

## پایش وضعیت و تشخیص عیوب بیرینگ‌ها به کمک آنالیز ارتعاشات، صداسنجی و ترموگرافی



مهندس احمد محمودی گزیک  
بازرس فنی برق واحد فنی و مهندسی سیمان خاش

### چکیده:

در این مقاله سعی شده است به نحوه تشخیص و رفع عیوب تجهیزات دوار و منحصرأ ایراد بیرینگ‌ها پرداخته شود. در همین راستا به بررسی یک مورد کاوی خرابی بیرینگ سر عقب الکتروموتور بلوئر کارخانه سیمان خاش به صورت پله به پله پرداخته شده است و اقدامات صورت گرفته از جمله آنالیز ارتعاشات و بررسی طیف فرکانسی، ارتعاشات overall، آنالیز حرارتی (ترموگرافی)، صدا سنجی و استفاده از نرم افزار spectra pro به عنوان ابزاری قوی در جهت تشخیص عیوب بیرینگ به تفکیک بیان شده‌اند. در انتها نیز بعد از تعویض بیرینگ، نشان داده شده است که نتایج ارتعاشات به حد قابل قبولی تقلیل یافته است.

واژه‌های کلیدی: بیرینگ، آنالیز ارتعاشات، ترموگرافی، spectra pro، موتور و بلوئر

### ۱- مقدمه

دوار به کار می‌روند. ارزیابی سیستماتیک از وضعیت یاتاقان غلتشی و آنالیز عیوب وارده به اجزا یاتاقان، دامنه‌ی وسیعی را به خود اختصاص داده است. دلیل این امر آن است که یاتاقان‌های غلتشی اجزایی از ماشین هستند که اغلب زیاد تعویض می‌شوند و اکثراً هم در معرض سایش شدید قرار دارند. به علاوه یاتاقان‌های غلتشی اغلب علت اصلی عیوب پیش آمده هر ماشین و بنابراین در کل فرآیند تولید نیز هست. با این وجود امروزه روش‌های بسیار موثر و کارآمد عیب‌یابی وجود دارند که قادر به ارزیابی و شناسایی وضعیت یاتاقان‌های غلتشی در سطح بالایی از اطمینان هستند.

یکی از کارآمدترین این روش‌ها آنالیز ارتعاشات و استفاده از طیف فرکانسی تجهیز می‌باشد. اندازه‌گیری‌های ارتعاشی

موتورهای الکتریکی جزو مهمترین و پرتعدادترین تجهیزات در واحدهای صنعتی هستند که نقش مهمی در تداوم تولید و عملکرد فرآیندهای صنعتی بر عهده دارند. ماشین آلات دوار، به عنوان نیروی محرکه‌ی اصلی در بیشتر صنایع، از مهمترین دارایی‌های فیزیکی به شمار می‌آیند. یاتاقان‌ها یکی از اجزای مهم ماشین‌آلات دوار می‌باشند که ضمن کنترل و تعیین موقعیت قطعه‌ی گردان یا روتور، تمامی نیروهای استاتیکی و دینامیکی موجود در ماشین نیز از طریق آنها تحمل می‌شود. تاکنون انواع گوناگونی از یاتاقان‌ها در ماشین‌آلات دوار به کار گرفته شده است که در این میان یاتاقان‌های غلتشی در زمره‌ی پر مصرف‌ترین انواع یاتاقان‌ها قرار دارند و در بیشتر ماشین‌آلات

جانبی الکتروموتورها را با دقت و کیفیت بالایی مورد ارزیابی قرار داد.

از دیگر تکنیک‌ها جهت تشخیص هرچه بهتر عیوب، صداسنجی تجهیزات به کمک دستگاه‌های صداسنج می‌باشد که می‌تواند در جهت تغییر صدای تجهیز و منحصر صدای بیرینگ و احتمالاً تغییر صدای آن ما را در تشخیص عیوب کمک کند.

مطالعه وضعیت بیرینگ‌ها، یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر در پایش وضعیت بر اساس قابلیت اطمینان است. خرابی در بیرینگ‌های غلتشی می‌تواند در کنس‌ها، المان‌های غلتشی، قفسه و یا ترکیبی از آنها ایجاد شود (شکل ۱ و ۲). دانستن نوع بیرینگ نصب شده از این جهت که انواع مختلف بیرینگ بسته به نوع ساخت، لقی داخلی و بار اعمالی، می‌تواند سیگنال‌های متفاوتی تولید کنند، سودمند است.

در این مقاله، برداشت داده‌ها و تحلیل آنها، به کمک دستگاه Easy Viber و نرم‌افزار Spectra Pro محصول شرکت VMI سوئد و دستگاه ترموگرافی Fluke Ti25 و همچنین دستگاه SKF TMST 3 جهت صداسنجی انجام گرفته است.

## ۲- شرح مورد کاوی

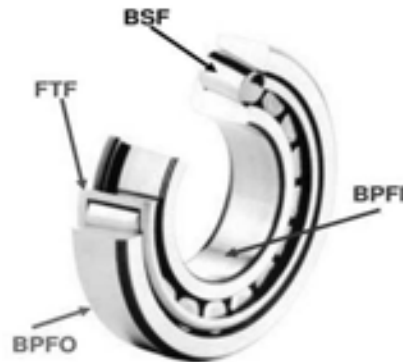
تجهیز مورد مطالعه یک بلوئر می‌باشد که از آن جهت تأمین دبی هوای زیاد در بارگیرخانه کارخانه سیمان خاش استفاده می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات موتور نیز عبارت است از:

معمولاً به دو منظور کلی انجام می‌شود یکی به منظور مراقبت و بررسی سلامتی دستگاه بر مبنای یک برنامه مشخص و دیگری به منظور فرایند تحلیل که با هدف نهایی برطرف ساختن عیب ماشین است. برای منظور دوم وسایل اندازه‌گیری ارتعاشی می‌توانند علت را بفهمند و بنابراین تعمیر مقتضی می‌تواند انجام گیرد. خرابی در ماشین‌آلات و قطعات مکانیکی به مرور شروع شده و توسعه می‌یابد و در نهایت منجر به از کارافتادگی سیستم مکانیکی می‌شود. چنین روندی امری طبیعی است، ولی آنچه که مهم است شناسایی خرابی‌های اولیه و جلوگیری از گسترش آنها است. برطرف کردن عیب‌های اولیه در ماشین‌آلات با هزینه نسبتاً کمی صورت می‌پذیرد، درحالی‌که اگر خرابی‌های جزئی برطرف نشود، چه بسا ممکن است بخش‌های دیگری از ماشین را نیز تحت تأثیر قرار داده و خرابی عمده‌ای در سیستم به وجود آید.

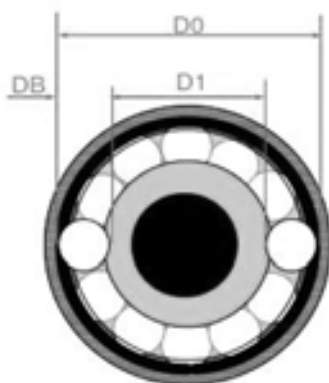
در کنار آنالیز ارتعاشات، سایر تکنیک‌ها به صورت مکمل قرار دارند. تکنیک آنالیز حرارتی یا بازرسی ترموگرافی یکی از ابزارهای ارزشمند و پرکاربرد در برنامه‌های پایش وضعیت است که در آن با استفاده از دوربین‌های ترموویژن، وضعیت حرارتی و مقادیر دمای بدنه و اجزای جانبی الکتروموتورها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اهمیت پایش وضعیت حرارتی الکتروموتورها از آنجا ناشی می‌شود که بر اساس تحقیقات به ازای هر ۱۰ سانتی‌گراد افزایش دمای الکتروموتور از مقدار مجاز، عمر مفید آن به اندازه ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت. افزایش دما و تمرکز حرارت، یکی از اولین نشانه‌های بروز عیب در الکتروموتورها به‌شمار می‌رود که با استفاده از دوربین ترموگرافی می‌توان مقادیر دما و الگوی حرارتی بدنه و اجزای

### Bearing Frequencies:

1. Ball Pass Frequency of Outer race (BPFO)
2. Ball pass frequency of the Inner race (BPFI)
3. Fundamental Train Frequency (FTF)
4. Ball Spain Frequency (BSF)



شکل ۱- نمایش فرکانس‌های مربوط به خرابی بیرینگ



$$BPFI = Nb/2 \cdot (1+(Bd/Pd)\cos\theta) \cdot RPM$$

$$BPFO = Nb/2 \cdot (1-(Bd/Pd)\cos\theta) \cdot RPM$$

$$BSF = Pd/2Bd \cdot (1-((Bd/Pd)\cos\theta)^2) \cdot RPM$$

$$FTF = \frac{1}{2} (1-((Bd/Pd)\cos\theta)) \cdot RPM$$

Note : shaft turning outer race fixed  
 F = frequency in cpm  
 N = number of balls

شکل ۲- روابط مربوط به فرکانس‌های خرابی بیرینگ

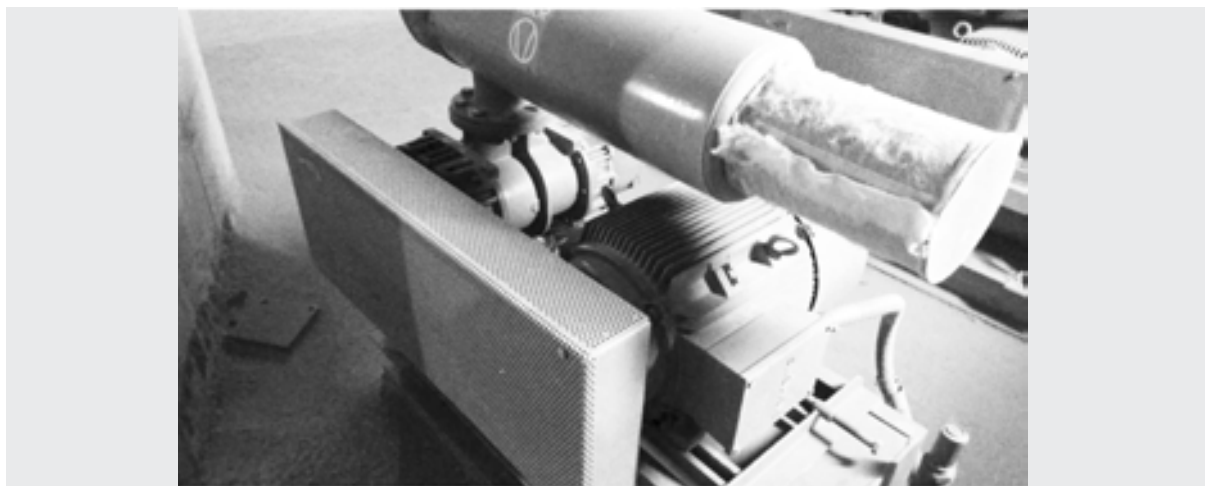
پایین‌تری نسبت به سر جلو برخوردار است. ولی همان‌طور که در آنالیز حرارتی مشخص است سر جلو موتور دمای حدوداً ۴۹ درجه سانتی‌گراد و سر عقب موتور دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد دارد که این غیرمعمول است. با کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از ارتعاشات overall، صداسنجی و آنالیز حرارتی فرضیه خرابی بیرینگ سر عقب الکتروموتور قوت گرفت. لذا تصمیم بر آن شد که موتور مذکور را دی‌کاپل کرده و اصطلاحاً free run نماییم تا از صحت عملکرد موتور به عنوان محرک این تجهیز اطمینان حاصل نماییم. ارتعاشات موتور بلوئر مذکور در جدول ۱ آمده است.

با توجه به BCU و ارتعاشات در حالت free run ایراد در سر عقب موتور مسجل شد، ولی آیا این ارتعاش ناشی از خراب بودن بیرینگ می‌باشد؟! آیا این ارتعاشات ناشی از لق شدن جای بیرینگ یا اصطلاحاً گشاد شدن درب

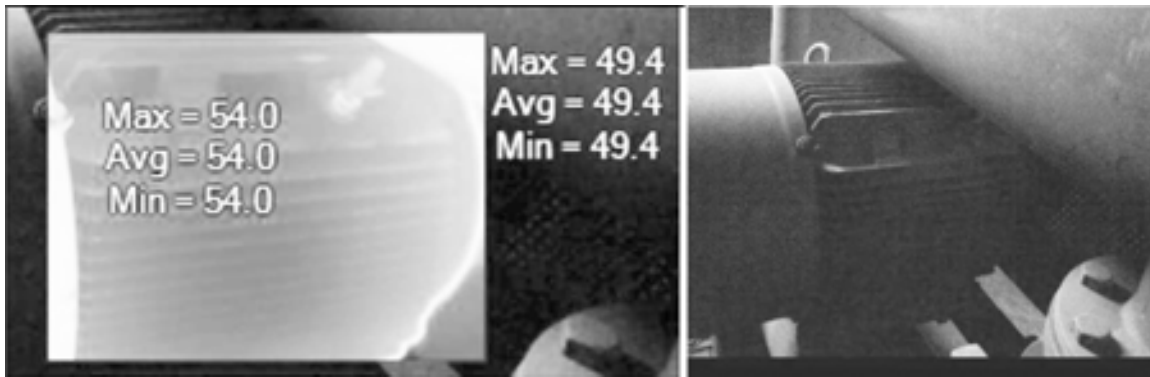
- type: 180M
- company: Siemens
- rate power: 22 kw
- rotational speed: 3000 rpm

در این مقاله به بررسی و دلایل ارتعاشات بحرانی آن پرداخته شده است که با توجه به استاندارد ISO 10816-1 در محدوده‌ی بحرانی قرار گرفته بود. از این‌رو با توجه به بالا بودن ارتعاشات overall، صدای تجهیز به‌وسیله دستگاه صداسنج شنیده شد که سر عقب موتور صدایی غیرمعمول به گوش می‌رسید. پس از آن، آنالیز حرارتی از تجهیز اخذ شد که در شکل ۴ آورده شده است.

با توجه به اینکه سر عقب الکتروموتورها دارای پروانه خنک‌کن می‌باشد و برحسب تجربه و مقایسه با دیگر الکتروموتورها در شرایط عادی سر عقب موتور از دمای



شکل ۳- موتور و بلوئر مورد بررسی



شکل ۴- تصویری از الگوی حرارتی بدنه موتور (سمت راست) و تصویر دیجیتالی متناظر با آن (سمت چپ)

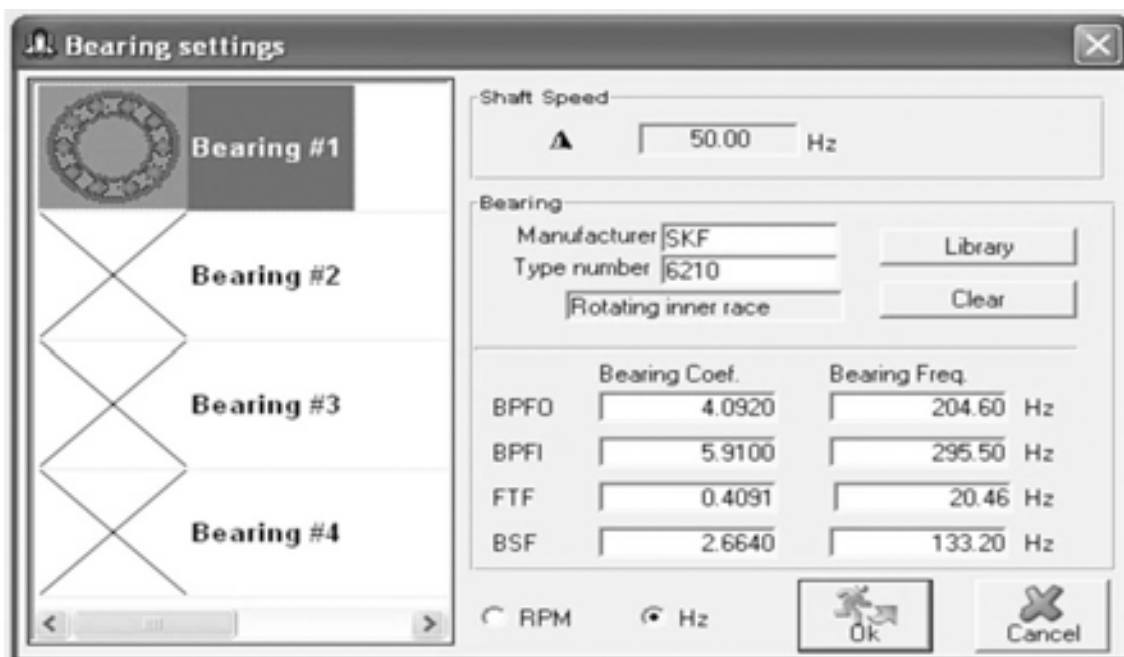
جدول ۱- ارتعاشات موتور تحت بار

سر جلو موتور (DE)				سر عقب موتور (NDE)				نقاط اندازه گیری
BCU	A	H	V	BCU	A	H	V	جهت اندازه گیری
۰.۲	۲.۶	۳.۷	۳.۹	۱.۳	۳.۵	۷.۵	۸.۱	دلبندی کلی ارتعاشات

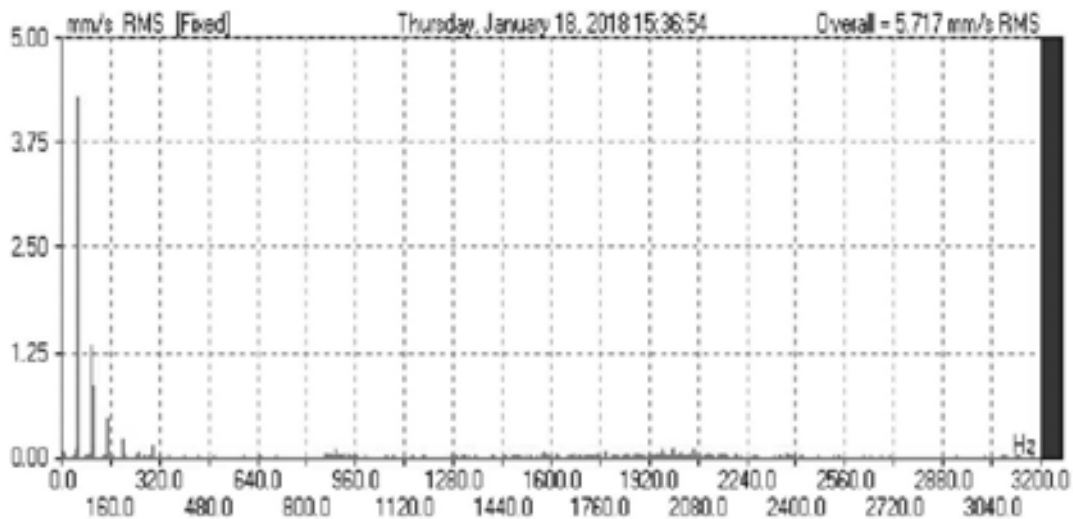
کرده و از آن طیف فرکانسی اخذ کردیم که اسپکتروم آن در شکل ۶ آمده است.

با توجه به دیده شدن پیک‌های کوچکی در فرکانس‌های بالا در اسپکتروم سرعت شکل ۶، طیف شتاب، نمودار موج زمانی و Envelope نیز اخذ شد. اسپکتروم شتاب در شکل ۷، نمودار موج زمانی در شکل ۸ و منحنی Envelope در شکل ۹ آمده است.

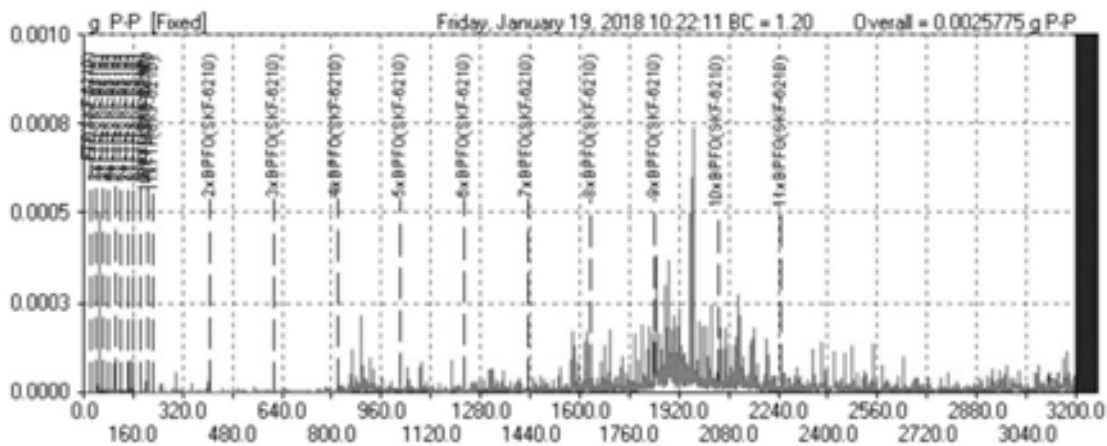
موتور می‌باشد؟! آیا خرابی، لقی و یا هرزگرد شدن پروانه خنک‌کن سبب داغی غیر عادی سر عقب شده؟! برای پاسخ به این پرسش‌ها و پرسش‌هایی از این دست، از نرم‌افزار Spectra Pro کمک گرفته و بیرینگ سر عقب موتور با مشخصات SKF-6210-2Z را در نرم‌افزار مذکور معرفی کردیم و مقادیر فرکانس‌های خرابی بیرینگ را تفکیک کردیم که در شکل ۵ آمده است. سپس موتور را استارت



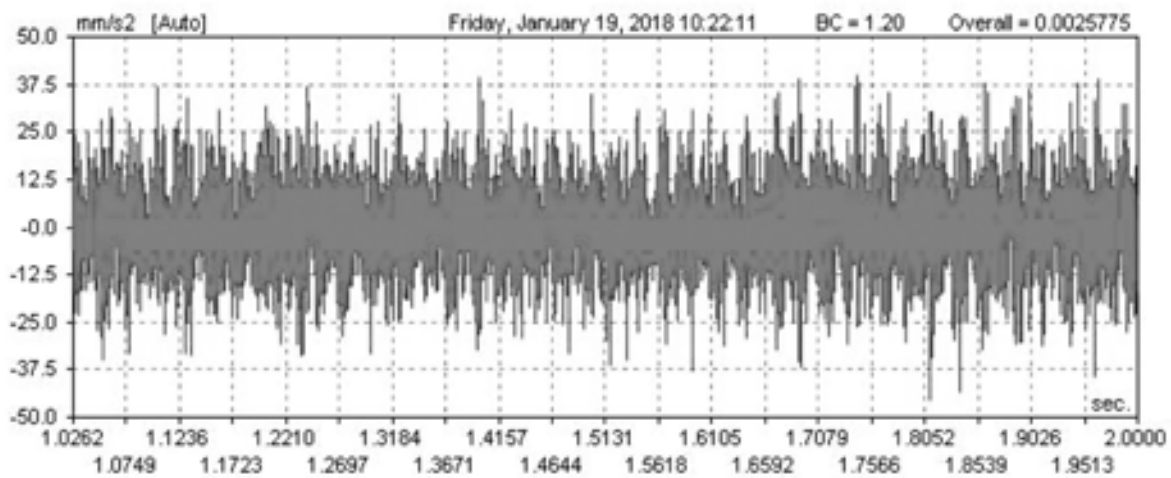
شکل ۵- مقادیر فرکانس خرابی بیرینگ ۶۲۱۰ در نرم‌افزار Spectra Pro



شکل ۶- طیف فرکانسی بیرینگ

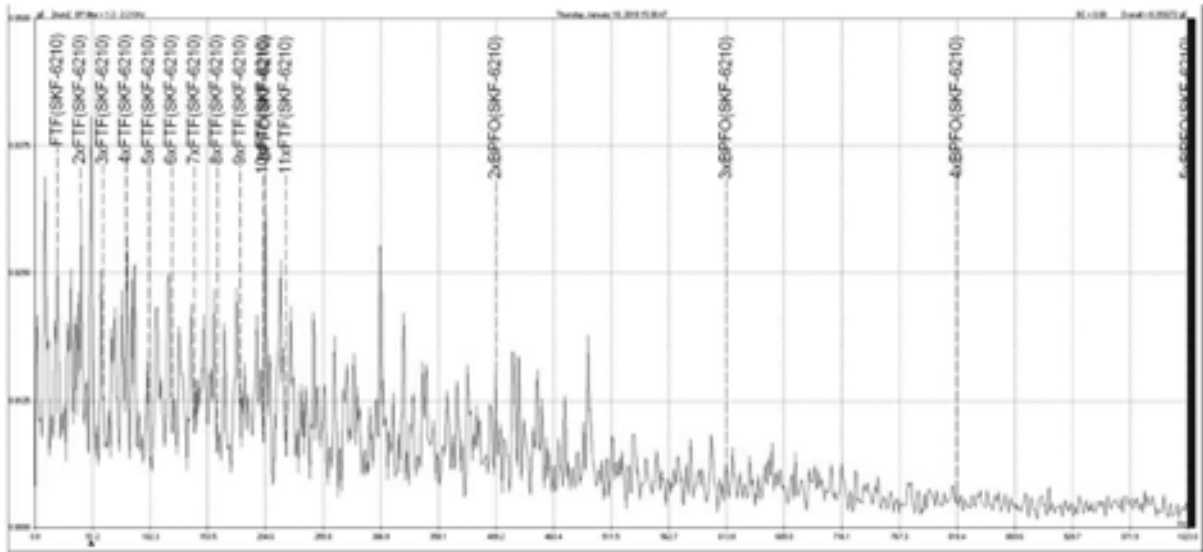


شکل ۷- اسپکتروم شتاب



شکل ۸- نمودار موج زمانی ارتعاشات بیرینگ





شکل ۹- منحنی Envelope

می‌گردد. پس از تعویض بیرینگ و استفاده از بیرینگ سالم، ارتعاشات آن به شکل چشمگیری کاهش یافت که ارتعاشات overall در جدول ۲ و طیف فرکانسی آن در شکل ۱۱ آمده است.

### ۳- نتیجه‌گیری

با توجه به موارد انجام شده در شرح کار می‌توان نتیجه گرفت جهت پایش وضعیت و عیب‌یابی تجهیزات دوار می‌بایست از کلیه‌ی ابزار در دسترس جهت حصول نتیجه‌ی با اطمینان بیشتر استفاده کرد که در این جا با استفاده

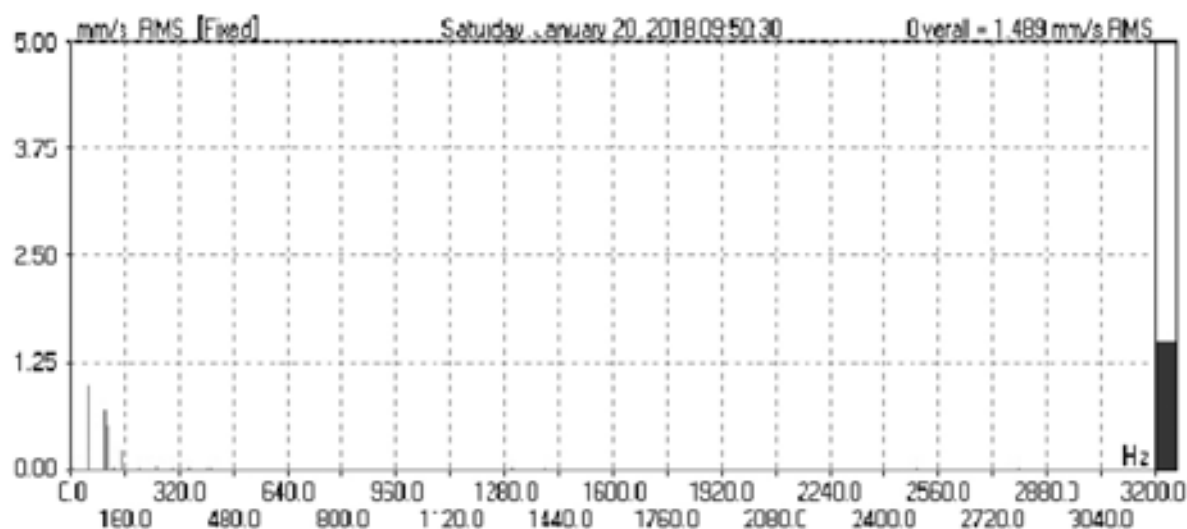
شکل ۷ اسپکتروم شتاب ارتعاشات بیرینگ می‌باشد که پیک‌های آن غالباً در بازه فرکانسی ۹۰۰ تا ۲۶۰۰ هرتز مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸، نمودار موج زمانی ارتعاشات بیرینگ، آثار shock pulse در آن مشهود است و پیک‌های ضربه‌ای در آن دیده می‌شود. شکل ۹ نمودار Envelope بیرینگ می‌باشد که به کمک قابلیت نرم‌افزار ایراد اصلی مربوط به قفسه نگهدارنده (fundamental train frequency) و کنس خارجی بیرینگ (ball pass frequency of outer race) می‌باشد. لذا پس از اطمینان از ایراد یافت شده اقدام به دمونتازژ الکتروموتور مذکور نمودیم که مشاهده شد که آب‌بند فلزی بیرینگ جدا شده و قفس نگهدارنده نیز شکسته بود که در شکل ۱۰ مشاهده



شکل ۱۰- بیرینگ خراب سر عقب موتور

جدول ۲- ارتعاشات موتور بعد از تعویض بیرینگ

سر جلو موتور (DE)				سر عقب موتور (NDE)				نقاط اندازه‌گیری
BCU	A	H	V	BCU	A	H	V	جهت اندازه‌گیری
۰,۱	۰,۹	۱,۱	۱,۲	۰,۱	۰,۹	۱,۱	۱,۲	دامنه‌ی کلی ارتعاشات



شکل ۱۱- طیف فرکانسی بیرینگ بعد از تعویض بیرینگ

- تدوین علی کامیاب
- ۳- کتاب عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار، تهیه و تدوین هوتن تمیزی، وحید رضایی و محمد اسماعیل خسروی
- ۴- کتاب کاربرد ارتعاشات در پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار، دکتر ضیایی راد و نوربان مترجم سعیدی و رضایی
- ۵- کتاب تحلیل و تفسیر ارتعاشات ماشین‌آلات دوار،

از آنالیز طیف فرکانسی، طیف شتاب، طیف موج زمانی، منحنی ENVELOPE، صداسنجی، ترموگرافی و استفاده از استانداردها و تجربه، ایراد بیرینگ شناسایی شد و قبل از رسیدن آسیب جدی به تجهیزات با هزینه کمی مورد مرتفع گردید. نکته دیگر اینکه داده‌برداری در تمام مراحل عیب‌یابی و ذخیره آن جهت استفاده و انتقال به دیگران و همچنین تحلیل داده‌ها قبل و بعد از عیب‌یابی و تعمیر، بسیار پراهمیت است که می‌بایست انجام و در شناسنامه‌ی رفتاری تجهیزات ذخیره شود.

6- Machinery Vibration Analysis, M. Behzad and A. Rohani

7- Noavaran Payesh Company Termografi Analysis  
By Milad Alidadi

8- www.skf.com

9- www.stock-eng.com

10- www.NoavaranPayesh.com

#### منابع:

- ۱- کتاب تکنولوژی ارتعاشات، م. صادقلو، شرکت خدمات مهندسی استاک
- ۲- کتاب آنالیز ارتعاشات Pareshe Girdhar، ترجمه و

### محیط زیست ودیعه‌ای الهی است!

در حفظ و حراست از آن برای خود و فرزندانمان کوشا باشیم.