

به نام خدا

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

حسین غلامزاده ثانی^۱ - علیرضایی^۲

^۱مدیر عامل و ^۲سرپرست پایش وضعیت

شرکت مهندسی اندیشه پردازان سپهر آپادانا

* info@apsagroup.ir

چکیده:

در تجهیزاتی از قبیل جعبه دنده‌ها به علت پیچیدگی و در دسترس نبودن اجزای داخلی، بکارگیری آنالیز ارتعاشات بمنظور شناسایی دقیق نوع و شدت خرابی و نیز محل وقوع آن نیازمند دقت، تمرکز و توجه به جزئیات می‌باشد، که اگر این موارد در پایش وضعیت ارتعاشات جعبه دنده‌ها بدرستی مورد توجه قرار گیرند شناسایی عیوب حتی در پیچیده‌ترین و بزرگ‌ترین جعبه دنده‌ها نیز میسر خواهد بود. در این مقاله، نمونه‌ای از بکارگیری آنالیز ارتعاشات در کشف خرابی اجزای داخلی جعبه دنده آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی ترکمنستان، ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌است.

واژه‌های کلیدی: پایش وضعیت، آنالیز ارتعاشات، یاتاقان و جعبه دنده

مقدمه:

یکی از بخش‌های اصلی تولید در کارخانه سیمان، بخش آسیای مواد خام است که از جمله تجهیزات مهم آن، الکتروموتور و جعبه دنده آسیا می‌باشد. توقف آسیای مواد خام، توقف کوره (بخش پخت) را بدنبال خواهد داشت که در واقع، به معنی کاهش حجم تولید سیمان خواهد بود. لذا پایش و تشخیص بموقع عیوب تجهیزات آسیای مواد، در راستای تولید پایدار بسیار ضروری است.

۱- ارزیابی وضعیت ماشین‌آلات براساس آنالیز ارتعاشات

۱-۱- مقدمه

ارتعاشات یک ماشین، پایداری زیاد و تأثیر پذیری کمی از عوامل محیطی داشته 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 آن‌ها می‌باشد.

۱-۲- نحوه ارزیابی وضعیت ماشین آلات براساس مقادیر ارتعاشات

جهت تعیین وضعیت کلی ماشین بر مبنای مقادیر ارتعاشات، معمولاً مقدار کلی دامنه ارتعاش^۱ با یکی از موارد زیر مقایسه می‌گردد:

- توصیه سازنده
- دستورالعمل‌های منتشر شده
- کنترل رفتار
- اطلاعات مقایسه‌ای [1]

۱-۳- سایر روش‌های ارزیابی وضعیت ارتعاشات ماشین آلات [2]

بطور معمول، دامنه کلی ارتعاشات از جنس سرعت بوده و در باند ISO یعنی فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰۰ 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، ناهم محوری، لقی مکانیکی و ... است. از همین روی به عنوان ارزیابی دقیق‌تر، روش‌های زیر به عنوان شاخص کلی وضعیت ماشین آلات نیز قابل استفاده هستند:

- شاخص دامنه ارتعاش در فرکانس بالا یا HFD^۲. (مقدار کلی دامنه شتاب ارتعاش که در باند فرکانس بالا برای مثال ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز یا بیشتر، اندازه‌گیری و پایش می‌شود) [3]
- شاخص وضعیت یاتاقان غلتشی^۳ (BC)
- شاخص قله^۴ (CF).

۲- آسیای مواد خام و ارزیابی وضعیت آن

۲-۱- آشنایی با تجهیز:

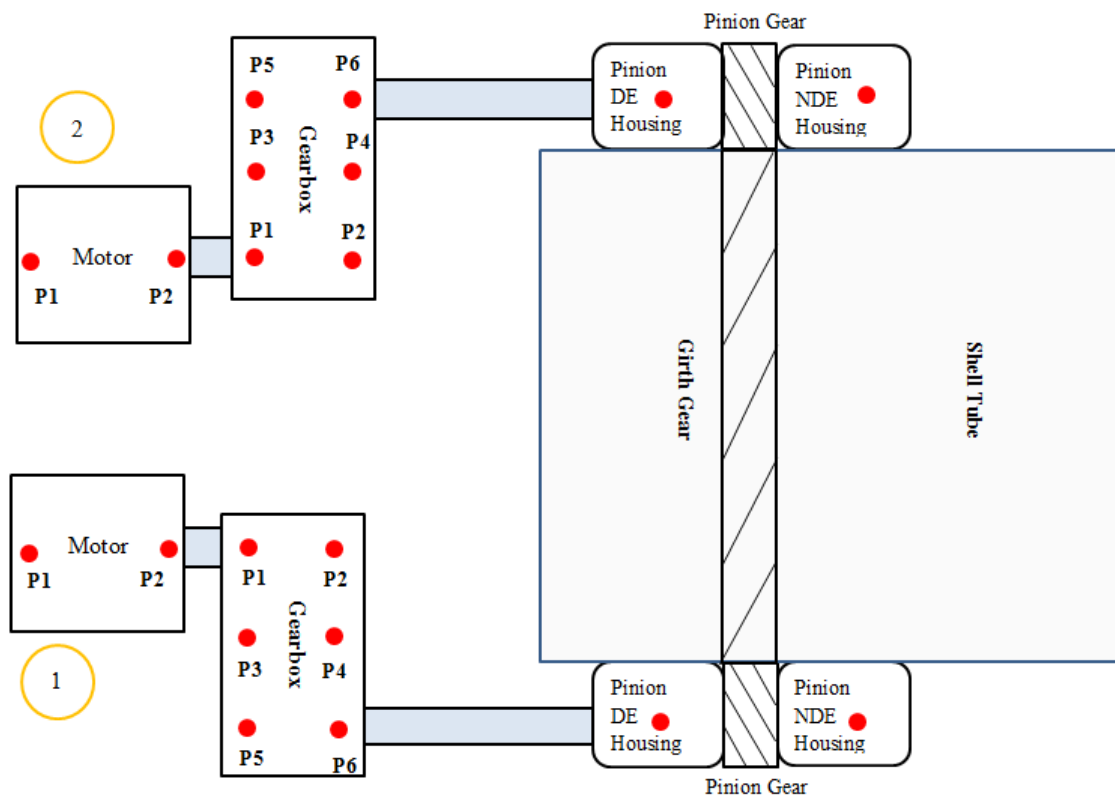
کارخانجات تولید سیمان از بخش‌ها یا دپارتمان‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که در هر یک از آن‌ها، بخشی از مراحل تولید انجام می‌شود. یکی از بخش‌های مهم این صنایع، بخش آسیای مواد خام می‌باشد. در این بخش، سنگ‌های مواد خام وارد آسیا شده و پس از طی مراحل، بصورت پودر مواد خام وارد بخش پخت یا کوره می‌شوند. توقف هر یک از اجزاء اصلی آسیای مواد خام، منجر به توقف کوره شده و نهایتاً کاهش ظرفیت تولید کارخانه و خسارت اقتصادی را در پی خواهد داشت. آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی ترکمنستان از نوع گلوله‌ای بوده و انتقال قدرت در آن بوسیله دو مجموعه مجزای چرخ دنده محرک و متحرک انجام می‌شود.

¹ Overall Vibration

² High Frequency Detection

³ Bearing Condition Unit

⁴ Crest Factor



شکل ۱ - جانمایی الکتروموتورها، جعبه دنده‌ها و یاتاقان‌های چرخ دنده محرک و متحرک آسیا

- مشخصات الکتروموتور و جعبه دنده آسیا :

جدول ۱- مشخصات الکتروموتور و جعبه دنده آسیا (که در هر دو سمت یکسان است)

مشخصات جعبه دنده	مشخصات الکتروموتور
سازنده : RENK	سازنده : ABB
تیپ : BH 140	تیپ : AML 630 L 6 AB AC
توان نامی : 2750 KW	توان نامی : 2750 KW
سرعت دورانی شافت ورودی و خروجی : 993-83.53 rpm	سرعت دورانی : 993 RPM

۲-۲- ارزیابی وضعیت ارتعاشات آسیا :

پایش وضعیت تجهیزات مختلف آسیا (از جمله جعبه دنده) جزو مهمی از برنامه‌های پایش وضعیت در یک کارخانه سیمان بشمار میرود. افزایش غیرعادی ارتعاشات جعبه دنده آسیای مواد خام کارخانه سیمان باهارلی در حین بهره برداری مدیران مجموعه را بر آن داشت تا با توجه به اهمیت موضوع ضمن تعریف یک پروژه به بررسی علل و ارائه راهکارها بپردازند.

با توجه به عدم وجود سوابق قبلی از ارتعاشات ماشین، بمنظور مطالعه و بررسی رفتار ارتعاشاتی جعبه‌دنده، در گام نخست بررسی موضوع تنها از دو راه امکان پذیر بود :

۱- مقایسه وضعیت ارتعاشات دو سمت آسیا با یکدیگر

۲- مقایسه با مقادیر پیشنهادی استاندارد

در اولین اندازه‌گیری انجام شده از آسیای مواد خام، مقادیر ارتعاشات ثبت شده از جعبه دنده‌ها به شرح ذیل در جدول شماره دو و سه قید شده‌اند.

جدول ۲- مقادیر ارتعاشات جعبه دنده شماره یک

جهت نقطه	Horizontal (mm/s)	Vertical (mm/s)	Axial (mm/s)
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 ۳- مقادیر ارتعاشات جعبه دنده شماره دو

جهت نقطه	Horizontal (mm/s)	Vertical (mm/s)	Axial (mm/s)
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 ۴- مقادیر مرزی شدت ارتعاش ماشین‌های گروه یک : ماشین‌های بزرگ با توان بالاتر از ۳۰۰ کیلووات تا کمتر از ۵۰ مگاوات و ماشین‌های الکتریکی با ارتفاع شفت H بزرگتر یا مساوی ۳۱۵ میلی متر

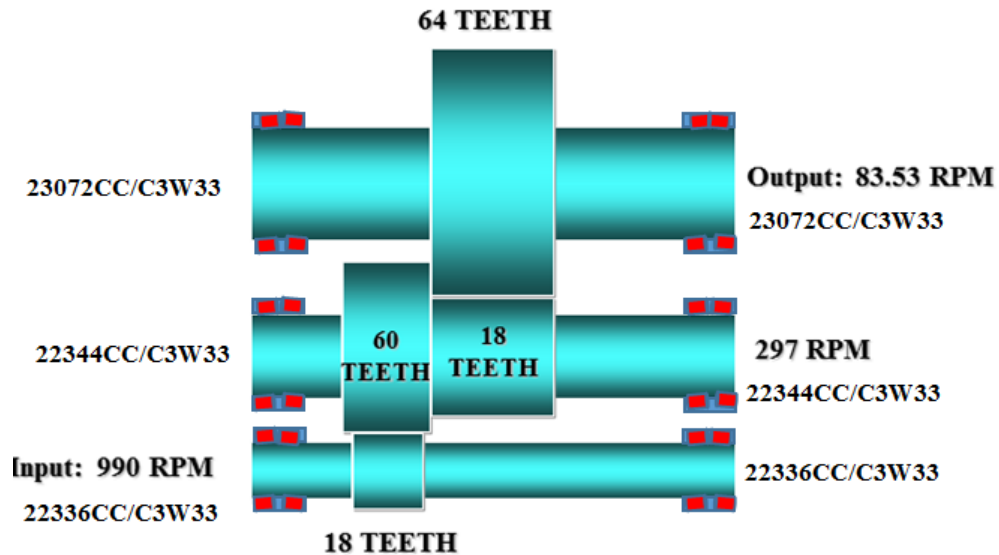
Support Class	Zone boundary	R.M.S Displacement μm	R.M.S Velocity mm/s
Rigid	A/B	29	2.3
	B/C	57	4.5
	C/D	90	7.1
Flexible	A/B	45	3.5
	B/C	90	7.1
	C/D	140	11

مطالعه مقادیر ارایه شده در جدول‌های فوق و مقایسه آنها با مقادیر استاندارد بیانگر دو نکته مهم و معنادار می‌باشند :

- ۱- مقادیر ارتعاشات کلیه نقاط جعبه دنده شماره یک در مقایسه با جعبه دنده شماره دو بیشتر است.
- ۲- مقایسه مقادیر ارتعاشات اندازه‌گیری شده از جعبه دنده‌های آسیا با استاندارد ISO 10816-3 نیز نشان‌دهنده وضعیت غیرعادی در جعبه دنده شماره یک می‌باشد.

۳-۲- ارزیابی دقیق تر وضعیت ماشین از طریق بررسی طیف‌های ارتعاشی

پس از تشخیص اولیه وجود عیب در جعبه دنده شماره یک ، بمنظور ارزیابی دقیق تر ، مطالعه انواع منحنی‌های ارتعاشی، در دستور کار قرار گرفت ، که جزئیات منحنی‌های استفاده شده برای ارزیابی وضعیت جعبه دنده و نتایج بدست آمده، در ادامه ارائه گردیده است.



شکل ۲- مشخصات کلی اجزای جعبه دنده

- مشخصات فرکانس‌های جعبه دنده و یاتاقان‌های آن :

$$GMF_1^1 \ 18/60 = 18 \times 16.5 = 297 \text{ Hz}$$

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

جدول ۵- فرکانس‌های چهارگانه اجزاء یاتاقان های جعبه دنده

Bearing Type	فرکانس خرابی رینگ داخلی ^۵	فرکانس خرابی رینگ بیرونی ^۴	فرکانس گردش غلتک ^۳	فرکانس گردش قفسه ^۲
22336	146	102	44.5	6.82
22344	46	32.7	13.8	1.9
23072	21.3	17.7	7.26	0.6

¹ Gearmesh Frequency

² Cage Frequency

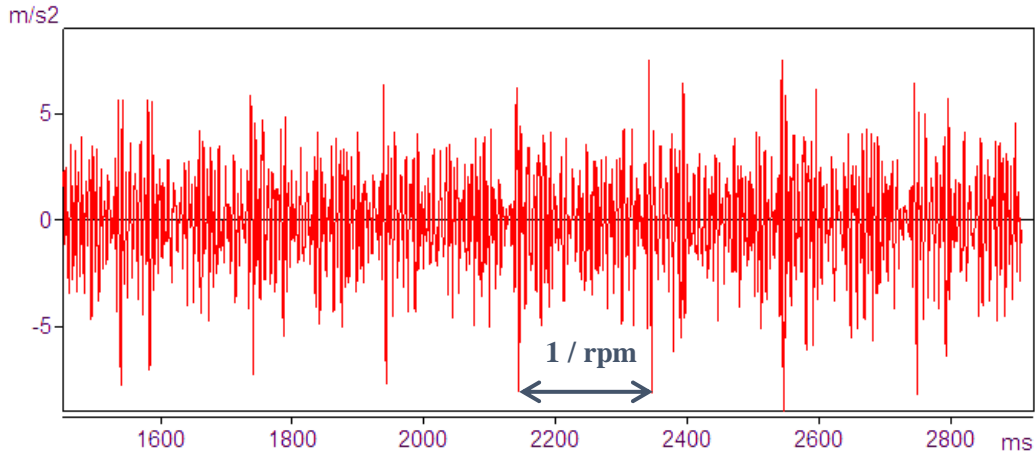
³ Ball Spin Frequency

⁴ Ball Pass Frequency of Outer Race

⁵ Ball Pass Frequency of Inner Race

۴-۲- بررسی منحنی شکل موج^۱

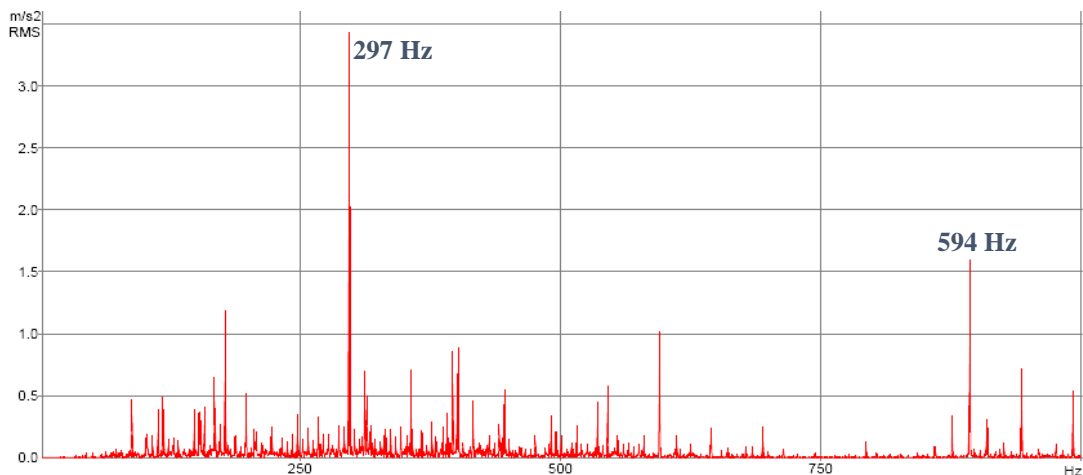
منحنی شکل موج ارتعاش یاتاقان شماره دو جعبه دنده در جهت افقی، در شکل ۳ آمده است. پیک با حداکثر دامنه برابر با فرکانس چرخش محور میانی بوده و مربوط به زمانی است که ناحیه آسیب دیده تحت بار قرار می‌گیرد.



شکل ۳- منحنی زمانی شتاب ارتعاشات در راستای افقی نقطه شماره ۲ جعبه دنده وجود پیک برابر دور در منحنی شکل موج ارتعاشات جعبه دنده ناشی از وجود ضربه در هر چرخش محور میانی است.

۴-۵- بررسی منحنی فرکانسی

طیف فرکانسی ارتعاشات در کلیه نقاط جعبه دنده در محدوده فرکانسی ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز (با در نظر گرفتن استاندارد ISO 13373 جهت تعیین بازه فرکانسی مورد نظر) نیز مورد بررسی قرار گرفت. طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه شماره ۲ جعبه دنده در شکل ۴ نشان دهنده بیشترین دامنه ارتعاش در فرکانس 297Hz و هارمونیک‌های آن است که مربوط به GMF_1 می‌باشد. همچنین باندهای کناری^۲ سرعت دورانی (1xRPM) نیز در اطراف آن‌ها وجود دارد. دامنه بالای فرکانس GMF_1 و باندهای کناری 1xRPM، نشان دهنده وجود آسیب جدی در دو چرخ دنده در گیر محور ورودی می‌باشد.

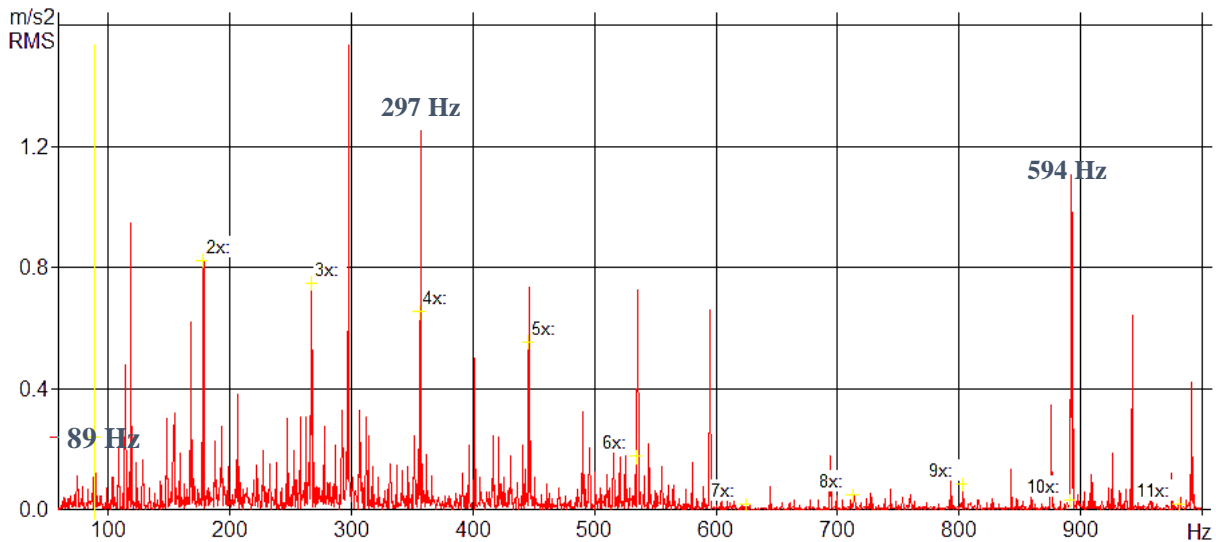


شکل ۴- طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات در راستای افقی نقطه شماره ۲ جعبه دنده

¹ Time Wave Form

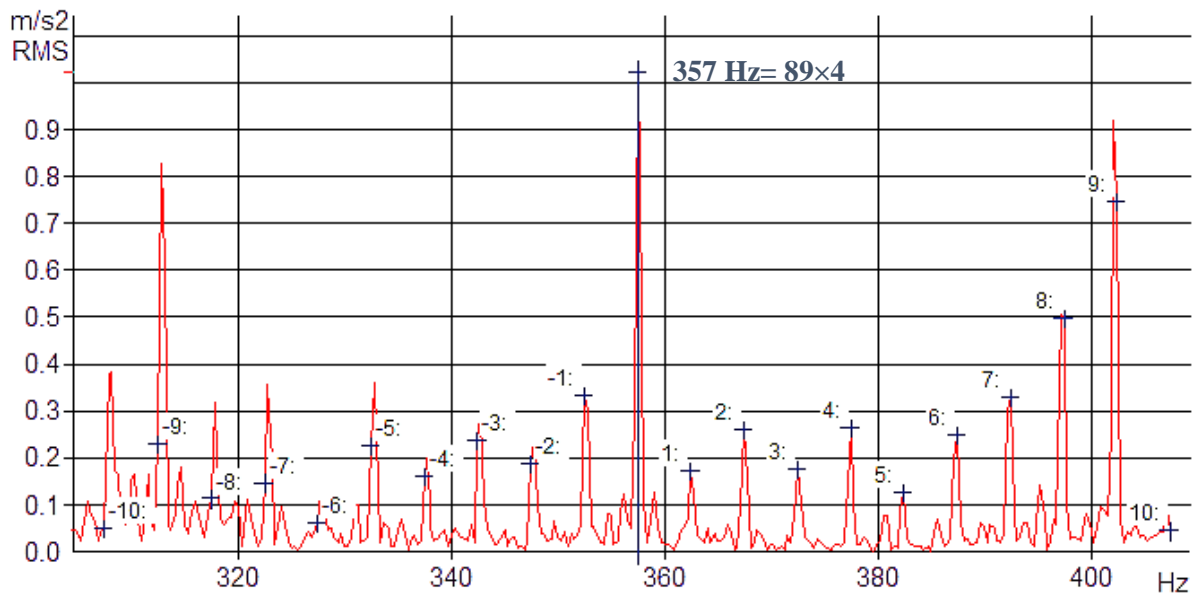
² Side Band

در طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه شماره ۴ جعبه دنده که در شکل شماره ۵ آمده است علاوه بر وجود بیشترین دامنه ارتعاش در فرکانس GMF_1 ، ارتعاشات در فرکانس 89Hz و هارمونیک‌های چند برابر دور آن که مربوط به فرکانس GMF_2 است، نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۵- طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات جعبه دنده در راستای عمودی نقطه شماره ۴

بررسی طیف فرکانسی ارتعاش نقطه شماره ۴ در راستای افقی نشان دهنده وجود باندهای کناری با فاصله سرعت دورانی محور مربوطه (5Hz) در اطراف فرکانس GMF_2 و هارمونیک‌های آن می‌باشد.

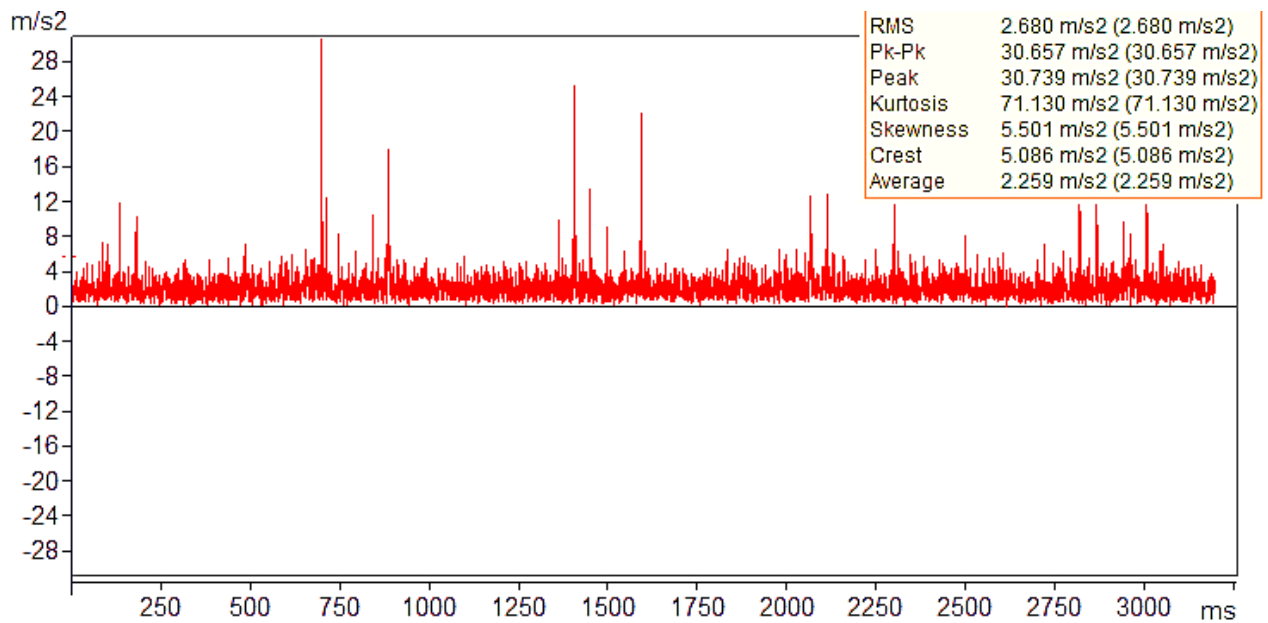


شکل ۶- طیف فرکانسی شتاب ارتعاشات جعبه دنده در راستای افقی نقطه شماره ۴

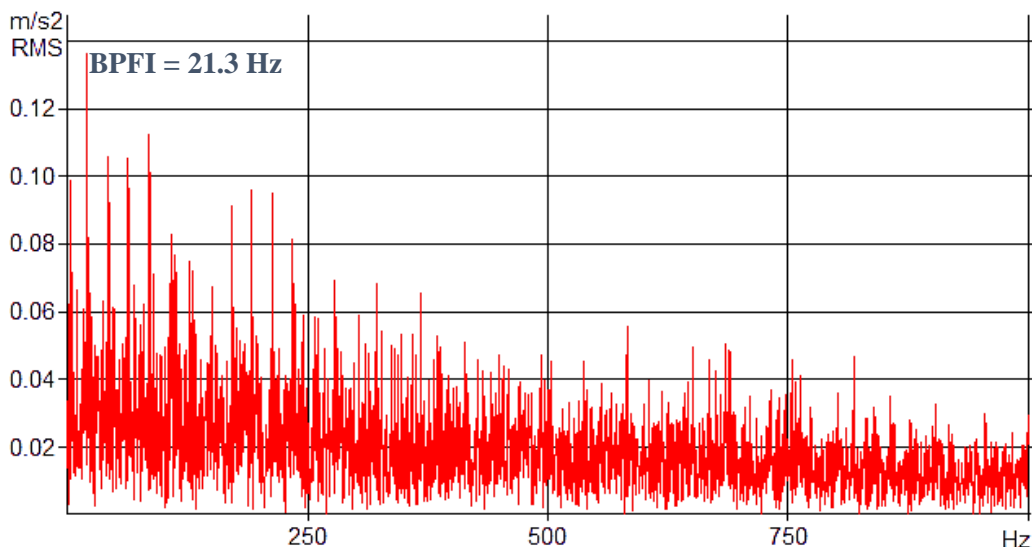
با در نظر گرفتن نتایج حاصله از بررسی شکل‌های شماره ۵ و ۶، وجود هارمونیک‌های GMF_2 و تعداد زیاد باندهای کناره آن مشخص کننده وضعیت بسیار نامناسب چرخ دنده محور میانی (18 TEETH) می‌باشد.

۶-۲- بررسی منحنی پوش^۱ ارتعاشات

منحنی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره ۵ جعبه دنده در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است (مقادیر شاخص‌های مختلف در جدول منحنی شکل ۷ نمایش داده شده است). مقدار شاخص Crest Factor در مقایسه با یاتاقان مشابه در جعبه دنده شماره ۲ بیشتر و غیرعادی می‌باشد. مؤلفه‌های فرکانسی که در شکل ۸ دیده می‌شوند، مضارب فرکانس 21.3 Hz (فرکانس خرابی اجزای داخلی بیرینگ 23072) و هارمونیک‌های آن می‌باشند، که باندهای کناری سرعت دورانی (1xRPM) نیز در اطراف آن ها وجود دارد.



شکل ۷ - منحنی سیگنال زمانی یا شکل موج پوش (Envelope) ارتعاشات یاتاقان شماره ۵ در راستای افقی



شکل ۸ - منحنی فرکانسی پوش (Envelope) ارتعاشات یاتاقان شماره ۵ در راستای افقی

^۱ Envelope

۲-۷- جمع بندی نتایج بدست آمده از بررسی انواع منحنی‌های ارتعاشی

بررسی الگوی ایجاد شده در انواع منحنی‌های ارتعاشی ثبت شده از جعبه دنده شماره ۱ و مقایسه آن‌ها با منحنی‌های ارتعاشی ثبت شده از جعبه دنده شماره ۲، تأیید کننده وجود خرابی در دنده‌ها و بیرینگ‌های جعبه دنده شماره ۱ بوده، بگونه‌ای که شدت خرابی در چرخ دنده‌های محور میانی شدیدتر می‌باشد. شایان ذکر است که برای تعیین شدت نسبی خرابی در اجزا، منحنی طیف فرکانسی ارتعاشات، معیار مناسب‌تری از شدت عیب می‌باشد. علت این موضوع، نوع خرابی رخ داده و پالس نسبتاً قوی ایجاد شده بر اثر آن است که در منحنی طیف فرکانسی، دامنه بالای فرکانس GMF و هارمونیک و باندهای کناری آن واضح‌تر مشاهده می‌شوند.

۲-۸- نتیجه بازدید از جعبه دنده :

پس از هماهنگی‌های انجام شده و توقف و بازرسی جعبه‌دنده مورد نظر در یک فرصت تعمیراتی، مشخص شد که دقیقاً مطابق با تحلیل ارتعاشات انجام گرفته، شکست در چرخ دنده محور میانی، خرابی اجزای داخلی یاتاقان شماره ۵ و آسیب‌های سطحی بر روی سایر چرخ دنده‌ها مشاهده گردید.



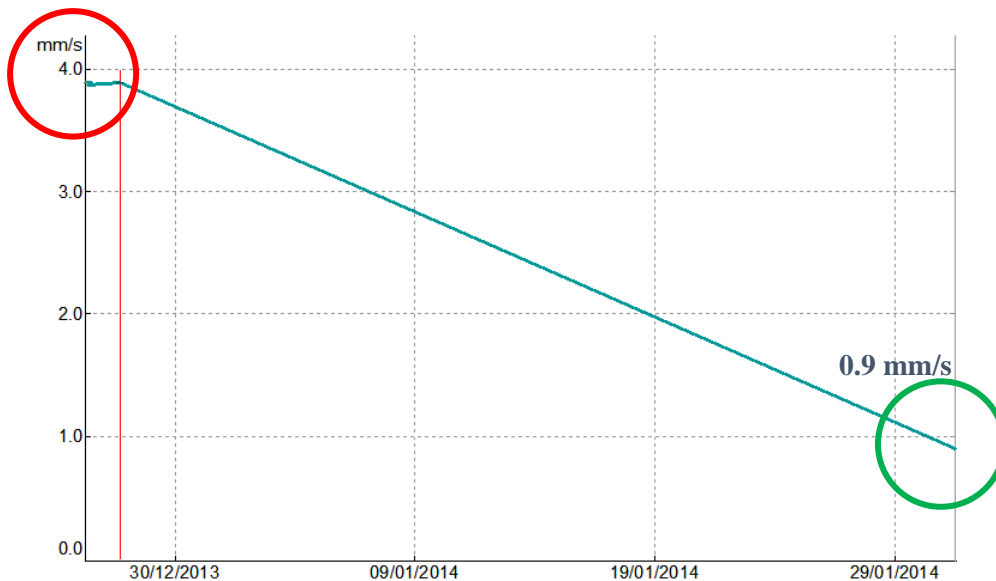
شکل ۹- تصویر خرابی چرخ دنده محور میانی



شکل ۱۰- تصویر خرابی در یاتاقان شماره ۵

۲-۹- اثربخشی اقدام اصلاحی انجام شده

وضعیت ارتعاشات ماشین پس از تعویض اجزای معیوب در شکل شماره ۱۱، نشان دهنده کاهش میزان ارتعاشات پس از تعمیر می‌باشد.



شکل ۱۱- منحنی رفتار ارتعاشی یاتاقان شماره ۲ جعبه دنده شماره یک در راستای عمودی قبل و پس از تعمیر

۳- نتیجه‌گیری

پایش وضعیت ارتعاشی تجهیزات دوار دارای جعبه دنده، 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 اجزاء جعبه دنده نظیر چرخ دنده‌ها و یاتاقان‌ها می‌باشد که معمولاً در بازرسی‌های معمولی قابل مشاهده و شناسایی نمی‌باشند. شناسایی بموقع آسیب در اجزاء جعبه دنده، از گسترش آن در سایر اجزای ماشین پیشگیری می‌نماید. در این مقاله، یک مطالعه موردی از تشخیص خرابی جعبه دنده در یک کارخانه سیمان مورد بررسی قرار گرفت. توجه به توصیه دستورالعمل‌های موجود، مقایسه وضعیت ارتعاشات ماشین‌های مشابه، بکارگیری 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 متخصصین پایش وضعیت در کشورمان، می‌توان با تعامل سازنده و انجام خدمات با کیفیت، به صادرات این نوع از خدمات مهندسی به خارج کشور مبادرت نموده تا ضمن دستیابی مزایای اقتصادی و نیز گسترش تجارت و دستاورد های فنی در راستای اعتلای نام کشور عزیزمان ایران اقدام نمائیم.

۴- فهرست منابع

- ۱- مولفین: مهدی بهزاد، کیوان سپانلو، مسعود آسایش و عباس روحانی - اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری، تعمیرات و عیب‌یابی ماشین‌های دوار - ناشر: انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی، چاپ اول ۱۳۸۶ - صفحات ۷۷...۸۱
- ۲- پایش وضعیت و عیب‌یابی ریشه‌ای یاتاقان‌های کلینکر کراشر در یک کارخانه سیمان، حسین وروانی فراهانی، حسین غلامزاده ثانی و علیرضائی، هشتمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۲

3- Frank Gagnon - Spike Energy Diagnostics (and Similar Techniques), History, Usefulness & Future Outlook - Vibra-K Consultants Ltd