

بررسی علل خرابی ریشه‌ای در یاتاقان‌ها به کمک روش‌های پایش وضعیت

محمد ریاحی
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
riahi@iust.ac.ir

نعمه جعفریان*
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشگاه علم و صنعت ایران
n_jafarian@mecheng.iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱

چکیده

معمولاً در بیشتر سیستم‌های مکانیکی جهت تعلیق محورهای دوار از یاتاقان استفاده می‌شود. تاکنون روش‌های متنوعی برای پایش وضعیت این دسته از ادوات مکانیکی به منظور اطمینان از صحت عملکرد و پیش‌گیری از وارد آمدن صدمات جبران‌ناپذیر به آنها به کار گرفته شده است. در این میان، آنالیز ارتعاشات و آکوستیک امیژن از جمله پرکاربردترین و دقیق‌ترین روش‌های پایش وضعیت محسوب می‌شوند. در این مقاله به بررسی این فناوری در یاتاقان‌های صنعتی پرداخته شده است. به طوری که با استفاده از تحلیل داده‌ها می‌توان اندازه عیب و موقعیت آن روی قطعه را پیش‌بینی کرد تا تصمیمات لازم جهت تعمیر یا تعویض یاتاقان اتخاذ گردد.

واژگان کلیدی: یاتاقان، پایش وضعیت، آنالیز ارتعاش، آکوستیک امیژن، سایش

۱. مقدمه

پایش وضعیت کنترل شونده، امروزه، استراتژی پایش وضعیت به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود. از جمله تکنیک‌های مورد استفاده در فن پایش وضعیت عبارت‌اند از آنالیز ارتعاشات، آکوستیک امیژن، اندازه‌گیری کرنش، ترموگرافی، آنالیز روغن، شرایط فیزیکی مواد و جز این‌ها. در ادامه به توضیح و تشریح برخی از این تکنیک‌ها می‌پردازیم.

پایش وضعیت یاتاقان‌ها اهمیت خاصی در صنعت دارد. این فناوری می‌تواند به عنوان اندازه‌گیری پارامترهای متنوع مربوط به شرایط مکانیکی ماشین‌آلات همچون ارتعاشات، دمای یاتاقان، فشار روغن، خرده‌های روغن و عملکرد دمای یاتاقان، فشار روغن، خرده‌های روغن و عملکرد تعریف شود [۱]. هزینه‌های زمان از کار افتادگی اجزاء برای فرایندهای صنعتی می‌تواند بسیار مهم باشد، بنابراین جلوگیری از شکست تجهیزات و کم کردن توقف به سبب انجام سرویس و تعمیر، مزیت‌هایی مهم‌اند که می‌توانند با



۲. آنالیز ارتعاشات

آنالیز ارتعاشات یکی از دقیق‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده در ماشین‌آلات دوار است. بسیاری از محققان به صورت نظری و آزمایشگاهی پیشرفت عیب در بلبرینگ‌ها و اثر آن بر ارتعاشات را مطالعه کرده‌اند. در این رهگذر، هوبریخ^۱ گسترش عیب خستگی در یاتاقان‌های غلتکی را بررسی کرد [۲]. هریس^۲ و کوتسالاس^۳ نیز پیشرفت شکست خستگی و ارتعاشات در طول این پیشرفت را مطالعه نمودند [۳].

۳. آکوستیک امیژن

آکوستیک امیژن پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراسوت رخ می‌دهد. این امواج ناشی از آزاد شدن ناگهانی انرژی الاستیک از منبع موجود در جسم می‌باشند. ترک‌ها، نشتی‌ها و سایر پدیده‌های فیزیکی می‌توانند به عنوان نقاط مناسب برای انتشار آکوستیک امیژن باشند [۴]. طی دو دهه گذشته، مطالعات متعددی در زمینه توسعه کاربرد فناوری آکوستیک امیژن برای پایش سلامت یاتاقان‌ها انجام شده است. در پایش وضعیت یاتاقان‌ها، آکوستیک امیژن از ضربه‌های کوچک ناشی از اصطکاک و سایش بین اجزای دوار یاتاقان ناشی می‌شود. این پدیده با آنالیز ارتعاشات تفاوت دارد، به طوری که باند فرکانسی که برای آن استفاده می‌شود بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز است. آکوستیک امیژن تشخیص زودهنگام‌تری نسبت به آنالیز ارتعاش برای عیوب حلقه خارجی ارائه می‌دهد [۵]. اگرچه این امر برای عیوب حلقه داخلی این گونه نیست. در ادامه کاربردهایی عملی از این دو روش بیان می‌شود.

۴. تشخیص تجربی عیب بلبرینگ‌ها با استفاده

از آنالیز ارتعاشات

آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی اجزای ماشین، یک روش تشخیص عیب متداول در سیستم‌های روتور یاتاقان است.

در این میان، دو موقعیت بحرانی وجود دارد: نخست تشخیص عیب و دیگری تعیین شدت آن. بلبرینگ‌ها ارتعاشات مشخصی دارند، زمانی که عیبی در بلبرینگ اتفاق بیافتد، شاخص‌های ارتعاشی نیز تغییر می‌کنند. یک یاتاقان نمونه، یک طیف ارتعاشی که شامل فرکانس‌های متعدد همراه با هارمونی‌های متناظر می‌باشد را تولید خواهد کرد. اگر ساچمه دارای عیبی مانند حفره^۴ باشد، هر دوران منجر به یک ضربه خواهد شد که به محفظه یاتاقان منتقل می‌شود. فرکانس اصلی مربوط به این سری از ضربه‌ها، فرکانس چرخش ساچمه^۵ نامیده می‌شود. به طور مشابه فرکانس عبور ساچمه، حلقه داخلی^۶ و فرکانس عبور ساچمه، حلقه خارجی^۷ نیز تعریف می‌شود.

۴-۱. فرکانس‌های عیب در بلبرینگ‌ها

در این بخش فرکانس‌های انواع عیب در بلبرینگ‌ها معرفی می‌شوند.

الف) فرکانس حرکت قفسه:

$$N_f = \frac{1}{2} N \left(1 - \frac{d}{p} \cos \varphi \right) \text{ rpm}$$

ب) فرکانس حرکت گردشی ساچمه:

$$N_b = \frac{1}{2} N \frac{p}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{p} \right)^2 \cos^2 \varphi \right) \text{ rpm}$$

ج) فرکانس حلقه بیرونی:

$$N_o = \frac{1}{2} N n_z \left(1 - \frac{d}{p} \cos \varphi \right) = n_z N_f \text{ rpm}$$

د) فرکانس حلقه درونی:

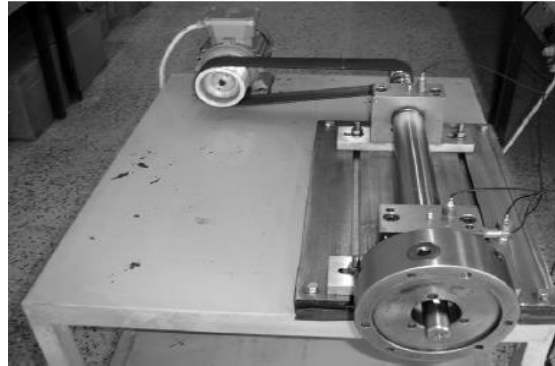
$$N_i = N n_z - \frac{1}{2} N n_z \left(1 - \frac{d}{p} \cos \varphi \right) = n_z (N - N_f)$$

به طوری که در این روابط N سرعت دورانی محور بر حسب دور بر دقیقه، d شعاع ساچمه، P قطر گام، n_z تعداد ساچمه‌ها و نهایتاً φ زاویه تماس می‌باشد.

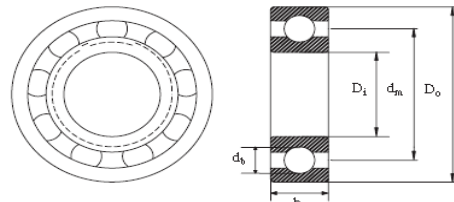
در این مطالعه، به منظور بررسی شکست و مشخصه‌های ارتعاش، دستگاهی مانند شکل ۱ راه‌اندازی شده است [۶]. این سیستم شامل یک موتور AC، اسپیندل - که دو طرف



آن توسط یک جفت بلبرینگ شیار عمیق استاندارد ۶۲۰۵ که مشخصات فرکانسی و ابعاد آن به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ داده شده - مقید شده است. یک فلاپویل نیز در سمت آزاد اسپیندل به منظور بارگذاری و کاهش نوسانات سرعت نصب شده است.



شکل ۱. نمایی از تجهیزات دستگاه [۶]



| | |
|---------------|---------------------|
| ۲۵ میلی‌متر | D_i |
| ۵۲ میلی‌متر | D_o |
| ۳۹ میلی‌متر | d_m |
| ۷/۹۴ میلی‌متر | قطر ساچمه (d_b) |
| ۱۵ میلی‌متر | عرض (b) |
| ۰/۱۳ کیلوگرم | جرم |

شکل ۲. ابعاد بلبرینگ [۶]

سرعت زاویه‌ای اسپیندل حدود ۳۲۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شده است و سیگنال‌های ارتعاش توسط سه شتاب‌سنج مدل ۴۳۸۴ شرکت بی. اند کی.^۸ نوع شارژی به دست می‌آیند. شتاب‌سنج‌ها در هر دو جهت افقی و عمودی در سمت راست تکیه‌گاه یاتاقانی و در سمت چپ آن قرار دارند. سرعت اسپیندل نیز توسط یک پراب تاکومتر فتوالکتریکی بی. اند کی. اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین پیشرفت عیب متمرکز شده، یک سری بلبرینگ جدید در

دستگاه قرار گرفته و تا رسیدن به شرایط خرابی تست می‌شوند. نمونه‌برداری در فاصله زمانی ۱۵ دقیقه و هر بار به مدت ۲ ثانیه به طول می‌انجامد و آزمایش بعد از ۱۴۲۰ ساعت کارکرد متوقف می‌شود. اندازه‌گیری‌های آماری مانند روش ریشه میانگین مربعات^۹، فاکتور کرسست^{۱۰} و مقدار تجمع آماری^{۱۱} برای پیش‌بینی سلامت یاتاقان‌ها اندازه‌گیری شد، که اطلاعات کافی برای پیش‌بینی موقعیت و شدت عیب متمرکز را به دست نمی‌دهد. برای این منظور نمودار طیف ارتعاش سیگنال‌ها در طی آزمایش رسم شد.

جدول ۱. فرکانس‌های مشخصه بلبرینگ

| فرکانس مشخصه بلبرینگ | هرتز |
|----------------------|-------|
| محفظه | ۰/۳۹۸ |
| رینگ خارجی | ۳/۵۸ |
| رینگ داخلی | ۵/۴۱ |
| اجزاء غلتان | ۴/۷۱ |

۲-۴. اندازه‌گیری‌های آماری

شکل ۳ نمودار ریشه میانگین مربعات سیگنال‌ها را نشان می‌دهد. ریشه میانگین مربعات یک اصطلاح مهندسی است که به عنوان شاخص تصحیح سیگنال متوسط زمان در مقیاس خطی تعریف و به صورت ولت گزارش می‌شود. تا به امروز این پارامتر به طور وسیعی برای آنالیز سیگنال استفاده می‌شده و از جمله روش‌های پردازش سیگنال حوزه زمان است. برای وقایع منفرد (X) و تعداد نمونه (N)، RMS می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

پارامتر کرسست از جمله مقیاس‌های عددی است که برای نمایش عیب در بلبرینگ‌ها استفاده می‌شود. وقتی مقدار پارامتر کرسست بالای ۳ است، عیب می‌تواند در بلبرینگ وجود داشته باشد. شکل ۴ نمودار پارامتر کرسست تست را نشان می‌دهد که در ساعت ۱۳۵۰ یک افزایش تند نشان می‌دهد و تا پایان تست کاهش نمی‌یابد.

پارامتر کرس (CF) به عنوان نسبت مقدار پیک بر مقدار ریشه میانگین مربعات سیگنال تعریف می‌شود و علامتی از یک نیروی آنی در سیگنال می‌دهد رابطه زیر برای محاسبه CF به کار می‌رود [۷]:

$$CF = \frac{\text{Peak Value}}{\text{RMS}}$$

شکل ۵ نمودار تجمع آماری ارتعاشات را در طول آزمایش نشان می‌دهد. مقدار تجمع آماری یک بلبرینگ تازه نصب شده باید حدود ۳ باشد. اگر عیب متمرکز در بلبرینگ پیشرفت کند، مقدار ضربه سیگنال ارتعاشی افزایش می‌یابد. بنابراین، تعداد تجمع آماری که معیاری از نقطه اوج یک شکل موجی است نیز افزایش می‌یابد. تجمع آماری یک نقطه اوج ماکزیمم برجسته حدود ۹۸۰ ساعت دارد که در مقیاس‌های اسکالر دیگر وجود ندارد. تجمع آماری یک ناهنجاری (تغییر ناگهانی) واضح در سیگنال‌های ارتعاشی بعد از ۱۳۵۰ ساعت همانند بقیه مقیاس‌های اسکالر می‌دهد. این پارامتر، (KU) مقیاسی از نقاط اوج یک سیگنال است و براساس اینکه یک سیگنال حاوی رویدادهای گذرای ضربه‌ای، در طول شروع تخریب است، مقادیر KU برای یک سیگنال گرفته شده می‌تواند توسط رابطه زیر تخمین زده شود [۷]. برای وقایع تنها (X_i) و تعداد نمونه (N)، میانه μ و انحراف استاندارد σ می‌توانند به ترتیب زیر محاسبه شوند:

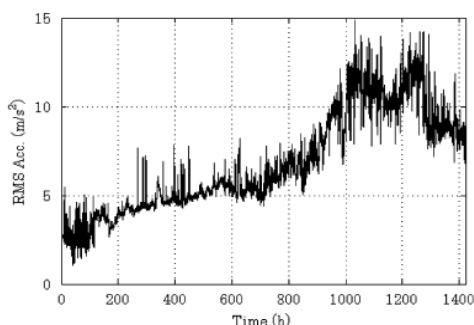
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

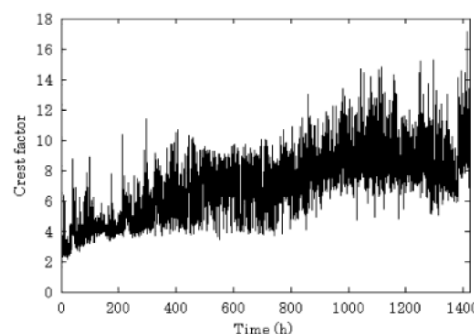
$$KU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4$$

به منظور تعیین مشخصات سیگنال‌های ارتعاشی و نمایش موقعیت و سایز عیب مربوطه در بلبرینگ، طیف ارتعاش وقتی که مقیاس‌های آماری یک ناهنجاری در سیگنال نشان دهند، محاسبه می‌شود. در شکل ۶ طیف ارتعاش در

ساعت ۱۳۰ تست را نشان می‌دهد. برجسته‌ترین نقاط اوج در طیف در سرعت محور و در هارمونی‌های (۵۳ و ۱۰۶ هرتز) هستند که مربوط به نابالانسی محور و غیرهم‌محور بودن یاتاقان‌ها و تسمه راننده است. همچنین نقطه اوج در فرکانس عبور ساچمه (۱۹۹۰ هرتز) یک بلبرینگ شیار عمیق ۶۲۰۵ در طیف نشان داده شده است. همه مقیاس‌های اسکالر تغییراتی را در شرایط بلبرینگ در حدود ۹۸۱ ساعت نشان می‌دهند که تجمع آماری بیشترین تغییر را نشان می‌دهد. شکل ۷ طیف را در حدود ساعت ۹۸۱ نشان می‌دهد. اگرچه نقاط اوج برجسته در سرعت محور و هارمونی‌های آن هستند، فرکانس‌های عیب داخلی، فرکانس‌های عیب ساچمه و فرکانس‌های عبوری ساچمه نیز وجود دارند. در یک بازه فرکانسی پایین بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ هرتز اولین هارمونی *IDF* (فرکانس عیب داخلی) و *BDF* (فرکانس عیب ساچمه) حضور دارند. همچنین در فرکانس بالا، نزدیک یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم، *IDF* و هارمونی‌هایش به‌طور واضح قابل مشاهده‌اند.

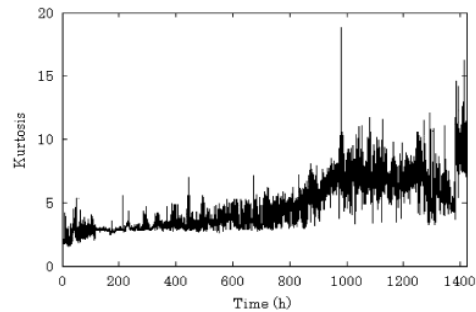


شکل ۳. نمودار RMS داده‌ها [۶]

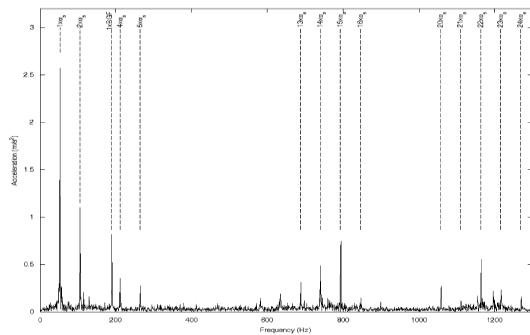


شکل ۴. نمودار پارامتر کرس داده‌ها [۶]

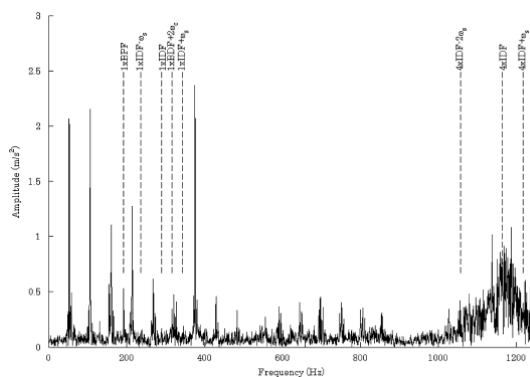
یاتاقان ساچمه‌ای محوری و یاتاقان غلتکی محوری در محدوده ۵۰ کیلو نیوتن انتخاب شد. یک رینگ از یاتاقان ساچمه‌ای محوری (SKF 51210) با یک رینگ مسطح گرفته شده از یاتاقان غلتکی محوری (SKF 8120) (TN) با همان سایز جایگزین شد (شکل ۹).



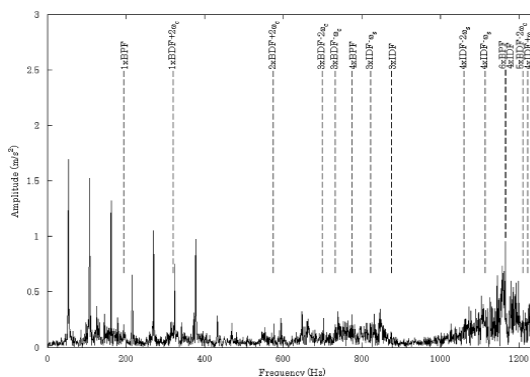
شکل ۵. نمودار تجمع آماری [۶]



شکل ۶. نمودار طیف در ساعت ۱۳۰ [۶]



شکل ۷. نمودار طیف در ساعت ۹۸۱ [۶]



شکل ۸. نمودار طیف در ساعت ۱۴۱۲ [۶]

دستگاه تست طراحی شده خاص، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای تحقیق به‌کار گرفته شده است.

شکل ۸ طیف ارتعاش در ۱۴۱۲ ساعت، جایی که پارامتر کرسرست و تجمع آماری بالاترین نقطه اوج بعد از ۱۳۸۰ ساعت، را دارند نشان می‌دهد. فرکانس چرخش محور و هارمونی‌هایش هنوز در طیف حضور دارند.

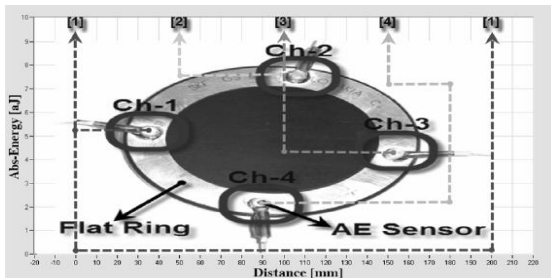
پیشرفت عیب در بلبرینگ به این‌صورت خلاصه می‌شود: سیستم از ۱۳۰ تا ۸۰۰ ساعت، با یک گرایش کم افزایش می‌یابد و سپس یک افزایش تا ۹۸۰ ساعت نشان می‌دهد. این رفتار به پیشرفت عیب داخلی تدریجی نسبت داده می‌شود. طیف در ۹۸۱ ساعت، مؤلفه‌های فرکانسی عیب داخلی را تا جایی که پیشرفت عیب ساچمه ممکن است نشان می‌دهد. بین ساعت‌های ۱۳۸۰ و ۹۸۱ پیشرفت عیب ساچمه و رینگ داخلی ادامه دارد. طیف در ساعت ۱۴۱۲ یک عیب حلقه خارجی علاوه بر عیب ساچمه و رینگ داخلی نشان می‌دهد. با باز کردن اجزای یاتاقان مشاهده شده است که در سطح حلقه خارجی و داخلی، حفره ایجاد شده است. همچنین روی سطح حلقه داخلی و ساچمه سایش ایجاد شده است.

۵. اندازه‌گیری تنزل خواص مکانیکی ذاتی در یاتاقان‌های سرعت‌پایین با استفاده از آکوستیک امیژن

در این مقاله از فناوری آکوستیک امیژن برای بررسی خرابی اولیه یاتاقان‌ها استفاده شده است. برای این منظور دستگاه آزمایشی طراحی شد که پیشرفت سایش و ترک را در همان مراحل ابتدایی کار سرعت بخشد [۴]. ترکیبی از



به صورت خطی در محور افقی بر حسب میلی متر تعریف شده است. این سیستم آکوستیکی به طور مداوم برای به دست آوردن انرژی مطلق (ژول) در طول یک ثابت زمانی ۱۰ میلی ثانیه در نرخ نمونه برداری ۱۰۰ مگاهرتز نصب شده است. انرژی مطلق از تقسیم انتگرال مربعات ولتاژ سیگنال بر مقاومت مرجع استخراج می شود.



شکل ۱۱. تجهیزات موقعیت منشأ برای تشخیص خطی [۴]

تلاش های متعددی برای تشخیص اندازه عیب در یاتاقان ها با استفاده از فناوری AE صورت گرفته است. اکثر کارها می منتشر شده روی تعیین اندازه عیوب ساختگی انجام شده است. برای این تحقیق خاص، روش آکوستیک امیژن برای تعیین وجود و سایز عیب واقعی روی یاتاقان ها به کار گرفته شد. این روش با تعیین زمان انفجارهای AE که مرتبط با عیب یاتاقان است به انجام رسید. با دانستن مدت انفجارهای AE و سرعت زاویه ای (S)، اندازه عیب (R) روی یاتاقان می تواند با استفاده از معادلات زیر محاسبه شود [۸]:

$$S = 2\pi \times \frac{Q}{2} \times w$$

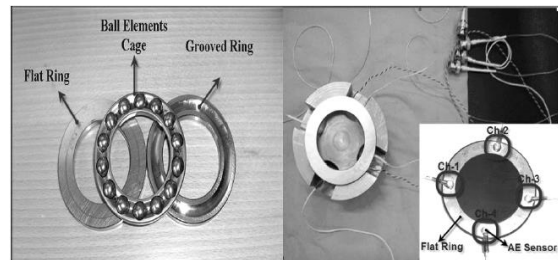
$$L = S \times \xi$$

با دانستن سرعت دورانی، قطر یاتاقان و مدت زمان عبور ساچمه ها بر روی ناحیه بارگذاری، اندازه عیب بزرگ ۱۳/۱۰ میلی متر به دست آمده است.

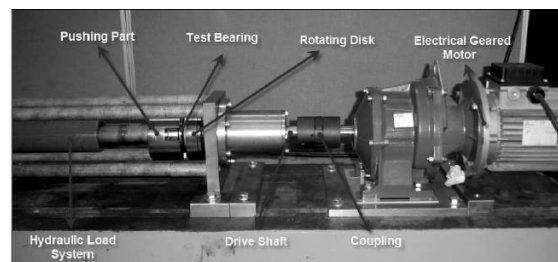
۶. نتیجه گیری

یاتاقان ها از جمله قطعات اصلی انواع ماشین ها هستند و پایش وضعیت صحیح و به موقع آنها سبب افزایش

تحت شرایط عادی بارگذاری، سرعت دورانی و هم محوری خوب، آسیب سطح با ترک های کوچک شروع می شود که بین سطح شیار مسطح و ساچمه ها قرار دارد که به تدریج تا سطح پیشرفت می کند و سیگنال های AE قابل مشاهده ای را تولید می کند. چهار حسگر AE همراه با دو ترموکوپل در قسمت پشت رینگ مسطح نصب شده اند.



شکل ۹. آرایش رینگ های یاتاقان ها [۴]



شکل ۱۰. چیدمان دستگاه تست [۴]

توانایی AE برای تعیین موقعیت های نشر منشأ سیگنال ها در زمان واقعی از مواد تحت بارگذاری یکی از فواید مهم AE نسبت به دیگر فناوری های تست های غیرمخرب است. در عمل، سیگنال های AE که در طول وسیله حرکت می کنند، ضعیف می شوند و با یک تأخیر به حسگرها می رسند. این تأخیر می تواند به علت فاصله بین منشأ نشر (عیب) و حسگر AE باشد و با دانستن سرعت سیگنال، موقعیت منشأ نشر AE می تواند تعیین شود. در یک بازه ۵۲ دسی بل و با دانستن فاصله بین حسگرهای AE سرعت امواج AE تحت چنین شرایطی به طور تجربی ۴۰۰۰ متر بر ثانیه اندازه گیری شده است. شکل ۱۱ چیدمان موقعیت منشأها که حلقه یاتاقان برای موقعیت یابی خطی باز شده است را نشان می دهد که محیط این رینگ مسطح

بهره‌وری ماشین‌ها، کاهش هزینه‌ها و زمان تعمیر و نگهداری می‌شود. در این مقاله دو روش به‌روز و دقیق پایش وضعیت، شامل آنالیز ارتعاشات و آکوستیک امیژن بررسی شد. با استفاده از این روش‌ها می‌توان پیش‌بینی زودهنگامی داشت و مکان و شدت آسیب را تعیین کرد؛

قابلیتی که روش‌های دیگر پایش وضعیت چنین امکانی را فراهم نمی‌کنند. این روش تعمیرات و نگهداری در حوزه علمی پیشرفت زیادی داشته و نیاز به کار بیشتری در عرصه صنعت دارد.

۷. مآخذ

- [1] Elforjani, M. "Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Using Acoustic Emission Technology." PhD diss., Cranfield University, 2010.
- [2] Hoeprich, M.R. "Rolling Element Bearing Fatigue Damage Propagation." *Trans ASME J Tribol* 114 (1992): 328-33.
- [3] Kotzalas, M.N. T.A. Harris. "Fatigue Failure Progression in Ball Bearing." *J Tribol* 123 (2001): 238-42.
- [4] Elforjani, M. D. Mba. "Natural Mechanical Degradation of Measurements in Slow Speed Bearings." *Engineering Failure Analysis* 16 (2009): 521-32.
- [5] Kilundu, B. X. Chimentin, J. Duez, D. Mba. "Cyclostationarity of Acoustic Emission for Monitoring Bearing Defects." *Mechanical Systems & Signal Processing* 25 (2011): 2061-72.
- [6] Tuncay, Karacy, Nizami, Akturk. "Experimental Diagnosis of Ball Bearing Using Statistical and Spectral Methods." *Tribology International* 42 (2008): 836-43.
- [7] Lihui, W., X.G. Robert, D.T. Pham. *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*, Springer, 2006.
- [8] AL-Ghand, A.M, D. Mba. "A Comparative Experimental Study on the Use of Acoustic Emission and Vibration Analysis for Bearing Defect Identification and Estimation of Defect Size." *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006): 1537-71.

پی‌نوشت

-
1. Hoeprich
 2. Haris
 3. Kotzalas
 4. pit
 5. Ball Spin Frequency: BSF
 6. Ball Pass Frequency, Inner Race: BPFI
 7. Ball Pass Frequency, Outer Race: BPFO
 8. B&K
 9. Root Mean Square
 10. Crest Factor
 11. kurtosis

