

به نام خدا

## شناسایی خرابی در یاتاقان کمپرسور HY90 با استفاده از آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن

حسین غلامزاده‌ثانی<sup>1</sup> - علیرضای<sup>2</sup>

<sup>1</sup>سرپرست PM شرکت سیمان زاوه تربت

<sup>2</sup>کارشناس VCM شرکت سیمان زاوه تربت

\* Sani.hossein@gmail.com

### چکیده:

امروزه بکارگیری استراتژی‌های مختلف مانند نگهداری پیش‌گیرانه، پیش‌بینانه و پیش‌اقدامانه بمنظور افزایش کارایی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در صنایع، ضروری است. در واقع هر یک از این استراتژی‌ها، جایگاه ارزشی خود را دارا بوده و یک نظام جامع نگهداری و تعمیرات، از ترکیب بهینه آن‌ها حاصل خواهد شد. اجرای برنامه روتین پایش وضعیت با استفاده از روش آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن برای تشخیص بموقع عیوب تجهیزات دوار نقش مهمی را بر عهده دارد. در این مقاله، نمونه‌ای از اثربخشی بکارگیری همزمان دو روش آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن در شناسایی خرابی اجزای کمپرسور کارخانه سیمان زاوه تربت، ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پایش وضعیت، آنالیز ارتعاشات، یاتاقان و جعبه‌دنده

### مقدمه:

امروزه دیگر کمتر واحد صنعتی را می‌توان یافت که در آن از ابزارهای متنوع پایش وضعیت در سیستم نگهداری و تعمیرات اثری نباشد. در حقیقت در حال حاضر اکثر صنایع بطور همزمان از روش‌های مختلف پایش وضعیت از قبیل آنالیز ارتعاشات، آنالیز روغن، ترموگرافی و ... بهره می‌گیرند. در چنین شرایطی سخن گفتن از تجربیات استقرار سیستم‌های مختلف پایش وضعیت، دیگر مطلب تازه و جذابی برای دست اندرکاران این حوزه به شمار نمی‌رود.

با توجه به پشت سر گذاشتن دوران استقرار پایش وضعیت در اکثر صنایع، دیگر نوبت به مباحث مرتبط با تثبیت و بکارگیری آن‌ها در شناسایی عیوب مختلف می‌رسد. در واقع امروزه مهم‌ترین چالش دست اندرکاران حوزه پایش وضعیت و نگهداری و تعمیرات، طرح-ریزی و اجرای سیستمی است که در آن با بهره‌گیری از روش‌های متنوع پایش وضعیت و هم‌پوشانی مناسب آن‌ها با یکدیگر بتوان متناسب با وضعیت ماشین‌آلات، شرایط فرایند، قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر یک از روش‌های پایش وضعیت به شکل اثربخش از آنها بهره‌جویید، بگونه‌ای که در شرایطی نتایج حاصل از یک روش آن‌ها را به نتیجه قطعی رهنمون نمیکند با استفاده از سایر روش‌ها بر بررسی دقیقتر موضوع بپردازند.

در این مقاله خواهیم دید که چگونه بکارگیری اثر بخش همزمان دو روش آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن، ما را به کشف بموقع خرابی اجزا در یک کمپرسور رهنمون میکند.

1- ارزیابی وضعیت ماشین‌آلات

## 1-1- مقدمه

ارتعاشات هر تجهیز دوار (چه از نظر مقدار و چه از نظر سایر مشخصات ارتعاشات) ارتباط مستقیمی با وضعیت آن دارد و هرگونه تغییر هر چند جزئی در وضعیت تجهیز (از هر نظر) با تغییر در وضعیت ارتعاشات آن همراه خواهد بود. لذا اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشات یکی از روش‌های اصلی برای پایش تجهیزات و ماشین‌آلات دوار به شمار می‌رود. از طرفی در تجهیزات دارای روغن، گرفتن نمونه و انجام آزمایش بر روی روغن، نیز روش ارزشمندی جهت شناسایی برخی عیوب در اجزای ماشین می‌باشد. که با توجه به نوع خرابی می‌تواند کارایی بیشتری در بعضی موارد نسبت به روش آنالیز ارتعاشات داشته باشد.

## 1-2- نحوه ارزیابی ارتعاشات کمپرسورهای Screw

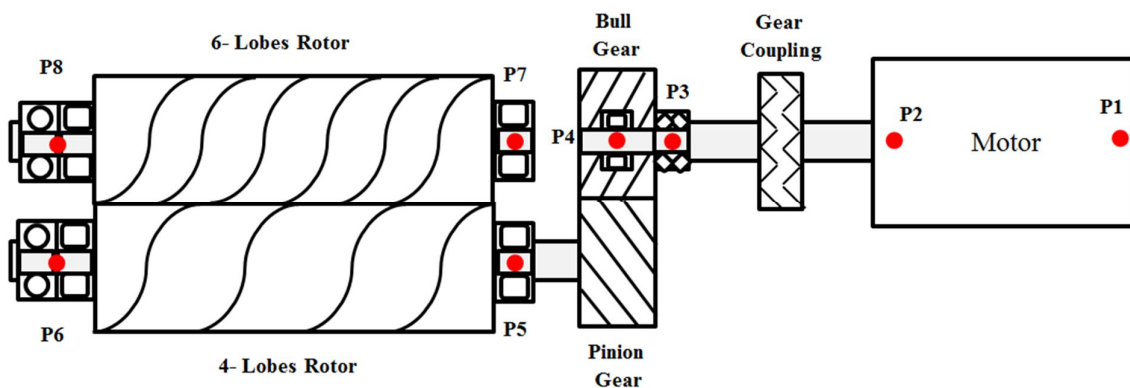
از آنجا که در این تجهیزات اجزایی نظیر چرخ دنده، روتور Screw و یاتاقان وجود دارند، آنالیز ارتعاشات آن‌ها به نسبت پیچیده بوده و نیازمند بکارگیری شاخص‌ها و روش‌های مختلفی جهت ارزیابی دقیق آن‌ها می‌باشد. لذا انتخاب پارامتر ارتعاشی و محدوده فرکانسی مناسب جهت اندازه‌گیری و پایش ارتعاشات آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب پارامتر ارتعاشی و ابزار اندازه‌گیری مربوطه با توجه به عوامل زیر تعیین می‌شوند:

- توصیه سازندگان
- تجربه کاربر
- محدودیت‌های محل اندازه‌گیری (دسترسی، فضای کافی، درجه حرارت و ...)
- محل اندازه‌گیری (اجزای ثابت یا دوار)
- محدودیت‌های کاربردی (محدودیت فرکانسی، محدودیت دامنه خیلی زیاد و ...). [1]

## 2- کمپرسور Screw HY 90

### 1-2- آشنایی با تجهیز:

هوای فشرده مورد نیاز خط تولید در کارخانه سیمان زاوه تربت از طریق 5 دستگاه کمپرسور Screw HY90 تامین می‌شود (شکل یک). همانطور که مشاهده می‌شود، محور الکتروموتور به یک جعبه دنده و در نهایت به محور محرک کمپرسور متصل شده‌است. مشخصات فنی کمپرسور مربوطه در جدول شماره دو درج شده‌است.



شکل 1- جانمایی الکتروموتور، جعبه دنده و یاتاقان‌های محور محرک و متحرک کمپرسور

جدول 2- مشخصات فنی کمپرسور HY90

Manufacture	Model no	Working Pressure	Max Inlet Temperature	Motor Power	Motor Speed	Bull Gear	Pinion Gear
ATLAS COPCO	HY90	8 bar	40°C	90 Kw	1490 rpm	47 Teeth	45 Teeth
Bull Gear Bearings		4-Lobes Rotor Bearings		6-Lobes Rotor Bearings			
22315	NU 2308	QJ 315+NU 315		NU 315	QJ 315+NU 315		NU 315

2-2- اندازه‌گیری ارتعاشات کمپرسور

ارتعاشات کلیه 5 دستگاه کمپرسور در نقاط مشخص شده بر روی شکل یک اندازه‌گیری شد. جهت بررسی و آنالیز دقیق ارتعاشات نیاز به اطلاع از نحوه درگیری محورها و همچنین محل دقیق یاتاقان‌ها و سایر اجزا می‌باشد. لذا کلیه فرکانس‌های مورد نیاز جهت ارزیابی وضعیت کمپرسور محاسبه و در جدول شماره سه قابل مشاهده است.

جدول 3- مشخصات فرکانسی اجزای کمپرسور HY90

Frequency Name	Calculation	Frequency (Hz)
4-Lobe Rotor Speed	$1490/60 \times 47T/45T$	25.94
4-Lobe Pass Frequency	$25.94 \times 4$	103.76
6-Lobe Rotor Speed	$25.94 \times 4T/6T$	17.3
6-Lobe Pass Frequency	$17.3 \times 6$	103.76
Bull Gear Mesh Frequency	$1490/60 \times 47T$	1167
Pinion Gear Mesh Frequency	$25.94 \times 45T$	1167
2x GMF	$2 \times 1167$	2334
3x GMF	$3 \times 1167$	3501

با توجه به جدول فوق و گستره محدوده فرکانسی اجزا، انتخاب پارامتر و بازه فرکانسی مناسب جهت اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاشات کمپرسور (Air End) از اهمیت زیادی برخوردار بوده و از آنجا که در برخی از دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات، تنها امکان اندازه‌گیری یک پارامتر وجود دارد، اظهار نظر دقیق در خصوص وضعیت سلامت کمپرسور، بسیار مشکل است.

### 3-2- ارزیابی وضعیت ارتعاشات کمپرسور:

در مرحله اول مقادیر ارتعاشات بر حسب پارامتر RMS سرعت اندازه‌گیری شد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده از کمپرسورها با یکدیگر و همچنین مقایسه با مقادیر پیشنهادی استاندارد نشان دهنده عادی بودن وضعیت کلیه کمپرسورها بود. به عنوان مثال مقادیر ارتعاشات یاتاقان‌های کمپرسور شماره یک و کمپرسور شماره سه در جدول شماره 4 نشان داده شده است.

جدول 4- مقادیر ارتعاشات کمپرسور بر حسب واحد سرعت

Compressor	RMS(mm/s)	4-lobes Rotor		6-lobes Rotor	
		P5	P6	P7	P8
7411CP1	H	0.7	1.5	0.6	1.4
	V	1	1.5	1.2	1.5
	A	0.7	0.9	0.8	0.8
7411CP3	H	1	2	0.6	1.2
	V	3	1.6	0.9	2
	A	0.3	0.7	0.8	1.8

در مرحله دوم ارتعاشات کمپرسورها بر حسب پارامتر RMS شتاب و همچنین شاخص‌های Crest Factor و Bearing Condition که در حوزه فرکانسی شتاب تعریف می‌شوند، اندازه‌گیری گردید. این بار مقایسه مقادیر ارتعاشات کمپرسورها با یکدیگر نشان دهنده غیرعادی بودن وضعیت ارتعاشات کمپرسور شماره یک می‌باشد. به عنوان مثال مقادیر ارتعاشات کمپرسور شماره یک و کمپرسور شماره سه در جدول شماره 5 مقایسه شده‌اند. (در هر نقطه، مقدار بیشترین دامنه ارتعاش در سه جهت افقی، عمودی و محوری ذکر شده است)

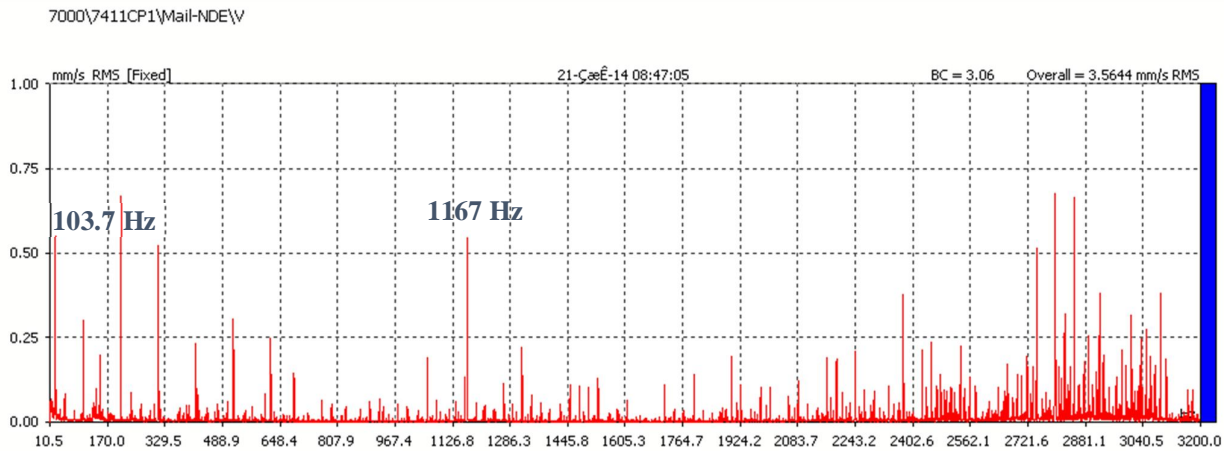
جدول 5- مقادیر ارتعاشات کمپرسور بر حسب واحد شتاب

Compressor	Vib (m/s <sup>2</sup> )	4-lobes Rotor		6-lobes Rotor	
		P5	P6	P7	P8
7411CP1	RMS	14	22	16	24
	BC	1.7	3	1.5	1.9
	CF	2.5	2.6	2.5	2.6
7411CP3	RMS	7	5	10	10
	BC	0.7	0.5	0.5	0.43
	CF	2.9	2.8	2.6	2.6

همانطور که مشاهده می‌شود علی‌رغم عادی بودن مقادیر ارتعاشات در حوزه فرکانسی سرعت (جدول 4) مقایسه مقادیر ارتعاشات جدول 5 نشان‌دهنده غیرعادی بودن مقدار ارتعاشات در یاتاقان‌های شماره 6 و 8 و همچنین مقدار شاخص BC در یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره یک نیز بیش از سایر نقاط است.

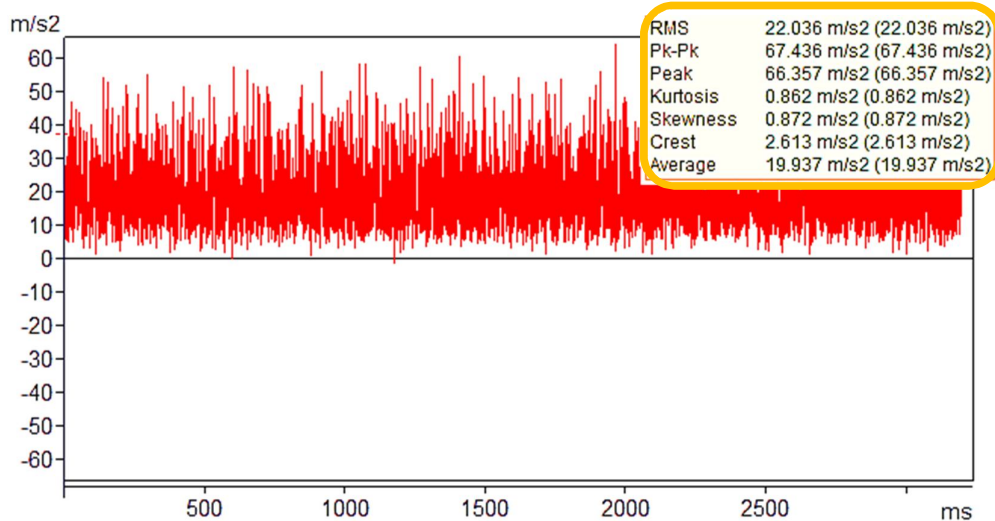
#### 4-2- ارزیابی دقیق‌تر ارتعاشات کمپرسور :

منحنی فرکانسی ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره یک در شکل شماره شش آمده‌است. محدوده فرکانسی انتخاب شده جهت اندازه‌گیری ارتعاشات کمپرسور بین 0.5-3200Hz می‌باشد.

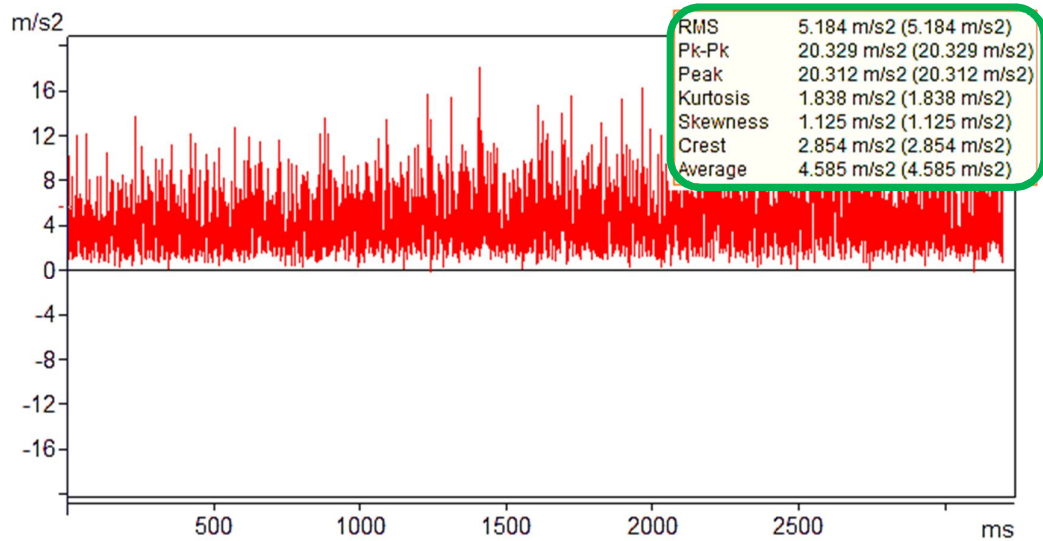


شکل 6- منحنی فرکانسی ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور در راستای عمودی

منحنی فرکانسی ارتعاشات در نقطه شماره 6 و سایر نقاط بررسی و مقایسه گردید که وضعیت کلیه آن‌ها تقریباً یکسان تشخیص داده شد و از همین روی منحنی پوش ارتعاشات مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های 7 و 8 مربوط به منحنی‌های زمانی پوش ارتعاشات نقطه شماره 6 در دو کمپرسور شماره یک و سه می‌باشد که با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

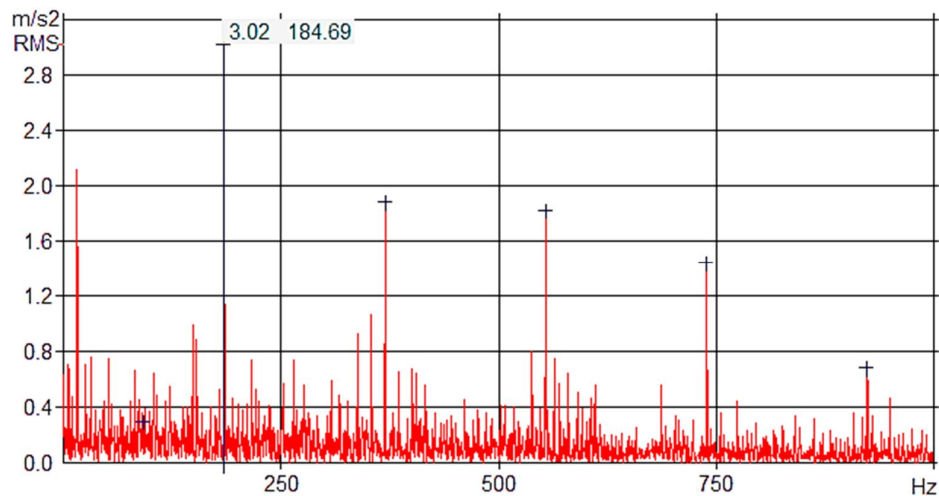


شکل 7- منحنی زمانی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره یک در راستای عمودی



شکل 8- منحنی زمانی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره 3 در راستای عمودی

مقایسه جداول فوق نشان میدهد، شاخص‌های RMS<sup>1</sup>، PK-PK<sup>1</sup>، Peak و Average در یاتاقان دو کمپرسور بایکدیگر اختلاف داشته اما در سایر شاخص‌ها نظیر Crest Factor و ... تفاوت محسوسی وجود ندارد. جهت بررسی دقیق‌تر منحنی فرکانسی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره یک در شکل شماره 9 مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل 9- منحنی فرکانسی پوش ارتعاشات یاتاقان شماره 6 کمپرسور شماره یک در راستای عمودی

همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ارتعاش در فرکانس 184.69Hz و هارمونیک‌های آن می‌باشد. جهت شناسایی فرکانس فوق نیاز به محاسبه و تعیین مقدار فرکانس خرابی اجزای یاتاقان‌های نصب شده در نقطه شماره 6 است. از همین روی

<sup>1</sup> Peak to Peak

با توجه به سرعت چرخش و نوع بیرینگ‌های نصب شده در نقطه شماره 6 از نرم افزارهای متداول موجود جهت محاسبه فرکانس‌های مزبور استفاده گردید که در جدول شماره 10 آمده است.

جدول 10 – فرکانس‌های چهارگانه اجزاء یاتاقان‌های نقطه شماره 6 کمپرسور (SKF)

Bearing Type	فرکانس خرابی حلقه داخلی <sup>4</sup>	فرکانس خرابی حلقه بیرونی <sup>3</sup>	فرکانس گردش غلتک <sup>2</sup>	فرکانس گردش قفسه <sup>1</sup>
Qj 315	170	116	54.5	10.5
NU 315	203	135	61.7	10.4

انتظار میرفت پس از محاسبه مقادیر فوق، مقدار فرکانس 184Hz نیز مشاهده گردد، اما بررسی مقادیر جدول فوق نشان دهنده اختلاف بسیار زیادی بین فرکانس مشخص شده در منحنی و مقادیر بدست آمده از نرم افزار می‌باشد. گفتنی است که بین اجزای یاتاقان، علاوه بر حرکت غلتشی، اندکی حرکت لغزشی<sup>5</sup> نیز روی می‌دهد. حرکت لغزشی ممکن است باعث عدم انطباق دقیق فرکانس‌های محاسبه شده بر فرکانس‌های اجزای نشان داده شده روی منحنی فرکانسی یا پوش شود. ثابت شده است که استفاده از تقریب‌های آسان شده در بسیاری از کاربردهای عملی برای محاسبه سریع فرکانس‌های آسیب یاتاقان قابل اطمینان است. (جدول 11) [2]

از همین روی با توجه به اینکه تنها فرکانس 170Hz نزدیک‌ترین عدد به مقدار مورد نظر بود، مجدد مقادیر فرکانس‌های آسیب بیرینگ Qj 315 به روش تقریبی در جدول شماره 11 محاسبه گردید.

جدول 11 – تقریبی از فرکانس‌های آسیب در یاتاقان‌های غلتشی

اطلاعات یاتاقان :	
تعداد ساچمه n : 12	
سرعت محور N : 1556.4 rpm	
تقریب برای یاتاقانی با تعداد عناصر غلتشی بین 6 و 12	تقریب برای یاتاقانی با تعداد عناصر غلتشی بین 6 و 12
$F_0 = N/60 \times (0.5 \times n - 1/2)$ $F_i = N/60 \times (0.5 \times n + 1/2)$ $F_c = N/60 \times (0.5 - 1/2 / n)$	$F_0 = N/60 \times 0.4 \times n$ $F_i = N/60 \times 0.6 \times n$ $F_c = N/60 \times 0.4$
از طریق تقریب :	آسیب وارده به :
124.51	F <sub>0</sub> حلقه خارجی
186.76	F <sub>i</sub> حلقه داخلی
10.37	F <sub>c</sub> قفسه

<sup>1</sup> Cage Frequency

<sup>2</sup> Ball Spin Frequency

<sup>3</sup> Ball Pass Frequency of Outer Race

<sup>4</sup> Ball Pass Frequency of Inner Race

<sup>5</sup> Sliding action

با توجه به جدول فوق و توضیحات ارائه شده، مشخص گردید فرکانس 184Hz می‌تواند در اثر خرابی حلقه داخلی یاتاقان Qj 315 باشد.

## 2-5- ارزیابی وضعیت روغن کمپرسور

از آنجا که برنامه آنالیز روغن کمپرسورها نیز همزمان با آنالیز ارتعاشات در حال انجام بود، با توجه به مشاهده علائم خرابی در آنالیز ارتعاشات، نتایج آنالیز روغن کلیه کمپرسورها نیز بصورت ویژه مورد بررسی قرار گرفت. تست‌های و آزمایشاتی که در خصوص نمونه روغن کمپرسورها صورت می‌پذیرد به شرح ذیل است:

- عناصر فرسایشی
- شاخص‌های فرسایشی
- افزودنی‌ها
- آلاینده‌ها
- آلودگی‌ها

شاخص<sup>1</sup> PQ یک ابزار پرطرفدار و قوی برای ارزیابی وضعیت سلامت تجهیزات روغنی است که یک عدد بدون واحد بوده و نشانگر میزان ذرات آهنی موجود در نمونه می‌باشد و ارزیابی آن نیازمند روند و بررسی آنست. همچنین برای تجهیزات مختلف با توجه به نوع طراحی تجهیز، مقدار این شاخص متفاوت است و به عنوان مثال در یک کمپرسور نسبت به جعبه‌دنده مقدار آن کمتر است. [3]

### • مقایسه سوابق نتایج آنالیز روغن کمپرسور شماره یک:

با توجه به گزارش آنالیز ارتعاشات و احتمال خرابی یاتاقان کمپرسور شماره یک، نتایج آنالیز روغن این کمپرسور نیز بررسی و با سوابق آن مقایسه گردید، که به عنوان مثال در جدول 12 نتایج مربوط به تست عناصر فرسایشی و شاخص PQ دو نمونه روغن گرفته شده از این کمپرسور که از نوع Shell Corena 68 می‌باشد، را نشان می‌دهد.

جدول 12- مقایسه نتایج آنالیز روغن کمپرسور شماره یک

عناصر فرسایشی	مقدار (PPM) 93/02/01	مقدار (PPM) 93/03/22
Fe	1.8	1.4
Cr	0	0.1
Cu	0.1	0.1
Pb	8.8	10.4
Sn	0	0
شاخص PQ	8	8

<sup>1</sup> Particle Quantification



همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار آهن و همچنین سایر عناصر فرسایشی پائین بوده و همچنین شاخص PQ نیز دارای روند ثابتی می‌باشد. از همین روی نتایج آنالیز روغن این کمپرسور که از نظر آنالیز ارتعاشات دارای وضعیت غیرعادی بود با نتایج سایر کمپرسورها نیز جهت ارزیابی دقیق تر وضعیت ماشین مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

• مقایسه نتایج آنالیز روغن کمپرسور شماره یک با سایر کمپرسورها :

جدول شماره 13 مقایسه نتایج کمپرسور شماره یک را با نتایج کمپرسور شماره دو که وضعیت ارتعاشی آن عادی است، نشان می‌دهد.

جدول 13- مقایسه نتایج آنالیز روغن کمپرسور شماره یک و دو

مقدار (PPM) کمپرسور شماره دو	مقدار (PPM) کمپرسور شماره یک	عناصر فرسایشی
2.1	1.8	Fe
0	0	Cr
0.2	0.1	Cu
10.3	8.8	Pb
0	0	Sn
8	8	شاخص PQ

بررسی جدول فوق نشان می‌دهد، وضعیت روغن هر دو کمپرسور که یک کدام از نظر ارتعاشات دارای وضعیت غیرعادی و دیگری عادی است، یکسان بوده و هیچ گونه علائم خرابی مشاهده نمی‌گردد. (لازم به ذکر است مقدار بالای عنصر سرب Pb ناشی از بالا بودن میزان این عنصر در روغن بکاررفته بوده و ارتباطی با خرابی اجزای ماشین ندارد)

## 2-6- جمع بندی نتایج آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن

با توجه به توضیحات فوق و عدم مطابقت نتایج آنالیز روغن و ارتعاشات در خصوص وضعیت کمپرسور شماره یک، تصمیم گیری در خصوص اقدام اصلاحی پیشنهادی بسیار مشکل بود اما از آنجا که تجربه نشان داده‌است، تکنیک آنالیز ارتعاشات در خصوص شناسایی مراحل اولیه خرابی تجهیزات دوار از قدرت و حساسیت بیشتری برخوردار است، تصمیم بر بازرسی کمپرسور شماره یک گردید.

## 2-7- نتیجه بازدید از کمپرسور

در بازرسی انجام شده مشخص گردید، سطح یکی از حلقه‌های داخلی یاتاقان Qj315 که در نقطه شماره 6 کمپرسور مزبور نصب گردیده، آسیب دیده‌است.



شکل 14- تصویر حلقه داخلی آسیب دیده یاتاقان کمپرسور

### نتیجه‌گیری

در کشف خرابی مربوط به آسیب دیدگی حلقه داخلی یاتاقان کمپرسور بکارگیری همزمان دو روش پایش وضعیت شامل آنالیز ارتعاشات و آنالیز روغن، قدرت کشف خرابی را به نحو موثری افزایش داد زیرا هر چند با توجه به ماهیت خرابی تغییر معناداری در نتایج آنالیز روغن مشاهده نگردیده بود، ولیکن آنالیز ارتعاشات توانسته بود این خرابی را به موقع و بدرستی شناسایی نماید و اگر تنها روش پایش این ماشین تکنیک آنالیز روغن می‌بود امکان شناسایی خرابی در مراحل اولیه آن وجود نداشت. نکته مورد توجه دیگر اهمیت پایش پارامتر شتاب در ارزیابی وضعیت سلامت کمپرسورهاست که در شناسایی این نوع خرابی، در مقایسه با پارامتر سرعت، کارایی بیشتری دارد و از همین روی اگر تنها پارامتر سرعت در پایش ارتعاشی کمپرسور مزبور بکارگرفته می‌شد، امکان شناسایی خرابی در مراحل اولیه آن نیز وجود نداشت.

### فهرست منابع

- 1- 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 1386 - صفحه 73
- 2- گردآوری و ترجمه: وحید رضائی و سعید سعیدی - تحلیل و تفسیر ارتعاشات ماشین‌آلات دوار - ناشر: پرس سانکو، چاپ اول 1389 - صفحات: 59 و 60

[3] [www.alsglobal.com](http://www.alsglobal.com)