ISAV2023
سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۹و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲ تهران - ایران
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

عیب‌یابی گیربکس فرآیند مجتمع گندله‌سازی به کمک نخستین آنالایزر ارتعاشات ایرانی

سعید شیروانی شاه عنایتی[آ]

[آ] ایران، پارس جنوبی، شرکت راه‌اندازی و بهره‌برداری صنایع نفت، کارشناس ارشد پایش وضعیت

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.shirvani.17947@oico.ir

چکیده

گیربکس‌ها جز پرکاربردترین تجهیزات انتقال قدرت در صنایع به شمار می روند. چرخ دنده ها عضو کلیدی هر گیربکس بوده و وظیفه انتقال حرکت دورانی و گشتاور تولیدی از شفت ورودی به شفت خروجی را بر عهده دارند. وقوع شکست در این دسته از تجهیزات، ضمن توقف تولید، هزینه های بسیار سنگین بر نگهداری و تعمیرات صنایع تحمیل می نماید. از این رو پایش وضعیت صحیح گیربکس‌ها پیش از شکست حائز اهمیت است. مقاله حاضر دستاورد عیب یابی دو گیربکس مورد استفاده در یکی از صنایع فولادسازی کشور است که با بهره‌گیری از نخستین دیتاکالکتور و آنالایزر ارتعاشات پیشرفته ایرانی انجام شده‌است.

کلمات کلیدی: پایش وضعیت؛ آنالیز ارتعاشات؛ عیب یابی گیربکس؛ ترک شفت؛ بک‌لش

۱- مقدمه

در نظام نگهداری و تعمیرات موجود در صنایع، استراتژی‌های مختلفی وجود دارد که در هر صنعتی تلاش می‌شود یک استراتژی خاص به عنوان استراتژی برتر پیاده سازی شود. آنچه مسلم است، تلاش برای پیاده سازی یک استراتژی خاص در نظام نگهداری و تعمیرات محصول یک دیدگاه بسته بوده و لازم است به فراخور وضعیت هر صنعت، استراتژی‌های مورد نظر انتخاب و پیاده-سازی شود.

در پایش وضعیت گیربکس‌ها معمولا از روش آنالیز ارتعاشات به‌عنوان تست اصلی و پایه استفاده می‌گردد. آنالیز ارتعاشات یک تکنیک بسیار فراگیر و قابل کاربرد برای پایش وضعیت بیشتر تجهیزات دوار مستقر در صنایع تولیدی است. البته دانش مرتبط به این تکنیک وسیع و توانایی آن در عیب‌یابی و پایش وضعیت تجهیزات دوار تحسین برانگیز است. به کمک این روش، ارتعاشات تجهیز اندازه گیری شده و بر اساس مشخصه های ارتعاشی تجهیز، وضعیت آن ارزیابی می‌گردد. اساس آنالیز ارتعاشات پردازش سیگنال در حوزه

زمان و فرکانس است. اگرچه تکنیک های رایج مبتنی بر تحلیل طیف فرکانسی بر اساس تبدیل فوریه، ابزار خوبی برای تحلیل سیگنال های پایاست ولی برخی از نقایص آن بهره گیری از آن را در تحلیل سیگنال های گذرا دشوار می سازد.

به منظور بررسی وضعیت چرخ‌دنده ها از نظر عیوب نقطه ای لازم است سیگنال زمانی از نظر مدولاسیون دامنه و فرکانس مورد بررسی قرار گیرد. مدولاسیون دامنه عبارتست از تغییرات منظم دامنه در حوزه زمان و مدولاسیون فرکانس عبارتست از تغییرات منظم فرکانس در حوزه زمان. به بیان دیگر مدولاسیون دامنه به سان یک بردار چرخان با اندازه متغیر و فرکانس ثابت است در حالی که مدولاسیون فرکانسی مانند بردار چرخان با اندازه ثابت و فرکانس متغیر است. در عمل بسیاری از عیوب همانند ناهمراستایی، خارج از مرکزیت، بک لش، لقی، سایش، ترک و شکستگی در گیربکس موجب ایجاد مدولاسیون با ترکیب فرکانس درگیری دنده به عنوان فرکانس حامل و فرکانس دور چرخدنده معیوب به عنوان فرکانس مدوله کننده می‌گردد. بدین ترتیب عیوب موضعی از قبیل ناهمواری سطوح، خوردگی، ترک و سایش دنده در سیگنال زمانی ارتعاشات قابل رصد است.

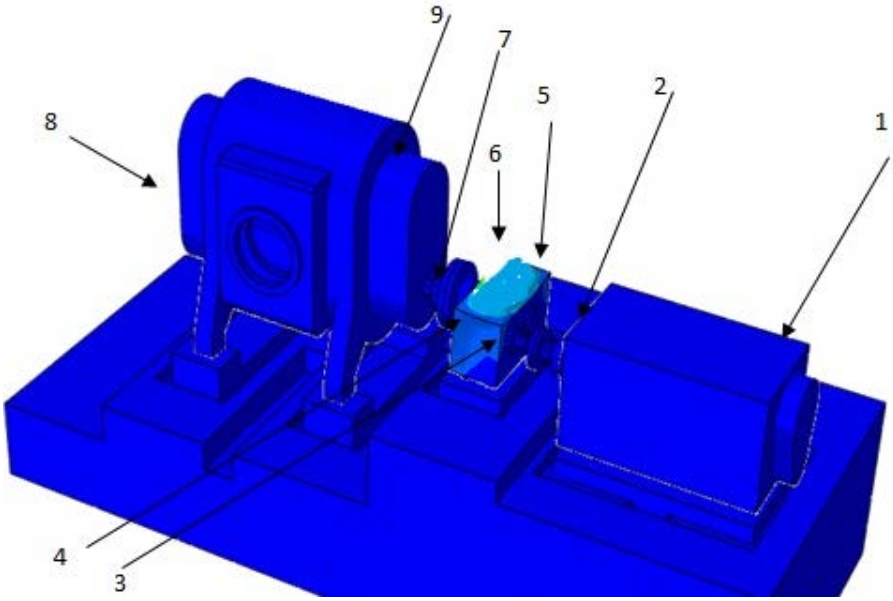
در سال‌های اخیر مباحث مرتبط با پایش وضعیت بیش از پیش مورد توجه مدیران و متخصصین نت صنایع و حتی مراکز پژوهشی و دانشگاهی قرار گرفته است. در این زمینه تکنیک های متنوعی وجود دارد که هرکدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند. به کمک هرکدام از این تکنیک‌ها می‌توان عیب یا مجموعه ای از عیوب را تجهیزات تشخیص داد. تکنیک آنالیز ارتعاشات به‌عنوان یکی از پرکاربردترین این تکنیک‌هاست. اگرچه ورود این تکنیک به کشور با تاخیر صورت گرفت ولی پیشرفت و نفوذ آن در صنایع مختلف نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد، سیمان، نیروگاه و ... در یک دهه اخیر چشمگیر بوده است. این موضوع بیان‌گر درک عمیق از اهمیت پایش وضعیت و تاثیر مستقیم آن بر کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات صنایع است. ارائه موردکاوی‌های تخصصی در کنفرانس-های نت و پایش وضعیت در کشور و مقالات علمی موجود در زمینه پایش وضعیت و عیب یابی گیربکس ها در صنایع کشور نشان-دهنده این مسئله است. مقاله حاضر دستاورد عیب یابی دو گیربکس صنعتی Hansen مورد استفاده در یکی از صنایع فولادی کشور با استفاده از نخستین دیتاکالکتور و آنالایزر ارتعاشات پیشرفته ایرانی است که پس از دوازده سال مطالعه و تحقیق و با یک سوم قیمت محصولات مشابه خارجی به کمک تیم‌های پایش وضعیت و نگهداری و تعمیرات صنایع آمده است. استفاده از سخت افزار و نرم افزار ایرانی از نوآوری‌های مقاله حاضر است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش از دستگاه آنالایزر ارتعاشات پیشرفته AVB4060 به منظور داده‌برداری و تحلیل ارتعاشات استفاده شده است. این دستگاه نخستین دیتاکالکتور ساخت ایران با مشخصات زیر است:

- دو کانال ورودی ارتعاشات و یک کانال ورودی تاکو
- بازه فرکانسی 1Hz-25600Hz
- آنالیز FFT با حداکثر ۲۵۶۰۰ خط
- صفحه نمایش هفت اینچ رنگی با رزولوشن 480*800
- مجهز به انواع تکنیک های پردازش و تحلیل ارتعاشات (طیف فرکانسی، سیگنال زمانی، انولوپ، اوربیت و آنالیز فاز)
- دارای ماژول بالانس تک صفحه ای و دو صفحه ای
- دارای ماژول تست ضربه، ODS
- مجهز به تکنیک Crest Factor
- دارای ماژول تخصصی مخصوص گیربکس
- دارای ماژول تحلیل مرتبه
- مجهز به نرم افزار DCM با محیط کاربری بسیار آسان

شکل ۱- دستگاه آنالایزر ارتعاشات پیشرفته ۴۰۶۰□□□



شکل ۲- موقعیت نقاط ارتعاش سنجی برروی الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور

به‌منظور پایش دقیق وضعیت تجهیز، ده موقعیت برروی مجموعه الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور برای داده برداری مشخص گردید که در شکل (۲) قابل مشاهده است. همچنین مشخصات فنی الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور در جدول (۱) ارائه شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آنالیز ارتعاشات دو تجهیز داده برداری شده خواهیم پرداخت.

مقادیر کلی ارتعاشات اندازه گیری شده در طی نخستین دوره داده برداری از تجهیزات مورد نظر، در جدول‌های شماره (۲) و (۳) در ادامه ارائه شده است. با استناد به استانداردهای رایج و همچنین مقادیر مجاز پیشنهادی سازنده، وضعیت ارتعاشات هر دو تجهیز قابل قبول است. اما اکتفا به این مقادیر می‌تواند گمراه کننده باشد. در ادامه بررسی سایر پارامتر ها نشان دهنده وضعیت هشدار و خطر در هر دو تجهیز است.

جدول ۱: مشخصات فنی الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور

Driver		Gearbox		Driven	
Type	Electromotor	Type	P4	Type	Firs Stage Compressor
Manufacturer	SCHORCH	Manufacturer	HANSEN	Manufacturer	AERZEN
Type	KV6534B	Power	2300 KW	Speed	399 RPM
Power	2300 Kw			Inlet Pressure	1.11
Frame Size	-	Ratio	1:3.72	Outlet Pressure	2.08
Voltage	6600V	Lubrican Type	Sell Omala	Inlet Temperature	50 C
Current	235 A	Quantity of Oil (Lit)	90	Outlet Temperature	70 C
Cos	0.89	Pinion teeth	18	Alarm Vibration	14 mm/s
No. of Poles	4	Gear teeth	67	Danger Vibration	18 mm/s
Speed	1492 RPM	Bearing Type	SKF 22240		
IP	55		SKF 23226		
Efficiency	97.2%		SKF 32226		
Bearing Type	6230 MC3	Alarm Vibration	7 mm/s		
Lubrican Type	Lithium Saponified Grease	Danger Vibration	10 mm/s		
Quantity of Grease	80 gr				
Alarm Vibration	4.5 mm/s				
Danger Vibration	7.5 mm/s				

جدول ۲: مقادیر کلی ارتعاشات تجهیز □۴۸□□-□□

Vibration	CP-XA48A (Velocity-mm/s)									
	Motor		Gearbox				Compressor			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Vertical	2.9	2.6	3	4.4	3.1	3.4	7.1	7.1	7.5	8
Horizontal	2	3.4	3.3	3.5	3.6	3.8	4.5	4.5	6	5.9
Axial	3.4	3.3	4.5	4.6	4.5	4.4	6.5	6.9	6.8	6.5

جدول ۳: مقادیر کلی ارتعاشات تجهیز □۴۸□□-□□

Vibration	CP-XA48B (Velocity-mm/s)									
	Motor		Gearbox				Compressor			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Vertical	1.5	1.5	4.7	3.2	3.9	3.4	4.4	4.9	4.5	6.5
Horizontal	2.4	2.4	4.6	3.5	4.8	4.8	5.5	7	6	5.9
Axial	2.4	2.3	4.8	5.5	4.5	4.6	6.5	5	5	4.8

جدول ۴: مقادیر پارامتر Crest Factor تجهیز CP-XA48A

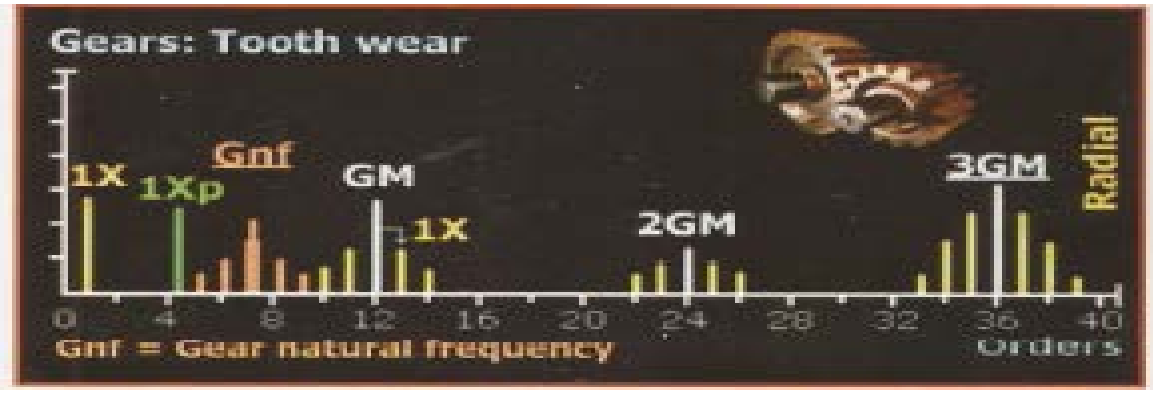
	CP-XA48A									
	Motor		Gearbox				Compressor			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Radial	3.4	3.3	6	5.5	6.3	5.9	3.4	3.5	3.4	3.5

جدول ۵: مقادیر پارامتر Crest Factor تجهیز CP-XA48B

	CP-XA48B									
	Motor		Gearbox				Compressor			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Radial	3	3.1	4.6	4.5	4.5	4.6	3.6	3.5	3.5	3.7

پارامتر Crest Factor عبارتست از نسبت مقدار پیک واقعی سیگنال ارتعاشی به مقدار RMS سیگنال گفته می شود. در مراحل ابتدایی خرابی بیرینگ ها، بیرینگ معیوب سیگنال های پریودیک تیزی ساطع می کند. باتوجه به اینکه در این مرحله مقدار RMS افزایش زیادی پیدا نمی‌کند در نتیجه با بزرگ شدن نسبت یادشده مقدار پارامتر Crest Factor افزایش می یابد. با گسترش خرابی و افزایش پیک های ارتعاشی مقدار RMS ارتعاش افزایش یافته و درنتیجه حاصل نسبت و نهایتا مقدار Crest Factor کاهش می‌یابد. بنابراین ترند مقادیر Crest Factor می‌تواند در شناسایی خرابی مراحل اولیه بیرینگ‌ها بسیار موثر باشد. لازم به ذکر است عوامل دیگری نیز برروی تغییرات این پارامتر موثر هستند که از آن جمله می‌توان به تحت تنش بودن بیرینگ در اثر بارهای ضربه‌ای بخصوص در گیربکس ها اشاره نمود. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول (۴) و (۵) مشخص است، پارامتر Crest Factor در نقاط مختلف گیربکس دارای وضعیت هشدار است. پیش از بررسی مشخصه های ارتعاشی گیربکس های مورد مطالعه، لازم است مروری بر مبانی آنالیز ارتعاشات در عیب یابی گیربکس ها صورت پذیرد.

درگیربکس سالم با وضعیت نرمال، انتظار می‌رود در سرعت‌های شفت و فرکانس درگیری دنده پیک هایی با دامنه قابل قبول مشاهده می‌گردد. بیشتر مشکلات در گیربکس ها با ظهور فرکانس های هارمونیک درگیری دنده همراه با سایدباند و فرکانس های طبیعی شناسایی می شوند. وقتی دندانه ها شروع به سایش می‌کنند، سایدباندهای دور اطراف فرکانس درگیری دنده ظاهر می‌شود. سایدباندها با سرعت دوران چرخدنده در حال سایش مطابقت دارد. ساید باندها در نتیجه مدولاسیون دامنه و یا فرکانس ایجاد می-گردد. در سایش شدید فرکانس های طبیعی دنده در اثر درگیری چرخدنده ها، تحریک می‌گردد.

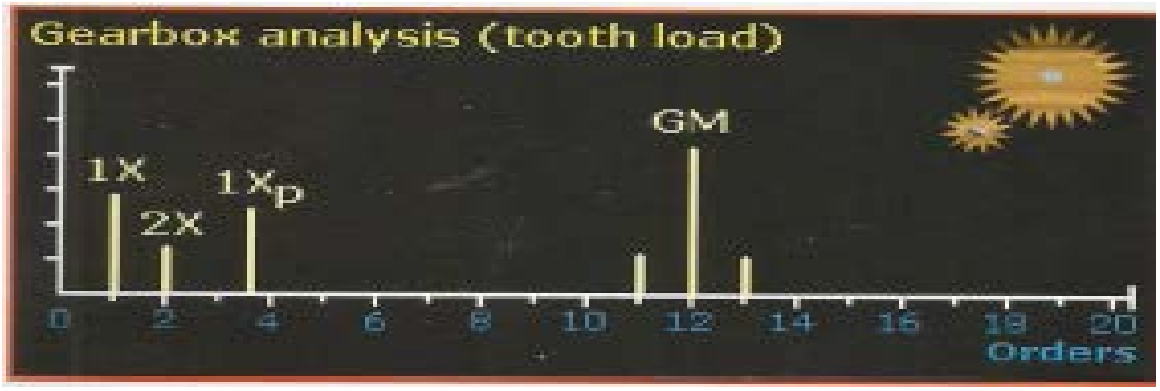


شکل ۳- مشخصه های طیف فرکانسی با عیب سایش دنده

ظهور و رشد سایدباندها می‌تواند نشانه بک لش و یا خارج از مرکزیت نیز باشد. چرخدنده های خارج از مرکز و یا با شفت های خمیده و یا مشکل بک‌لش باعث می‌شوند که بار در هر دور تغییر کند. این مسئله منجر به مدولاسیون دامنه و رشد سایدباندهای دور شفت حامل چرخدنده معیوب حوالی فرکانس درگیری دنده گردد. هارمونیک های اول تا سوم فرکانس درگیری دنده به علت رفتار غیرخطی با رشد همراه خواهند بود. بک‌لش یا لقی چرخدنده موجب ظهور سایدباندهای دور شفت معیوب در اطراف فرکانس درگیری دنده می‌گردد.

شکل ۴- مشخصه های طیف فرکانسی عیب خارج از مرکزیت و بک‌لش

شکل ۵- مشخصه های طیف فرکانسی گیربکس با عیب ناهمراستایی



شکل ۶- مشخصه های طیف فرکانسی در حالت بار غیرعادی برروی دنده

ناهمراستایی داخلی و یا خارجی در گیربکس موجب تحریک هارمونیک های فرکانس درگیری دنده با نسبت دامنه های غیرعادی خواهد شد. در صورت اعمال بار غیرعادی برروی دنده نیز فرکانس درگیری دنده رشد خواهد کرد.

بررسی دقیق طیف فرکانسی گیرکس CP-XA48A در شکل (۷) نشان دهنده موارد زیر است:

فرکانس درگیری دنده برابر با حاصل‌ضرب تعداد دنده چرخدنده ورودی در فرکانس کاری شفت ورودی و یا حاصل‌ضرب تعداد دنده چرخدنده خروجی در دور شفت خروجی و معادل ۴۵۰هرتز است. (GMF=18*25=67*6.7=450Hz)

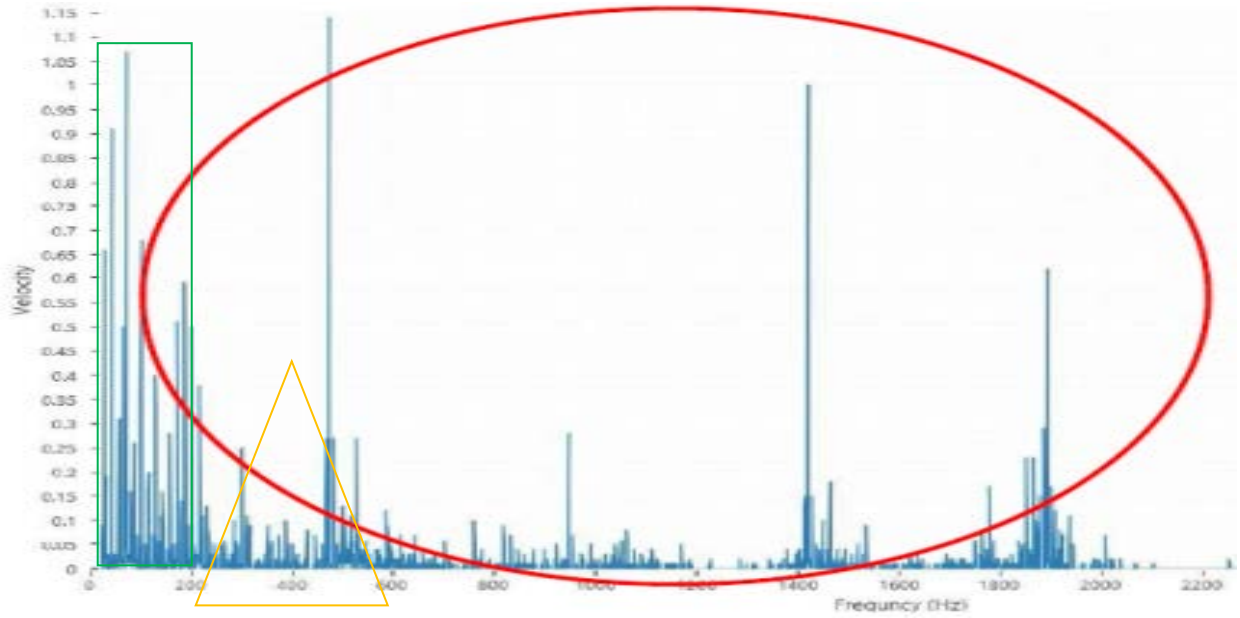
دامنه فرکانس درگیری دارای دامنه غالب بوده که این مسئله نگران کننده است.

سایدباندهای فرکانس درگیری دنده بصورت نامتقارن رشد کرده اند که این مسئله نشان از یک عیب غیرخطی در گیربکس (از قبیل لقی، بک لش یا خارج از مرکزیت) دارد.

هارمونیک های فرکانس درگیری دنده نیز تحریک شده و دارای دامنه غیرعادی هستند. علاوه بر این سایدباندهای فرکانس های مذکور نیز بصورت نامتقارن رشد کرده اند که این مسئله گسترش خرابی و شدت عیب را نشان می‌دهد.

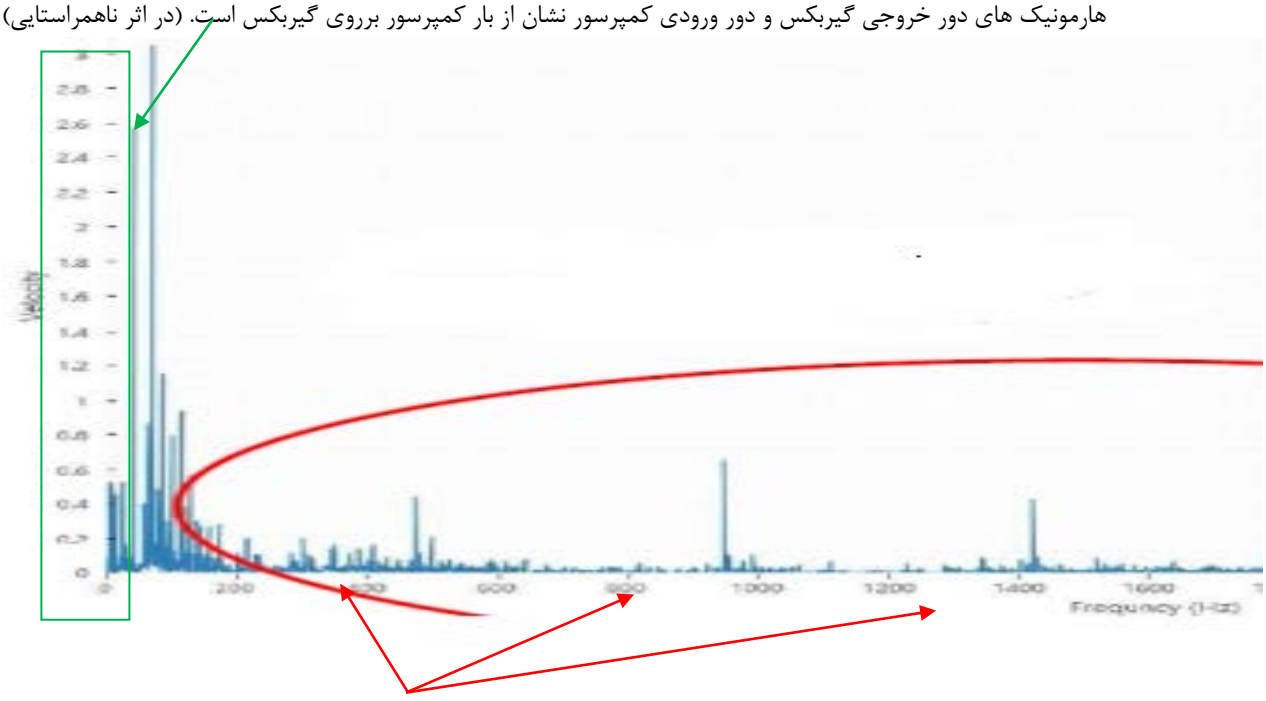
فرکانس های طبیعی گیربکس تا حد زیادی تحریک شده اند. (فرکانس طبیعی در گیربکس حدفاصل هارمونیک دور شفت و فرکانس درگیری دنده را شامل می‌شود.)

بار اعمالی از کمپرسور بر روی گیربکس زیاد است که میتواند ریشه مکانیکی یا فرآیندی داشته باشد. (هارمونیک های دور کمپرسور که معادل 400rpm است نشان دهنده این مسئله است.)



شکل ۷: طیف فرکانسی گیربکس ۴۸□□-□□ (گیربکس شماره ۱)

هارمونیک های دور خروجی گیربکس و دور ورودی کمپرسور نشان از بار کمپرسور برروی گیربکس است. (در اثر ناهمراستایی)



شکل ۸: طیف فرکانسی گیربکس ۴۸□□-□□ (گیربکس شماره ۲)

بررسی دقیق طیف فرکانسی ۴۸□□-□□ در شکل (۹) نشان دهنده موارد زیر است:

فرکانس درگیری دنده برابر با حاصلضرب تعداد دنده چرخدنده ورودی در فرکانس کاری شفت ورودی و یا حاصلضرب تعداد دنده چرخدنده خروجی در دور شفت خروجی و معادل ۴۵۰هرتز است. (GMF=18*25=67*6.7=450Hz)

دامنه فرکانس درگیری دارای دامنه قابل قبول است ولی هارمونیک های آن دارای دامنه بزرگتر و غیر قابل قبول هستند.

طیف فرکانسی کاملا مشابه شکل (۵) و الگوی ناهمراستایی در گیربکس است.

بار اعمالی از کمپرسور بر روی گیربکس زیاد است که میتواند ریشه مکانیکی در اثر ناهمراستایی و یا فرآیندی داشته باشد. (هارمونیک های دور کمپرسور معادل 400rpm نشان دهنده این مسئله است.)

غالب بودن ارتعاشات محوری از یک سو و نسبت غیرطبیعی فرکانس های درگیری دنده نشان از ناهمراستایی است.

جمع بندی نتایج نشان از وجود بک‌لش در گیربکس شماره (۱) داشت به همین علت نسبت به توقف تجهیز و چک بک‌لش اقدام گردید. در اندازه گیری بک‌لش این مورد تایید شد. در ادامه به ریشه یابی علت بهم ریختن بک‌لش در گیربکس پرداخته شد. این عوامل عبارت بودند از عیوب مونتاژ، تغییر در وضعیت هوزینگ بیرینگ و ایجاد ترک شفت. بهمین علت نسبت به بازرسی دقیق گیربکس از طریق کپ پوسته گیربکس اقدام گردید و فرضیه ترک شفت تایید شد. خوشبختانه تمام دنده‌های چرخ‌دنده پینیون و Gear سالم بوده و هزینه تحمیلی محدود به سفارش ساخت شفت خروجی و مونتاژ آن گردید.

شکل ۱۱: ترک در شفت گیربکس □□۴۸□□-□□ پس از انتقال به کارگاه و دمونتاژ آن

همچنین با توجه به جمع‌بندی نتایج آنالیز ارتعاشات وجود ناهمراستایی در گیربکس شماره (۲) محرز و نسبت به الاینمنت مجدد گیربکس دوم اقدام گردید که منجر به کاهش دامنه ارتعاشات و نرمال شدن مشخصه های ارتعاشی تجهیز گردید.

لازم به ذکر است بهبود شرایط کارکردی و الاینمنت گیربکس منجر به کاهش بار اعمالی بر گیربکس، افزایش عمر و کاهش توان مصرفی الکتروموتور می‌گردد.

پس از نتایج حاصل از اولین دوره آنالیز ارتعاشات و حصول رضایت کامل کارفرما از قابلیت های اولین دستگاه آنالایزر ارتعاشات ایرانی، پیاده سازی برنامه جامع پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات در سایت مذکور طبق برنامه روتین هفتگی در دستورکار قرار گرفت. خوشبختانه نتایج و دستاوردهای حاصل از پیاده‌سازی برنامه جامع پایش وضعیت در مجتمع فولادی مذکور طی سه سال اخیر منجر به کاهش توقف‌های تولید، کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در اثر پیشگیری از تعمیرات پیش‌گیرانه دوره‌ای غیرضروری، کاهش حجم کاری و نفر ساعت تعمیرات صرف شده، پیشگیری از سعی و خطا در عیب‌یابی تجهیزات دوار و جلوگیری از خرابی‌های سنگین شده‌است.

۳- نتیجه‌گیری

اجرای برنامه پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز ارتعاشات باید در یک کلاس جهانی پیگیری شود و نباید تنها محدود به مقایسه مقادیر کلی ارتعاشات با استاندارد و یا سفارش سازنده یا وندور شود.

به منظور تحلیل دقیق وضعیت یک گیربکس ضروری است مقادیر فرکانس درگیری دنده، تغییرات دامنه فرکانس درگیری دنده و فرکانس های طبیعی، سایدباندها و ... نیز مورد بررسی قرار گیرند.

تنها زمانی میتوان شرایط یک تجهیز دوار را نرمال دانست و عمر کارکردی قابل قبولی برای آن متصور بود که تمام پارامترهـای مورد بررسی نرمال باشند.