مقاله

به‌کارگیری منحنی پوش سیگنـــال‌های ارتعاشی در پایش وضعیت و عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی

حسین وروانی فراهانی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
شرکت فراپایش باختر، پارک علم و فناوری استان مرکزی، اراک
h_v_f@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۷

چکیده

ماشین‌آلات دوار از جمله مهم‌ترین دارایی‌های هر صنعت محسوب می‌شوند. کارکرد بلندمدت یاتاقان‌های غلتشی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی این دسته از ماشین‌ها، نقش مهمی در تداوم کارکرد ماشین‌آلات دوار دارد. بدین جهت است که تاکنون روش‌های متنوعی برای ارزیابی وضعیت این دسته از یاتاقان‌ها ابداع و به‌کار گرفته شده است. از جملهٔ این روش‌ها، بررسی محتوای منحنی پوش سیگنال ارتعاشات اندازه‌گیری شده از روی هوزینگ یاتاقان‌های غلتشی است. در این روش، برخی پردازش‌ها روی سیگنال شتاب ارتعاشات انجام می‌شود و از این رهگذر منحنی فرکانسی پوش آنها به‌دست می‌آید. بررسی مؤلفه‌های فرکانسی موجود در این منحنی، روشی کارآمد برای پایش وضعیت یاتاقان‌های غلتشی و شناسایی به‌موقع عیب‌های آنهاست. با استفاده از این روش و براساس روش‌های پیش‌بینانه و پیش‌گیرانهٔ تعمیر و نگه‌داری، می‌توان ضمن جلوگیری از خرابی کلی یاتاقان، در برخی موارد عمر مفید آن را نیز افزایش داد. در این مقاله، پس از بررسی مبانی پردازش سیگنال مربوطه و روش به‌کارگیری منحنی پوش، بررسی‌های موردی متعددی مطرح و بدین ترتیب کارآیی روش مورد بحث ارزیابی می‌شود.

واژگان کلیدی: یاتاقان غلتشی، پایش وضعیت، تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، منحنی پوش

۱. مقدمه

ماشین‌آلات دوار، به‌عنوان نیروی محرکهٔ اصلی در بیشتر صنایع، از مهم‌ترین دارایی‌های فیزیکی به‌شمار می‌روند. یاتاقان‌ها یکی از اجزای مهم ماشین‌آلات دوار می‌باشند که ضمن کنترل و تعیین موقعیت قطعهٔ گردان یا روتور، تمامی نیروهای استاتیکی و دینامیکی موجود در ماشین نیز از طریق آنها تحمل می‌شود. تاکنون انواع گوناگونی از یاتاقان‌ها در ماشین‌آلات به‌کار گرفته شده است. در این میان، یاتاقان‌های غلتشی در زمرهٔ پرمصرف‌ترین انواع یاتاقان‌ها قرار دارند و در بیشتر ماشین‌آلات دوار به‌کار می‌روند. از جمله ویژگی‌های مهم یاتاقان‌های غلتشی در

مقایسه با نوع لغزشی، امکان پایش وضعیت اجزاء و تعیین عمر باقی‌ماندهٔ آنهاست. در واقع بسیاری از حالت‌های خرابی این دسته از یاتاقان‌ها، به‌صورت تدریجی و همراه با ایجاد نشانه‌های قابل آشکارسازی در هر مرحله از خرابی رخ می‌دهند. لذا با توجه به اهمیت یاتاقان‌های غلتشی، جهت تداوم کارکرد ماشین‌آلات دوار، برنامه‌های پایش وضعیت آنها با تکیه بر روش‌های گوناگونی تدوین و اجرا می‌شود. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: تحلیل ارتعاشی، ارزیابی آکوستیک، پایش دما و ترموگرافی، تحلیل روغن و جز این‌ها.

البته هر یک از این روش‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و با توجه به کاربرد مورد نظر و امکانات و بودجهٔ موجود، می‌توان روش مناسب را برگزید. در این مقاله، ضمن مرور روش‌های ارزیابی یاتاقان‌های غلتشی به‌کمک سیگنال‌های ارتعاشی، چگونگی به‌کارگیری منحنی پوش ارتعاشات بررسی و چندین بررسی موردی صنعتی ارائه می‌شود.

۲. روش‌های ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی از طریق تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی

از میان روش‌های متنوع پایش وضعیت و عیب‌یابی یاتاقان‌ها، تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده از روی نشیمنگاه یاتاقان، جایگاه ویژه‌ای دارد. پاره‌ای از دلائل این موضوع عبارت است از:

۱. در دسترس بودن انواع حسگرهای ارتعاش‌سنج، دستگاه‌های تحلیلگر و نرم‌افزارهای تخصصی با قیمت‌های مناسب

۲. پشتوانهٔ نظری قابل قبول و تجربه‌های موفق صنعتی

در این بخش از مقاله، روش‌های گوناگون تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، که می‌توانند برای ارزیابی وضعیت و عمرسنجی یاتاقان‌های غلتشی به‌کار روند، به اجمال معرفی می‌شوند. معمولاً برای قضاوت کلی دربارهٔ وضعیت ماشین، مقدار کلی دامنهٔ ارتعاشات[1] از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های قبلی، مقادیر پیشنهادی استانداردهای معتبر و یا مقادیر پیشنهادی کارخانهٔ سازنده به‌کار می‌رود. به‌طور معمول، این دامنه از جنس سرعت است و در باند ایزو[2]؛ یعنی فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز، اندازه‌گیری و پایش می‌شود. مقدار کلی ارتعاش با تعریف فوق، برای ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی مناسب نیست. دلیل این موضوع، حساسیت پایین مقدار کلی ارتعاش نسبت به عیب‌های یاتاقان‌های غلتشی در مقایسه با مشکلاتی چون نامیزانی جرمی، ناهم‌محوری، لقی مکانیکی و جز این‌هاست. لذا به‌عنوان روشی جایگزین، یکی از دو روش زیر به‌عنوان شاخص کلی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی قابل استفاده است:

الف) شاخص دامنهٔ ارتعاش در فرکانس بالا[3]. این شاخص در واقع همان مقدار کلی دامنهٔ ارتعاش است، با این تفاوت که از جنس شتاب است و در باند فرکانس بالا، مثلاً ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز، اندازه‌گیری و پایش می‌شود [۱].

ب) شاخص یاتاقان غلتشی[4]. سازندگان دستگاه‌های ارتعاش‌سنجی با علائم تجاری گوناگون و صاحبان فناوری در این عرصه، انواع متنوعی از شاخص‌های یاتاقان غلتشی را معرفی و توصیه کرده‌اند که هر یک با روال پردازشی خاصی به‌دست می‌آید [۱ - ۲]. نکتهٔ قابل توجه در به‌کارگیری این شاخص‌ها، اندازه‌گیری دوره‌ای و بررسی روال تغییرات آنها در طول زمان است. معمولاً روند افزایشی این شاخص‌ها، نشانه‌ای از وضعیت غیرعادی یاتاقان یا وجود مشکل روانکاری در آن است.

منحنی شکل موج برحسب زمان[5] به‌عنوان خروجی اولیهٔ حسگر، تصویر مستقیمی از رفتار دینامیکی ماشین و وضعیت اجزای داخلی آن به‌دست می‌دهد. به‌ویژه عیب‌هایی که منجر به ایجاد پالس در سیگنال می‌شوند و شکل سینوسی رایج آن را تغییر می‌دهند، از این طریق قابل ردیابی هستند. وجود آسیب موضعی در اجزای یاتاقان غلتشی، وجود ترک در هر یک از حلقه‌های داخلی یا خارجی یاتاقان و جز این‌ها برخی از عیب‌های قابل

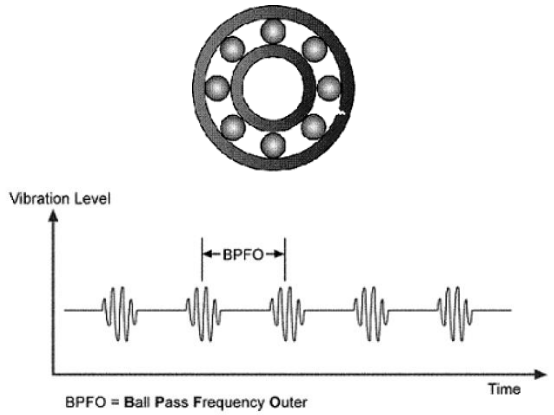
شناسایی از طریق منحنی شکل موج هستند [۳ – ۴]. همچنین انتقال از حوزهٔ زمان به حوزهٔ فرکانس، که به‌کمک الگوریتم تبدیل فوریهٔ سریع[۶] صورت می‌گیرد و منحنی طیف فرکانسی را به‌دست می‌دهد، از دیگر روش‌های تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌آلات دوار است. این روش به نوعی مهم‌ترین و رایج‌ترین روش تشخیص عیب‌های گوناگون و از جمله مشکلات یاتاقان‌های غلتشی به‌شمار می‌رود [۳ – ۴]. مزیت این دو روش ارائهٔ تصویری مستقیم از وضعیت یاتاقان و عیب‌های مربوط به آن است.

تحلیل پوش یا به‌عبارت دیگر دمدولاسیون[۷] سیگنال ارتعاشی در حیطهٔ فرکانس بالا، یکی دیگر از روش‌های رایج در ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی است. منحنی پوش در واقع طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشی از جنس شتاب است که با اعمال الگوریتم تبدیل فوریهٔ سریع روی سیگنال (پس از فیلترکردن آن در ناحیهٔ فرکانس بالا، یک‌سویه‌کردن و به‌دست آمدن منحنی پوش) به‌دست می‌آید [۵ – ۷]. در این مقاله، جزئیات این روش و کاربردهای آن همراه با ارائهٔ چند بررسی موردی از صنعت، بررسی می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این روش، حساسیت زیاد آن به عیب‌های گوناگون یاتاقان‌ها (از جمله نصب اشتباه، آسیب در اجزا، مشکلات روانکاری و جز این‌ها) و آشکار ساختن این عیب‌ها در مراحل اولیهٔ آن یا پایش آنها در مراحل مختلف رشد عیب است.

۳. کاربرد منحنی پوش سیگنال‌های ارتعاشی در ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی

۳-۱. مراحل پردازش سیگنال برای به‌دست‌آوردن منحنی پوش

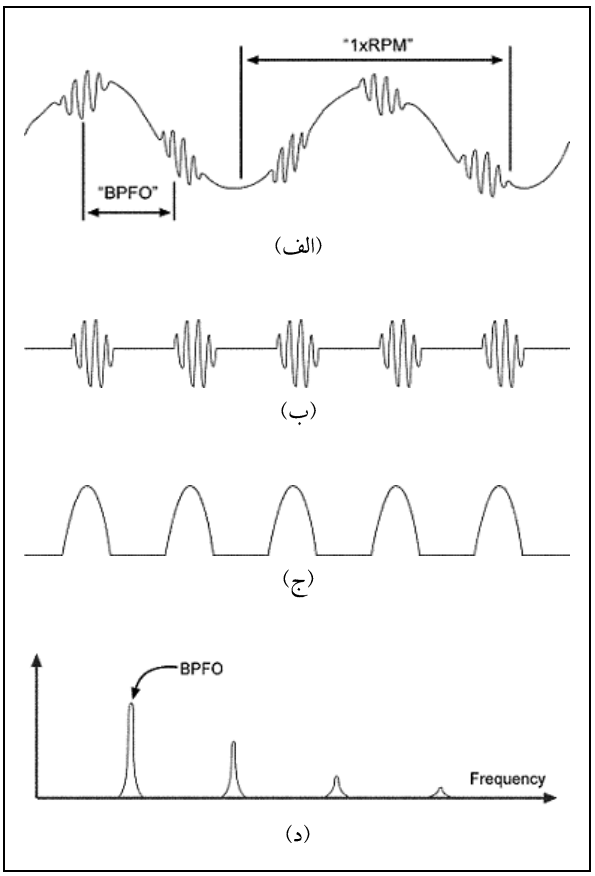
در شکل ۱ چگونگی ایجاد سیگنال ارتعاشی بر اثر وجود عیب در اجزای یاتاقان‌های غلتشی (مثلاً وجود خرابی روی حلقهٔ بیرونی) درج شده است. هنگام عبور ساچمه‌ها از روی سطوح حلقه‌های داخلی و بیرونی در شرایط وجود عیب، ضربات یا پالس‌هایی ایجاد می‌شود. این ضربات به‌صورت متوالی ایجاد می‌شوند و نیز تحریک فرکانس طبیعی اجزای یاتاقان و سازه‌های نزدیک به آنها (مثلاً هوزینگ یاتاقان و جز این‌ها) را درپی دارد. توالی ضربات، منجر به مدوله‌شدن[۸] ارتعاش ایجادشده با فرکانس وقوع ضربه (عمدتاً فرکانس عیب در اجزای یاتاقان) می‌شود. برای بررسی وضعیت یاتاقان، سیگنال ارتعاشی از نزدیک‌ترین موقعیت به یاتاقان و ترجیحاً در محل حداکثر بار[۹]، اندازه‌گیری می‌شود. این کار عموماً به‌کمک حسگرهایی از نوع شتاب‌سنج صورت می‌پذیرد. سپس فیلتر اعمال می‌شود. فیلترها دارای یک حد پایین و یک حد بالای فرکانس می‌باشند. با اعمال این فیلتر، مؤلفه‌های فرکانسی کمتر و بیش‌تر از حدود تعیین‌شده، حذف می‌شود و قسمت میانی آن باقی می‌ماند. سپس عملیات یکسوسازی روی سیگنال انجام می‌شود و با استخراج منحنی پوش، سیگنال جدیدی به‌دست می‌آید. این سیگنال را شکل موج پوش نیز می‌نامند.



شکل ۱. سیگنال ارتعاشات ایجادشده
بر اثر وجود عیب در اجزای یاتاقان

در شکل ۲ خلاصه‌ای از مراحل پردازش برای به‌دست آوردن شکل موج پوش نمایش داده شده است. مفهوم یک‌سویه‌کردن و استخراج منحنی پوش در این شکل نمایش داده شده است. سپس بنابر روال مرسوم و با اعمال الگوریتم تبدیل فوریهٔ سریع، منحنی فرکانسی از شکل موج پوش تهیه و نمایش داده می‌شود. منحنی‌ای که بدین

روش به‌دست می‌آید، همان منحنی پوش مورد نظر است که دامنهٔ آن همیشه برحسب شتاب (با واحد g یعنی شتاب گرانش و یا برحسب متر بر مجذور ثانیه) بیان می‌شود.



شکل ۲. مراحل پردازش برای به‌دست آوردن شکل موج پوش الف) سیگنال ارتعاشات اندازه‌گیری شده از روی هوزینگ یاتاقان با دامنهٔ از جنس شتاب، ب) اعمال فیلتر (میان‌گذر) و حذف ناحیهٔ فرکانس پایین و بالای سیگنال، ج) یکسوکردن سیگنال و به‌دست آوردن پوش سیگنال فیلترشده، د) اعمال الگوریتم تبدیل فوریه سریع و به‌دست آوردن طیف فرکانسی پوش

۳-۲. پارامترها و تنظیمات مهم در به‌دست آوردن منحنی پوش

پارامترهای مهم در این روش عبارت‌اند از:

۱. حد پایین و بالای فیلتر میان‌گذر
۲. مقدار فیلتر پایین‌گذر (قبل از اعمال تبدیل فوریه سریع)
۳. تعداد میانگین‌گیری و رزولوشن منحنی (تعداد خطوط)

مقادیر این پارامترها براساس کاربرد مورد نظر تعیین و بر روی دستگاه ارتعاش‌سنجی اعمال می‌شوند تا منحنی مناسب به‌دست آید. در خصوص مقادیر فیلتر میان‌گذر، دیدگاه‌های گوناگونی وجود دارد [۸]. اما به‌عنوان جمع‌بندی و براساس تجربه‌های پژوهشگران، استفاده از فیلتر با پهنای باند وسیع، مثلاً ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز، مناسب‌ترین گزینه است. البته این باند برای ماشین‌آلات دوار با سرعت دورانی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه پیشنهاد می‌شود. اما برای ماشین‌آلات با سرعت دورانی کمتر از ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بهتر است حد پایین فرکانس کاهش یابد (مثلاً ۵۰۰ هرتز). همچنین برای ماشین‌آلاتی با سرعت دورانی بیشتر از ۳۰۰۰ دور بر دقیقه بهتر است حد بالای فرکانس افزایش یابد (مثلاً ۲۰۰۰۰ هرتز).

تعیین مقدار فیلتر پایین‌گذر (قبل از اعمال تبدیل سریع فوریه)، براساس فرکانس‌های چهارگانه خرابی اجزای یاتاقان (بخش ۳-۳) صورت می‌پذیرد. ضروری است مقداری برای این فیلتر انتخاب شود که تا مضرب دهم از فرکانس حلقهٔ داخلی یاتاقان پوشش داده شود.

استفاده از میانگین‌گیری در روال پردازش سیگنال، برای افزایش کیفیت سیگنال و بهبود نسبت سیگنال به نوفه ضروری است. میانگین‌گیری از نوع خطی و به تعداد ۴ یا ۸ میانگین، برای اغلب کاربردها مناسب می‌باشد. دقت منحنی (قدرت تفکیک مؤلفه‌های فرکانسی) یکی دیگر از مشخصه‌های مهم منحنی فرکانسی پوش است که به تعداد خطوط تعیین‌شده در فرایند تبدیل فوریه سریع بستگی دارد. به‌طور معمول، تعداد خطوط ۳۲۰۰ یا ۶۴۰۰ برای بررسی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی مناسب می‌باشد.

۳-۳. چگونگی مطالعهٔ محتوای منحنی پوش

مطالعهٔ منحنی پوش براساس بررسی محتوای فرکانسی آن (مؤلفه‌های فرکانسی یا قله‌های موجود در منحنی) و انطباق آنها با فرکانس‌های چهارگانه اجزای یاتاقان، بررسی دامنهٔ هر یک از مؤلفه‌های موجود و نیز شکل کلی منحنی (از

نظر وجود هارمونیک‌ها و نسبت دامنهٔ آنها به یکدیگر و جز این‌ها) صورت می‌پذیرد. برای محاسبهٔ فرکانس‌های خرابی اجزای یاتاقان، از روابط ۱ تا ۴ استفاده می‌شود [۳].

$$f_{bpfo} = \frac{Z(f_0 - f_i)\left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)}{2} \qquad (۱)$$

$$f_{bpfi} = \frac{Z(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)}{2} \qquad (۲)$$

$$f_{bsf} = \frac{(f_0 - f_i)}{2} \times \frac{D}{d}\left(1 - \left(\frac{d}{D}\cos\alpha\right)^2\right) \qquad (۳)$$

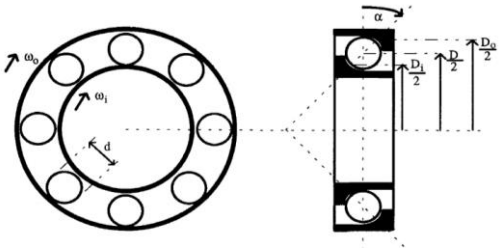
$$f_c = \frac{f_i\left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)}{2} + \frac{f_o\left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)}{2} \qquad (۴)$$

باید توجه داشت که بانک اطلاعاتی این فرکانس‌ها برای انواع گوناگونی از یاتاقان‌ها در اغلب نرم‌افزارهای تخصصی، که همراه با دستگاه‌های ارتعاش‌سنجی ارائه می‌شوند، موجود است. همچنین از طریق وبگاه شرکت اس. کی. اف.[۱۰] و با تعیین نوع یاتاقان و سرعت دورانی محور آن، می‌توان به‌سادگی این فرکانس‌ها را به‌دست آورد.

در این روابط، f_{bpfo} فرکانس عبور ساچمه از حلقهٔ بیرونی[۱۱] برحسب هرتز، f_{bpfi} فرکانس عبور ساچمه از حلقهٔ داخلی[۱۲] برحسب هرتز، f_{bsf} فرکانس گردش ساچمه یا غلتک[۱۳] برحسب هرتز، f_c فرکانس گردش قفسه[۱۴] برحسب هرتز، Z تعداد ساچمه‌ها یا غلتک‌ها، f_o فرکانس دورانی حلقهٔ بیرونی (معمولاً برابر با صفر)، f_i فرکانس دورانی حلقهٔ داخلی (معمولاً برابر با سرعت دورانی برحسب دور بر دقیقه تقسیم بر ۶۰)، d قطر ساچمه، D قطر گام یاتاقان و α زاویهٔ تماس یاتاقان است. مقدار قطر گام یاتاقان نیز از رابطهٔ ۵ به‌دست می‌آید.

$$D = \frac{D_i + D_o}{2} \qquad (۵)$$

به‌طوری‌که در رابطهٔ ۵، D_i قطر بیرونی رینگ داخلی و D_o قطر داخلی حلقهٔ بیرونی است (شکل ۳).



شکل ۳. نمایی شماتیک از یک یاتاقان غلتشی

و نمادهای به‌کار رفته در روابط ۱ تا ٤

وجود مؤلفه‌های ارتعاشی در منحنی پوش، که فرکانس آنها با فرکانس‌های اجزای یاتاقان انطباق داشته باشد، اغلب به‌معنای وجود اشکال در یاتاقان است. البته مراد از اشکال در اینجا، لزوماً آسیب فیزیکی نیست و مشکلات روانکاری، نصب و جز این‌ها را نیز باید مد نظر قرار داشت. علاوه بر فرکانس‌های چهارگانهٔ فوق، گاهی اوقات مضرب‌های فرکانس دورانی محور نیز در منحنی پوش مشاهده می‌شوند که معمولاً نشانه‌ای از وجود لقی مکانیکی در یاتاقان است. همچنین در برخی موارد، سطح نوفه در این منحنی افزایش می‌یابد که نشانگر مشکلات روانکاری (آلودگی روانکار، کمبود روانکار، کیفیت نامناسب روانکار و جز این‌ها) است.

۳-٤. بررسی‌های موردی صنعتی

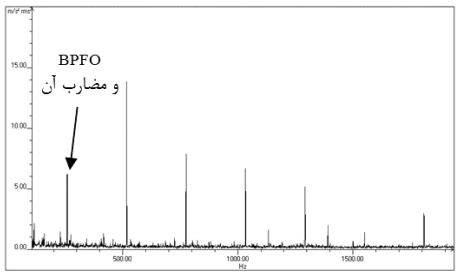
در این بخش از مقاله، چهار بررسی موردی از پایش و ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی به‌کمک منحنی پوش، که در صنایع گوناگون صورت پذیرفته، به‌عنوان نمونهٔ عملی و برای تکمیل مباحث بخش قبلی، ارائه می‌شود. در تمامی این موارد، محدودهٔ فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز برای به‌دست آوردن منحنی پوش استفاده شده است. از جمله نکات مهم در به‌کارگیری این روش، داده‌برداری روتین ارتعاشات و بررسی روال تغییرات مؤلفه‌های موجود در منحنی پوش در طول زمان است. در تمامی این

بررسی‌ها، این موضوع رعایت شده و منحنی درج‌شده در شکل‌ها، مربوط به آخرین رکورد ثبت‌شده، قبل از تعویض یاتاقان است. همچنین تصمیم‌گیری در خصوص بازدید و تعویض یاتاقان‌ها، باید مبتنی بر بررسی انواع اطلاعات ارتعاشی (شکل موج، منحنی فرکانسی، منحنی پوش و جز این‌ها) باشد تا قطعیت تشخیص عیب افزایش یابد.

۳-٤-۱. آسیب در حلقهٔ بیرونی یاتاقان یک فن

در این بخش نتایج ارزیابی یاتاقان‌های یک دستگاه فن ارائه می‌شود. این فن دارای دو یاتاقان غلتشی از نوع ۲۳۱۶ است و سرعت دورانی آن ۲۹۷۵ دور بر دقیقه می‌باشد. براساس داده‌برداری‌های انجام‌شده طی برنامهٔ روتین پایش وضعیت، افزایش دامنهٔ ارتعاش در فرکانس ۲۵۶/۹ هرتز و هارمونیک‌های آن در منحنی پوش مشاهده شد (شکل ۴).

(الف)



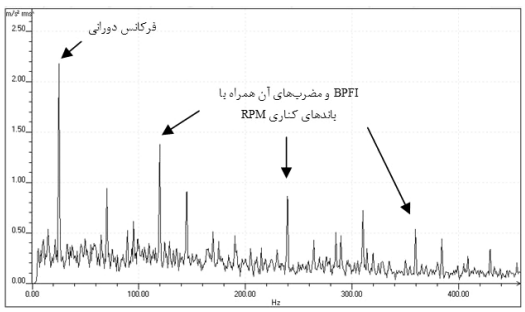
(ب)

شکل ٤.تصویری از الف) رینگ بیرونی یاتاقان
ب) منحنی پوش مربوط به بررسی موردی اول

بنابر روابط ۱ تا ۴، فرکانس آسیب در حلقهٔ بیرونی این یاتاقان برابر با ۲۵۶/۹ هرتز است. پس از توقف و دمونتاژ فن، از یاتاقان‌های آن بازدید و مشاهده شد که حلقهٔ بیرونی آسیب دیده است. تصویری از حلقهٔ بیرونی یاتاقان در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۳-٤-۲. آسیب در اجزای یاتاقان یک جعبه‌دنده

در این بخش نتایج ارزیابی یاتاقان‌های یک جعبه‌دنده ارائه می‌شود. محور ورودی این جعبه‌دنده دارای یک یاتاقان غلتشی از نوع ۶۳۰۸ است و سرعت دورانی آن ۱۴۸۸ دور بر دقیقه می‌باشد. براساس داده‌برداری‌های انجام‌شده طی برنامهٔ روتین پایش وضعیت، افزایش دامنهٔ ارتعاش در فرکانس ۱۲۰ هرتز و هارمونیک‌های آن همراه با باندهای کناری[15] سرعت دورانی در منحنی پوش مشاهده شد (شکل ۵).



شکل ۵. منحنی پوش مربوط به بررسی موردی دوم

طبق روابط ۱ تا ۴، فرکانس آسیب در حلقهٔ داخلی این یاتاقان ۱۲۰ هرتز می‌باشد. پس از توقف و دمونتاژ جعبه‌دنده، از یاتاقان‌های آن بازدید و مشاهده شد که حلقهٔ داخلی و ساچمه‌های یاتاقان آسیب دیده‌اند (شکل ۶).

۳-٤-۳. آسیب در حلقهٔ داخلی یک پمپ گریز از مرکز

در این بخش، نتایج ارزیابی یاتاقان‌های یک پمپ ارائه می‌شود. این پمپ دارای یاتاقان غلتشی از نوع NJ2310 (سمت پروانه) و ۷۳۱۰ (سمت کوپلینگ) است و سرعت دورانی آن ۲۹۷۶ دور بر دقیقه می‌باشد. براساس داده‌برداری‌های انجام‌شده طی برنامهٔ روتین پایش وضعیت، افزایش دامنهٔ ارتعاش در فرکانس ۳۵۹/۴ هرتز و

هارمونیک‌های آن همراه با باندهای کناری سرعت دورانی در منحنی پوش مشاهده شد (منحنی الف از شکل ۷ که در آن ناحیهٔ فرکانس بالا بزرگنمایی شده است). همچنین مضارب فرکانس دورانی و نیز فرکانس ۱۹/۹ هرتز در این منحنی وجود داشت (منحنی ب از شکل ۷ که در آن ناحیهٔ فرکانس پایین بزرگنمایی شده است).

(الف)

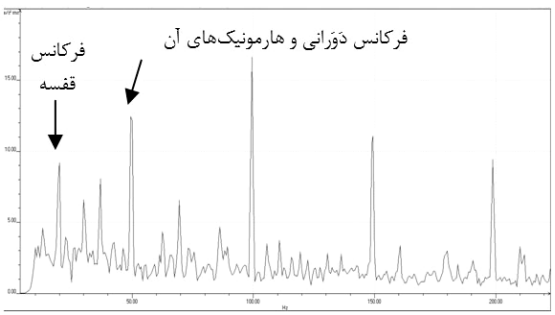
(ب)

شکل ٦. نمایی از الف) رینگ داخلی
ب) ساچمه‌های یاتاقان بررسی موردی دوم

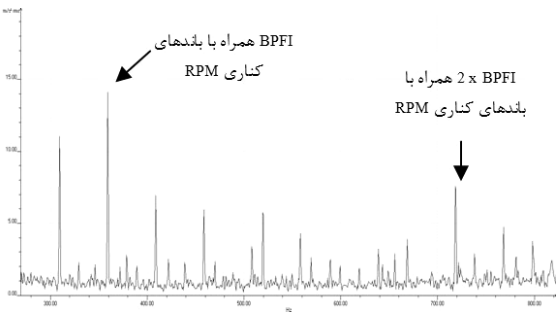
بنابر روابط ۱ تا ۴، فرکانس آسیب در حلقهٔ داخلی یاتاقان سمت کوپلینگ (از نوع ۷۳۱۰) برابر با ۳۵۹/۴ هرتز و فرکانس قفسهٔ آن ۱۹/۹ هرتز می‌باشد. پس از توقف و دمونتاژ پمپ، از یاتاقان‌های آن بازدید و مشاهده شد که رینگ داخلی آسیب دیده است (شکل ۸).

۳-٤-٤. ارزیابی وضعیت روانکار یاتاقان‌های غلتشی

در این بخش، کاربرد منحنی پوش برای ارزیابی وضعیت روانکار بررسی می‌شود. برخی اوقات، افزایش دامنه در فرکانس‌های اجزای یاتاقان تنها به‌علت مشکلات روانکاری است و مناسب است در صورت رؤیت این مؤلفه‌ها، ابتدا نسبت به کنترل وضعیت روانکار و در صورت نیاز اصلاح آن (مثلاً انجام گریس‌کاری یا تعویض گریس) اقدام شود. کاهش دامنهٔ مؤلفه‌های مورد بررسی پس از انجام اقدامات اصلاحی روی وضعیت روانکار و عدم افزایش مجدد آنها در آیندهٔ نزدیک، تأییدکنندهٔ وجود اشکال روانکاری است. عدم کاهش این مؤلفه‌ها و یا بازگشت آنها طی مدتی کوتاه نشانگر وجود یک مشکل جدی‌تر است. همچنین گاهی مشکلات روانکاری در قالب افزایش سطح نوفه در منحنی پوش خود را نشان می‌دهد. در این موارد، پس از اصلاح وضعیت روانکار، سطح نوفه بلافاصله کاهش خواهد یافت. شکل ۹ نمونه‌ای از این حالت را نشان می‌دهد که مربوط به یاتاقان یک فن است. لذا منحنی پوش ابزاری مناسب برای پیشگیری از خرابی زودهنگام یاتاقان‌ها بر اثر مشکلات روانکاری[۱۶] به‌شمار می‌رود.



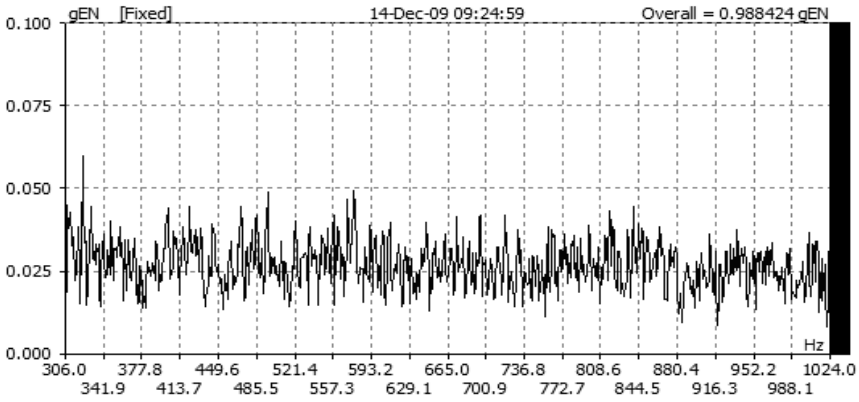
(الف)



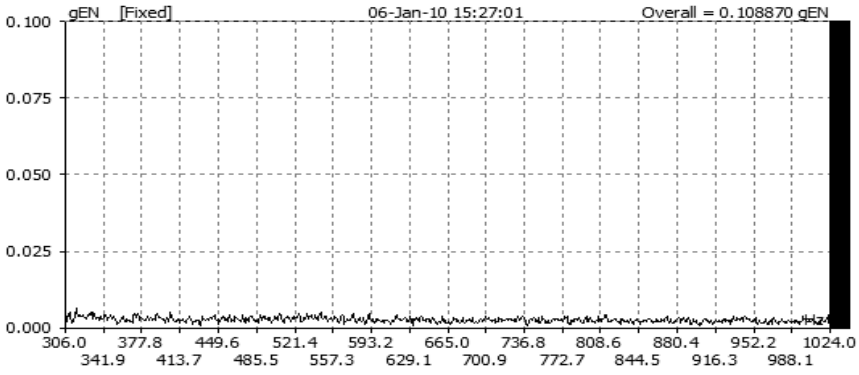
(ب)

شکل ۷. منحنی‌های پوش مربوط به بررسی موردی سوم

شکل ۸. تصویری از حلقهٔ داخلی یاتاقان بررسی موردی سوم



(الف)



(ب)

شکل ۹. منحنی پوش یاتاقان یک دستگاه فن؛ الف) قبل از تعویض گریس، ب) بعد از تعویض گریس

٤. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا منحنی پوش و روند پردازش سیگنال ارتعاشات برای به‌دست آوردن آن مطرح شد. سپس کاربرد این منحنی برای ارزیابی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی، همراه با ارائهٔ چند بررسی موردی صنعتی مطالعه شد. براساس تجربه‌های صنعتی، وقتی یاتاقان در وضعیت نامطلوبی باشد، مؤلفه‌هایی متناظر با فرکانس‌های چهارگانهٔ اجزای یاتاقان (روابط ۱ تا ۴) در منحنی پوش مشاهده می‌شود. منظور از وضعیت نامطلوب، مواردی چون خرابی هر یک از اجزای یاتاقان، وجود تنش و اصطکاک غیرعادی در یاتاقان بر اثر مشکلات روانکاری و یا به‌واسطهٔ نصب

نادرست و جز این‌هاست. برای تشخیص و تفکیک این موارد از هم، دقت به عمر یاتاقان و کنترل وضعیت روانکار، قبل از هرگونه اقدام تعمیراتی براساس نتایج بررسی منحنی پوش ضروری است. بر این اساس، چنانچه دامنهٔ قله‌های ارتعاشی پس از تعویض روانکار کاهش یابد و این وضع پایدار بماند، افزایش دامنهٔ این قله‌ها بر اثر مشکلات روانکاری بوده است. همچنین چنانچه دامنهٔ بالا در قله‌های موجود در منحنی پوش بلافاصله پس از نصب یاتاقان جدید دیده شود، شرایط نصب یا کیفیت اولیهٔ یاتاقان باید مورد بررسی قرار گیرد و اصلاح شود. اما چنانچه قله‌های ارتعاشی پس از تعویض روانکار کاهش نیابد یا پس از کاهش، دوباره افزایش یابند و نیز یاتاقان به‌تازگی تعویض نشده باشد، وجود قله‌های ارتعاشی در منحنی پوش نشانه‌ای از آسیب فیزیکی در اجزای یاتاقان خواهد بود.

البته، چون حتی آسیب جزئی و در مراحل اولیه، منجر به ایجاد قله در منحنی پوش می‌شود، لذا روند این قله‌ها تحت پایش پیوسته با بازهٔ زمانی کوتاه‌تر از حالت عادی قرار گرفته و پس از رسیدن آنها به حد بحرانی، باید نسبت به بازدید و تعویض یاتاقان اقدام نمود. همچنین این نکته نباید از نظر دور بماند که هر روشی در کنار مزایای خود محدودیت‌هایی نیز دارد. لذا روش منحنی پوش نیز تنها به‌عنوان یکی از روش‌های موجود برای پایش یاتاقان‌های غلتشی مطرح است.

معمولاً نتیجهٔ مناسب با به‌کارگیری روش‌ها و ابزارهای گوناگون در شرایط مختلف و یا به‌کارگیری همزمان آنها، حاصل می‌شود. بررسی تطبیقی روش‌های گوناگون برای ارزیابی یاتاقان‌های غلتشی می‌تواند موضوع چندین مقاله دیگر نیز باشد.

۵. مآخذ

[1] Gagnon F. "Spike Energy Diagnostics (and Similar Techniques), History, Usefulness & Future Outlook." *Vibra-K Consultants Ltd.*, 2006, 492-512.

[2] Xu, M. "Spike Energy measurement & Case Histories." *Entek IRD International Corporation*, 1999.

[3] Howard, I. "A Review of Rolling Element Bearing Vibration: Detection, Diagnosis and Prognosis." *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory Airframes and Engines Division*, 1994.

[4] Barkov A., N. Barkova, *Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings, Part 1 & 2, VibroAcoustical Systems and Technologies*, St. Petersburg, Russia.

[5] Howieson D. *Vibration Monitoring: Envelope Signal Processing*, SKF Reliability Systems, 2008.

[6] Weller N. "Acceleration Enveloping: Higher Sensitivity, Earlier Detection, and GE Energy." *Orbit Magazine*, Second Quarter, 2004.

[7] Lee G. "Acceleration Enveloping, A Key Element in Aggressive Condition Monitoring." *Uptime Magazine*, February 2006.

[8] Courrech J. "Envelope Analysis for Effective Rolling Element Fault Detection, Fact or Fiction?" *B&K Uptime Magazine*, No. 1, Vol. 8, 2000.

پی‌نوشت

1. overall vibration
2. ISO
3. high frequency detection (HFD)
4. bearing condition unit

5. time wave form
6. fast fourier transform
7. demodulation

۸. منظور از مـدوله‌شـدن، تغییـرات منظـم و متنـاوب دامنـه است. در مـورد یاتاقان‌های غلتشی، فرکانس طبیعی اجزای یاتاقان، فرکانس اصلی یا حامل و فرکانس‌های خرابی اجزا، فرکانس مدوله‌کننده به‌شمار می‌رود.

9. bearing load zone
10. www.skf.com
11. ball pass frequency of outer race (BPFO)
12. ball pass frequency of inner race (BPFI)
13. ball spin frequency (BSF)
14. cage rotational frequency (fundamental train frequency or FTF)
15. side band

۱۶. بنابر آمار منتشرشده توسط شرکت اس. کی. اف. مشکلات روانکاری (کیفیت نامناسب یا آلودگی روانکار)، علت خرابی زودهنگام حدود پنجاه درصد از یاتاقان‌های غلتشی است.