

## بررسی و ریشه‌یابی خرابی یاتاقان‌های غلتشی با استفاده از آنالیز انولوپ

علی همتی\*

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ارتعاشات

دانشگاه بوعلی سینا همدان

a\_hemati65@yahoo.com

بهمن سپهری

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ارتعاشات

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد

b\_beiran@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

### چکیده

یاتاقان‌ها اعضاء حامل باری هستند که به صورت گسترده در تجهیزات دوار صنایع نفت و گاز کاربرد دارند لذا از این‌رو، بررسی و پیش‌بینی خرابی این تجهیزات از اهمیت بالایی برخوردار است. آنالیز ارتعاشات بر پایه آنالیز پاسخ زمانی، طیف فرکانسی، آنالیز فاز، اوربیت و آنالیز انولوپ<sup>۱</sup> است. در این تحقیق چگونگی خرابی یاتاقان‌های غلتشی با استفاده از تکنیک انولوپ بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق بر پایه بررسی‌های تجربی و همچنین با استفاده از ابزارآلات تخصصی در حوزه تحلیل ارتعاشات هستند. پیش‌بینی خرابی و همچنین ریشه‌یابی خرابی نقش مهمی در هزینه تعمیر و نگهداری دارد که در این تحقیق خرابی یاتاقان و دلایل آن مورد بررسی قرار گرفته است. هر یاتاقان با توجه به شرایط هندسی و سختی آن، برای ساعت کارکرد مشخصی طراحی شده است. چنانچه یاتاقان پیش‌تر از زمان تعیین شده دچار خرابی شود باید دلایل آن بررسی و در صورت امکان رفع شود. در این مطالعه خرابی زود رس یاتاقان غلتشی به دلیل اعمال بار بیش از حد، بررسی شده است.

**واژگان کلیدی:** آنالیز انولوپ، یاتاقان‌های غلتشی، تجهیزات دوار، بار بیش از حد

### ۱. مقدمه

ماهه رفتار یاتاقان پایش و تحلیل شده است. بیشتر خرابی‌ها در یاتاقان‌های غلتشی به دلیل استفاده از روانکار نامناسب یا ناکافی بودن میزان روانکار حادث می‌شود [۱]. معمولاً پس از شروع ترک در سطوح داخلی یا خارجی یاتاقان، این ترک با سرعت نسبتاً زیادی رشد می‌کند که در نتیجه آن، ارتعاشات سطوح و همچنین میزان ذرات سایشی در روغن افزایش می‌یابد. آغاز ترک به صورت معیاری برای معیوب بودن یاتاقان در کارکردهای بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲].

با استفاده از ابزارهای تخصصی داده‌برداری و آنالیز ارتعاشات از جمله VibXpert II، داده‌برداری‌هایی در حوزه زمان در یک بازه زمانی مشخص انجام شده است. با توجه به بازه زمانی، ممکن است روند ارتعاشی ثابت بوده و این ثبات از چندین ماه به چند سال برسد. در این مقاله با توجه به داده‌برداری‌های انجام شده در حوزه زمان به کمک تحلیل و پیش‌بینی خرابی یاتاقان در انولوپ شتاب، در یک بازه چند

تحلیل غیرقطعی و مطالعه پارامتری برای تخمین خرابی یاتاقان ناشی از خستگی ترک‌های سطح داخلی و خارجی یاتاقان سیلیکونی انجام شده است [۳]. تشخیص خرابی و عیب‌یابی یک یاتاقان غلتشی با مشخصات هندسی و سختی تعریف شده بر پایه تحلیل سیگنال ارتعاشی الکتروموتور و همچنین تحلیل و اندازه‌گیری جریان فاز بررسی شده است [۴]. ارتعاشات بر پایه پایش وضعیت جهت تشخیص خرابی یاتاقان‌های غلتشی برای چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. بررسی خلاصه‌ای از کارهای انجام شده و همچنین بررسی و محاسبه چگونگی تشخیص و تحلیل خرابی یاتاقان‌های غلتشی انجام شده است [۶]. همواره مقایسه یک روش مناسب جهت درستی تحلیل و آنالیزهای انجام شده است، لذا طیف زمانی و فرکانسی یاتاقان‌های یک جعبه دنده با یاتاقان‌های لغزشی در حالت پایدار استخراج و با طیف‌های ارتعاشی مقایسه شده است. روشی مطمئن مبتنی بر تحلیل سیگنال ارتعاشی برای عیب‌یابی یاتاقان ارائه شده است [۷]. آلترناتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ با یاتاقان‌های غلتشی مورد بررسی قرار گرفته و سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان، در دو حالت سالم و معیوب (عیب ساچمه) بررسی و پاسخ‌های اصلی بر طیف ارتعاشی حالت سالم و معیوب مشخص شد [۸]. روش‌های هوشمند و تحلیلی جهت آنالیز خرابی یاتاقان‌های غلتشی وجود دارد. با استفاده از طیف تکین و همچنین شبکه‌های عصبی خرابی یاتاقان‌های غلتشی بررسی و مشخص شده است [۹]. در این مقاله مطالعه موردی برای تشخیص و ریشه‌یابی خرابی یاتاقان‌های غلتشی با استفاده از آنالیز ارتعاشات و روش آنالیز انولوپ شتاب انجام شده است.

## ۲. معادلات و مشخصات مورد استفاده در بررسی

تحریک‌های ناشی از گذر اجزای غلتان یا ساچمه‌های یاتاقان از مسیر خود بر حلقه داخلی و حلقه خارجی سبب ایجاد فرکانس‌های خرابی یاتاقان می‌شود.

در اینجا به ترتیب معادلات خرابی یاتاقان‌های غلتشی شامل خرابی حلقه داخلی یاتاقان معادله ۱، حلقه خارجی یاتاقان معادله ۲، قفسه یاتاقان معادله ۳ و ساچمه یاتاقان معادله ۴ نشان داده شده است.

$$BPF_i = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 + \frac{B}{P} \times \cos\theta\right) \quad (1)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 - \frac{B}{P} \times \cos\theta\right) \quad (2)$$

$$FTF = \frac{F}{2} \times \left(1 + \frac{B}{P} \times \cos\theta\right) \quad (3)$$

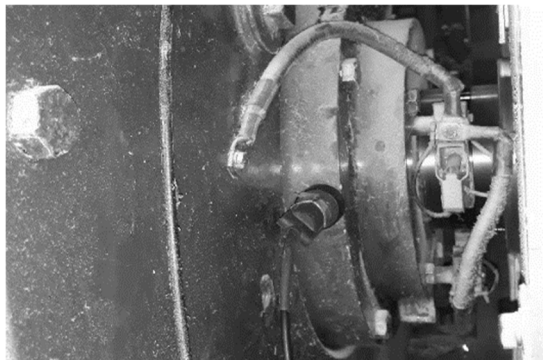
$$BSF = \frac{F}{2} \times \frac{P}{B} \times \left(1 - \frac{B^2}{P^2} \times \cos^2\theta\right) \quad (4)$$

BPF <sub>i</sub>	فرکانس خرابی حلقه داخلی یاتاقان
BPFO	فرکانس خرابی حلقه خارجی یاتاقان
FTF	فرکانس خرابی قفسه نگهدارنده ساچمه‌های یاتاقان
BSF	فرکانس خرابی ساچمه
P	قطر دایره گام
B	قطر ساچمه یا غلتک یاتاقان
θ	زاویه تماس ساچمه
F	سرعت دورانی یاتاقان
N	تعداد ساچمه‌های یاتاقان

با توجه به معادلات و تحلیل‌های نشان داده شده، تغییرات دور در میزان فرکانس‌های خرابی تجهیز تأثیرگذار بوده و با افزایش دور تجهیز، خرابی‌های یاتاقان به فرکانس‌های بالا منتقل می‌شود. این فرکانس‌ها ناشی از تحریک ساچمه در برخورد با حلقه داخلی، حلقه خارجی و یا قفسه هستند. جدول ۱ فرکانس‌های خرابی یاتاقان NU 1030M که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است را نشان می‌دهد. با توجه به متغیر بودن دور الکتروموتور تحلیل‌های انجام شده برای این تجهیز در دور ۵۵۵ RPM است، لذا فرکانس‌های خرابی یاتاقان که در جدول ۱ نشان داده شده است بر مبنای دور ۵۵۵ RPM است.



شکل ۱. نمونه داده برداری از نقطه DE موتور



شکل ۲. نمونه سنسور ارتعاش سنج در DE الکتروموتور

#### ۴. نتایج و خروجی‌های ارتعاشی حوزه فرکانس

همواره چهار مرحله خرابی یاتاقان با بازه‌های زمانی متفاوت بسته به نوع تعمیرات و نگهداری اتفاق خواهد افتاد، این موضوع خود مستلزم زمان شروع خرابی، نحوه روانکاری و میزان بار دینامیکی اعمال شده به تجهیز است. بررسی‌های تجربی حاصل از داده برداری در حوزه زمان به وسیله آنالایزر Omnitrend VibXpert II انجام شده و در نرم افزار تحلیل و نشان مختص به این دستگاه داده‌های گرفته شده تحلیل و نشان داده شده است. شکل ۳ انولوپ شتاب یاتاقان سالم را نشان می‌دهد که میزان دامنه این ارتعاشات بسیار پایین و قابل قبول است.

جدول ۱. فرکانس‌های خرابی یاتاقان NU 1030 M

SHAFT ROTATION	۹/۲۵ Hz
BPFO	۱۰۰/۳۴۴ Hz
BPFI	۱۲۱/۶۵۶ Hz
2*BSF	۴۷/۷۳۳ Hz
FTF	۴/۱۸۱ Hz

#### ۳. مشخصات تجهیزات دوار و نوع یاتاقان‌های

##### مورد تحلیل و بررسی

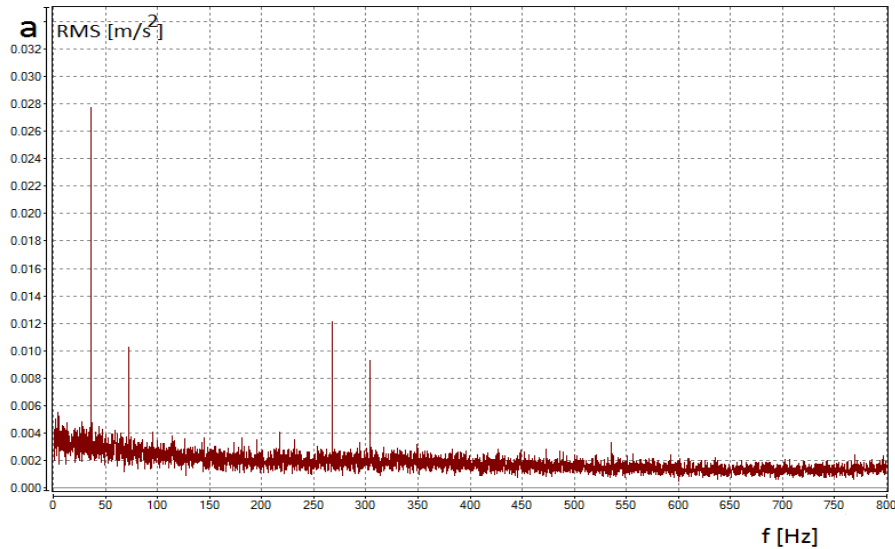
الکتروموتور مورد بررسی محرک یک سیستم انتقال قدرت کاهنده جهت ایجاد و تبدیل قدرتی است که در جدول ۲ مشخصات آن نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات الکتروموتور مورد بررسی

NDE Bearing	6030
	SKF NU
DE Bearings	1030
	6030
Motor Power	۱۶۰۰ kW
Motor Rotation	۹۶۰ RPM

با توجه به پاسخ خرابی یاتاقان و داده برداری‌های انجام شده، تمامی تحلیل‌های ارتعاشی برای یاتاقان سر جلوی الکتروموتور (DE) انجام و گزارش شده است این درحالی است که یاتاقان انتهایی الکتروموتور (NDE) نیز خراب شده است.

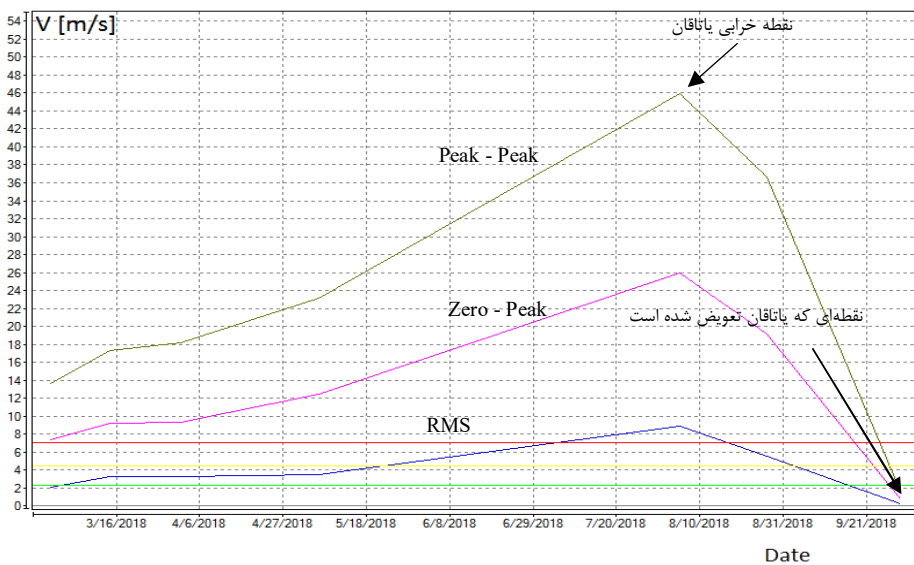
شکل ۱ نحوه داده برداری از محل قرارگیری یاتاقان الکتروموتور با آنالایزر VibXpert II را نشان می‌دهد. در شکل ۲ نیز محل قرارگیری سنسور جهت داده برداری را نشان می‌دهد که تمامی داده‌های گرفته شده در نقطه نشان داده شده است.



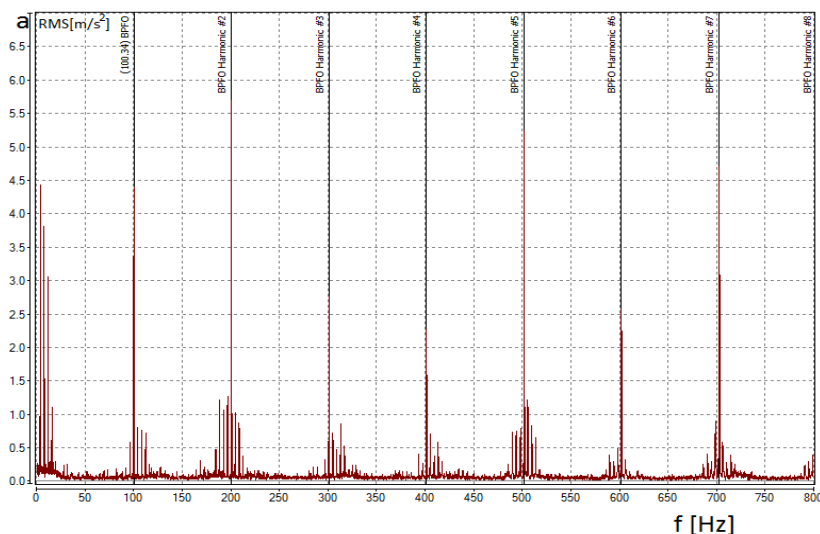
شکل ۳. انولوپ شتاب یک نمونه یاتاقان سالم

می‌دهد. پاسخ انولوپ به همراه پیک‌های خرابی حلقه خارجی و همچنین خرابی قفسه یاتاقان (FTF) در شکل ۵ و این پاسخ به صورت بزرگنمایی برای مشخص شدن سایید باندهای خرابی در شکل ۶ نشان داده شده است. این پیک خرابی که شامل خرابی با پاسخ هارمونیک‌های فرکانس BPFO و سایید باند FTF است، خرابی حلقه داخلی با فرکانس  $100/34$  Hz و خرابی قفسه یا سایید باندهای فرکانس  $4/181$  Hz است.

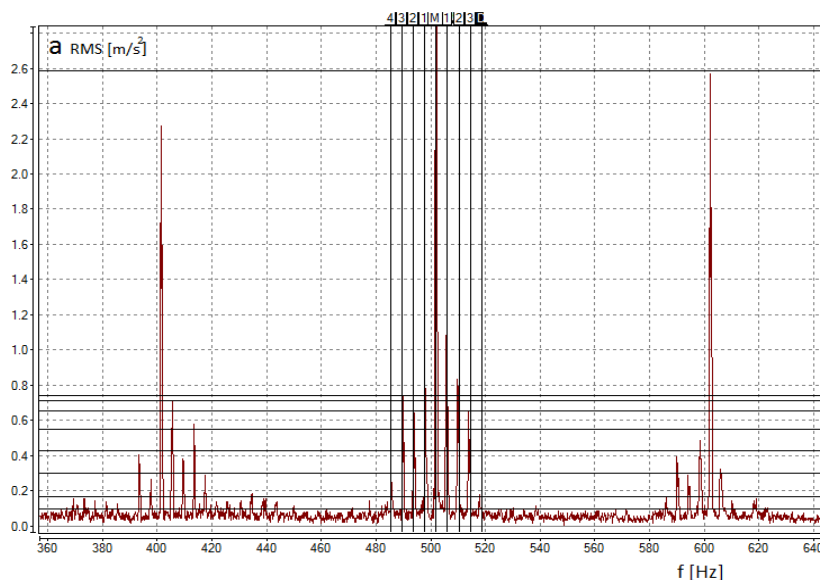
چنانچه پاسخ انولوپ شتاب مانند شکل ۳ ولی دامنه آن رو به افزایش باشد می‌توان این نقص را با انجام روانکاری مناسب برطرف نمود. در شکل ۴ روند خرابی یاتاقان الکتروموتور نشان داده شده است، چنانچه این روند صعودی باشد می‌توان به وجود عیب شک و پاسخ‌های انولوپ، طیف و همچنین پاسخ زمانی را تحلیل نمود. شکل ۵ پاسخ انولوپ شتاب را برای یاتاقان SKF NU1030 با علائم و فرکانس‌های BPFO یا خرابی حلقه خارجی را نشان



شکل ۴. روند تغییرات ارتعاشات از شروع خرابی تا تعویض یاتاقان



شکل ۵. انولوپ شتاب یاتاقان SKF NU1030 با خرابی حلقه خارجی و قفسه یاتاقان



شکل ۶. انولوپ شتاب یاتاقان SKF NU1030 با خرابی حلقه داخلی به همراه سایید باند های قفسه

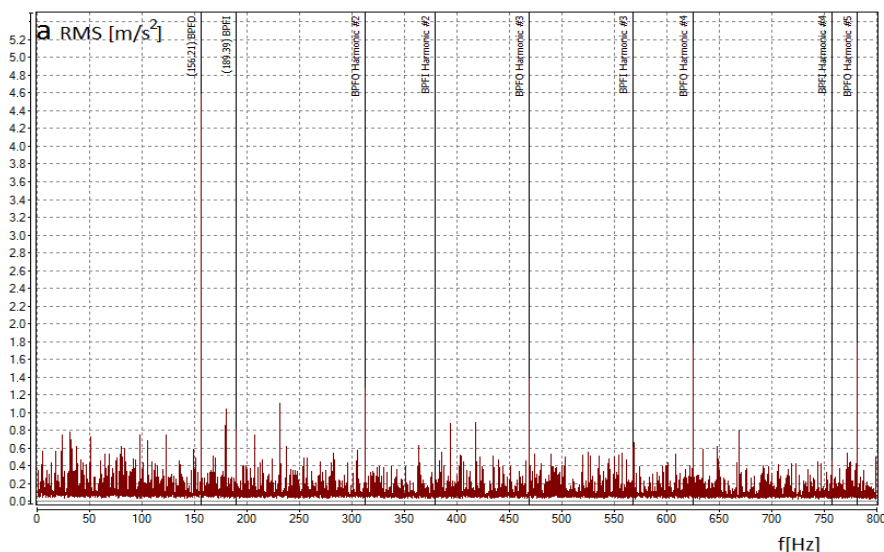
این در حالی است که میزان فرکانس های خرابی در عمل در مقایسه با حالت محاسباتی به دلیل شرایط خرابی اختلاف ناچیزی دارند.

شکل ۸ مراحل داده برداری از یاتاقان یا نمودار آبخاری را نشان می دهد که این طیف انولوپ شتاب بوده که چندین مرحله قبل از تعویض یاتاقان خراب شده و چند مرحله بعد از تعویض و داده برداری از یاتاقان سالم را نمایش می دهد. این

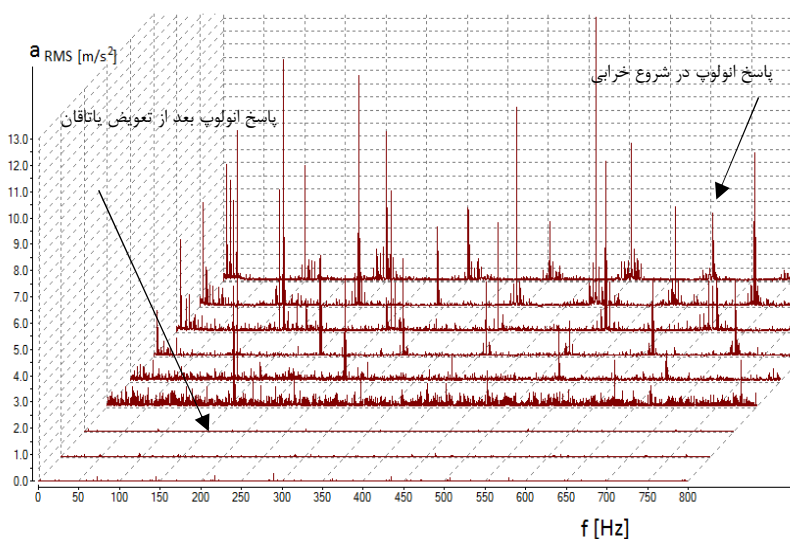
هنگامی که یاتاقان به خرابی حد نهایی خود می رسد تمام فرکانس های خرابی در انولوپ شتاب حذف و به نوبه تبدیل می شود. شکل ۷ مرحله ایی از خرابی را نشان می دهد که انولوپ شتاب به سمت نوبه رو به تغییر است.

شکل ۷ انولوپ شتاب قبل از تعویض یاتاقان را نشان می دهد که با پیشرفت خرابی حلقه خارجی و قفسه یاتاقان، حلقه داخلی نیز آسیب دیده و در مرحله آخر هارمونیک های BPFi با فرکانس  $121/456$  Hz و ضرایب آن نیز نمایان شده است.

اختلافات قبل و بعد از خرابی و تعویض یاتاقان در نمودار آبشاری با توجه به دامنه ارتعاشات مشهود است.



شکل ۷. انولوپ شتاب قبل از تعویض یاتاقان با هارمونیک‌های FTF، BPFI و BPFO



شکل ۸. نمودار آبشاری پاسخ انولوپ از مرحله شروع خرابی تا تعویض یاتاقان

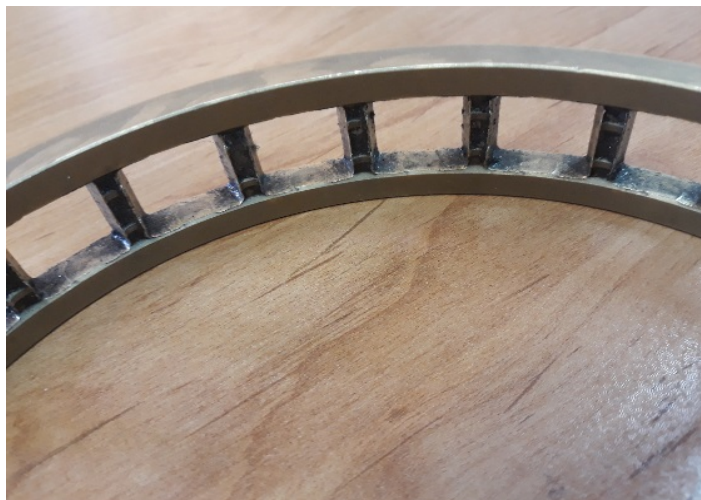
### ۵. یاتاقان الکتروموتور بعد از خرابی و تعویض

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و تشخیص خرابی یاتاقان در مرحله نهایی که شامل پاسخ هارمونیک‌های قفسه، حلقه داخلی و خارجی است، یاتاقان تعویض و علائم خرابی ناشی از بار بیش از حد بر روی حلقه خارجی و داخلی مشهود است. با توجه به میزان خرابی و خستگی در منطقه Load Zone

حلقه خارجی برای یاتاقان SKF NU 1030 و مشاهدات حاصل از باردهی مجموعه که چیزی بیشتر از حد مجاز طراحی بوده است، ریشه خرابی میزان بار بیش از حد مجاز بر روی الکتروموتور و به تبع آن یاتاقان بوده است. شکل ۹ حلقه آسیب دیده داخلی و خارجی یاتاقان و شکل ۱۰ قفسه یاتاقان آسیب دیده را نشان می‌دهد.



شکل ۹. حلقه داخلی و خارجی یاتاقان با علایم خستگی ناشی از بیش بار



شکل ۱۰. قفسه یاتاقان SKF NU1030 با ساییدگی ناشی از خستگی

## ۶. نتیجه گیری

تحلیل ارتعاشات یک روش مناسب در تعیین وضعیت یاتاقان است که با توجه به روند شدت ارتعاشات می توان از سلامت و یا خرابی آن اطمینان حاصل نمود. نرم افزار Omnitrend یک نرم افزار تخصصی مختص به آنالایزر VibXpert II است که تمامی خروجی های حاصل از داده برداری در این نرم افزار تحلیل و بررسی شده است. هر یاتاقان سالم با توجه به روند ثابت ارتعاشی و همچنین با دامنه انولوپ بسیار پایین و پیک های پایه و تصادفی می تواند به کار خود ادامه دهد.

در نتیجه ی آنالیز انولوپ، می توان به راحتی از وضعیت یاتاقان اطمینان حاصل نمود. اولین علائم خرابی یاتاقان، رشد و ایجاد پیک های فرکانس خرابی یاتاقان است. با رشد دامنه فرکانس های خرابی در پاسخ انولوپ، به تدریج این فرکانس های خرابی جای خود را به دامنه و پیک های تصادفی خواهند داد که در نهایت خرابی یاتاقان پاسخی جز نوفه حاصل نخواهد شد. وجود نوفه در پاسخ انولوپ نشانگر پایان عمر یاتاقان است.

در این تحقیق ریشه خرابی یاتاقان مورد بررسی به دلیل خرابی حلقه خارجی در منطقه اعمال بار، بار بیش از حد بوده است.

همواره نباید بار دینامیکی اعمال شده بیشتر از حد طراحی شده باشد، زیرا این عمل می‌تواند عمر یاتاقان را به کمتر از نصف برساند. با توجه به منطقه و شکل خرابی حلقه خارجی و حلقه داخلی یاتاقان، می‌توان ریشه خرابی را تشخیص داد.

## ۷. مأخذ

- [1] Harris, T. A., Kotzalas, M. N., "Essential concepts of bearing technology", CRC press, 2006.
  - [2] Khiripet, Noppadon, "An architecture for intelligent time series prediction with causal information" PhD diss., Georgia Institute of Technology, 2001.
  - [3] Pattabhiraman, Sriram, George Levesque, Nam H. Kim, and Nagaraj K. Arakere. "Uncertainty analysis for rolling contact fatigue failure probability of silicon nitride ball bearings." *International Journal of Solids and Structures*, 2010, Vol.47, no.18-19, pp.2543-2553.
  - [4] Yang, Zhenyu, Uffe C. Merrild, Morten T. Runge, Gerulf Pedersen, and Hakon Børsting, "A study of rolling-element bearing fault diagnosis using motor's vibration and current signatures", *Proceedings series*, 2009, Vol.354, p.359.
  - [5] Lei, Yaguo, Zhengjia He, and Yanyang Zi, "A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery", *Expert Systems with applications*, 2008, Vol.35, no.4, pp.1593-1600.
  - [6] Sidar, Ragini, Prakash Kumar Sen, and Gopal Sahu, "Review of vibration-based fault diagnosis in rolling element bearing and vibration analysis techniques", *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, 2015, Vol.4, no.10, pp.998-1003.
- [۷] صفری خیام، همائی هادی، "امکان‌سنجی استفاده از آنالیز صوت برای عیب‌یابی یک جعبه دنده هلیکال با یاتاقان‌های غلتشی"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاشات، ش ۶، دوره ۳، ۱۳۹۳.
- [۸] جعفری علی، شکریان اشکان، احمدی حجت، "عیب‌یابی برینگ توسط آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاشات، ش ۸، دوره ۴، ۱۳۹۴.
- [۹] حسینیان مهدی، صالحی مهدی، "تشخیص عیب یاتاقان‌های غلتشی با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی بر اساس تحلیل طیف تکین و شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاشات، ش ۱۲، دوره ۶، ۱۳۹۶.

## پی‌نوشت:

1. Envelope