

## تعیین موقعیت یاتاقان معیوب در جعبه دنده‌هایی با یاتاقان‌های مشابه و دسترسی محدود به کمک استفاده از آنالیز ارتعاشی GMF

پویان هوشمندان<sup>۱</sup>، حمیدرضا دبیری<sup>۲</sup>، علی موسوی<sup>۳</sup>، کوروش عباسی<sup>۴</sup>

تهران-میدان ونک-خیابان ملاصدرا-پلاک ۵۱-شرکت پتروپایش صنعت جنوب

CM\_GROUP@STPC.IR

### چکیده

در اغلب جعبه دنده های مورد استفاده در صنعت، یاتاقانهای دو سمت هر یک از شفت‌های میانی عمدتاً از یک نوع بوده که در صورت بروز خرابی در یکی از یاتاقانها، تعیین موقعیت یاتاقان معیوب، به علت یکسان بودن فرکانس خرابی یاتاقانها دشوار می باشد. این موضوع زمانی که امکان دسترسی به تجهیز جهت جابجائی مکان داده برداری میسر نباشد حادثر میگردد. در این مقاله سعی شده روشی جهت تعیین موقعیت یاتاقان معیوب در جعبه دندهها به کمک آنالیز ارتعاشی بمنظور ارتقاء دقت و کیفیت عملیات پایش وضعیت و همچنین هدفمند کردن و کاهش زمان تعمیراتی ارائه شود.

واژه های کلیدی: جعبه دنده ، ONLINE ، GMF ، BPF1 .

### مقدمه

امروزه تکنولوژی آنالیز ارتعاشات در سطح وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار گرفته و کاربردهای مختلفی دارد. از جمله کاربردهای این تکنولوژی می توان به ارزیابی وضعیت تجهیزات دوار و عیب یابی آنها اشاره کرد. به کمک آنالیز ارتعاشات می توان عیوب را با دقت قابل قبولی شناسائی کرده و با انجام به موقع اقدامات اصلاحی از گسترش خرابی در ماشین جلوگیری نمود. جعبه دنده ها از آن گروه ماشین آلاتی می باشند که آنالیز ارتعاشی امکان پایش وضعیت آنها را میسر ساخته است. جعبه دنده ها دارای قطعات مختلفی بوده که در صورت پیشرفت خرابی در یک قطعه و عدم اقدام اصلاحی به موقع می تواند هزینه های گزاف تعمیراتی را ایجاد نماید. لذا با توجه به اهمیت این موضوع در این مقاله به عیب یابی اینگونه تجهیزات به کمک آنالیز ارتعاشی می پردازیم.

<sup>۱</sup> کارشناس، سرپرست اجرایی شرکت پتروپایش صنعت جنوب

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، مدیر عامل شرکت پتروپایش صنعت جنوب

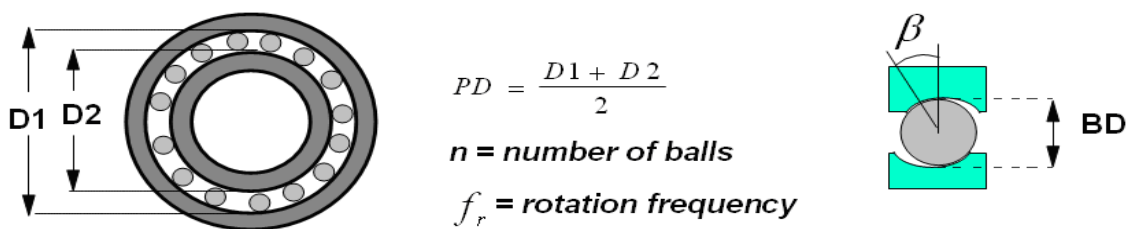
<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، سرپرست نظارت گروه پایش وضعیت شرکت پتروشیمی شهید تندگویان

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، سرپرست تعمیرات مکانیک واحد PTA-1 شرکت پتروشیمی شهید تندگویان

در ابتدا نحوه محاسبه اطلاعات مورد نیاز جهت ارزیابی وضعیت جعبه دنده ها بکمک آنالیز ارتعاشی ارائه شده و سپس نحوه استفاده از اطلاعات بمنظور عیب یابی این گونه تجهیزات و تعیین نوع و موقعیت خرابی بیرینگ معیوب جعبه دنده بررسی می گردد .

جهت پایش وضعیت جعبه دنده ها به کمک آنالیز ارتعاشات نیاز به اطلاعاتی در زمینه سرعت چرخش شفت ها، نوع یاتاقانهای مورد استفاده و همچنین تعداد دندانه چرخندها می باشد. با استفاده از این اطلاعات و بکار گیری آنها در معادلات ذیل می توان فرکانس های ارتعاشی اجزای مختلف جعبه دنده را محاسبه کرد.

### - معادلات فرکانس اجزای بیرینگ بر اساس نوع بیرینگ و سرعت چرخش شفت [1]



$$PD = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

$n = \text{number of balls}$

$f_r = \text{rotation frequency}$

- فرکانس گذر بال بر روی کنس خارجی (Ball Pass Frequency Outer Race)

$$BPFO(Hz) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (1)$$

- فرکانس گذر بال بر روی کنس داخلی (Ball Pass Frequency Inner Race)

$$BPFI(Hz) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (2)$$

- فرکانس چرخش بال (Ball Spin Frequency)

$$BSF(Hz) = f_r \frac{PD}{BD} \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (3)$$

- فرکانس قفسه بیرینگ (Fundamental Train Frequency)

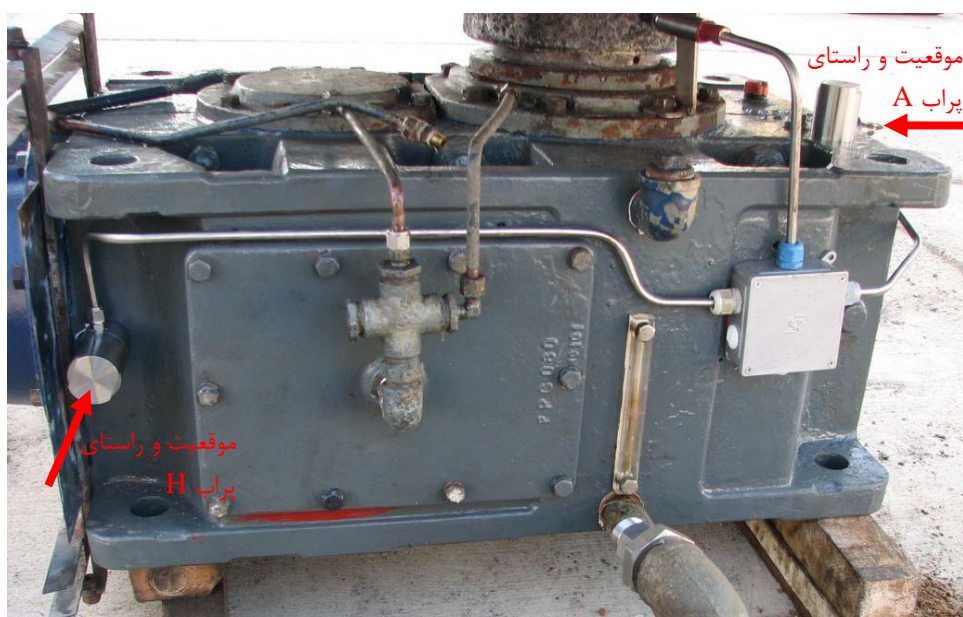
$$FTF(Hz) = \frac{1}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (4)$$

### - محاسبه فرکانس درگیری چرخنده ها (Gear Mesh Frequency)

$$GMF(Hz) = \text{تعداد دندانه های چرخنده} \times \text{دور شفت} \quad (5)$$

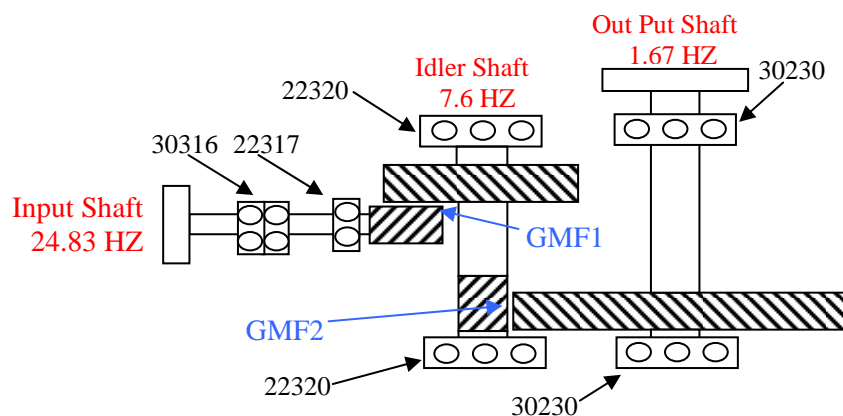
## مشخصات دستگاه مورد بررسی

مجتمع پتروشیمی شهید تندگویان - فاز ۱ دارای ۴ فن برج خنک کننده (Cooling Tower) بوده که در واحد CF مستقر می باشند. نیروی محرک فن های مذکور الکتروموتور بوده و از طریق Drive Shaft به طول تقریبی ۴ متر انتقال قدرت به جعبه دنده انجام می پذیرد و خروجی آن باعث چرخش پروانه فن می گردد. با توجه به ساختمان کولینگ تاور، امکان ارتعاش برداری از قسمت جعبه دنده به وسیله ابزارهای پرتابل ممکن نمی باشد و تنها از قسمت موتور این امکان وجود دارد. لذا جهت ارتعاش برداری قسمت جعبه دنده از سیستم پایش وضعیت آنی (On line Condition Monitoring) استفاده شده است. به این صورت که دو پراب شتاب سنج در موقعیت H و A بکار گرفته شده که به ترتیب در قسمت ورودی و خروجی پوسته جعبه دنده نصب گردیده اند. داده های برداشت شده توسط این پراب ها، جهت پردازش به Local Panel منتقل می شود و از این طریق امکان ارزیابی وضعیت جعبه دنده میسر شده است (شکل ۱).



شکل ۱- جعبه دنده فن برج خنک کننده و محل نصب Probs های سیستم پایش وضعیت آنی.

اطلاعات فنی جعبه دنده مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شکل شماتیک جعبه دنده فن برج خنک کننده به همراه مشخصات دندهها و یاتاقانها.

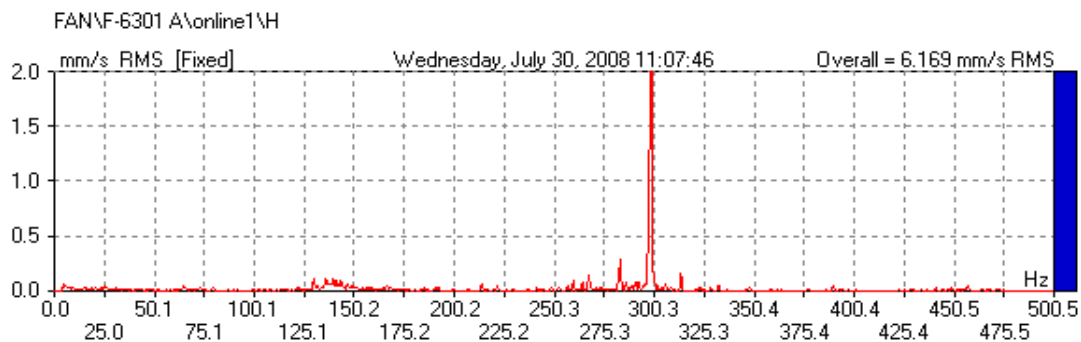
همانطور که در شکل ۲ مشخص شده دور ورودی گیربکس (1490 RPM) 24.83 Hz، دور شفت میانی 7.6 Hz (456 RPM) و دور شفت خروجی (100 RPM) 1.67 Hz می باشد. شماره نشان داده شده بر روی بیرینگ ها معرف نوع آنها می باشد و دو فرکانس در گیری چرخنده نیز طبق معادله شماره ۵ محاسبه می گردند. لازم به ذکر است که تعداد دندانه های چرخنده ورودی و خروجی به ترتیب 12 و 78 می باشد.

$$GMF1 = 24.83 \times 12 = 297.96 \text{ Hz}$$

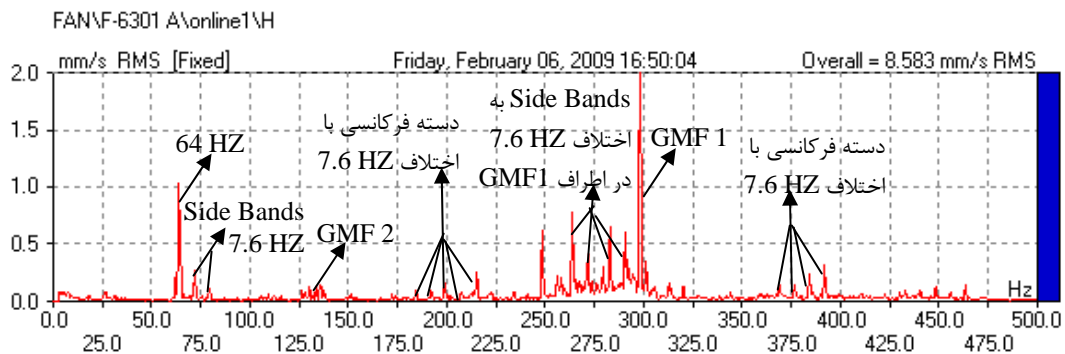
$$GMF2 = 1.67 \times 78 = 130.26 \text{ Hz}$$

## طرح مشکل

در اجرای برنامه روتین ارتعاش برداری بکمک سیستم Online، تغییراتی در وضعیت ارتعاشی جعبه دنده یکی از فن ها مشاهده شد. شکل ۳ و ۴ وضعیت ارتعاشی تجهیز را در زمان کارکرد نرمال و پس از وقوع تغییرات در راستای H نشان میدهد.



شکل ۳- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای H قبل از بروز خرابی.



شکل ۴- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای H پس از خرابی.

با مقایسه شکل ۳ و ۴ تغییراتی به صورت زیر در وضعیت ارتعاشی مشاهده می گردد:

- ۱- افزایش Overall ارتعاشی از 6.1mm/s به 8.5 mm/s
- ۲- ایجاد فرکانس هائی با دامنه پائین در قسمت هائی از طیف و با اختلاف 7.6 Hz
- ۳- رشد فرکانس 64 HZ با Side Band به اختلاف 7.6 Hz
- ۴- رشد Side Band های 7.6 HZ در کنار GMF 1

بکمک مشخصه های ذکر شده جهت شناسایی عیب و موقعیت آن مراحل ذیل را دنبال گردید:

۱. فرکانس های ایجاد شده با اختلاف 7.6 HZ می تواند ما را در جهت بررسی بیشتر بر روی متعلقات شفت میانی هدایت کند، چرا که فرکانس یاد شده مربوط به دور شفت میانی می باشد که قبلاً به آن اشاره شد.
۲. جهت شناسایی قطعه معیوب فرکانس های مربوط به قطعات شفت میانی که شامل ۲ بیرینگ از نوع SKF-22320 و همچنین دو چرخنده می باشد را مشخص می کنیم:  
با استفاده از معادلات شماره (۱)، (۲)، (۳) و (۴) فرکانس اجزای بیرینگ 22320 با سرعت چرخش 7.6 HZ مربوط به شفت میانی محاسبه می گردند.

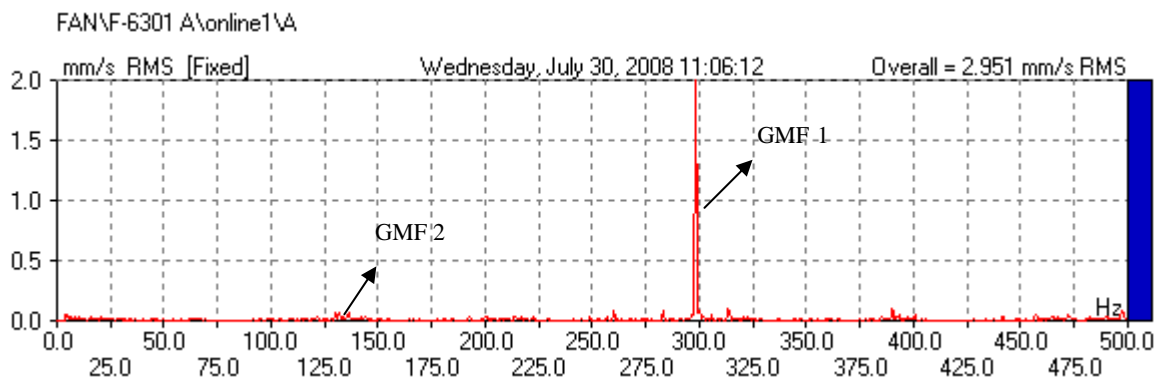
BPFO = 49.4 HZ  
 BPFI = 64.1 HZ  
 BSF = 20.2 HZ  
 FTF = 3.1 HZ

ضمناً فرکانس درگیری چرخنده های شفت میانی که قبلاً محاسبه شده مطابق زیر می باشد:

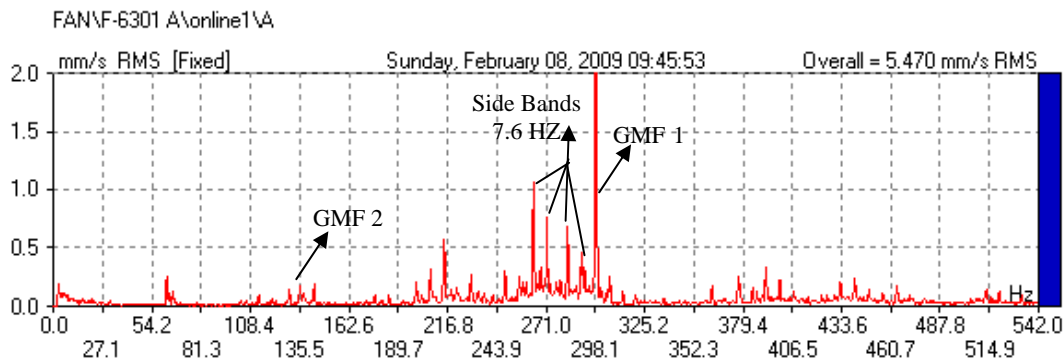
GMF 1 = 297.96 HZ (فرکانس درگیری چرخنده بالائی)  
 GMF 2 = 130.26 HZ (فرکانس درگیری چرخنده پائینی)

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در طیف فرکانسی، فرکانس 64 HZ با Side Band به اختلاف 7.6 HZ ایجاد شده است. طبق محاسبات فرکانسی صورت گرفته، فرکانس 64 HZ بر BPFI منطبق می باشد که وجود Side Band دور شفت میانی در کنار این فرکانس و همچنین دسته های فرکانسی به اختلاف 7.6 HZ در نواحی مختلف طیف، نشان دهنده خرابی در کنس داخلی بیرینگ می باشد.

۳. با بررسی های انجام شده خرابی در کنس داخلی بیرینگ 22320 مربوط به شفت میانی شناسایی شده است. حال باید موقعیت بیرینگ معیوب را مشخص کرد، چرا که از این نوع بیرینگ در سمت بالا و پائین Idler Shaft استفاده شده است. جهت شناسایی بیرینگ معیوب می بایست از تغییرات ایجاد شده در GMF استفاده کرد. به این دلیل که پیشرفت خرابی بیرینگ می تواند در نحوه درگیری دندانه ها و همچنین Back Lash چرخنده ها تاثیر گذاشته و در نتیجه در فرکانس درگیری چرخنده ها تغییراتی ایجاد کند. در ادامه وضعیت طیف فرکانسی راستای A قبل و پس از وقوع خرابی نشان داده شده است.



شکل ۵- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای A قبل از بروز خرابی.



شکل ۶- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای A پس از خرابی.

در مورد تاثیر پذیری فرکانس در گیری چرخنده ها (GMF) در اثر خرابی بیرینگ می توان گفت که موقعیت محور و متعاقباً چرخنده نصب شده بر روی آن از موقعیت مرکز بیرینگ تبعیت میکند. خرابی در بیرینگ باعث می شود که اجزای دوار بیرینگ و به خصوص رینگ داخلی نوسان داشته باشد. نوسان در رینگ داخلی باعث تغییر در موقعیت محور بیرینگ و در نتیجه تغییر در موقعیت شفت و چرخنده متصل به آن می گردد. تغییرات حتی به صورت جزئی در موقعیت محور چرخنده باعث نوساناتی در فرکانس در گیری چرخنده ها می گردد که بصورت ایجاد SIDE BAND های متناسب با دور چرخش چرخنده در کنار GMF نمایان می شود.

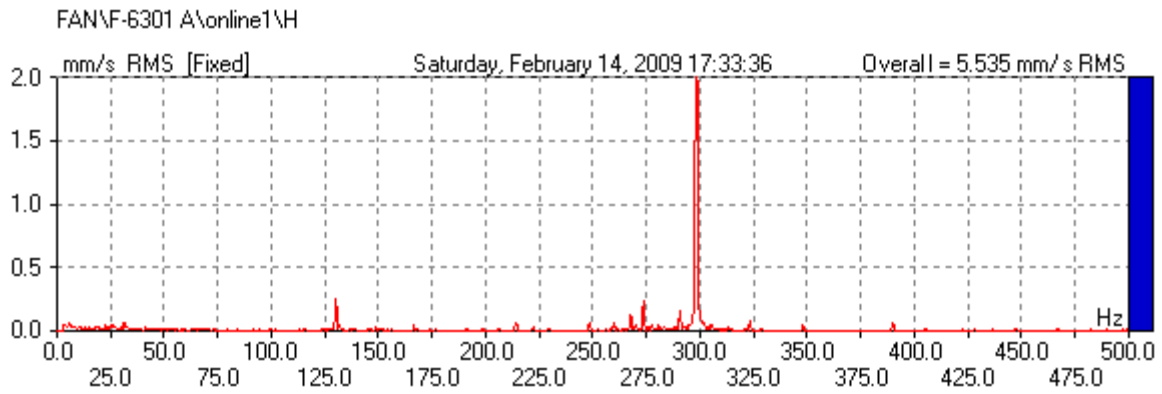
در مقایسه شکل ۳ و ۴ به این نکته اشاره شده بود که در کنار GMF1 فرکانس هائی با اختلاف 7.6 HZ ایجاد شده است. این وضعیت در بررسی شکل ۵ و ۶ نیز به وضوح مشاهده می شود. با در نظر گرفتن این موضوع می توان گفت که پس از وقوع خرابی بیرینگ بیشترین تغییرات در محدوده فرکانسی GMF1 و Side Band های اطراف این فرکانس رخ داده و تغییرات چندانی در محدوده فرکانسی GMF2 ایجاد نشده است. لذا با توجه به نزدیکی بیرینگ سمت بالای شفت میانی به چرخنده در گیر با چرخنده شفت ورودی که GMF1 را ایجاد می کند، می توان پیش بینی کرد که خرابی در بیرینگ سمت بالا (Upper Bearing) شفت میانی ایجاد شده است.

با مشخص شدن نوع خرابی و موقعیت آن، جعبه دنده به کارگاه منتقل و پس از Disassemble شدن قطعات آن، مشاهده شد که خرابی کنس داخلی بیرینگ و همچنین موقعیت بیرینگ معیوب به صورت صحیح پیش بینی شده بود و وضعیت سایر قطعات گیربکس مناسب بوده است. شکل شماره ۷ وضعیت کنس داخلی بیرینگ را نشان می دهد.

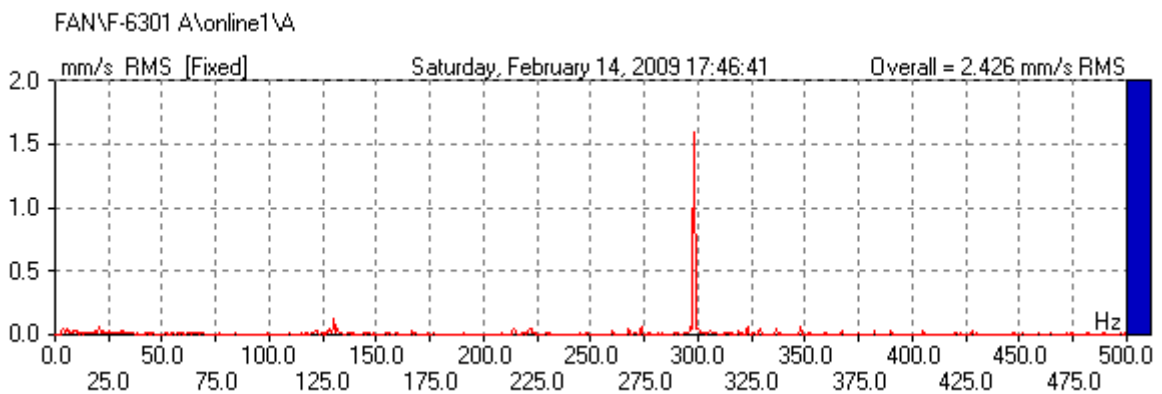


شکل ۷- کنس داخلی (Inner Race) معیوب یاتاقان بالایی محور میانی.

پس از تعویض بیرینگ تجهیز نصب و راه اندازی شد که طیف فرکانسی راستای H و A به ترتیب در شکل شماره ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای H پس از تعویض یاتاقان.



شکل ۹- طیف ارتعاشی دستگاه در راستای A پس از تعویض یاتاقان.

دامنه Overall ارتعاشی پیش از خرابی، در زمان خرابی و پس از تعویض بیرینگ در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ارتعاشات Overall دستگاه پیش از خرابی، در زمان خرابی و پس از تعویض بیرینگ.

وضعیت راستا	H mm/s	A mm/s
	پیش از خرابی	6.1
هنگام خرابی	8.5	5.4
پس از تعمیر	5.5	2.4

همانطور که در جدول شماره ۱ مشاهده می شود ارتعاشات تجهیز پس از تعویض بیرینگ کاهش یافته و به شرایط نرمال رسیده است. ضمناً بهبود وضعیت در طیفهای فرکانسی (شکل ۸ و ۹) نیز مشاهده می شود.

## نتیجه گیری

واحد پایش وضعیت به منظور هدفمند کردن و کاهش هزینه های تعمیراتی و همچنین تولید مستمر کارخانجات بر پا شده است و این مسئله سبب میشود که این واحدها از طریق پیش بینی به موقع خرابی، نوع خرابی و موقعیت قطعه معیوب، در اجرای تعمیراتی برنامه ریزی شده، هدفمند و منسجم حرکت نماید.

این مقاله سعی در ارائه روشی ابتکاری در تحلیل ارتعاشات جعبه دنده ها جهت شناسایی موقعیت یاتاقان معیوب بر روی محوری با یاتاقانهای مشابه است. در این روش با تحلیل ارتعاشات ابتدا خرابی یاتاقان مشخص گردید و در ادامه با مقایسه GMF های مختلف دستگاه و همچنین در نظر گرفتن Side Band های تشکیل شده در اطراف آنها موقعیت بیرینگ معیوب دقیقاً مشخص گردید.

همانطور که در مقاله نیز اشاره گردید به علت محدودیت دسترسی به جعبه دنده مذکور فقط امکان ارتعاش برداری از دو نقطه و هر نقطه نیز فقط در یک راستا امکان پذیر بوده و کلیه تحلیلها نیز بر روی همین دادههای محدود صورت پذیرفته است که این خود دلیلی بر قابلیت بالای روش معرفی شده است.

## مراجع

- [1] Brüel & Kjaer Vibro Application Note, [www.bkvibro.com](http://www.bkvibro.com), Detecting Faulty Rolling Element Bearings, p2