



## استفاده از روش پخش آوایی به منظور بررسی روان کاری در یک یاتاقان لغزشی در حوزه زمان و فرکانس

صادق حسینی<sup>1</sup>، مهدی احمدی نجف آبادی<sup>2\*</sup>، مهدی اخلاقی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
\*تهران، صندوق پستی 1854934648، ahmadin@aut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 20 بهمن 1394  
پذیرش: 12 اردیبهشت 1395  
ارائه در سایت: 30 خرداد 1395  
کلید واژگان:

روش پخش آوایی  
یاتاقان‌های لغزشی  
تبدیل موجک  
پایش شرایط روان کاری  
تماس فلز با فلز

### چکیده

روان کاری ضعیف به عنوان یک عامل مهم در خرابی این یاتاقان‌ها شناخته می‌شود، بنابراین دانستن شرایط روان کاری در یک یاتاقان بسیار مهم می‌باشد. روان کاری هیدرودینامیکی، روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی به عنوان سه محدوده روان کاری برای یاتاقان‌ها شناخته می‌شوند. در روان کاری هیدرودینامیکی، فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده برای تحمل بار کافی می‌باشد و سطوح لغزشی یاتاقان با هم تماس نخواهد داشت. اگرچه در اغلب موارد، آن‌ها در محدوده مخلوط و مرزی کار می‌کنند و تماس فلز با فلز در سطوح لغزشی خواهند داشت. برای مشخص شدن این محدوده‌ها استفاده از منحنی مرسوم استریبک می‌تواند مفید باشد. با این وجود مشخص کردن محدوده دقیق روان کاری هیدرودینامیکی از محدوده روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی با استفاده از این منحنی و روابط مربوط به روان کاری یاتاقان‌های لغزشی، به دلیل وجود تعداد زیاد پارامترهای کاری و طراحی تاثیرگذار کار سختی می‌باشد. مطالعه حاضر بر روی روش اندازه گیری پخش آوایی به منظور پایش شرایط روان کاری در یک نوع از یاتاقان‌های لغزشی تمرکز کرده است. بدین ترتیب پایش شرایط روان کاری در حین کارکرد یاتاقان فراهم شده است و مقادیر متغیرهای کاری یاتاقان برای تغییر محدوده روان کاری از روان کاری هیدرودینامیکی به روان کاری مخلوط و یا مرزی به دست آمده است. در ادامه با استفاده از روش تبدیل موجک مشخصات فرکانسی هر محدوده روان کاری مشخص گردیده است. بعد از مشخص شدن محدوده‌های روان کاری، مقدار تماس فلز با فلز در هر کدام از محدوده‌ها بدست آمده است.

## Using acoustic emission method for lubrication monitoring in a journal bearing in the time- frequency domain

Sadegh Hosseini, Mehdi Ahmadi Najafabadi\*, Mehdi Akhlaghi

Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 1854934648, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 February 2016  
Accepted 01 May 2016  
Available Online 19 June 2016

#### Keywords:

Acoustic emission method  
Journal bearings  
wavelet transform  
Lubrication condition monitoring  
Metal to metal contact

### ABSTRACT

Poor lubrication is known as an important factor in the bearings failure. Therefore, it is very important to detect the lubrication condition. Hydrodynamic lubrication, mixed lubrication and boundary lubrication are the basic regimes of the fluid film lubrication. In a proper condition, development of hydrodynamic pressure is adequate to support the load and the bearings operate under hydrodynamic lubrication condition. However, in most situations, they operate in mixed lubrication or boundary lubrication regime and have metal-to-metal contact. To establish these regimes, employing the so-called Stribeck curve is a useful method. In this curve, the oil film thickness is proportional to the lubricant viscosity and sliding velocity and inversely proportional to the applied load. However, distinguishing the exact range of hydrodynamic lubrication regime from mixed and boundary regime using this curve and the relation related to the sliding bearings, due to high number of affecting design factors and operating parameters is difficult. The present study focused on the acoustic emission measuring method in order to monitor the lubrication conditions in a type of journal bearings. Thus, condition monitoring of the journal bearing lubrication is provided and the numerical value of operating variables of the bearing for lubrication regime change from hydrodynamic to mixed is achieved. Using wavelet method, frequency features for each regime are identified. Then, for each lubrication regime, metal-to-metal contact detection is performed.

### 1- مقدمه

یاتاقان‌های لغزشی از اجزا انتقال توان پر کاربرد و حساس در صنعت می‌باشند که بارهای زیادی را در ماشین‌های مختلف تحت شرایط کاری مختلف تحمل می‌کنند. از مزایای مهم یاتاقان‌های لغزشی این موضوع می‌باشد که تماسی

فاز و پدیده‌هایی در رابطه با خرابی باشند [4]. استفاده از روش پخش آوایی برای شناسایی عیوب و پایش وضعیت در انواع مختلف یاتاقان‌ها گزارش شده است [5-9]. محققین زیادی از این روش برای شناسایی عیوب در یاتاقان‌های غلطشی استفاده کرده‌اند و نتیجه‌گیری شده است که مشخصه‌های پخش آوایی می‌توانند اطلاعاتی در مورد اندازه عیب فراهم کنند. از این طریق امکان پایش مقدار خرابی در یاتاقان‌ها فراهم شده است و همچنین بیان شده است که مشخصه‌های پخش آوایی برای شناسایی عیوب در یاتاقان‌ها مناسب هستند. امبا [10] در یک تحقیق بر روی یاتاقان‌های ساچمه‌ای تحت بارگذاری‌های سنگین و سرعت‌های چرخشی پایین نشان داده شده است که پایش یاتاقان غلطشی دارای خراشیدگی و کندگی با حداقل اندازه 100 میکرومتر توسط این روش امکان‌پذیر است، در حالی که با روش‌های ارتعاشی فرکانس پایین این امر امکان‌پذیر نبوده است. به علاوه، برخی از محققین در زمینه پایش وضعیت شرایط روان کاری در یاتاقان‌ها با استفاده از روش پخش آوایی تحقیقاتی را انجام داده‌اند. مینتین و اندرسون [5] روش پخش آوایی را برای پایش شرایط روان کاری در یاتاقان غلطشی روان کاری شده با گریس تحقیق کرده‌اند. هدف مشخص کردن وجود ذرات ناخالصی در روان کار گریس و تاثیر آن در پخش آوایی تولید شده بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که حتی مقادیر کم ذرات ناخالصی که در آزمایش‌ها به کار رفته است برای بوجود آوردن پخش آوایی و افزایش تعداد ضربات آن کافی بوده است و همچنین سختی ذرات از طریق این مشخصه‌ها شناسایی شده است. جمال‌الدین و همکارانش [11] از امواج تنشی با فرکانس بالا برای بررسی شرایط روان کاری در یاتاقان‌های با سرعت پایین استفاده کرده‌اند. با استفاده از این روش روان کاری مناسب و نامناسب یاتاقان‌ها از هم تشخیص داده شده‌اند. توانایی این روش برای بررسی مقدار گریس در حوضچه یاتاقان که کاملاً وابسته به شرایط روان کاری در یاتاقان در حال کار می‌باشد، بیان شده است. تقریباً تمامی تحقیقات انجام گرفته قبلی بر روی یاتاقان‌های غلطشی بوده‌اند و مطالعات کمی در مورد یاتاقان‌های لغزشی صورت گرفته است. میرهادی‌زاده و همکارانش [12] تاثیر متغیرهای کاری (سرعت، بار و ...) را در تولید پخش آوایی در یاتاقان‌های لغزشی مورد مطالعه قرار داده‌اند. مطالعات آن‌ها روابط تحلیلی بیان شده برای محدوده روان کاری هیدرودینامیکی که در آن منبع اصلی پخش آوایی، اصطکاک ناشی از تنش برشی سیال و همچنین حرکت سیال می‌باشد را تصدیق کرده است. نتیجه‌گیری شده است که افت توان در یاتاقان مستقیماً با مقدار پخش آوایی تولید شده متناسب بوده است. هدف اصلی در تحقیقات حاضر به دست آوردن شرایط روان کاری در منحنی استریبک و شناسایی تغییرات محدوده روان کاری یاتاقان به عنوان تابعی از پارامترهای شرایط کاری با استفاده از روش پخش آوایی می‌باشد. سیگنال‌های پخش آوایی می‌توانند به دو دسته دوره‌ای و غیردوره‌ای تقسیم شوند. پدیده‌هایی از قبیل تماس فلز با فلز که به شکل تکراری و برابر با تعداد دوران یاتاقان رخ می‌دهند تولید سیگنال‌های دوره‌ای می‌کنند. در مقابل، وجود ذرات ناخالصی در روان کار می‌تواند باعث تولید سیگنال‌های تصادفی یا غیردوره‌ای شوند. در این تحقیق، سیگنال‌های پخش آوایی دوره‌ای ثبت شده به منظور شناسایی تماس فلز با فلز که در محدوده روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی رخ می‌دهند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## 2- تبدیل موجک<sup>5</sup> پیوسته

روش‌های سنتی تحلیل سیگنال به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند که شامل

بین قسمت‌های متحرک رخ نمی‌دهد و از این طریق یاتاقان طول عمر نامحدود دارد [1]. در شرایطی که یاتاقان‌ها در شرایط کاری مناسب باشند این موضوع صادق می‌باشد، اما در شرایط کاری سنگین، مانند بارهای زیاد و سرعت‌های چرخشی کم، فیلم روغن نمی‌تواند به شکل کامل سطوح لغزشی را از هم جدا کند و تماس فلز با فلز رخ خواهد داشت. تحت چنین شرایطی، یاتاقان در محدوده روان کاری هیدرودینامیکی نخواهد بود و شرایط روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی حاکم می‌شوند. زمانی که یاتاقان تحت روان کاری مرزی باشد، سطوح لغزشی یاتاقان و شفت در تماس خواهند بود و اصطکاک در بالاترین مقدار خود خواهد بود. مقادیر اصطکاک کمتر با روان کاری مخلوط ایجاد می‌شود و این در حالی است که سطوح لغزشی نسبتاً توسط روان کار از یکدیگر جدا شده‌اند و روان کاری هیدرودینامیکی زمانی است که سطوح لغزشی کاملاً توسط روان کار از یکدیگر جدا شده‌اند [2]. در منحنی استریبک<sup>1</sup>، اصطکاک به عنوان تابعی از پارامترهای کاری داده شده است و محدوده‌های روان کاری مختلف از هم تفکیک شده‌اند. در این منحنی، محدوده‌های روان کاری به سه محدوده تقسیم شده‌اند و ترکیب سرعت چرخشی، بار اعمالی و لزجت دینامیکی روغن برای مشخص شدن ضخامت فیلم روغن و در نتیجه محدوده روان کاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این منحنی ضرایب اصطکاک در محور عمودی در ارتباط با پارامترهای ذکر شده در محور افقی نشان داده شده است (شکل 1). همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود با کاهش سرعت چرخشی در نیرو و لزجت دینامیکی ثابت، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و این کاهش تا پایان محدوده روان کاری هیدرودینامیکی ادامه پیدا می‌کند. دلیل این کاهش، کاهش ضریب اصطکاک تا قبل از رسیدن به محدوده روان کاری مخلوط می‌باشد. با کاهش بیشتر سرعت چرخشی، روان کاری مخلوط ایجاد می‌شود و اصطکاک افزایش پیدا می‌کند. با ادامه کاهش سرعت چرخشی اصطکاک افزایش سریعتری پیدا می‌کند و اصطلاحاً روان کاری وارد محدوده مرزی می‌شود. دلیل این موضوع این می‌باشد که با بدتر شدن شرایط روان کاری گسستگی فیلم روغن و تماس فلز با فلز در روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی امکان‌پذیر می‌باشد. مقدار اصطکاک در این محدوده‌ها وابستگی به پارامترهایی از قبیل بار اعمالی، سرعت چرخشی، لزجت دینامیکی، صافی سطح، فشار روغن ورودی و دمای توزیع شده در فیلم روغن دارد [2]. انواع مختلفی از یاتاقان‌های لغزشی وجود دارند که با توجه به پارامترهای طراحی و ساخت آن‌ها می‌توانند دارای منحنی استریبک مختص خود باشند.

پخش آوایی<sup>2</sup> به عنوان ساطع شدن امواج الاستیک مکانیکی تولید شده به وسیله تغییرات دینامیکی در ساختار داخلی ماده بیان می‌شود. در حال حاضر عموماً این عقیده وجود دارد که پخش آوایی تقریباً با تمامی پدیده‌های فیزیکی در جامدات و سطوح آن‌ها همراه است و امکان ضبط کردن آن در فرآیندهای مختلف تنها وابسته به حساسیت تجهیزات اندازه‌گیری دارد [3]. فرکانس، انرژی، تعداد ضربات<sup>3</sup>، دامنه، مدت زمان اتفاق افتادن<sup>4</sup> و ... به عنوان مشخصه‌های سیگنال پخش آوایی بیان می‌شوند. فرکانس‌های همراه با روش پخش آوایی محدوده وسیعی بین 20 کیلو هرتز تا چندین مگاهرتز را پوشش می‌دهند. هر کدام از مشخصه‌های پخش آوایی اطلاعاتی در مورد وضعیت موضوع مورد تحقیق می‌توانند داشته باشند. عموماً منابع پخش آوایی در سازه‌های مختلف فلزی می‌توانند شامل تغییر شکل پلاستیک، تغییر فاز، تبدیل

<sup>1</sup> Stribeck Curve

<sup>2</sup> Acoustic emission

<sup>3</sup> Counts

<sup>4</sup> Duration

<sup>5</sup> Wavelet Transform

در این رابطه،  $b$  بیان کننده موقعیت یا شیفت زمانی می باشد و همچنین  $a$  مشخص کننده مقیاس سیگنال می باشد. مقیاس رابطه عکس با فرکانس دارد و موقعیتها نیز در ارتباط با بازه های زمانی می باشند. به طور کلی تبدیل موجک پیوسته مشخص کننده ارتباط تابع مورد تحلیل و تابع موجک مادر می باشد. این ارتباط توسط ضرایب تبدیل موجک پیوسته مشخص می شود. سیگنال های پخش آوایی می توانند توسط تبدیل موجک پیوسته مورد تحلیل قرار بگیرند و در صورتی که سیگنال های پخش آوایی با تابع مادر مطابقت داشته باشند در این صورت مقادیر تبدیل موجک پیوسته بیشتر خواهند بود که بیان کننده تطبیق خوب بین سیگنال مورد تحلیل و تابع مادر می باشد.

### 3- تجهیزات مورد استفاده در آزمایشها

روش اندازه گیری پخش آوایی برای پایش شرایط روان کاری در یاتاقان لغزشی تغذیه فشاری به کار گرفته شده است. برای انجام این کار شرایط واقعی یاتاقان در محیط آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که، هر کدام از شرایط آزمایش حداقل دو بار تکرار شده است و بعد از بررسی تشابه حدودی نتایج آزمایش های یکسان با یکدیگر، از تکرار پذیری آزمایشها اطمینان حاصل شده است. تجهیزات به کار گرفته شده در دو بخش تجهیزات اندازه گیری پخش آوایی و تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش بر روی یاتاقان توصیف شده اند.

### 3-1- تجهیزات پخش آوایی

نرم افزار پخش آوایی و سیستم پردازش اطلاعات شرکت پک<sup>3</sup> با حداکثر نرخ داده برداری 40 مگاهرتز برای جمع آوری رخدادهای پخش آوایی مورد استفاده قرار گرفته است. دو حسگر پیزوالکتریک تک کریستال نوع تشدیدی از این شرکت مورد استفاده قرار گرفته اند. این حسگرها که پیکو<sup>4</sup> نامیده می شوند، در دو قسمت مختلف از بدنه یاتاقان نصب شده اند. حسگرها تشدید فرکانسی 513.28 کیلوهرتز و مقدار بهینه نمونه برداری در محدوده فرکانسی بین 100 تا 700 کیلوهرتز داشته اند. سطوح حسگرها به منظور اتصال آکوستیکی خوب بین حسگر و یاتاقان توسط گریس پوشانده شده است. سیگنال های جمع آوری شده از طریق یک پیش تقویت کننده تقویت شده اند. پیش تقویت کننده بر روی 40 دسی بل برای تمامی آزمایشها تنظیم شده است که مربوط به شرکت پک بوده و امکان تغییر دامنه با مقادیر 20، 40 و 60 دسی بل را دارا بوده است. نرخ نمونه برداری یک مگاهرتز با 16 بیت تفکیک پذیری بین 10 تا 100 دسی بل بوده است. نرم افزار پخش آوایی مشخصه های سیگنال به دست آمده از قبیل دامنه، مدت زمان، تعداد ضربات و انرژی را محاسبه کرده است.

### 3-2- تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش یاتاقان

یاتاقان تغذیه فشاری مورد استفاده در این تحقیق از جنس فسفر برنز با شیار محیطی روغن ساخته شده است. قطر 35 میلی متر، عرض 63 میلی متر، صافی سطح 1.5 میکرومتر، طول محوری شیار 6.3 میلی متر، عرض محیطی شیار 5 میلی متر و قطر سوراخ روغن 5 میلی متر ابعاد یاتاقان بوده اند و همچنین شفتی از جنس فولاد سخت کاری شده با قطر 35 میلی متر مورد استفاده قرار گرفته است. "شکل 2" نمایی از تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایشها را نشان می دهد. در دو انتهای شفت از دو یاتاقان ساچمه ای خود تنظیم شونده به منظور حمایت یاتاقان مورد آزمایش استفاده شده است.

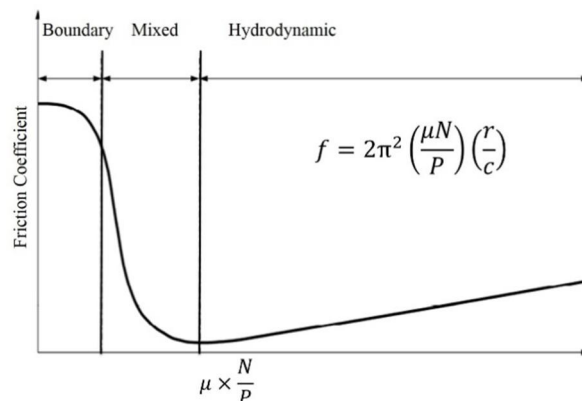


Fig. 1 Stribeck curve for lubrication conditions in bearings

شکل 1 منحنی استریک برای شرایط روان کاری در یاتاقانها

$\mu$  لزجت دینامیکی  
 $N$  تعداد دوران شفت  
 $P$  فشار محاسبه شده بر روی تصویر سطح یاتاقان  
 $r$  شعاع شفت  
 $c$  لقی بین شفت و یاتاقان

روش های حوزه زمان و روش های حوزه فرکانس می باشند. در روش های حوزه زمان مولفه های آماری سیگنال های روش پخش آوایی از قبیل مقدار میانگین، انحراف معیار، مقدار بیشینه و ... مورد استفاده قرار می گیرند. حوزه فرکانس بخش دیگری از ویژگی های سیگنال را در اختیار ما قرار می دهد که عموماً بر پایه تبدیل فوریه سیگنال می باشد مانند چگالی توان طیفی سیگنال<sup>1</sup> و طیف فرکانسی<sup>2</sup>. این روشها عموماً برای تحلیلی سیگنال های ثابت مناسب می باشند و برای سیگنال های گذرا نسبت به زمان مناسب نمی باشند [13].

مطالعات سه دهه اخیر توجه زیادی به تبدیل موجک داشته اند که روشی مبتنی بر حوزه زمان- فرکانس می باشد و برای شناسایی تحلیل خرابی ماشین آلات که دارای سیگنال های گذرا می باشند، مناسب می باشد [13]. تبدیل موجک مانند تبدیل فوریه مقادیری را از تشابه بین سیگنال و تابع مورد استفاده برای تحلیل را به دست می دهد. برخی از محققین از این روش به منظور تحلیل سیگنال های پخش آوایی استفاده کرده اند [14-16]. تبدیل موجک برای یک سیگنال با مقدار میانگین صفر و طول محدود توسط تابعی با مشخصات زیر در نظر گرفته می شود:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

و

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (2)$$

در صورتی که تابع مورد استفاده دو شرط بالا را تامین کند می تواند به عنوان موجک مادر  $\psi(t)$  مورد استفاده قرار گیرد. در این صورت تبدیل موجک پیوسته تابع  $f(t)$  با توجه به تابع موجک مادر به صورت رابطه (3) بیان می شود:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

<sup>3</sup> Physical Acoustics

<sup>4</sup> Pico

<sup>1</sup> Power spectral density

<sup>2</sup> Frequency spectrum

سانتی گراد بوده است. به دلیل مدت زمان کوتاه انجام آزمایش‌ها تغییرات محسوسی در دمای روغن مشاهده نشده است. یکی از حسگرهای پخش آوایی در بدنه یاتاقان و دیگری در حوضچه روغن بر روی دیواره داخلی یاتاقان در نزدیک‌ترین قسمت ممکن به شفت نصب شده‌اند. حسگرها ابتدا به یک پیش تقویت کننده 40 دسی‌بل و سپس به دستگاه پخش آوایی متصل شده‌اند. سیگنال‌های پخش آوایی با نرخ نمونه‌برداری یک مگاهرتز همزمان با اطلاعات دما، سرعت چرخشی، فشار روغن و مقدار بار جمع‌آوری شده‌اند. مطابق با روابط استفاده شده در منحنی استریک شرایط آزمایش به گونه‌ای تغییر داده شده‌اند که محدوده روان کاری از روان کاری هیدرودینامیکی به روان کاری مرزی تغییر پیدا کرده است. برای تمامی بارهای اعمالی و لزجت دینامیکی روغن، محدوده سرعت چرخشی شفت به گونه‌ای انتخاب شده است که در بیشترین مقدار سرعت چرخشی، یاتاقان در روان کاری هیدرودینامیکی قرار داشته باشد و سپس با کاهش سرعت چرخشی روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی تولید شود. متغیرهای کاری در نظر گرفته شده و منتج شده برای یاتاقان در جدول 2 ذکر شده‌اند. با استفاده از منحنی استریک و با استفاده از این متغیرها هرکدام از آزمایش‌ها به یکی از انواع روان کاری ارجاع داده شده‌اند (جدول 3).

#### 4- تشریح مساله مورد تحقیق

آزمایش‌ها در بار ثابت انجام شده‌اند و به دلیل تغییرات کم دما، لزجت دینامیکی تغییر کمی داشته است. بدین ترتیب از سرعت چرخشی به عنوان تنها متغیر تاثیر گذار در تعیین محدوده روان کاری استفاده شده است. مولفه‌های دیگری که می‌توانسته‌اند در شرایط روان کاری تاثیر بگذارند شامل ابعاد یاتاقان، فشار روغن ورودی، زبری سطح شفت و یاتاقان و نحوه و محل اعمال بار بوده است. علاوه بر این عوامل، وجود نویز محیطی مربوط به کارکرد موتور الکتریکی، پمپ روغن و به طور کلی وجود منابع مختلف تولید سیگنال‌های پخش آوایی بر روی سیگنال‌های دریافتی به عنوان منابع تولید خطا وجود داشته است. البته سعی شده با استفاده از مشخص کردن حد آستانه برای سیگنال‌های دریافتی به مقدار 30 دسی‌بل، تا حدی سیگنال‌های مربوط به این منابع که فاصله بیشتری نسبت به یاتاقان مورد آزمایش تا سنسورها داشته‌اند، حذف شوند. چرا که سیگنال‌های پخش آوایی با افزایش فاصله از منبع تولید سیگنال تضعیف می‌شوند. به دلیل تعداد زیاد مولفه‌های تاثیر گذار، به دست آوردن روابط تحلیلی دقیق برای به دست آوردن منحنی استریک مشکل می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک اجزا، اصطکاک بین سطوح، پوسته‌پوسته شدن، تغییر شکل در اثر خستگی ناشی از عیوب، ترک‌های سطحی و زیر سطحی در سطوح لغزشی می‌توانند به عنوان منبع پخش آوایی باشند. به دلیل مدت زمان کوتاه آزمایش‌ها در مقایسه با طول عمر یاتاقان‌ها، از احتمال رخ دادن این پدیده‌ها در تحلیل نتایج چشم‌پوشی شده است. در شرایط مناسب کاری یاتاقان، تماس فلز با فلز رخ نخواهد داد، این بدین معنی است که همواره یک فیلم نازک از روغن بین دو سطح به منظور جلوگیری از تماس برجستگی‌های سطوح وجود دارد. تحت شرایط روان کاری هیدرودینامیکی فیلم روغن به میزان کافی به منظور حصول اطمینان از عدم تماس سطوح بزرگ می‌باشد. بنابراین منبع پخش آوایی می‌تواند در اثر اصطکاک در سیال و اصطکاک بین سیال و سطوح باشد. چنین اصطکاک‌های در سیال به تنش برشی نسبت داده می‌شود که به عنوان نیرو بر واحد سطح در مرز جامد در حرکت سیال در صفحه مماسی بیان می‌شود [12]. در شرایط کاری یک یاتاقان به دلایلی از قبیل نیروهای ناگهانی، ارتعاشات، کمبود

از نوار پلاستیکی با ضخامت 10 میلی‌متر بین شفت و این یاتاقان‌ها به منظور کاهش نویز استفاده شده است. جک بادی قرار داده شده در زیر یاتاقان امکان اعمال بار در مرکز یاتاقان را فراهم کرده است. سرعت چرخشی شفت بین 20 تا 1700 دور بر دقیقه از طریق یک موتور دو کیلووات و یک مبدل الکتریکی فراهم شده است. فشار روغن ورودی قابل تنظیم بین 0.5 تا 6 بار در نظر گرفته شده است. روغن استفاده شده در یاتاقان به پمپ روغن بازگردانده شده و بعد از فیلتر شدن از طریق فیلتر مورد استفاده در پمپ، به چرخه روان کاری بازگشت داده شده است. اندازه‌گیری شرایط کاری یاتاقان با استفاده از حسگرهایی با نرخ نمونه‌برداری 100 هرتز در تمام طول انجام آزمایش انجام شده است. اطلاعات به دست آمده از این حسگرها همزمان با حسگرهای آکوستیکی ثبت شده‌اند. برای این منظور از یک دورسنج تماسی برای اندازه‌گیری سرعت دورانی شفت، از یک حسگر فشار روغن برای اندازه‌گیری فشار روغن ورودی، از یک حسگر بار به منظور اندازه‌گیری مقدار بار اعمالی و از سه حسگر دما به منظور اندازه‌گیری دمای بدنه یاتاقان، روغن ورودی و خروجی استفاده شده است. مشخصات حسگرهای مورد استفاده در جدول 1 ذکر شده‌اند. آزمایش‌ها در بارهای ثابت و سرعت‌های دورانی متغیر بین 1700 دور بر دقیقه 0 تا 10 دور بر دقیقه انجام گرفته‌اند.

قبل از شروع آزمایش‌ها دمای روغن به دمای ثابت رسیده است. دمای ثابت در سرعت دورانی 1700 دور بر دقیقه و در حالت بدون بار 50 درجه

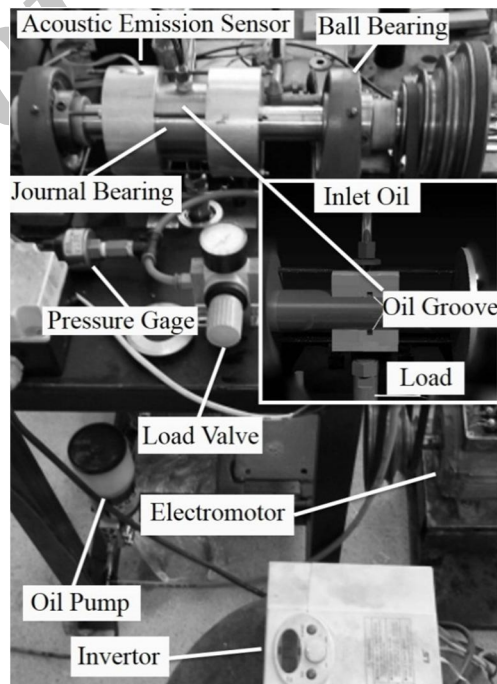


Fig. 2 Schematic of used set up and a semi view of sliding bearing

شکل 2 نمای تجهیزات مورد استفاده و نمای برش خورده یاتاقان لغزشی

جدول 1 مشخصات حسگرهای مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

Table 1 Specification of the used sensors

نوع حسگر	محدوده اندازه‌گیری	میزان خطا
دماسنج	0-140 درجه سانتی‌گراد	1 درجه سانتی‌گراد
گیج اندازه‌گیری فشار	0-2.5 مگاپاسکال	1 درصد
دورسنج تماسی	0-20000 دور بر دقیقه <sup>1</sup>	0.1 درصد
سلول بار (نیروسنج)	0-5 کیلو نیوتن	0.5 درصد

<sup>1</sup> Revolutions per minute (RPM)

## جدول 2 متغیرهای شرایط کاری یاتاقان

Table 2 Variables of the bearing

نوع روغن	فشار روغن ورودی (MPa)	سرعت چرخشی (RPM)	میزان اعمال بار (kN)	دمای روغن در شرایط مختلف (C°)
SAE 40	0.05	1700, 1400, 1100, 900, 700, 500, 400	0.78, 1.57	50, 52
	0.25	300, 200, 150, 100, 75, 50, 40, 25, 10	3.92, 3.14	54, 56
لزجت دینامیکی (PaS)	عدد سامرفیلد	کمینه مقدار ضخامت فیلم روغن (µm)	ضریب اصطکاک	گشتاور ناشی از نیروی اصطکاک (Nm)
0.0745, 0.0667	کمترین 0.00055	کمترین 0.8	کمترین 0.00089	کمترین 103.2
0.0599, 0.0540	بیشترین 3.647	بیشترین 70	بیشترین 0.148	بیشترین 132.8

روغن، عدم هم مرکزی، ارتفاع زیاد برخی از قسمت‌های زبری در سطوح، احتمال گسستگی و تماس فلز با فلز وجود دارد. این پدیده با بدتر شدن شرایط روان کاری و کاهش پیدا کردن ضخامت فیلم روغن محتمل تر می‌شود. طبق منحنی استریبک، ضخامت فیلم هیدرودینامیکی متناسب با لزجت دینامیکی روغن، سرعت لغزشی و به شکل معکوس متناسب با مقدار نیروی اعمالی می‌باشد. در صورتی که تماس دو سطح لغزنده رخ بدهد، یکی از مهم ترین عواملی که می‌تواند باعث تولید پخش آوایی شود، زبری سطوح لغزشی می‌باشد.

## 5- نتایج و بحث

در "شکل‌های 3 تا 8"، سرعت‌های چرخشی که دارای کمینه انرژی می‌باشند بیان کننده مرز بین محدوده روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط می‌باشند. زمانی که یاتاقان در محدوده روان کاری هیدرودینامیکی می‌باشد، تماسی بین شفت و یاتاقان رخ نداده است و لایه روغن بار را تحمل کرده است. در چنین شرایطی افت‌های انرژی اصطکاکی به دلیل حرکت چرخشی فیلم روغن به‌عنوان منبع اصلی تولید پخش آوایی بوده است. تماس بین شفت و یاتاقان در روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی امکان‌پذیر می‌باشد. در این محدوده‌ها، شکل سطوح به‌علاوه سرعت چرخشی، بار و لزجت دینامیکی روغن در تولید سیگنال‌های پخش آوایی می‌توانسته‌اند تاثیرگذار باشند. زمانی که سطوح نسبت به یکدیگر حرکت دارند، برآمدگی‌های آن‌ها تحت تماس‌ها و جداشدگی‌های کوچک تصادفی قرار می‌گیرند. مطابق با نتایج ذکر شده در ارتباط با پخش آوایی بوجود آمده در لغزش سطوح، انرژی پخش آوایی با کاهش سرعت لغزشی در صورتی که الباقی شرایط ثابت باشند کاهش می‌یابد [3]. در آزمایش‌ها انجام شده نیز این امر مشاهده شده است. با کاهش سرعت چرخشی تا رسیدن به یک سرعت مشخص (در مرز بین محدوده روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری

محدوده روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط و مرزی رخ داده است و این موضوع با منحنی استریبک تطابق دارد. دلیل انجام آزمایش‌ها از سرعت زیاد به کم، تمایل به رخ دادن روان کاری مرزی در آخرین زمان انجام آزمایش بوده است، چرا که در این محدوده امکان کندگی و وارد شدن ذرات فلزی سطوح سایشی در روان کار و تاثیر بر نتایج وجود داشته است. اما با این روند آزمایش به دلیل اتمام آزمایش در این محدوده، امکان تاثیر ذرات بر روی نتایج محدوده‌های دیگر حداقل شده است. بدین طریق، در "شکل‌های 3 تا 8" محدوده‌های روان کاری هیدرودینامیکی از روان کاری مخلوط قابل تشخیص هستند.

سه یاتاقان مشابه با لقی و فشارهای روغن ورودی مختلف در شرایط کاری مشابه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. لقی‌های ایجاد شده برای یاتاقان‌ها در محدوده مجاز طراحی برای یاتاقان‌های لغزشی بوده است. در زمان انجام آزمایش‌ها از طریق نصب حسگرهای پخش آوایی سیگنال‌های ساطع شده از امواج الاستیک ثبت شده است. در بین مشخصه‌های پخش آوایی، مشخصه‌هایی که حساسیت بیشتری نسبت به تغییر شرایط کاری از خود نشان داده‌اند، انتخاب شده‌اند. در میان این مشخصه‌ها، تعداد ضربات و انرژی تغییرات محسوس‌تری داشته‌اند. این پارامترها می‌توانسته‌اند از منابع پخش آوایی که در بخش قبل ذکر شدند، تاثیر گرفته باشند. نتایج انرژی پخش آوایی در مقابل زمان انجام آزمایش‌ها برای دو یاتاقان در سه بار مختلف در "شکل‌های 3 تا 8" نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است انرژی سیگنال‌ها توسط نرم‌افزار دستگاه پخش آوایی محاسبه و ارائه می‌شوند. در آزمایش‌ها، سرعت چرخشی به‌صورت پیوسته در 16 مرحله از 1700 دور بر دقیقه تا 10 دور بر دقیقه کاهش پیدا کرده است و این سرعت در هر مرحله برای مدت زمان هشت ثانیه ثابت نگه داشته شده است. برخی از این بازه‌های زمانی در آزمایش‌ها مربوط به زمان تغییرات سرعت چرخشی بوده‌اند. این بازه‌ها به دلیل عدم یکنواختی در تغییر سرعت چرخشی و امکان داشتن خطا در تحلیل سیگنال‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. مقدار مربع میانگین ریشه‌ها<sup>1</sup> برای انرژی در بازه‌های زمانی هشت ثانیه‌ای در زیر هر کدام از "شکل‌های 3 تا 8" نشان داده شده است. با استفاده از این روش، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده با منحنی استریبک انجام شده است.

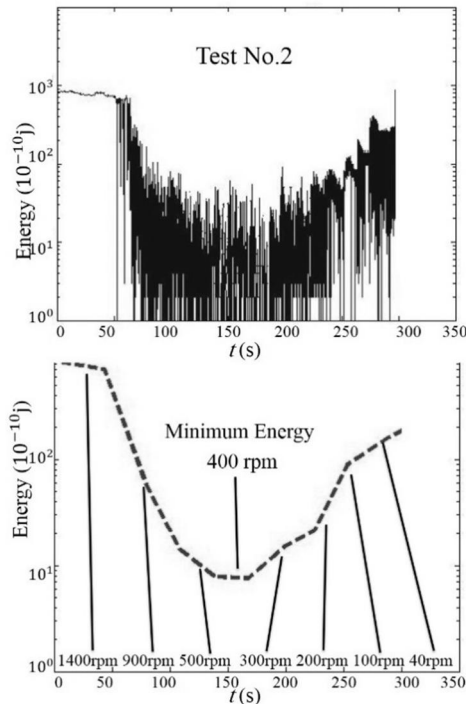
جدول 3 محدوده‌های روان کاری مربوط به شرایط کاری مختلف در آزمایش‌ها با

استفاده از منحنی استریبک

Table 3 Lubrication regimes related to tests by Stribeck curve

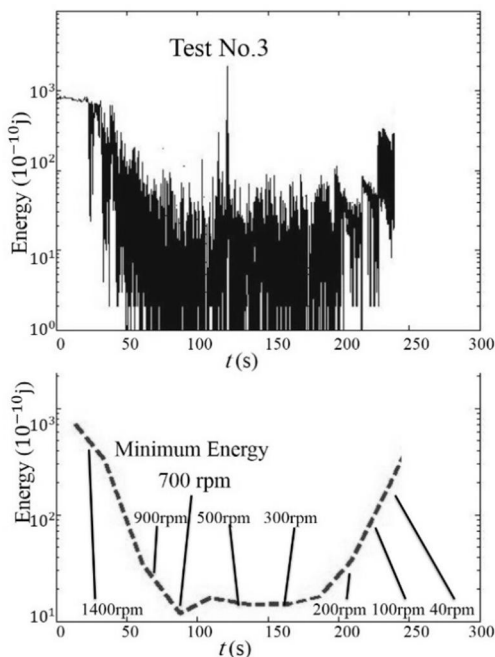
محدوده روان کاری	سرعت چرخشی (RPM)	فشار (MPa)	لزجت دینامیکی (PaS)
هیدرودینامیکی	N > 40	0.641	0.0599
	N > 100	1.282	
	N > 200	2.564	
	N > 300	3.205	
مخلوط	N < 40	0.641	در دمای 54 درجه سانتی‌گراد
	10 < N < 100	1.282	
	40 < N < 200	2.564	
	40 < N < 300	3.205	
	-	0.641	
مرزی	N = 10	1.282	
	N < 40	2.564	
	N < 40	2.564	
	N < 40	3.205	

<sup>1</sup> Root mean squares



**Fig. 4** AE energy vs time for the bearing with 0.1 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 3.14 kN load

شکل 4 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.1 میلی متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 3.14 کیلو نیوتن



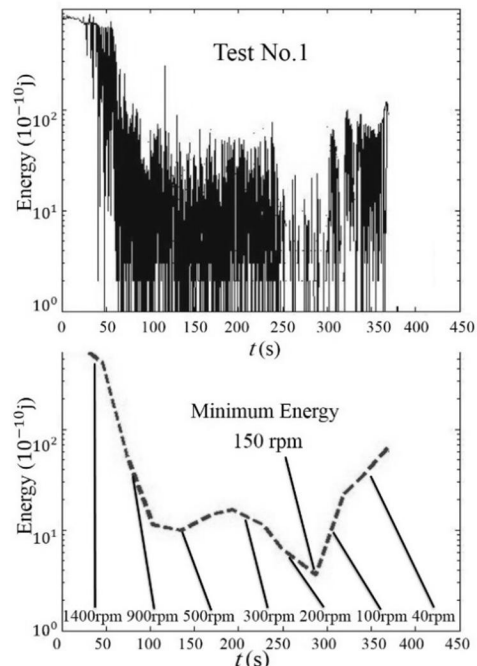
**Fig. 5** AE energy vs time for the bearing with 0.1 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 3.92 kN load

شکل 5 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.1 میلی متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 3.92 کیلو نیوتن

هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط را مشخص می کند مشاهده نشده است. در این آزمایش ها (شکل 6 تا شکل 8) کمینه مقدار مجاز برای لقی یاتاقان انتخاب شده است و لقی کم باعث شده لایه روغن در تمامی بارهای اعمالی در سرعت چرخشی مشابه امکان تامین فاصله بین شفت و یاتاقان را نداشته

مخلوط) کاهش انرژی پخش آوایی مشاهده شده است. با کاهش سرعت چرخشی، خارج از مرکزی یاتاقان افزایش پیدا می کند و ضخامت کمینه فیلم روغن کاهش پیدا می کند. همان طور که در نتایج مشاهده می شود، کاهش ضخامت فیلم روغن که به دلیل کاهش سرعت چرخشی بوده است، تا زمانی که باعث تماس فلز با فلز نشده است، باعث افزایش انرژی پخش آوایی نشده است. اما با ادامه کاهش سرعت چرخشی و نتیجتاً کاهش ضخامت فیلم روغن، تماس فلز با فلز و افزایش انرژی رخ داده است. در محدوده روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی (بعد از کمینه مقدار انرژی) با کاهش سرعت چرخشی افزایش در انرژی پخش آوایی مشاهده شده است که به دلیل افزایش در اصطکاک از طریق کاهش ضخامت فیلم روغن و تماس بیشتر برجستگی های سطوح بوده است. در سرعت های چرخشی در کمینه انرژی و کمتر از آن فیلم روغن دیگر توانایی نگهداری لقی بین شفت و یاتاقان را نداشته است و تماس فلز با فلز و متعاقباً افزایش انرژی پخش آوایی رخ داده است. همان طور که مشاهده می شود، سرعت های چرخشی نشان داده شده در جدول 3 که مشخص کننده مرز بین روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط می باشد با نتایج بدست آمده هم خوانی ندارد. این اختلاف به دلیل نظر نگرفتن تمامی پارامترهای تاثیر گذار در منحنی استریک می باشد.

در یاتاقان با لقی 0.1 میلی متر و در آزمایش شماره 1 (شکل 3)، بار اعمال شده کمتر از آزمایش شماره 2 (شکل 4) می باشد و کمینه انرژی در سرعت کمتر نسبت به آزمایش شماره 2 رخ داده است و همین نتیجه برای آزمایش شماره 2 در مقایسه با آزمایش شماره 3 (شکل 5) مشاهده شده است. مطابق با منحنی استریک، با افزایش مقدار بار، روان کاری مخلوط در سرعت های چرخشی بالاتر اتفاق می افتد. در آزمایش های ذکر شده نیز این امر مشاهده شده است. در یاتاقان با لقی 0.07 میلی متر برای تمامی بارهای اعمالی تغییر قابل توجهی در سرعت چرخشی که مرز بین روان کاری



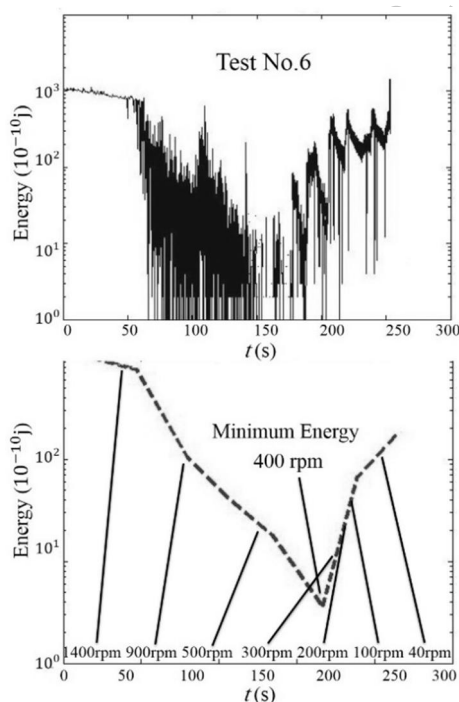
**Fig. 3** AE energy vs time for the bearing with 0.1 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 1.57 kN load

شکل 3 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.1 میلی متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 1.57 کیلو نیوتن

ورودی انتخاب شده است و شرایط آزمایش مشابه با یاتاقان‌های قبلی بر روی آن اجرا شده است (آزمایش شماره 7). به دلیل مقدار فشار روغن ورودی، به جز در آزمایش‌های با مقدار کم بار اعمالی (شکل 9)، در بقیه بارها محدوده‌های روان کاری از یکدیگر قابل تشخیص نبوده‌اند (شکل 10).

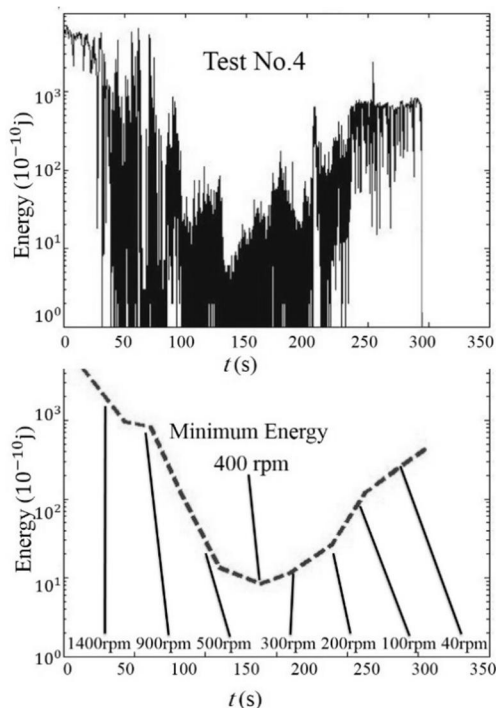
روش‌های برپایه زمان می‌توانند تنها بخشی از اطلاعات موجود در سیگنال‌های پخش آوایی را در اختیار ما قرار دهند. به همین دلیل به منظور ارزیابی بیشتر سیگنال‌ها روش تبدیل موجک پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق با نرخ نمونه‌برداری محدوده فرکانسی سیگنال‌های پخش آوایی بین 50 تا 500 کیلوهرتز در نظر گرفته شده است که در این محدوده ارتعاشات معمول مربوط به شرایط کارکرد یاتاقان تاثیرگذار نمی‌باشند. از دیب‌چز<sup>13</sup> که یکی از مرسوم‌ترین موجک‌های مادر می‌باشد برای تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است [13]. بنابراین تبدیل موجک پیوسته برای سیگنال‌ها در محدوده فرکانسی بین 50 تا 500 کیلوهرتز با فواصل 5 کیلوهرتز تولید شدند. بدین ترتیب تبدیل موجک پیوسته یک سیگنال یک بعدی تابعی از دو مولفه موقعیت و مقیاس شده است.

تبدیل موجک برای هر سیگنال ماتریسی از ضرایب می‌باشد که هر ردیف از این ماتریس بیان‌کننده ضرایب تبدیل موجک پیوسته برای یک مقیاس یا فرکانس و هر ستون بیان‌کننده تعداد نمونه‌های مربوط به یک سیگنال می‌باشد. به دلیل ابعاد بزرگ این ماتریس‌ها، از هر محدوده روان کاری 500 سیگنال متوالی برای تبدیل موجک انتخاب شدند. بدین ترتیب برای هر محدوده روان کاری، یک بازه زمانی انتخاب شده است و تبدیل موجک پیوسته بر روی آن بازه زمانی انجام شده است. این امر به دلیل قابلیت تحلیل روش تبدیل موجک در حوزه زمان و فرکانس به صورت همزمان فراهم شده است. نتایج مربوط به تبدیل موجک پیوسته برای سیگنال‌ها در یاتاقان دارای لقی



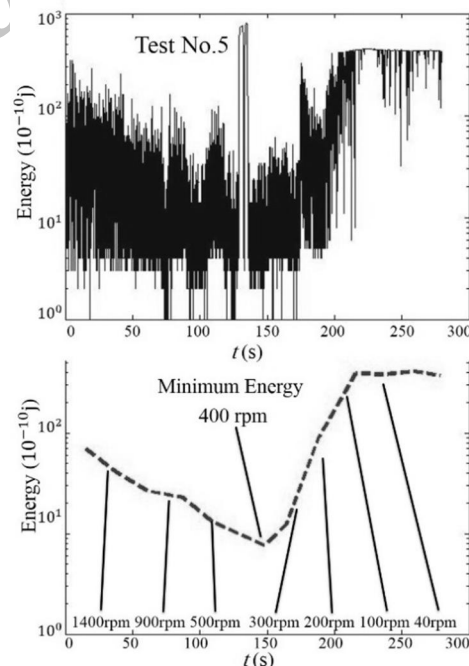
**Fig. 8** AE energy vs time for the bearing with 0.07 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 3.92 kN load

شکل 8 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.07 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 3.92 کیلو نیوتن



**Fig. 6** AE energy vs time for the bearing with 0.07 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 1.57 kN load

شکل 6 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.07 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 1.57 کیلو نیوتن



**Fig. 7** AE energy vs time for the bearing with 0.07 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 3.14 kN load

شکل 7 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.07 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 3.14 کیلو نیوتن

باشد. به عبارت دیگر، به دلیل لقی کم یاتاقان، برخلاف یاتاقان با لقی 0.1 میلی‌متر، بارهای اعمالی در نظر گرفته شده تاثیر چندانی در شرایط کاری یاتاقان نداشته‌اند و این در حالی است که این موضوع در منحنی استریک در نظر گرفته نشده است. در یاتاقان سوم مقدار بسیار کم برای فشار روغن

<sup>1</sup> Daubechies 3

توجه این می‌باشد که در بخش قبل، محدوده روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مرزی قابل تشخیص از یکدیگر نبودند و مقادیری مشابه با یکدیگر داشتند و این در حالیتیست که ضرایب تبدیل موجک پیوسته بین محدوده 200 تا 500 کیلوهرتز فقط در بازه زمانی مربوط به روان کاری مرزی دارای افزایش قابل ملاحظه می‌باشند و در دیگر بازه‌های زمانی مربوط به سایر شرایط روان کاری افزایشی مشاهده نمی‌گردد. می‌توان گفت این افزایش در بازه زمانی مربوط به روان کاری مرزی مربوط به تماس فلز با فلز در این محدوده می‌باشد. در "شکل 11" قسمت دوم همان ضرایب تبدیل موجک پیوسته در محدوده 200 تا 500 کیلوهرتز نمایش داده شده است. البته باید توجه داشت که به دلیل دریافت سیگنال‌های پخش آوایی در فرکانس‌های بالای 50 کیلوهرتز، امکان بررسی پدیده‌هایی با فرکانس کمتر از این مقدار وجود نداشته است. در غیر این صورت، در اثر تماس فلز با فلز در سرعت‌های چرخشی متفاوت، می‌بایست فرکانس‌هایی برابر با همان فرکانس سرعت دورانی به عنوان فرکانس غالب دریافت می‌گردید.

زمانی که در یک یاتاقان لغزشی حداقل ضخامت فیلم روغن از ارتفاع برجستگی‌های دو سطح در حال چرخش کمتر باشد، برجستگی‌های سطح متحرک در هر دور چرخش که به محدوده حداقل فاصله می‌رسند، با سطح مقابل تماس خواهند داشت و این موضوع تولید تنش الاستیک یا پخش آوایی خواهد کرد. بنابراین در صورت تولید پخش آوا ناشی از چنین پدیده‌ای، پخش آوا به صورت متناوب و با تعداد تکراری برابر با تعداد چرخش شفت و یا یاتاقان ایجاد خواهد شد. با توجه به مطالب گفته شده در مورد محدوده‌های روان کاری، احتمال وقوع پخش آوا به صورت دوره‌ای در محدوده روان کاری مخلوط و به خصوص در محدوده روان کاری مرزی بیشتر خواهد بود. به منظور شناسایی سیگنال‌های دوره ای یک برنامه در نرم‌افزار متلب<sup>1</sup> نوشته شده است. در این برنامه برای هر سرعت چرخشی ثابت و مشخص بر حسب تعداد دوران بر دقیقه، تعداد ضربات پخش آوایی که تعداد آن‌ها با هم برابر بوده و همچنین تعداد تکرار آن‌ها با خطای کمتر از 10 درصد برابر با سرعت چرخشی بر حسب دور بر دقیقه بوده شناسایی شده‌اند. نتایج برای دو آزمایش شماره 9 و 10 (شکل 12 و شکل 13) نشان داده شده است. موضوع قابل توجه این می‌باشد که این سیگنال‌های دوره‌ای قبل از کمینه مقدار ضربات پخش آوایی و یا در محدوده روان کاری هیدرودینامیکی مشاهده نشده‌اند و تعداد آن‌ها با فاصله گیری از این محدوده افزایش پیدا کرده است. زمانی که یاتاقان در محدوده روان کاری هیدرودینامیکی می‌باشد تماس تکرار شونده بین شفت و یاتاقان رخ نداده است و بنابراین سیگنال‌ها در این محدوده به شکل دوره‌ای نبوده‌اند. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود با کاهش سرعت چرخشی و متعاقباً کاهش ضخامت فیلم روغن تعداد بیشتری از برآمدگی‌های سطوح در کمینه مقدار ضخامت فیلم روغن با یکدیگر تماس پیدا کرده‌اند. این موضوع بیان کننده وارد شدن شرایط روان کاری یاتاقان به محدوده مرزی می‌باشد. در آزمایش شماره 10 در مقایسه با آزمایش شماره 9 به دلیل فشار کمتر روغن ورودی با وجود اعمال بار کمتر تعداد سیگنال‌های دوره‌ای بیشتر بوده است که نشانگر تماس فلز با فلز بیشتر به دلیل فقر روان کاری در شرایط کاری مشابه بوده است. روان کاری ضعیف و تماس سطوح متحرک به‌عنوان عوامل اساسی در ایجاد عیوب در یاتاقان‌های لغزشی می‌باشند. در این مقاله با استفاده از روش پخش آوایی و شناسایی تماس فلز با فلز امکان پیش بینی اینگونه عیوب در یاتاقان‌ها فراهم شده است. این نتایج

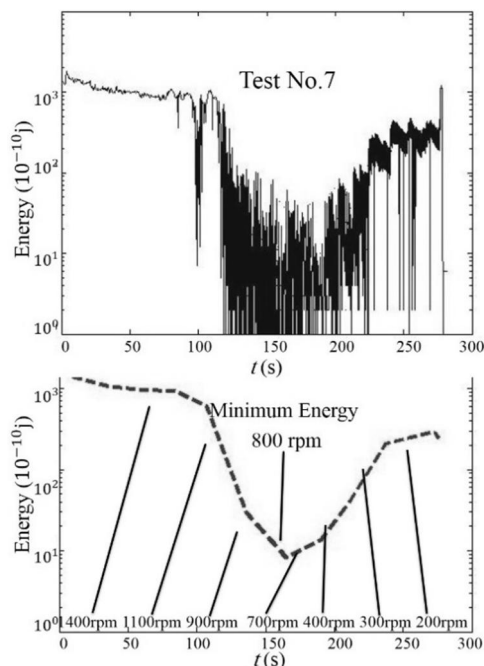


Fig. 9 AE energy vs time for the bearing with 0.08 mm clearance, 0.5 bar inlet oil pressure and 1.57 kN load

شکل 9 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.08 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 0.5 بار و نیروی اعمالی 1.57 کیلو نیوتن

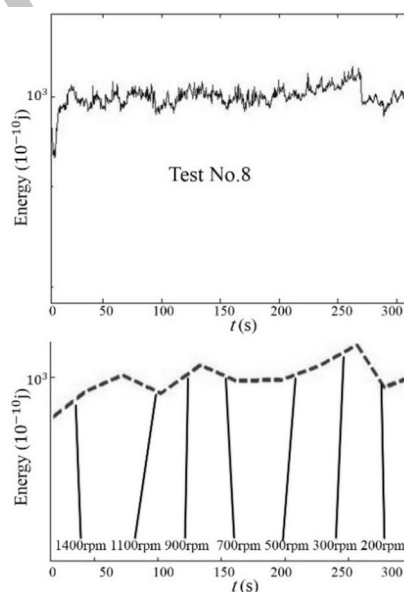


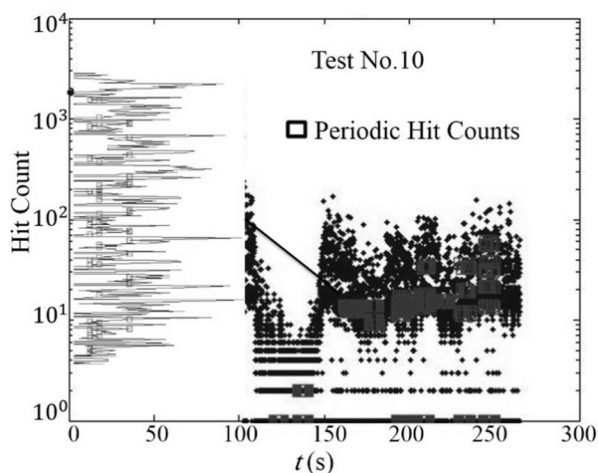
Fig. 10 AE energy vs time for the bearing with 0.08 mm clearance, 0.5 bar inlet oil pressure and 3.92 kN load

شکل 10 انرژی پخش آوایی در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.08 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 0.5 بار و نیروی اعمالی 3.92 کیلو نیوتن

0.07 میلی‌متر در بار 1.57 کیلو نیوتن و با سرعت کاهشی در "شکل 11" ارائه شده است. همان‌طور که در شکل پیداست افزایش ضرایب موجک پیوسته در شرایط روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مرزی بین محدوده فرکانسی بین 50 تا 200 کیلو هرتز با تغییرات زمان کاملاً قابل تشخیص می‌باشد که این موضوع مطابق با منحنی استریک و نتایج به‌دست آمده برای مربع میانگین ریشه‌های انرژی سیگنال در بخش قبل می‌باشد. اما نکته قابل

<sup>1</sup> MATLAB





**Fig. 13** Metal to metal contact detection by similar AE count vs time for the bearing with 0.08 mm clearance, 0.5 bar inlet oil pressure and 1.57 kN load

شکل 13 شناسایی تماس فلز با فلز از طریق تعداد ضربات پخش آوایی مشابه در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.08 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 0.5 بار و نیروی اعمالی 1.57 کیلو نیوتن

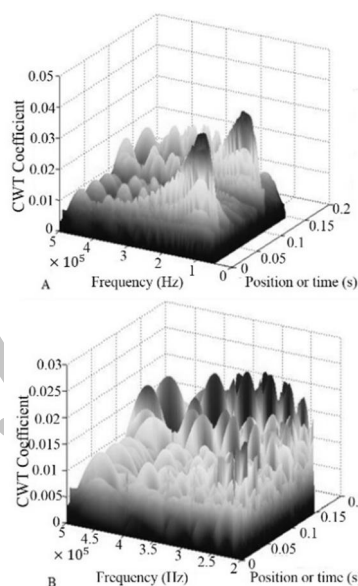
تحقیقات شرایط کاری و سیگنال‌های پخش آوایی با استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی یاتاقان جمع‌آوری شده‌اند. بدین طریق، منحنی استریک با استفاده از مربع میانگین ریشه‌های انرژی پخش آوایی به‌دست آمده و مقادیر عددی متغیرهای کاری یاتاقان که مشخص‌کننده تغییر محدوده روان کاری از روان کاری هیدرودینامیکی به روان کاری مخلوط بوده است، مشخص شده است. سرعت‌های چرخشی در منحنی استریک که مشخص‌کننده مرز بین روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط بوده است مطابق با نتایج بدست آمده نبوده‌اند که این اختلاف به دلیل در نظر نگرفتن تمامی پارامترهای تاثیرگذار در این منحنی بوده است. در سه یاتاقان مورد آزمایش نتایج زیر حاصل شده است:

1. در یاتاقان با لقی 0.1 میلی‌متر از لحاظ کیفی روندی مشابه با منحنی استریک در تمامی بارهای اعمالی با استفاده از انرژی پخش آوایی بدست آمده است.
2. در یاتاقان با لقی 0.07 میلی‌متر کمینه مقدار لقی مجاز برای یاتاقان انتخاب شده است و برای تمامی بارهای اعمال شده تغییرات قابل توجهی در سرعت چرخشی که مشخص‌کننده مرز بین روان کاری هیدرودینامیکی و روان کاری مخلوط بوده است، مشاهده نشده است.
3. در یاتاقان با لقی 0.08 میلی‌متر و فشار روغن ورودی کم به جز در آزمایش‌ها با مقادیر بارهای کم اعمالی، محدوده های روان کاری قابل تشخیص از یکدیگر نبوده‌اند و روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی، محدوده های قالب بوده‌اند.
4. از طریق تبدیل موجک پیوسته و با استفاده از موجک مادر دبپچز 3، نتایجی مشابه با تحلیل در حوزه زمان به‌دست آمده است. بعلاوه، مشخص شده محدوده فرکانسی بین 200 تا 500 کیلوهرتز مربوط به سایس سطوح و تماس فلز با فلز بوده است. که این امر در محدوده روان کاری مرزی مشهود بوده است.

از طریق تحلیل سیگنال‌های پخش آوایی به‌دست آمده از آزمایش‌های مختلف در شرایط مختلف کاری یاتاقان‌های مورد آزمایش در حوزه زمان و همچنین در حوزه زمان - فرکانس از طریق تبدیل موجک پیوسته به‌دست آمده است.

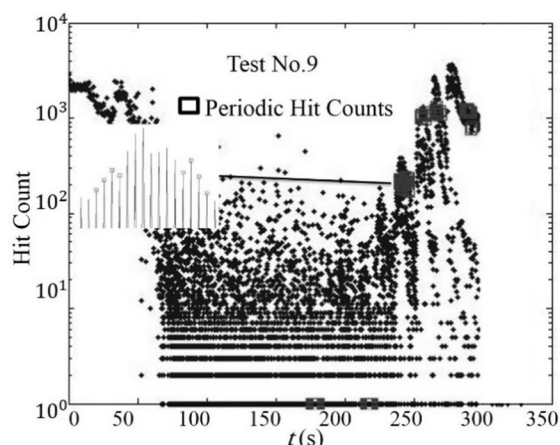
## 6- نتیجه گیری

نتایج تحقیقات حاضر نشان داده‌اند که پایش شرایط روان کاری در یاتاقان‌های لغزشی با طراحی‌ها و ساخت‌های مختلف و همچنین شرایط کاری گوناگون با استفاده از روش پخش آوایی امکان‌پذیر است. در این تحقیقات از سه یاتاقان تغذیه فشاری با لقی‌ها و فشارهای روغن مختلف برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. یاتاقان‌ها در بارهای ثابت با سرعت‌های چرخشی متغیر از 1700 دور بر دقیقه تا 10 دور بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در طول



**Fig. 11** Continuous wavelet coefficients for two different frequency ranges at different lubrication regimes for one of the test bearings

شکل 11 ضرایب تبدیل موجک پیوسته در دو محدوده فرکانسی مختلف برای یکی از یاتاقان‌های مورد آزمایش در سه محدوده مختلف روان کاری



**Fig. 12** Metal to metal contact detection by similar AE count vs time for the bearing with 0.1 mm clearance, 2.5 bar inlet oil pressure and 3.14 kN load

شکل 12 شناسایی تماس فلز با فلز از طریق تعداد ضربات پخش آوایی مشابه در مقیاس زمان برای یاتاقان با لقی 0.1 میلی‌متر، فشار روغن ورودی 2.5 بار و نیروی اعمالی 3.14 کیلو نیوتن

- 787, 2000.
- [6] M. Elforjani, D. Mba, Observations and location of acoustic emissions for a naturally degrading rolling element thrust bearing, *ASM International*, Vol. 8, No. 4, pp. 370-385, 2008.
- [7] Y. E. Kim, C. C. Tan, B. S. Yang, V. Kosse, Experimental study on condition monitoring of low speed bearings : time domain analysis, *Proceedings of The 5th Australasian Congress on Applied Mechanics*, pp. 108-113, 2007.
- [8] R. A. Khamis, A. Addali, B. Charnley, D. Mba, Energy Index technique for detection of acoustic emissions associated with incipient bearing failures, *Applied Acoustics*, Vol. 71, No. 9, pp. 812-821, 2010.
- [9] A. Choudhury, N. Tandon, Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International*, Vol. 33, No. 1, pp. 39-45, 2000.
- [10] D. Mba, The Use of Acoustic Emission for Estimation of Bearing Defect Size, *Machinery Failure Prevention Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 188-192, 2008.
- [11] N. Jamaludin, D. Mba, R. H. Bannister, Monitoring the lubricant condition in a low-speed rolling element bearing using high frequency stress waves, *Process Mechanical Engineering*, Vol. 216, No. 2, pp. 73-88, 2002.
- [12] S. A. Mirhadizadeh, E. P. Moncholi, D. Mba, Influence of operational variables in a hydrodynamic bearing on the generation of acoustic emission, *Tribology International*, Vol. 43, No. 9, pp. 1760-1767, 2010.
- [13] P. McFadden, Application of wavelet transform to early detection of gear failure by vibration analysis, *Proceedings of an International Conference of Condition Monitoring*, University College of Swansea, Wales, 1994.
- [14] S. Prabhakar, A. R. Mohanty, A. S Sekhar, Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults, *Tribology International*, Vol. 35, No. 12, pp. 793-800, 2002.
- [15] Y. Ruqiang, X. R. Gao, An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 4-5, pp. 291-301, 2005.
- [16] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui, Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis, *Meccanica*, Vol. 43, No. 2, pp. 339-348, 2008.

5. در آزمایش‌ها، ضربات پخش آوایی دوره‌ای برای هر سرعت چرخشی ثابت شناسایی شده‌اند و مشخص شده است که این ضربات پخش آوایی که به شکل دوره‌ای رخ داده، تنها در محدوده مرزی و مخلوط رخ داده‌اند که به دلیل تماس فلز با فلز بین سطوح لغزشی بوده است. نتایج نشان داده‌اند که با کاهش سرعت چرخشی تعداد تماس فلز با فلز بیشتر شده است که به دلیل ضخامت کمتر فیلم روغن و تماس بیشتر برجستگی‌های دو سطح در محدوده مرزی در مقایسه با محدوده مخلوط بوده است، این موضوع با منحنی استریک تطابق داشته است.

## 7- مراجع

- [1] J. G. Wills, M. Dekker, *Lubrication Fundamentals*, Second Edition, pp. 170-182, New York: Basel, 1980.
- [2] J. E. Shigley, R. M. Charles, *Bearings and Lubrication*, pp. 42-47, Shepherdstown: McGraw-Hill, 1990.
- [3] V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Sarychev, V. Schavelin, Acoustic emission in friction. *Tribology and interface engineering series*, Vol. 51, No. 53, pp. 15-18, 2007.
- [4] V. Baranov, A. Karasevich, E. Kudryavtsev, V. Remizov, Acoustic Diagnostics and Monitoring at Fuel and Power Plants, *Proceedings of The 5th International Conference on Wear and Lubrication*, Moscow, Russia, 1998.
- [5] J. Miettinen, P. Andersson, Acoustic emission of rolling bearings lubricated with contaminated grease, *Tribology International*, Vol. 33, No. 11, pp. 777-

Archive of SID