

شناسایی خرابی جعبه‌دنده آسیای مواد در کارخانه سیمان باهارلی ترکمنستان با استفاده از آنالیز ارتعاشات

حسین غلامزاده ثانی
کارشناس مهندسی مکانیک
شرکت مهندسی اندیشه‌پردازان سپهر آپادانا
h.sani@yahoo.com

علیرضا رضایی*
کارشناس مهندسی مکانیک
شرکت مهندسی اندیشه‌پردازان سپهر آپادانا
rezaee.85@gmail.com

تاریخ پذیرش: 1394/09/08

تاریخ دریافت: 1394/01/20

چکیده

در تجهیزاتی چون انواع جعبه‌دنده‌ها، به دلیل پیچیدگی و در دسترس نبودن اجزای داخلی، استفاده از آنالیز ارتعاشات به منظور شناسایی دقیق نوع و شدت خرابی و نیز محل وقوع آن نیازمند دقت، تمرکز و توجه به جزئیات می‌باشد. چنانچه این موارد در پایش وضعیت ارتعاشات جعبه‌دنده‌ها به درستی مورد توجه قرار گیرند، شناسایی عیوب حتی در پیچیده‌ترین و بزرگ‌ترین موارد نیز میسر خواهد بود. در این مقاله، نمونه‌ای از به‌کارگیری آنالیز ارتعاشات در پایش خرابی اجزای داخلی جعبه‌دنده آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی ترکمنستان بررسی شده است.

واژگان کلیدی: پایش وضعیت، آنالیز ارتعاشات، یاتاقان، جعبه‌دنده

1. مقدمه

از جمله بخش‌های اصلی تولید در کارخانه سیمان، بخش آسیای مواد خام است و از جمله تجهیزات مهم آن، الکتروموتور و جعبه‌دنده آسیا می‌باشد. توقف آسیای مواد خام، توقف کوره را در پی خواهد داشت. لذا پایش و تشخیص به‌موقع عیوب تجهیزات آسیای مواد در راستای تولید پایدار بسیار مهم و ضروری می‌نماید.

2. ارزیابی وضعیت براساس آنالیز ارتعاشات

ارتعاشات یک ماشین، پایداری زیاد و تأثیرپذیری اندکی از عوامل محیطی دارد و به همین علت می‌تواند معیار مناسبی

از وضعیت سلامت آن باشد. یکی از مشکل‌ترین تصمیم‌گیری‌ها برای یک تحلیلگر ارتعاشات تعیین میزان ارتعاش قابل قبول برای ماشین‌آلات و زمان بهینه جهت تعمیر آنهاست. جهت تعیین وضعیت کلی ماشین بر مبنای مقادیر ارتعاشات، معمولاً مقدار کلی دامنه ارتعاش¹ با مواردی چون توصیه سازنده، دستورالعمل‌ها و کنترل رفتار ماشین مقایسه می‌شود [1]. معمولاً دامنه کلی ارتعاشات از جنس سرعت است و در باند ایزو؛ یعنی فرکانس 10 تا 1000 هرتز، اندازه‌گیری و پایش می‌شود. مقدار کلی ارتعاش با تعریف فوق، برای ارزیابی وضعیت ماشین مناسب

نیست. علت این موضوع، حساسیت پایین مقدار کلی ارتعاش نسبت به برخی از عیوب نظیر خرابی دنده‌ها و یاتاقان‌ها در مقایسه با مشکلاتی چون نامیزانی جرمی، ناهم‌محوری، لقی مکانیکی و جز این‌هاست. از همین رو، به‌عنوان ارزیابی دقیق‌تر، روش‌های ذیل به‌عنوان شاخص کلی وضعیت ماشین‌آلات قابل استفاده‌اند [2]:

1. شاخص دامنه ارتعاش در فرکانس بالا². (مقدار کلی دامنه شتاب ارتعاش که در باند فرکانس بالا برای مثال 5000 تا 20000 هرتز یا بیشتر اندازه‌گیری و پایش می‌شود [3])
2. شاخص وضعیت یاتاقان غلثشی³ و شاخص قله⁴

3. آسیای مواد خام و ارزیابی وضعیت آن

3-1. آشنایی با تجهیز

کارخانجات تولید سیمان از بخش‌های متنوعی تشکیل شده‌اند و در هر یک از آنها بخشی از مراحل تولید انجام می‌شود. از جمله بخش‌های مهم این مجموعه‌ها، بخش آسیای مواد خام است. در این بخش، سنگ‌های مواد خام وارد آسیا شده و پس از طی مراحل، به‌صورت پودر مواد خام وارد بخش پخت یا کوره می‌شوند. توقف هر یک از اجزای اصلی آسیای مواد خام، منجر به توقف کوره شده و نهایتاً کاهش ظرفیت تولید و خسارت اقتصادی را در پی دارد. آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی ترکمنستان از نوع گلوله‌ای است که انتقال قدرت در آن به‌وسیله دو مجموعه مجزای چرخ‌دنده محرک و متحرک انجام می‌شود. در جدول 1 مشخصات الکتروموتور و جعبه‌دنده آسیا ذکر شده است.

3-2. ارزیابی وضعیت ارتعاشات آسیا

پایش وضعیت تجهیزات متنوع آسیا بخش مهمی از برنامه‌های پایش وضعیت در یک کارخانه سیمان به‌شمار می‌رود. رشد غیرعادی ارتعاشات جعبه‌دنده آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی در حین بهره‌برداری مدیران

مجموعه را برآن داشت تا با توجه به اهمیت موضوع، به بررسی علل و ارائه راهکارها بپردازند. با توجه به نبود سوابق قبلی، به‌منظور مطالعه و بررسی رفتار ارتعاشاتی جعبه‌دنده، در گام نخست بررسی موضوع تنها از طریق مقایسه وضعیت ارتعاشات دو سمت آسیا با یکدیگر امکان‌پذیر بود. در نخستین اندازه‌گیری از آسیای مواد خام، مقادیر ارتعاشات ثبت‌شده از جعبه‌دنده‌ها در جدول 2 و 3 قید شده‌اند. مطالعه مقادیر جدول‌های 2 و 3 و مقایسه آنها بیانگر این است که مقادیر ارتعاشات کلیه نقاط جعبه‌دنده شماره 1 در مقایسه با جعبه‌دنده شماره 2 بیشتر است.

3-3. ارزیابی دقیق‌تر وضعیت ماشین از طریق

بررسی طیف‌های ارتعاشی

پس از تشخیص اولیه وجود عیب در جعبه‌دنده شماره 1، به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر، مطالعه انواع منحنی‌های ارتعاشی در دستور کار قرار گرفت. جزئیات منحنی‌های استفاده‌شده برای ارزیابی وضعیت جعبه‌دنده و نتایج حاصل در ادامه ارائه شده است. مشخصات فرکانس‌های جعبه‌دنده و یاتاقان‌های آن بدین قرار است:

$$GMF_1^5 \quad 18/60 = 18 \times 16.5 = 297 \text{ Hz}$$

$$GMF_2 \quad 18/64 = 64 \times 1.4 = 89 \text{ Hz}$$

3-4. بررسی منحنی شکل موج

در شکل 3 منحنی شکل موج ارتعاش یاتاقان شماره 2 جعبه‌دنده در جهت افقی نمایش داده شده است. پیک با حداکثر دامنه برابر با فرکانس چرخش محور میانی بوده و مربوط به زمانی است که ناحیه آسیب‌دیده تحت بار قرار می‌گیرد. وجود پیک برابر دور در منحنی شکل موج ارتعاشات جعبه‌دنده ناشی از وجود ضربه در هر چرخش محور میانی است.

3-5. بررسی منحنی فرکانسی

طیف فرکانسی ارتعاشات در تمامی نقاط جعبه‌دنده در محدوده فرکانسی صفر تا 1000 هرتز (با در نظر گرفتن

به GMF_1 می‌باشد. همچنین باندهای کناری^۸ سرعت دورانی نیز در اطراف آنها وجود دارد. دامنه بالای فرکانس ۱- GMF و باندهای کناری $1xRPM$ نشان‌دهنده وجود آسیب جدی در دو چرخ‌دنده درگیر محور ورودی می‌باشد.

استاندارد ایزو 13373^۷ جهت تعیین بازه فرکانسی مورد نظر) نیز بررسی شد. طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه 2 جعبه‌دنده در شکل 4 نشان‌دهنده بیشترین دامنه ارتعاش در فرکانس 297 هرتز و هارمونیک‌های آن است که مربوط

جدول 1. مشخصات الکتروموتور و جعبه‌دنده آسیا (که در هر دو سمت یکسان است)

| مشخصات جعبه دنده | | مشخصات الکتروموتور | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------|
| رنگ ^{۱۰} | سازنده | ای.بی.بی. ^۹ | سازنده |
| بی.اچ. 140 ^{۱۱} | تیپ | AML 630 L 6 AB AC | تیپ |
| 2750 کیلووات | توان نامی | 2750 کیلووات | توان نامی |
| 83/53 تا 993 دور بر دقیقه | سرعت دورانی محور ورودی و خروجی | 993 دور بر دقیقه | سرعت دورانی |

جدول 3. مقادیر ارتعاشات جعبه‌دنده شماره 2

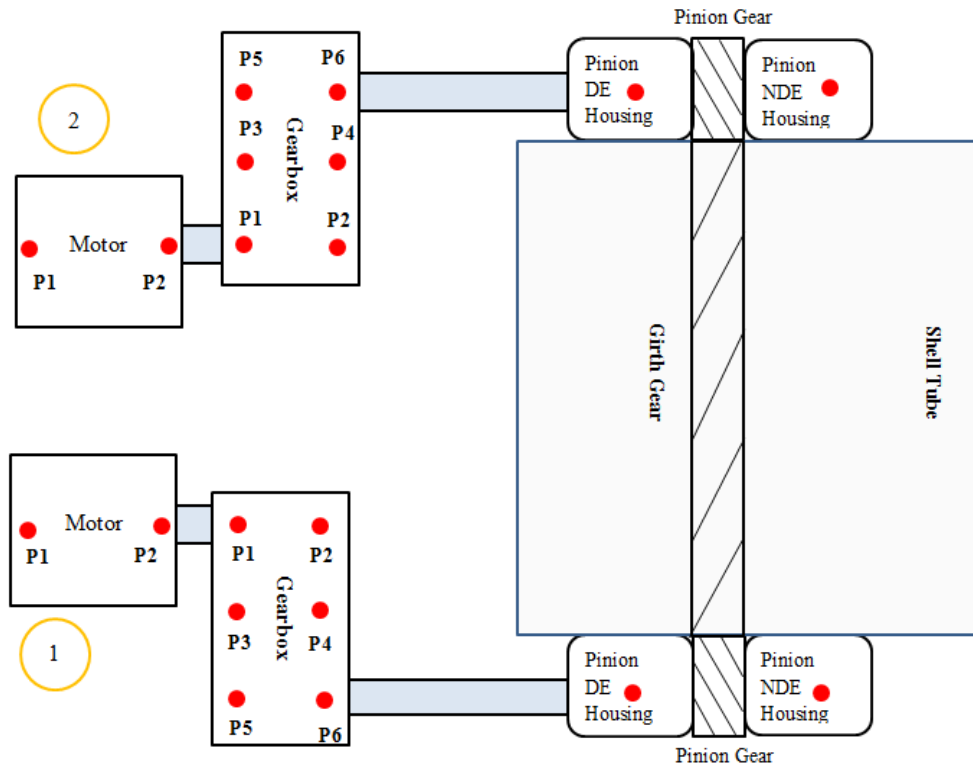
| | افقی (میلی‌متر بر ثانیه) | عمودی (میلی‌متر بر ثانیه) | محوری (میلی‌متر بر ثانیه) |
|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1/8 | 1/7 | 1/5 |
| 2 | 1/5 | 1/8 | 1/3 |
| 3 | 1/3 | 1/5 | 1/5 |
| 4 | - | 1/6 | 1/1 |
| 5 | 1/7 | 1/2 | 1/2 |
| 6 | 1/6 | 1/7 | 1 |

جدول 2. مقادیر ارتعاشات جعبه‌دنده شماره 1

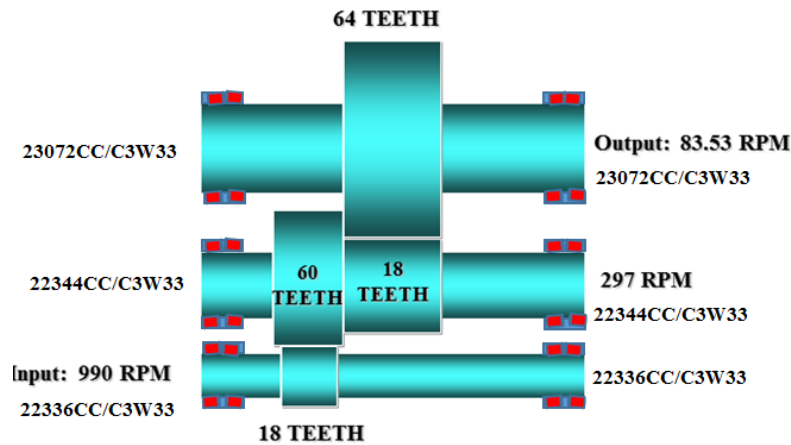
| | افقی (میلی‌متر بر ثانیه) | عمودی (میلی‌متر بر ثانیه) | محوری (میلی‌متر بر ثانیه) |
|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 3/9 | 3/7 | 4 |
| 2 | 3/8 | 3/4 | 2/7 |
| 3 | 2/6 | 2/7 | 2/3 |
| 4 | - | 3/1 | 2 |
| 5 | 2/5 | 2/3 | 2/6 |
| 6 | 2/1 | 3/3 | 2/5 |

جدول 4. فرکانس‌های چهارگانه اجزای یاتاقان‌های جعبه‌دنده

| نوع یاتاقان ^{۱۶} | فرکانس خرابی رینگ داخلی ^{۱۵} | فرکانس خرابی رینگ بیرونی ^{۱۴} | فرکانس گردش غلتک ^{۱۳} | فرکانس گردش قفسه ^{۱۲} |
|---------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| 22336 | 146 | 102 | 44/5 | 6/82 |
| 22344 | 46 | 32/7 | 13/8 | 1/9 |
| 23072 | 21/3 | 17/7 | 7/26 | 0/6 |



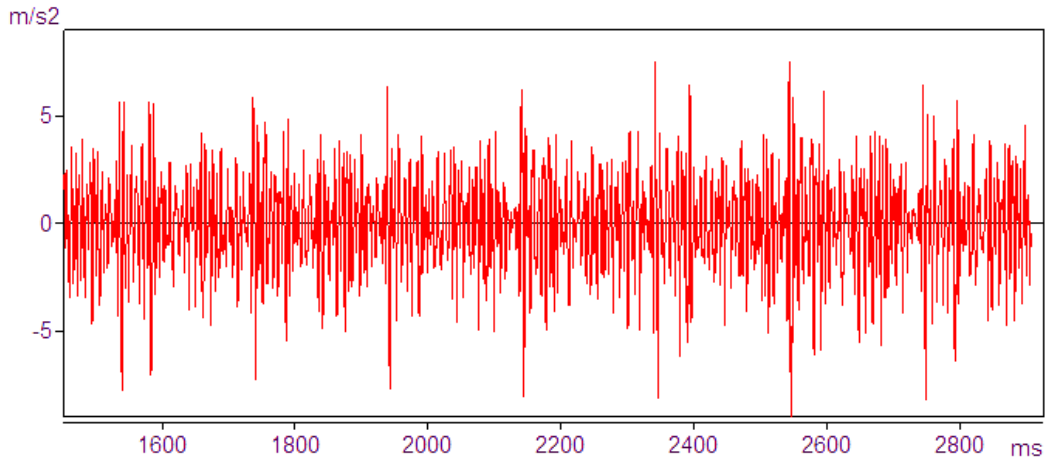
شکل 1. جانمایی الکتروموتورها، جعبه‌دنده‌ها و یاتاقان‌های چرخ‌دنده محرک و متحرک آسیا



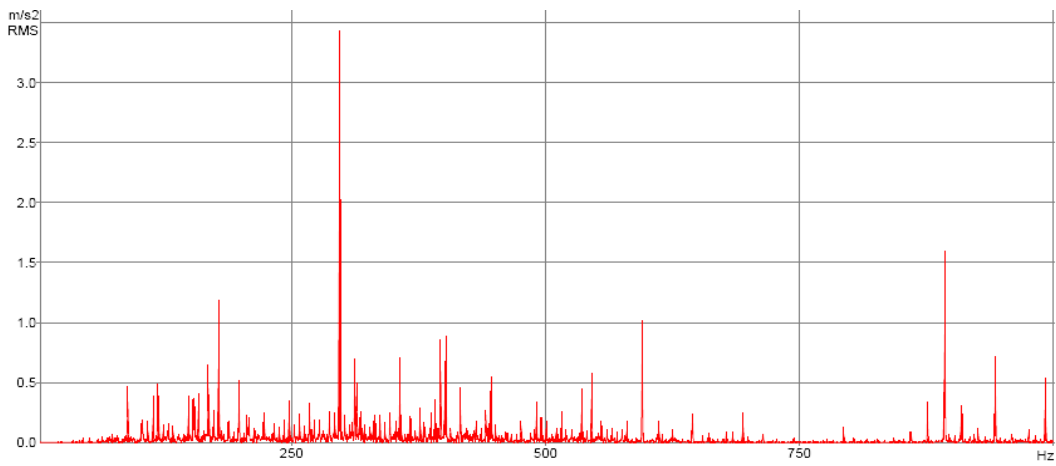
2. مشخصات کلی اجزای جعبه‌دنده

وجود باندهای کناری با فاصله سرعت دورانی محور مربوطه (5 هرتز) در اطراف فرکانس GMF_2 و هارمونیک‌های آن می‌باشد. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از بررسی شکل‌های 5 و 6، وجود هارمونیک‌های GMF_2 و تعداد زیاد باندهای کناره آن مشخص‌کننده وضعیت بسیار نامناسب چرخ‌دنده محور میانی (18 TEETH) می‌باشد.

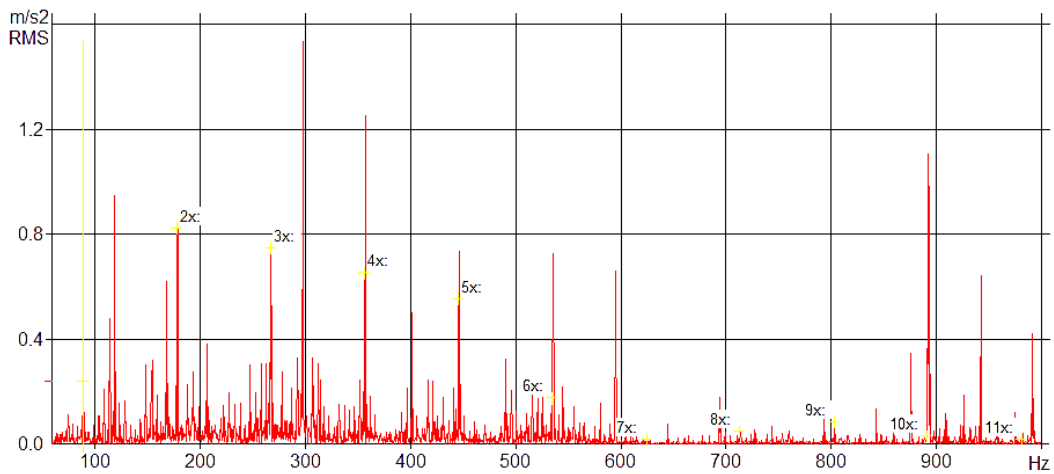
در طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه 4 جعبه‌دنده، که در شکل 5 نمایش داده شده است، علاوه بر وجود بیشترین دامنه ارتعاش در فرکانس GMF_1 ، ارتعاشات در فرکانس 89 هرتز و هارمونیک‌های چند برابر دور آن که مربوط به فرکانس GMF_2 است، نیز مشاهده می‌شود. بررسی طیف فرکانسی ارتعاش نقطه 4 در راستای افقی نشان‌دهنده



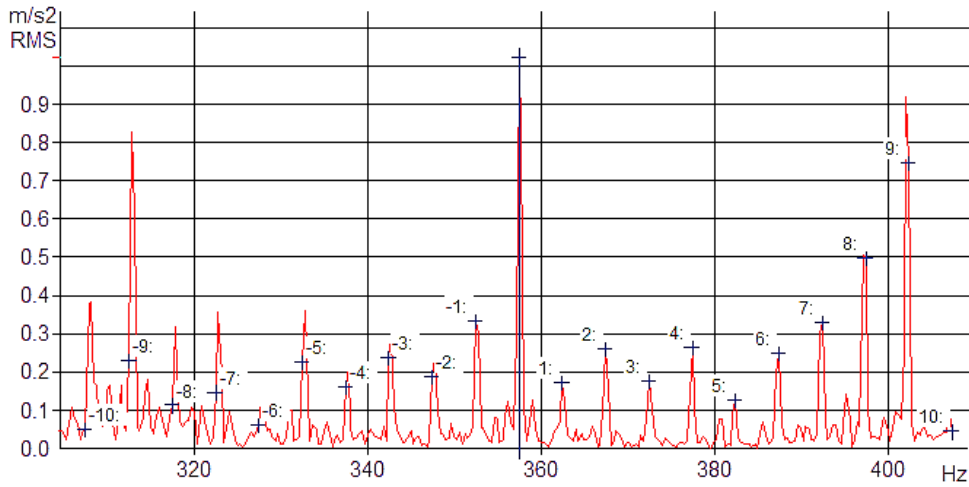
شکل 3. منحنی زمانی شتاب ارتعاشات در راستای افقی نقطه 2 جعبه‌دنده



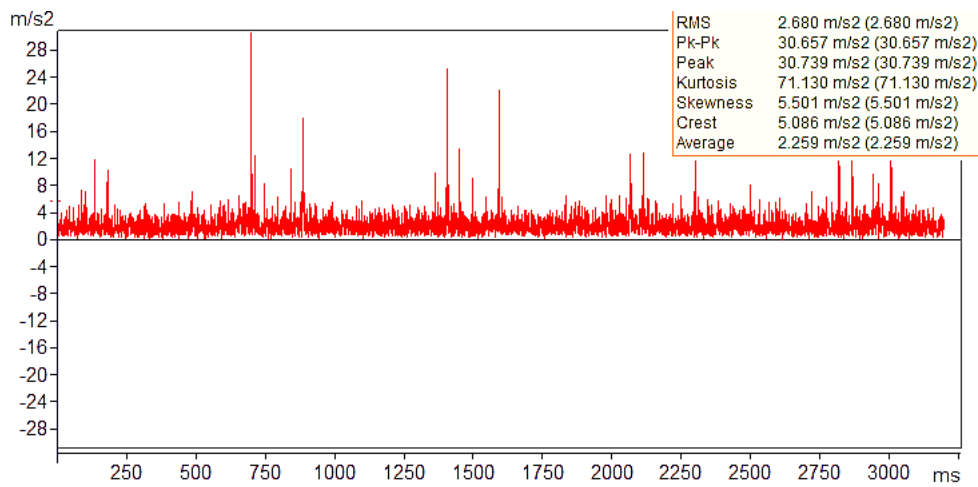
شکل 4. طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات در راستای افقی نقطه 2 جعبه‌دنده



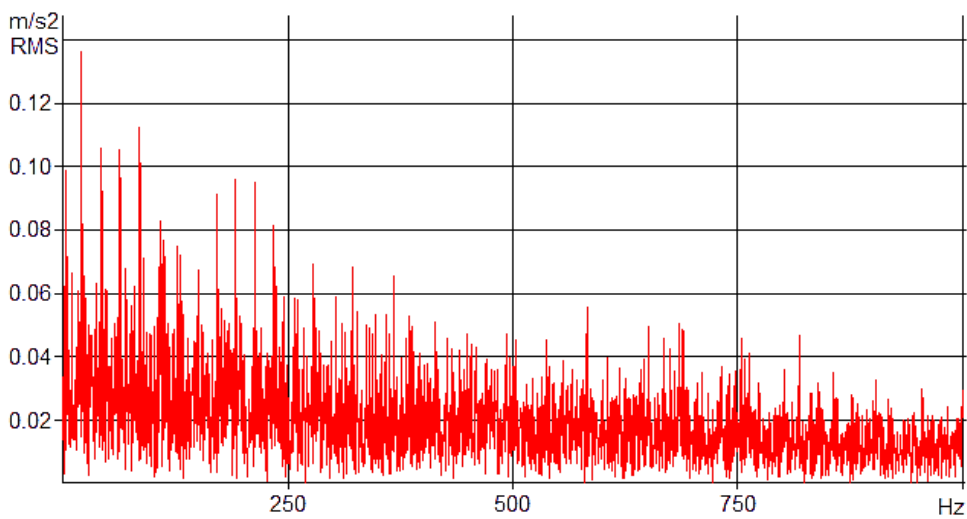
شکل 5. طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات جعبه‌دنده در راستای عمودی نقطه 4



شکل 6. طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات جعبه‌دنده در راستای افقی نقطه 4



شکل 7. منحنی سیگنال زمانی یا شکل موج پوش^{۱۷} ارتعاشات یاتاقان شماره 5 در راستای افقی



شکل 8. منحنی فرکانسی پوش ارتعاشات یاتاقان 5 در راستای افقی

3-6. بررسی منحنی پوش ارتعاشات

منحنی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره 5 جعبه‌دنده در شکل‌های 7 و 8 نمایش داده شده است (مقادیر شاخص‌های مختلف در جدول منحنی شکل 7 نمایش داده شده است). مقدار شاخص Crest Factor در مقایسه با یاتاقان مشابه در جعبه‌دنده 2 بیشتر و غیرعادی می‌باشد. مؤلفه‌های فرکانسی که در شکل 8 دیده می‌شوند، مضارب فرکانس 21/3 هرنز (فرکانس خرابی اجزای داخلی بیرینگ 23072) و هارمونیک‌های آن می‌باشند، که باندهای کناری سرعت دورانی (1xRPM) نیز در اطراف آنها وجود دارد.

شکل 11 نشان‌دهنده کاهش میزان ارتعاشات پس از تعمیر می‌باشد.



شکل 9. تصویر خرابی چرخ‌دنده محور میانی

3-7. جمع‌بندی نتایج حاصل از بررسی انواع

منحنی‌های ارتعاشی

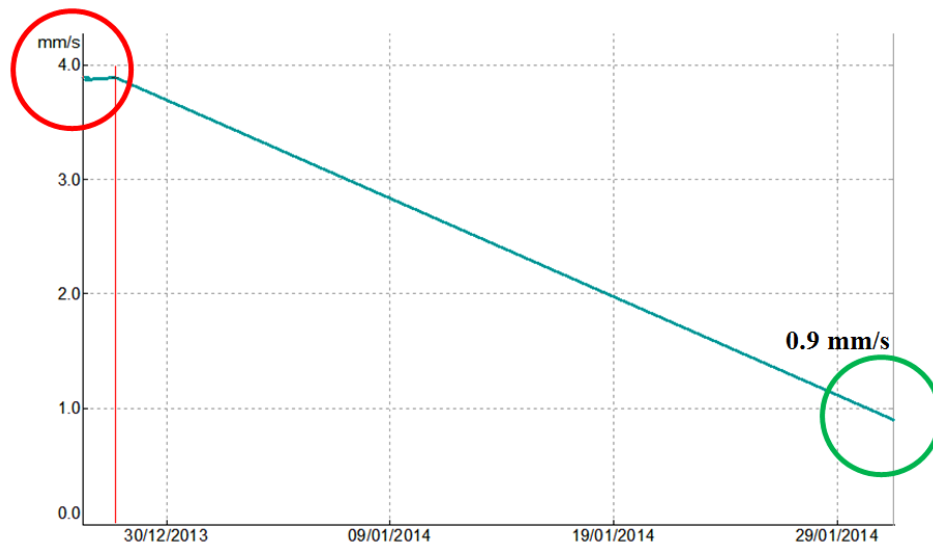
بررسی الگوی ایجادشده در انواع منحنی‌های ارتعاشی ثبت‌شده از جعبه‌دنده 1 و مقایسه آنها با منحنی‌های ارتعاشی ثبت‌شده از جعبه‌دنده 2 مؤید وجود خرابی در دنده‌ها و بیرینگ‌های جعبه‌دنده 1 بوده، به‌گونه‌ای که شدت خرابی در چرخ‌دنده‌های محور میانی شدیدتر است. شایان ذکر است که برای تعیین شدت نسبی خرابی در اجزاء، منحنی طیف فرکانسی ارتعاشات، معیار مناسب‌تری از شدت عیب است. علت این موضوع نوع خرابی رخ داده و پالس نسبتاً قوی ایجادشده بر اثر آن است که در منحنی طیف فرکانسی، دامنه بالای فرکانس GMF و هارمونیک و باندهای کناری آن واضح‌تر مشاهده می‌شوند.

3-8. نتیجه بازدید از جعبه‌دنده

پس از هماهنگی‌های انجام‌شده و توقف و بازرسی جعبه‌دنده مورد نظر در یک فرصت تعمیراتی مشخص شد که دقیقاً مطابق با تحلیل ارتعاشات انجام شده، شکست در چرخ‌دنده محور میانی، خرابی اجزای داخلی یاتاقان 5 و آسیب‌های سطحی روی سایر چرخ‌دنده‌ها مشاهده شد. وضعیت ارتعاشات ماشین پس از تعویض اجزای معیوب در

4. جمع‌بندی

پایش وضعیت ارتعاشی تجهیزات دوار دارای جعبه‌دنده از جمله اقدامات ضروری است که در یک برنامه نگهداری و تعمیرات جامع باید مورد توجه قرار گیرد. هدف از این پایش، ارزیابی وضعیت سلامت و عیب‌یابی اجزای جعبه‌دنده نظیر چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌هاست که معمولاً در بازرسی‌های معمولی قابل مشاهده و شناسایی نمی‌باشند. شناسایی به‌موقع آسیب در اجزای جعبه‌دنده از گسترش آن در سایر اجزای ماشین پیشگیری می‌کند. در این مقاله، مطالعه‌ای موردی از تشخیص خرابی جعبه‌دنده در یک کارخانه سیمان مطرح شد. توجه به توصیه دستورالعمل‌های موجود، مقایسه وضعیت ارتعاشات ماشین‌های مشابه، به‌کارگیری انواع منحنی‌های ارتعاشی و اندازه‌گیری پارامترهای مناسب جهت اظهار نظر دقیق در خصوص وضعیت سلامت ماشین و محل عیب موضوعی است که در این مقاله مورد تأکید قرار گرفته است. این تجربه نشان می‌دهد در صورت اراده متخصصان پایش وضعیت می‌توان با تعامل سازنده و انجام خدمات باکیفیت به صادرات این‌گونه از خدمات مهندسی مبادرت ورزید.



شکل 11. منحنی رفتار ارتعاشی یاتاقان 2 جعبه‌دنده 1 در راستای عمودی قبل و پس از تعمیر

5. مأخذ

[1] بهزاد، مهدی، کیوان سپانلو، مسعود آسایش و عباس روحانی. اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری، تعمیرات و عیب‌یابی

ماشین‌های دوار، تهران: انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی، چاپ اول، 1386.

[2] وروانی فراهانی، حسین، حسین غلامزاده ثانی، علیرضا رضائی. "پایش وضعیت و عیب‌یابی ریشه‌ای یاتاقان‌های کلینکر

کراشر در یک کارخانه سیمان"، هشتمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات، ایران، تهران، دانشگاه

صنعتی شریف، اسفند 1392.

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

پی‌نوشت

1. overall vibration
2. high frequency detection
3. bearing condition unit
4. crest factor
5. gearmesh frequency
6. time wave form
7. ISO 13373
8. side band
9. ABB
10. RENK
11. BH 140
12. cage frequency
13. ball spin frequency

14. ball pass frequency of outer race
15. ball pass frequency of inner race
16. bearing type
17. envelope