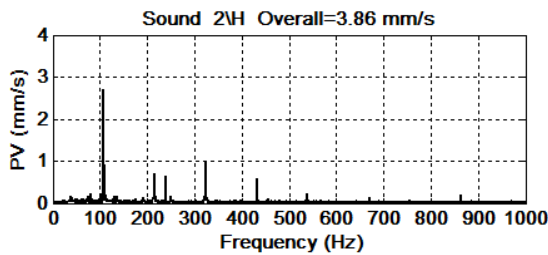
شکل ۱۰. طیف فرکانسی ارتعاشی یاتاقان ۴



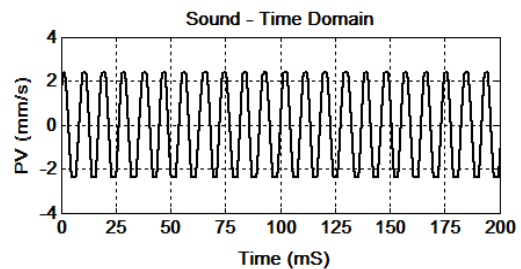
شکل ۱۳. طیف صدای یاتاقان ۳



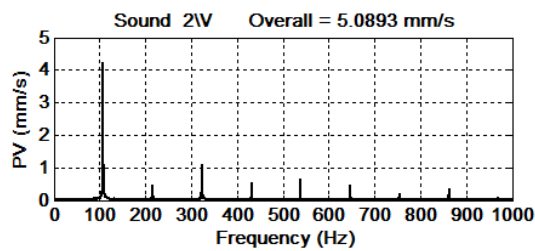
شکل ۱۲. طیف صدای یاتاقان ۳ در محدوده صفر تا ۶ کیلوهرتز



شکل ۱۵. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۲ توربین در جهت افقی



شکل ۱۴. طیف زمانی صدای یاتاقان شماره ۳



شکل ۱۶. طیف فرکانسی صدای یاتاقان ۲ توربین در جهت عمودی

جدول ۷. مشخصات طیف فرکانسی آنالیز ارتعاشات یاتاقان ۴

فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	دامنه (میلی متر بر ثانیه)
۱۶۵۹/۵۶	۹۹۵۷۳/۸	۳/۵۰
۱۶۷۲/۸۲	۱۰۰۳۶۹/۴	۱/۱۱
۷۲۰/۹۵۵	۱۰۳۲۵۷/۳	۱/۰۴

جدول ۸. مشخصات طیف فرکانسی آنالیز صوت یاتاقان ۴

فرکانس (هرتز)	فرکانس (دور بر دقیقه)	فشار صوت (باسکال)	سرعت ذره (میلی متر بر ثانیه)
۱۶۶۰/۰۷۵	۹۹۶۰۴/۵۲	۱/۳۹۱۲	۳/۴۷۸
۱۶۷۲/۸۶	۱۰۰۳۷۱/۶۴	۰/۶۶۴	۱/۶۶
۱۶۴۶/۶۱۷	۹۸۷۹۷/۰۲۷	۰/۴۶۲۴	۱/۱۵۶

در صورت وجود عیب در ماشین، طیف فرکانسی صدا مانند طیف فرکانسی ارتعاشات تغییر می‌کند. همچنین با مقایسه سرعت به دست آمده از آنالیز ارتعاشات و سرعت ذره حاصل از آنالیز صوت، مشخص شد که اختلاف دو سرعت کم و قابل قبول و فرض میدان اکوستیک دور صحیح است و سرعت ارتعاشات را می‌توان با اندازه‌گیری فشار صوت محاسبه کرد. بنابراین این روش می‌تواند برای تعیین وضعیت کلی ماشین‌های دوار، به خصوص جعبه‌دنده‌های یاتاقان لغزشی، که معمولاً جعبه‌دنده‌های بزرگ و توان بالا هستند، استفاده شود. همچنین می‌توان سرعت دورانی ماشین را با دقت خوبی از طیف فرکانسی صدا به دست آورد.

مشاهده می‌شود که در هر دو طیف در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، حداکثر دامنه در فرکانس دور ماشین رخ می‌دهد و علائم نابالانسی موجود در طیف فرکانسی جعبه‌دنده، از توربین به جعبه‌دنده منتقل شده است.

۸. جمع‌بندی

در این مقاله آنالیز ارتعاشات و صدای یاتاقان‌های لغزشی یک جعبه‌دنده هلیکال با استخراج طیف فرکانسی انجام شد. با مقایسه طیف فرکانسی مشخص شد که با حذف نویزهای زمینه، که در حالت خاموشی ماشین آشکار می‌شوند، صدا و ارتعاش دارای طیف فرکانسی مشابهی‌اند و

۹. مأخذ

- [1] Yoshioka T., T. Fujiwara. "New acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue", 1984, pp. 183-186.
- [2] Mivachika, K., Y. Zheng, K. Tsubokura, S. Oda, Y. Kanayama, T. Koide, C. Namba, T. Hayashi. "Acoustic Emission of bending fatigue process of super-carburised spur gear teeth." *Progress in Acoustic Emission*, Japanese Society for NDI, 2002, pp. 304-310.
- [3] Wheatner, J., D. Houser, C. Blazakis. "Gear tooth bending fatigue crack detection by Acoustic Emissions and tooth compliance." *ASME technical paper 93FTM9*, 1993, pp. 1-7.
- [4] Siores, E., A. A. Negro. "Condition Monitoring of a Gear Box Using Acoustic Emission Testing." *Material Evaluation*, 1997, pp. 183-187.

- [5] Chacon, Juan Luis Ferrando, Vassilios Kappatos, Wamadeva Balachandran, Tat-Hean Gan. “A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique.” *Applied Acoustics*, vol. 89, 2015, pp. 88-100.
- [6] Prezel, J., P. Lipar, A. Belsak, M. Cudina. “On acoustic very near field measurements.” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 40, 2013, pp. 194-207.
- [7] de Bree, H., V.B. Svetovoy, R. Raangs, R. Visser. “The very near field; theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field.” ICSV11, St. Petersburg 2004.
- [8] Chacon, Juan Luis Ferrando, Estefania Artigao Andicoberry, Vassilios Kappatos, Georgios Asfis, Tat-Hean Gan, Wamadeva Balachandran. “Shaft angular misalignment detection using acoustic emission.” *Applied Acoustics* 85, 2014, pp. 12-22.
- [9] Cooley, J. W., J. W. Tukey. “An Algorithm for the Machine Computation of the Complex Fourier Series.” *Mathematics of Computation*, Vol. 19, April 1965, pp. 297-301.

پی نوشت

-
1. ECM-231
 2. ME-V2
 3. Frequency Response
 4. Sensitivity
 5. Impedance
 6. Recording Source
 7. External Microphone
 8. Sample Rate
 9. A/D Conversion
 10. Easy Viber
 11. Spectra Pro
 12. Cooley-Tukey