

پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات و اثربخشی آن به منظور شناسایی و رفع عیب الکتروفرایندی کارخانه گندله سازی مجتمع فولاد خراسان

مسعود زمان آبادی^۱، حسن غلامی^۲، علیرضا رضائی^۳، مهدی رفعتی زرکک^{۴،۵*}

^۱ کارشناس مسئول بازرسی تجهیزات مکانیک، مجتمع فولاد خراسان، نیشابور، masoodzamanabadiKhSteelCo@iran.ir

^۲ مدیریت انرژی، مجتمع فولاد خراسان، نیشابور، hassangholami@yahoo.com

^۳ سرپرست واحد پایش وضعیت، شرکت مهندسی اندیشه پردازان سپهر آپادانا (آپسا)، مشهد، a-rezaie@apsagroup.ir

^{۴،۵} کارشناس پایش وضعیت، شرکت مهندسی اندیشه پردازان، مشهد، m.rafati@khayyam.ac.ir

^۵ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خيام، مشهد، m.rafati@khayyam.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، اثربخشی برنامه روتین پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات در واحد گندله سازی مجتمع فولاد خراسان بررسی شده است. تجهیز تحت بررسی یک دستگاه الکتروفرایندی^۱ واحد پخت با توان 3400 kW می باشد، که تحت پایش وضعیت ارتعاشی، علائمی از بالا رفتن مقدار دامنه ارتعاشات از خود نشان داده است. باتوجه به حساسیت و اولویت بالای تجهیز بررسی های لازم جهت تشخیص علت افزایش دامنه ارتعاشات در دستور کار قرار گرفت و بدین منظور از آنالیز طیف فرکانسی و آنالیز زاویه فاز استفاده گردید. نتایج اندازه گیری نشان دهنده وجود بیشترین دامنه ارتعاشات در فرکانس دور کاری روتور فن بوده که می تواند ناشی از وجود نامیزانی باشد. جهت بررسی هر چه دقیق تر وضعیت ماشین و تفکیک عیوب محتمل از تکنیک زاویه فاز بر روی یاتاقان های فن استفاده گردید که با توجه به هم فاز بودن ارتعاشات در راستای شعاعی دو یاتاقان فن، وجود نامیزانی استاتیکی پروانه فن مورد تایید قرار گرفت. در نهایت بالانس فن مذکور در دستور کار قرار گرفته و پس از عملیات بالانس مولفات ارتعاشی در یاتاقان های فن و الکتروموتور مجدداً اندازه گیری شده که با کاهش ۸۰٪ دامنه ارتعاشات در راستای شعاعی و محوری اثر بخشی تشخیص و اقدام مورد تایید قرار گرفت.

واژه های کلیدی

پایش وضعیت، آنالیز ارتعاشات، بالانس، الکتروموتور، فن

مقدمه

کارخانه گندله سازی مجتمع فولاد خراسان با ظرفیت تولید سالانه ۲ میلیون و ۵۰۰ هزار تن در زمستان ۱۳۹۶ راه اندازی گردید. استفاده از تجهیزات با آخرین تکنولوژی روز صنعت فولاد در کنار بکارگیری نیروی جوان و آموزش دیده بستری مناسب جهت بهره گیری از

روش ها و ابزار نوین نگهداری و تعمیرات را در کارخانه فراهم آورده است. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت^۲ از جمله موثرترین روش های حال حاضر نگهداری و تعمیرات است، که می تواند نقش مهمی در استفاده مفید و موثر از منابع، کاهش توقفات و هزینه ها، افزایش راندمان و بهره وری را داشته باشد، و قطعاً با گذشت زمان مزایای بهره گیری از چنین ابزار و روش هایی بیشتر آشکار خواهد شد، زیرا که عمده فواید این روش ها به استفاده دراز مدت آنها می باشد. این تکنیک می تواند به عنوان اندازه گیری شاخص های متنوع مربوط به شرایط مکانیکی و عملکردی ماشین آلات همچون ارتعاشات، دمای یاتاقان، فشار روغن، ذرات فرسایشی موجود در روغن و راندمان تعریف شود. کاهش هزینه های ناشی از توقفات ناخواسته و همچنین افزایش قابلیت دسترسی تجهیزات، از مهم ترین مزایای بکارگیری پایش وضعیت در یک مجموعه صنعتی می باشند. امروزه، روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت به طور گسترده ای در صنعت استفاده می شود [1]. از جمله تکنیک های مورد استفاده در پایش وضعیت تجهیزات دوار عبارت است از: آنالیز ارتعاشات، آنالیز التراسونیک، ترموگرافی، آنالیز روانکار و آنالیز جریان.

به دلیل افزایش رقابت در صنعت و تولید، ضرورت بکارگیری تکنیک پایش وضعیت برای ارزیابی سلامت تجهیزات اجتناب ناپذیر است. یک روش موثر برای کاهش احتمال وقوع شکست فاجعه آمیز تجهیزات از طریق تجزیه و تحلیل ارتعاش است [2]. تجزیه و تحلیل ارتعاش یک سازوکار است که برای پایش شرایط کاری تجهیز، به منظور کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات و خرابی ها مورد استفاده قرار می گیرد. تکنیک تجزیه و تحلیل ارتعاشات شامل اندازه گیری ارتعاش و تحلیل آن است [3]. آنالیز ارتعاشات یکی از دقیق ترین مولفه ها جهت پایش وضعیت و تشخیص علت ریشه ای خرابی در ماشین آلات دوار است. بسیاری از محققان به صورت نظری و تجربی پیشرفت عیب در تجهیزات و یاتاقان ها و اثر آن بر ارتعاشات را مطالعه کرده اند. در این

² Condition Based Maintenance

¹Recuperation Fan

می‌شود. امروزه این مولفه به طور وسیعی در آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی استفاده می‌شود و از جمله روش‌های پردازش سیگنال در حوزه زمان است. برای وقایع منفرد X و تعداد نمونه n مقدار مولفه RMS از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (6)$$

مشخصات فنی تجهیز مورد مطالعه

در این پژوهش تجهیز مورد پایش یک الکتروفرانر کوره واحد گندله‌سازی مجتمع فولاد خراسان با توان نامی 3400 kW می‌باشد. الکتروموتور ساخت شرکت WEG با سرعت دورانی 994 rpm که به صورت کوپل مستقیم به یک فن از نوع Center Hung متصل شده است. شماره فنی بیرینگ‌های سمت آزاد (NDE) و کوپل (DE) فن 23056CC/C3W33 می‌باشد. در شکل ۱ نمای از فن مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویر الکتروفرانر مورد مطالعه.

داده‌های ارتعاشی توسط دستگاه Easy Viber ساخت شرکت VMI سوئد جمع‌آوری شده است. یک دستگاه جمع‌آوری ارتعاشات معمولاً شامل یک یا دو سنسور، حافظه‌ای جهت ذخیره سیگنال‌ها و مدارات الکترونیکی که سیگنال‌ها در حوزه زمان را به حوزه فرکانس (تحت فرایند FFT) تبدیل می‌کند و یک خروجی جهت انتقال اطلاعات ذخیره شده به کامپیوتر می‌باشد. تنظیمات اندازه‌گیری برای دستگاه آنالیز ارتعاشات مربوطه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات فنی دستگاه آنالیز ارتعاشات.

مقدار	مشخصه
6400	تعداد خطوط طیفی
Linear	نوع میانگین‌گیری
0.5-3200 Hz	بازه طیف فرکانسی
3.2-20 kHz	بازه فرکانسی اندازه‌گیری BC یا وضعیت بیرینگ

سنسور مورد استفاده مدل Accelerometer Type AC-102-1A با حساسیت 100 mV/g می‌باشد.

رهگذر، هوپریخ گسترش عیب خستگی در یاتاقان‌های غلتشی [4] و همچنین هریس و کوتسالاس نیز پیشرفت شکست خستگی و ارتعاشات در طول این پیشرفت را مطالعه نموده‌اند [5].

در ابتدا سیگنال‌های ارتعاشی توسط دستگاه جمع‌آوری اطلاعات از محل تکیه‌گاه‌ها اجزاء تحت بار، با استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک در حوزه زمان جمع‌آوری و با استفاده از تبدیل سریع فوری^۳ به حوزه‌ی فرکانسی منتقل شده، تا با تحلیل این اطلاعات با استفاده از تکنیک‌های مختلف، خرابی شناسایی شود. به همین جهت با کاهش توقفات ناخواسته و افزایش طول عمر تجهیزات منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات تجهیز می‌شود [2].

پایش وضعیت مبتنی بر ارتعاشات، می‌بایست به صورت دوره‌ای انجام شود تا با ایجاد نمودار روند تغییرات ارتعاش تجهیز در بازه‌های زمانی مختلف، بروز خرابی شناسایی گردد. برای تعیین میزان ارتعاش مجاز تجهیزات از روش‌های مختلفی نظیر: مقادیر پیشنهادی کارخانه سازنده، مقادیر پیشنهادی استانداردها، مقایسه با ماشین‌های مشابه و بر مبنای تغییرات میزان ارتعاشات ماشین استفاده می‌شود. در واقع، هر نقص در دستگاه سبب ایجاد ارتعاشات با ویژگی‌های متمایز شده که می‌توان با اندازه‌گیری و مقایسه با مرجع مناسب، وضعیت دستگاه ارزیابی و پس از تشخیص عیب در نهایت عامل ریشه‌ای خرابی نیز مشخص گردد [7].

آنچه در این مطالعه موردی به آن پرداخته خواهد شد عبارتست از: تحلیل علل افزایش دامنه ارتعاشات یک دستگاه الکتروفرانر فرایندی واحد گندله‌سازی مجتمع فولاد خراسان و نقش پایش وضعیت در پیش‌بینی به موقع خرابی و جلوگیری از توقف خط تولید و همچنین گسترش خرابی.

روابط حاکم

حرکت ارتعاشی یک جسم با استفاده از قانون دوم نیوتون به شکل زیر بیان می‌شود:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

در معادله فوق مقادیر m ، c و k به ترتیب جرم، میرایی و سفتی جسم می‌باشد و مولفه f محرک خارجی است. با تبدیل فوری معادله ۱ خواهیم داشت:

$$(-\omega^2 M + j\omega C + K)X(\omega) = F(\omega) \quad (2)$$

با تعریف تابع امپدانس به صورت زیر:

$$Z(\omega) = [-\omega^2 M + j\omega C + K] \quad (3)$$

و

$$H(\omega) = Z^{-1}(\omega) \quad (4)$$

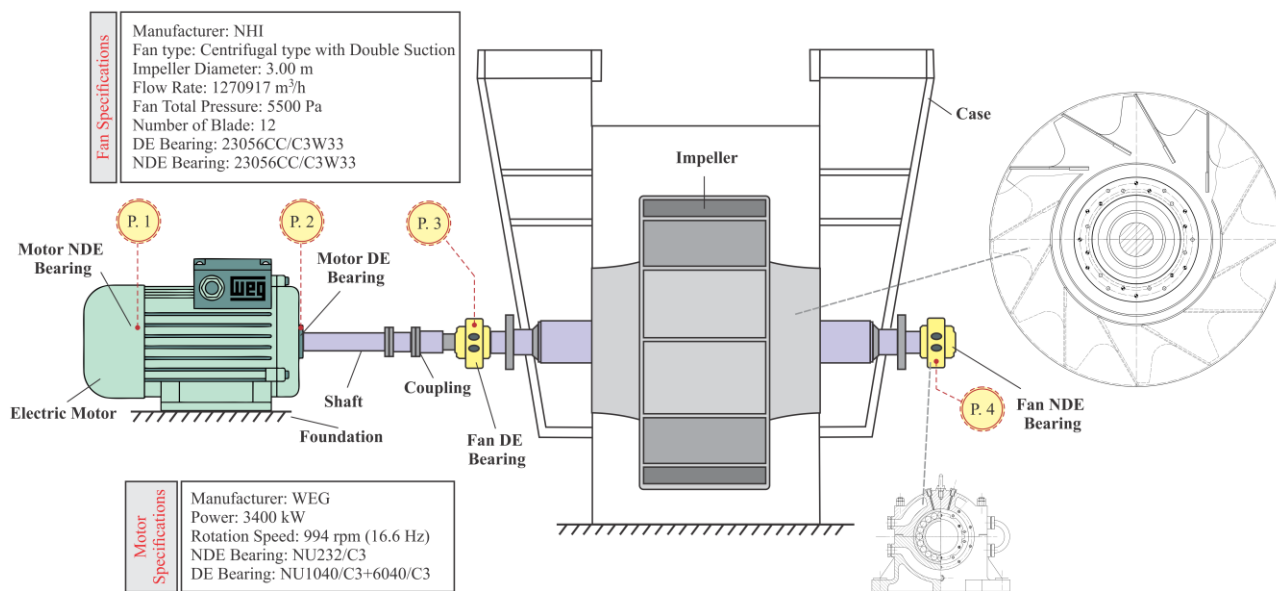
و در نهایت پاسخ ارتعاشی سیستم از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$X(\omega) = H(\omega).F(\omega) \quad (5)$$

ریشه میانگین مربعات^۴ یک اصطلاح مهندسی است که به عنوان شاخص تصحیح سیگنال متوسط زمان در مقیاس خطی تعریف

³ Fast Fourier Transform

⁴ Root Mean Square(RMS)



شکل ۲. شماتیکی کلی از الکتروفن و مشخصات موتور و فن

آشکار سازی عیب

در شکل ۲ نقاط تعیین شده جهت اندازه گیری ارتعاشات بر روی تجهیز مشخص شده است. مجموعاً چهار نقطه شامل دو نقطه در الکتروموتور و دو نقطه بر روی فن که محل تحمل نیروهای وارده بر تجهیز است، برای این منظور انتخاب شده است.

این فن دارای دو یاتاقان غلتشی با شماره فنی 23056 و سرعت دورانی 994 rpm می باشد. بر اساس داده بردای های روتین پایش وضعیت، افزایش دامنه ارتعاش در یاتاقان های دو سمت الکتروموتور و فن مشاهده گردید. مقادیر دامنه ارتعاشات چهار نقطه اندازه گیری شده (مطابق شکل ۲) برای الکتروفن در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲. مقادیر اندازه گیری شده دامنه ارتعاشات و مولفه BCU برای

چهار نقطه تعیین شده جهت اندازه گیری.

Point	H (mm/s)	V (mm/s)	A (mm/s)	BCU (g)
1	2.4	0.7	-	0.3
2	2.6	1.0	1.5	0.4
3	4.3	1.4	3.8	0.5
4	5.6	2.3	5.6	0.25

مطابق جدول ۲ وضعیت ارتعاشی تجهیز با در نظر گرفتن استاندارد ISO 10816 که مقادیر مجاز ارتعاشات برای ماشین آلات نو حداکثر تا 2.3 mm/s خوب و حداکثر تا 4.5 mm/s قابل قبول ارزیابی می شود، در محدوده هشدار یا تحت مراقبت قرار دارد.

تحلیل داده ها

آنالیز سیگنال های ارتعاشی اجزاء ماشین، یک روش تشخیص عیب متداول در تجهیزات دوار می باشد. از میان روش های متنوع پایش وضعیت و عیب یابی تجهیزات، تحلیل سیگنال ارتعاشی اندازه گیری شده از روی نشیمنگاه یاتاقان از جایگاه ویژه ای برخوردار است. در این بخش برخی از روش های ارزیابی وضعیت ماشین آلات به کار رفته در این پژوهش به اجمال معرفی می گردد.

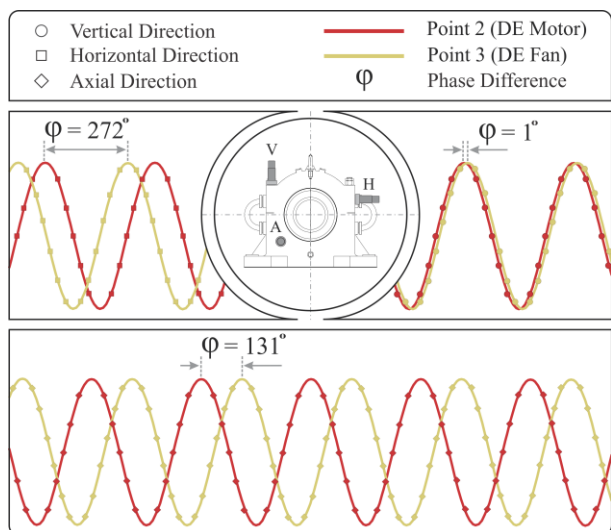
منحنی شکل موج: در اندازه گیری ارتعاشی از هر تجهیز اولین خروجی کسب شده از دستگاه منحنی تغییرات ارتعاشات بر حسب زمان می باشد؛ که همواره تصویر مستقیم و بدون پردازش از رفتار دینامیکی ماشین ارائه می دهد.

منحنی طیف فرکانسی: چنانچه منحنی شکل موج در حوزه زمان به کمک الگوریتم تبدیل سریع فوری به حوزه فرکانسی برده شود؛ منحنی طیف فرکانسی بدست می آید. این روش از شناخته شده ترین روش هاش عیب یابی در ماشین آلات می باشد.

شاخص یاتاقان غلتشی^۵: سازندگان سخت افزارهای داده برداری ارتعاشی در خصوص این شاخص هر کدام مدل مختص به خود را ارائه کرده اند که در هر کدام این شاخص با روال پردازش مشخصی به دست می آید. در خصوص به کارگیری این روش باید یادآور شد که اندازه گیری دوره ای و بررسی روند تغییرات شاخص با گذر زمان (در طول بازه های زمانی مشخص شده جهت پایش) ضروری است. روند صعودی این شاخص نشانگر وضعیت غیرعادی در یاتاقان می باشد. جهت تعیین وضعیت کلی ماشین بر مبنای مقادیر ارتعاشات، معمولاً مقدار کلی دامنه ارتعاش با مواردی چون توصیه سازنده، دستورالعمل ها و کنترل رفتار ماشین مقایسه می شود [8].

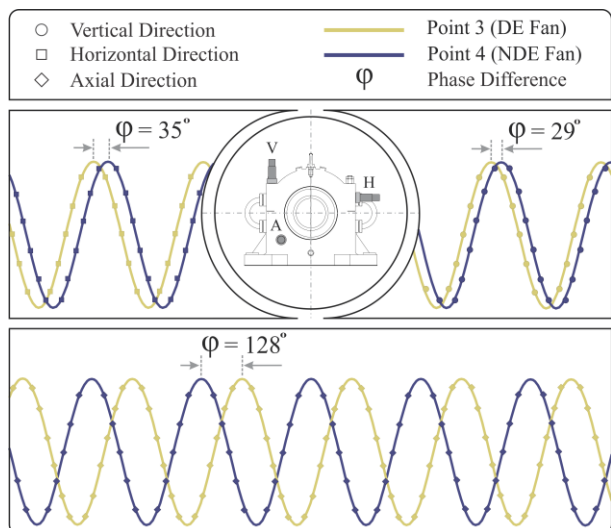
⁵ Bearing Condition Unit (BCU)

بررسی منحنی فرکانسی ارتعاشات در هر یک از حالات شکل ۴ نشان دهنده تغییر دامنه فرکانس دور کاری روتور (16.6 Hz) یا همان 1x در هر دو راستای محوری و شعاعی می باشد.



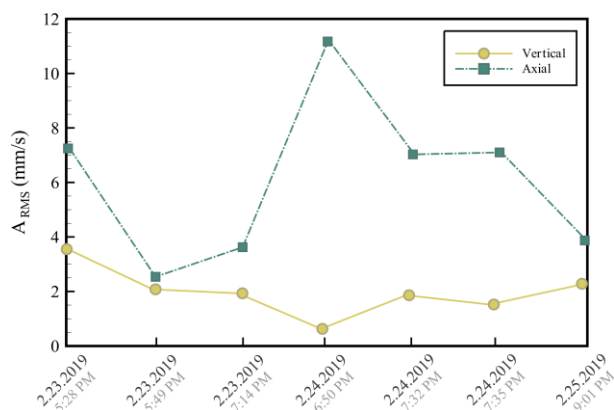
شکل ۵. مقادیر اختلاف فاز ارتعاشی بین نقاط ۲ و ۳ تجهیز در راستاهای عمودی، افقی و محوری.

جهت بررسی هر چه دقیق تر وضعیت ماشین و تفکیک عیوب موجود از تکنیک زاویه فاز نیز استفاده شده است، و زوایای فاز ارتعاشات یاتاقان های فن و سمت کوپل الکتروموتور اندازه گیری و تحلیل گردید. شکل ۵ و ۶ مقادیر زاویه فاز ارتعاشات برای این یاتاقان ها را نشان می دهد.



شکل ۶. مقادیر اختلاف فاز ارتعاشی بین نقاط ۳ و ۴ تجهیز در راستاهای عمودی، افقی و محوری.

بررسی زاویه فاز محوری اندازه گیری شده در شکل ۵، در ابتدای استارت با زمانی که چندین ساعت از کارکرد فن می گذرد تفاوت دارد. با گذشت چندین ساعت از کارکرد فن، اختلاف فاز محوری دو سمت کوپلینگ صفر درجه می شود که نشان دهنده تغییر وضعیت همراستایی کوپلینگ با ابتدای استارت می باشد.

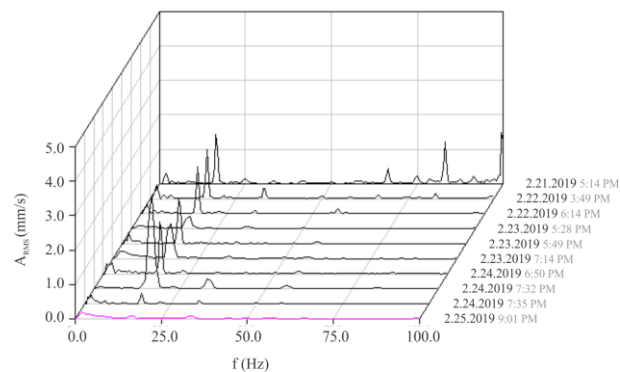


شکل ۳. منحنی ترند مقادیر دامنه ارتعاشات یاتاقان سمت کوپل فن (نقطه سوم) در راستای عمودی و محوری در بازه های زمانی مختلف.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، مقادیر ارتعاشات یاتاقان های فن از نوسانات زیادی برخوردار است. در ابتدای راه اندازی تجهیز وضعیت ارتعاشات به ویژه در راستای محوری عادی است اما به مرور پس از کارکرد فن و همچنین افزایش درصد دمپر، ارتعاشات در راستای محوری افزایش قابل توجهی پیدا می کند. لذا مقرر گردید تا وضعیت نصب و همراستایی کوپلینگ و بیرینگ های فن و همچنین دمپرهای ورودی جریان سیال بررسی و در صورت نیاز اصلاح شود، که پس از آن شاهد پایداری علائم ارتعاشی بوده و شرایط جهت انجام بالانس فن، مهیا گردید.

شناسایی نوع خرابی

در این بخش نتایج ارزیابی تجهیز به کمک آنالیز ارتعاشات ارائه می شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود مقادیر ارتعاشات این یاتاقان در راستای عمودی از 3.5 mm/s تا 0.6 mm/s و در راستای محوری از 3.75 mm/s تا 11.25 mm/s نوسان داشته است. شکل ۴ منحنی طیف فرکانسی مقادیر ارتعاشات این یاتاقان را بر حسب بازه های زمانی اندازه گیری شده نشان می دهد.



شکل ۴. منحنی طیف فرکانسی دامنه ارتعاشات یاتاقان سمت کوپل فن (نقطه سوم) در راستای عمودی در بازه های زمانی مختلف قبل و پس از انجام بالانس فن

مطابق استاندارد ISO 10816 مشاهده می شود پس از بالانس فن کلیه مقادیر ارتعاشی در محدوده مجاز و عادی قرار گرفته است.

مطابق شکل ۷ مشاهده می شود پس از انجام عملیات بالانس بر روی فن، مقادیر دامنه ارتعاشات در دو راستای افقی و محوری به مقدار چشمگیری کاهش پیدا کرده و از حالت نیاز به اقدام، به محدوده عادی رسیده است.

نتیجه گیری

الف) بکارگیری صحیح آنالیز ارتعاشات در مجتمع فولاد خراسان منجر به کاهش موثر توقفات و افزایش اطمینان از عملکرد مناسب تجهیزات شده است.

ب) نامیزانی یکی از عیوب عمده در فن های صنایع معدنی می باشد که بدلیل مشکلات اولیه در زمان ساخت روتور یا در حین بهره برداری با توجه به ماهیت مواد، رخ داده و نیروی ناشی از آن تاثیر بسیار زیادی در کاهش عمر قطعات بویژه یاتاقان ها دارد. لذا شناسایی به موقع آن و رفع عیب بوسیله انجام بالانس دینامیک در جلوگیری از خرابی و توقفات ناخواسته و نهایتاً افزایش قابلیت دسترسی تجهیزات، یکی از مهم ترین نتایج بکارگیری تکنیک پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات می باشد.

ج) استقرار سیستم پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات و تشکیل بانک اطلاعاتی از ماشین آلات دوار کارخانه گندله سازی مجتمع فولاد خراسان به فاصله کمی از راه اندازی موجب شده است اکنون مجموعه بسیار ارزشمندی از سابقه رفتار ارتعاشی، اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه ماشین آلات دوار کارخانه موجود باشد که این مهم در تحلیل و عیب یابی ماشین آلات از اهمیت بسزایی برخوردار است و به مرور زمان ارزش چنین بانک اطلاعاتی بیش از پیش نمایان خواهد شد.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم میدانیم از معاونت محترم بهره برداری مجتمع، مدیریت دفتر فنی و برنامه ریزی و همچنین مدیریت کارخانه گندله سازی در خصوص ضرورت استقرار پایش وضعیت از ابتدای راه اندازی واحد گندله سازی و حمایت های همیشگی ایشان، تشکر نمائیم.

فهرست علائم (در صورت لزوم)

A	دامنه ارتعاشات
BC	مولفه بیرینگ غلتشی
C	مولفه میرایی
DE	سمت کوپل شده
f	نیروی محرک خارجی، N
H	امپدانس سیستم
m	جرم، kg
n	تعداد نمونه
NDE	سمت غیر کوپل
rpm	دور بر دقیقه

بررسی زوایای فاز اندازه گیری شده در شکل ۶ که بر روی یاتاقان های فن اندازه گیری شده است، با توجه به هم فاز بودن ارتعاشات در راستای شعاعی دو یاتاقان، نشان دهنده وجود نامیزانی استاتیکی در پروانه فن می باشد. در نهایت با بررسی های انجام شده در منحنی طیف فرکانسی و ارزیابی زوایای فاز در یاتاقان های تجهیز، مشکل نامیزانی، عیب غالب موجود در ماشین تشخیص داده شد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که عیب ناشی از نامیزانی، تاثیر زیادی در کاهش عمر بیرینگ تجهیز دارد.

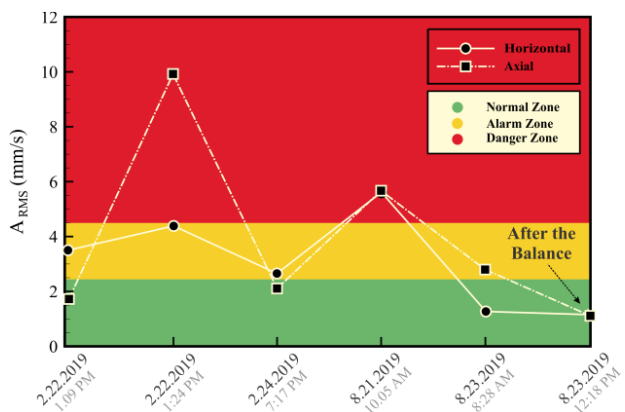
رفع عیب

باتوجه به تشخیص عیب تجهیز توسط آنالیز ارتعاشات در برنامه پایش وضعیت تنظیم شده، در این مرحله رفع عیب و بالانس فن موردنظر در دستور کار قرار گرفت.

همانطور که از شکل ۳ مشخص است، مقادیر دامنه ارتعاشات در بازه های زمانی کوتاه مقدار زیادی نوسان دارد که این پدیده در مواردی که اقدام به اصلاح نامیزانی صورت می گیرد باعث اختلال در فرایند بالانس می گردد. نوسانات ارتعاشات در تجهیز می تواند ناشی از ترک در رتور، لقی نامناسب بیرینگ ها، تغییرات ناگهانی دمپر فن، تغییرات دمای سیال ورودی به فن و یا حتی هم پوشانی با عیوبی غیر از نامیزانی باشد. باتوجه به اهمیت این موضوع اقدام به بررسی یک به یک موارد فوق، جهت اطمینان از عدم تاثیر آنها بر روی مقادیر ارتعاشات گردید و با رفع آنها و پایداری مقادیر ارتعاشات، شرایط جهت انجام بالانس فن مهیا گردید. پس از بالانس فن اقدام به اندازه گیری ارتعاشی تجهیز شد که مقادیر آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مقادیر اندازه گیری شده دامنه ارتعاشات و مولفه BCU برای چهارنقطه تعیین شده جهت اندازه گیری بعد از بالانس فن.

Point	H (mm/s)	V (mm/s)	A (mm/s)	BCU (g)
1	0.38	0.70	-	0.3
2	0.70	1.0	1.50	0.4
3	1.20	0.40	0.90	0.20
4	1.20	0.50	1.20	0.20



شکل ۷. مقایسه مقادیر ترند دامنه ارتعاشات یاتاقان سمت آزاد فن (نقطه چهارم) در راستای افقی و محوری قبل و بعد از بالانس فن.

[3] Renwick JT, Babson PE, 1985. "Vibration analysis-a proven technique as a predictive maintenance tool." IEEE Trans Ind Appl, Vol. 21(2), pp. 324-32.

[4] Hoeprich, M.R. 1992. "Rolling Element Bearing Fatigue Damage Propagation." Trans ASME J Tribol, 114, 328-330.

[5] Kotzalas, M.N. T.A. Harris. 2001 . "Fatigue Failure Progression in Ball Bearing." J Tribol, 123, 238-42.

[6] Wakiru JM, Pintelon L, Muchiri PN, Chemweno PK. 2019. "A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. Mechanical systems and signal processing." Mar 1; 118:108-32.

[7] Alguindigue IE, Buczak LA, Uhrig RE. 1993. "Monitoring and diagnosis of rolling element bearings using artificial neural networks. IEEE Trans Ind Electron". Vol. 40(2), pp. 209-17.

[8] بهزاد، مهدی، کیوان سپانلو، مسعود آسایش و عباس روحانی. ۱۳۹۴. اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری، تعمیرات و عیب یابی ماشین های دوار، تهران: انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی، چاپ اول.

RMS	ریشه میانگین مربعات
t	زمان، s
x	جابه جایی، m
$\dot{x}$	سرعت، m/s
$\ddot{x}$	شتاب، m/s^2
Z	امپدانس سیستم
	علائم یونانی
φ	اختلاف فاز، Degree
ω	فرکانس طبیعی سیستم، Hz

مراجع و منابع

[1] Elforjani, M. 2010. "Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Using Acoustic Emission Technology." PhD diss., Cranfield University,.

[2] Betta, Giovanni, Consolatina Liguori, Alfredo Paolillo, and Antonio Pietrosanto 2002. "A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, no. 6 , pp.1316-1322.