

## عیب‌یابی بلبرینگ توسط آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی

علی جعفری\*

استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
دانشکده کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی  
دانشگاه تهران

jafarya@ut.ac.ir

اشکان شکرپان

کارشناس ارشد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
دانشکده کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی  
دانشگاه تهران

ashkan.shokrian@ut.ac.ir

حجت احمدی

استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
دانشکده کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی  
دانشگاه تهران

hahamdi878@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱

## چکیده

طی دهه گذشته، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تشخیص عیوب انجام شده است. پژوهشگران در رشته‌هایی چون پزشکی، مهندسی، علوم تجربی، تجارت و اقتصاد، روش‌های متنوعی را برای تشخیص عیب (خرابی) یا شرایط غیرعادی، شناسایی دقیق یا جداسازی اجزای معیوب و تصمیم‌گیری درباره اثر بالقوه اجزای خراب یا در حال خرابی ایجاد کرده‌اند. استفاده از روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات نظیر برنامه‌های پایش وضعیت با روش آنالیز ارتعاشات اطلاعات گسترده‌ای در مورد عملکرد ماشین‌آلات در اختیار مهندسان قرار می‌دهد که آنها را در برنامه‌ریزی، هدایت، کنترل و بهینه‌سازی یاری می‌دهد. در این مقاله، روشی مطمئن مبتنی بر تحلیل سیگنال ارتعاشی برای عیب‌یابی بلبرینگ ارائه شده است. بلبرینگ مورد بررسی، بلبرینگ آلترناتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ می‌باشد. برای این منظور، سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان از بلبرینگ، در دو حالت سالم و معیوب (عیب ساچمه) گرفته و بسامدهای اصلی بر طیف ارتعاشی حالت سالم و معیوب مشخص شد. دامنه ارتعاشی بسامدهای اصلی در حالت معیوب به دلیل وجود خرابی در بلبرینگ نسبت به حالت سالم افزایش یافته است. با این افزایش دامنه می‌توان معیوب‌بودن بلبرینگ را نتیجه گرفت.

واژگان کلیدی: تشخیص عیب، نگهداری و تعمیرات، بلبرینگ، آنالیز ارتعاشات، تبدیل فوریه

## ۱. مقدمه

بر مبنای شرایط واقعی دستگاه قضاوت می‌شود و شناخت کافی و علمی در این زمینه وجود دارد، قابلیت اطمینان در حد بالایی است. براساس مطالعات انجام‌شده، همچنین بهره‌گیری از یافته‌ها و تجربیاتی که طی مراحل پژوهش

نگهداری و تعمیرات و شیوه‌های عملی و بهینه آن، بسته به نوع ماشین‌آلات، ظرفیت و پتانسیل مجموعه و حتی اقلیم جغرافیایی، از جمله چالش‌های فراروی مدیران نگهداری و تعمیرات می‌باشد. در روش پایش وضعیت چون

انجام شده، می‌توان بیان کرد که یک مدل نگهداری و تعمیرات مؤثر از بخش‌های زیر تشکیل شده است (مدل نظری):

۱. کشف عیب<sup>۱</sup>

۲. ارزیابی عیب<sup>۲</sup>

۳. تصحیح عیب<sup>۳</sup>

این برنامه کمک می‌کند شروع مسئله یا عیب به‌وجود آمده کشف شود، سپس برای ارزیابی دلیل بروز مشکل و نوع عیب، امکانات لازم فراهم گردد و در نهایت مشکل در زمان مناسب و به‌طور مؤثر برطرف شود [۱].

بیرینگ‌ها (یاتاقان‌ها) را می‌توان به‌عنوان قلب ماشین‌آلات در تمام صنایع در نظر گرفت. نقش اصلی بیرینگ در تمام ماشین‌آلات ایجاد بستر مناسب حرکت و تحمل بار است. لذا کوچکترین خلل در کارکرد بیرینگ‌ها، ماشین‌آلات را از کار مؤثر یا حرکت بازمی‌دارد. چون اصطکاک و سایش در اجزای مکانیکی غیرقابل اجتناب است، بیرینگ‌ها هم به‌مرور دچار فرسایش می‌شوند و عمر مفیدشان به‌سر می‌آید و باید تعویض شوند. از اینرو، بیرینگ‌ها از جمله قطعات مصرفی محسوب می‌شوند و همواره در زمرهٔ سبد خرید کارخانه‌ها قرار دارند [۲]. طبق تجارب و بررسی‌های به‌عمل آمده، مصرف بیرینگ در صنایع ایران بیش از حد متعارف در صنایع کشورهای در حال توسعه یا پیشرفته است و به‌نظر می‌رسد رقم آن حداقل دو برابر باشد. این مقدار مصرف اضافی هزینه‌های بسیار گزافی به کشور تحمیل می‌کند. از اینرو پایش‌وضعیت و کاهش میزان مصرف بیرینگ می‌باید جزئی از دغدغهٔ مدیران صنعت قرار گیرد [۲].

کارکرد مناسب بیشتر ماشین‌ها و دستگاه‌های صنعتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای به حرکت هموار و یکنواخت بیرینگ‌ها بستگی دارد. در کاربردهای صنعتی بیرینگ به‌عنوان اجزای مکانیکی بحرانی شناخته می‌شوند و یک عیب اولیه در این اجزاء اگر به‌موقع تشخیص داده نشود به از کار افتادگی کلی دستگاه منجر می‌شود و امکان دارد

برخی مواقع سبب یک خرابی فاجعه‌بار گردد. عیوب بیرینگ‌ها امکان دارد در هنگام استفاده یا در هنگام فرایند ساخت آنها ایجاد شود و تشخیص این عیوب برای پایش وضعیت و نیز برای ارتقای کیفیت بازرسی یاتاقان‌ها بسیار مهم است. بلبرینگ گونه‌ای از یاتاقان‌ها هستند که در ابزارهای مختلف کاربردهای وسیعی دارند. این ادوات می‌توانند هم بارهای شعاعی و هم بارهای محوری را تحمل کنند و معمولاً در جاهایی به‌کار می‌روند که بار به‌نسبت کوچک باشد. در یک بلبرینگ بار از لایهٔ خارجی به ساچمه‌ها اعمال می‌شود و از آنجا فشار به لایهٔ داخلی منتقل می‌گردد. با توجه به کروی بودن ساچمه‌ها، نقطهٔ تماس آنها با لایه‌های درونی و بیرونی بسیار کوچک خواهد بود، در نتیجه می‌توانند بسیار نرم حرکت کنند؛ از سوی دیگر با توجه به کوچک بودن محل تماس، اگر فشار بیش از حدی به گوی‌ها وارد شود می‌تواند موجب تغییر شکل یا خردشدن آنها گردد.



شکل ۱. نمایی از بلبرینگ

واژهٔ بلبرینگ از دو بخش بال<sup>۴</sup> به‌معنای گوی و بیرینگ<sup>۵</sup> به‌معنای تحمل‌کردن تشکیل شده است. اساس کار بلبرینگ‌ها بر این است که مانع کشیده‌شدن سطوح روی یکدیگر می‌شوند و سطح تماس را نیز کاهش می‌دهند؛ در نتیجه اصطکاک بین سطوح به‌شدت کاهش می‌یابد [۳]. معمولاً ایجاد ترک در بلبرینگ‌ها به‌صورت شکاف از زیر سطح حمل‌کنندهٔ بار شروع شده و به‌تدریج به سطح سرایت

داده شده است. همچنین در شکل ۶ سیگنال‌های ارتعاشی (در حوزه زمان) این دو بلبرینگ (سالم و معیوب) نمایش داده شده است.



شکل ۴. نحوه قرارگیری پروپ حسگر روی بدنه آلترناتور



(ب)

(الف)

شکل ۵. نمایی از الف) بلبرینگ سالم، ب) بلبرینگ معیوب

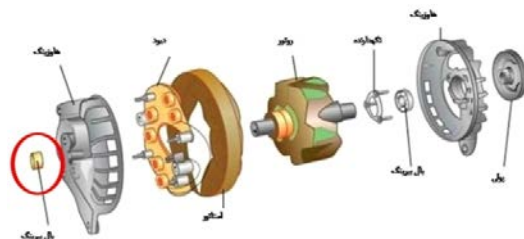
### ۳. اندازه‌گیری ارتعاشی در یاتاقان

یاتاقان‌ها در دستگاه‌های مختلف به‌عنوان مولد نوفه عمل می‌کنند؛ خواه سالم باشند، خواه در آنها عیب وجود داشته باشد. یاتاقان‌های ساچمه‌ای (بال‌بیرینگ‌ها)، که بار آنها به‌صورت شعاعی است، حتی اگر از لحاظ هندسی دارای عیب خاصی نباشند تولید ارتعاشات می‌کنند. علت این امر آن است که برای حمل بار از تعداد المان‌های محدودی استفاده می‌کند. تعداد المان‌های غلتشی و موقعیت آنها در ناحیه بار با چرخش یاتاقان‌ها تغییر می‌کند و این امر به تغییرات پرریزگی در سفتی اجزای یاتاقان‌ها منجر می‌شود و این تغییرات سفتی موجب تولید ارتعاشات می‌گردد که با نام ارتعاشات تغییرات مطلوبیت<sup>۸</sup> از آن یاد می‌شود [۵].

می‌کند. یک ترک (خرابی) معمولاً پس از شروع، با سرعت نسبتاً زیادی رشد می‌کند که نتیجه آن سطوح ارتعاش بالا و ذرات موجود در روغن است. به‌دلیل عمر باقیمانده نسبتاً کوتاه آغاز ترک به‌صورت معیاری برای معیوب‌بودن یاتاقان در کارکردهای بحرانی عمل می‌کند [۴].

### ۲. بلبرینگ مورد آزمایش

برای آزمایش‌های بلبرینگ معیوب، سیگنال‌های ارتعاشی از آلترناتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵<sup>۶</sup> تحصیل شد. در شکل ۲ تصویر شماتیک آلترناتور تراکتور مسی فرگوسن نمایش داده شده است. یاتاقان مورد آزمایش بلبرینگ انتهایی آلترناتور به‌شماره اس. کا. اف. ۶۲۰۱<sup>۷</sup> می‌باشد. بلبرینگ با سرعت ثابت ۳۹۰۰ دور بر دقیقه شروع به کار کرد. سیگنال‌های ارتعاشی از یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک جمع‌آوری شد (شکل ۳).



شکل ۲. اجزای آلترناتور



شکل ۳. سیستم تحصیل داده

حسگر دستگاه ارتعاش‌سنج روی محفظه آلترناتور دقیقاً روبروی بال‌بیرینگ نگه‌داشته شد. شکل ۴ محل قرارگیری حسگر را نشان می‌دهد. در شکل ۵ بلبرینگ سالم و معیوب (عیب ساچمه) که در ساچمه خود دچار خرابی است نمایش

### ۵. مدل پیشرفت خرابی

معمولاً به محض ایجاد خرابی در بلبرینگ، این روند به سرعت رشد می‌کند. همچنین به علت دمای بالایی که در هنگام چرخش بلبرینگ ایجاد می‌شود، خرابی یاتاقان شدت می‌گیرد. چون پیشرفت خرابی معمولاً از شروع آن سریع‌تر رخ می‌دهد، مطالعه‌ای توسط گوتزالس و هریس نشان داد که ۳ تا ۲۰ درصد از عمر مفید باقیمانده یک یاتاقان خاص پس از شروع خرد شدن باقی می‌ماند [۸]. این مطالعه دو ناحیه پیشرفت خرابی را شناسایی کرد. پیشرفت ساکن خرابی با رشد آرام عیب (ترک) شناخته شده و میزان ارتعاش، پهنای باند کمی را نشان می‌دهد. آغاز پیشرفت غیرساکن خرابی با افزایش مقدار ارتعاش پهنای باند هم-زمان است [۸].

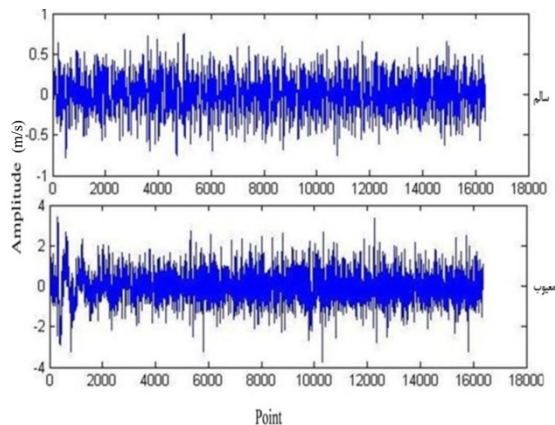
گوتزالس و هریس همچنین یک مدل پیشرفت خرابی را ارائه کردند. این مدل با استفاده از دو مقدار ثابت  $C$  و  $m$  نرخ پیشرفت خرد شدن را به شباهت خرد شدن مرتبط می‌کند. شباهت خرد شدن برحسب حداکثر تنش (مگاپاسگال)، تنش برشی بر میانگین (مگاپاسگال) و طول خرد شدن (میلی‌متر) تعریف می‌شود [۸].

$$\frac{dS_p}{dN} = C(W_{sp})^m \quad (4)$$

$$W_{sp} = (\sigma_{\max} + \tau_{\max}) \sqrt{\pi S_p} \quad (5)$$

### ۶. رشد عیب بر اثر خستگی - خوردگی

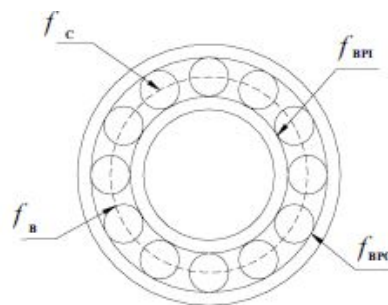
در مدل خستگی - خوردگی، آغاز و رشد شکاف وابسته به هندسه قطعه، بارگذاری به عنوان تابعی از زمان، سطح رطوبت، دما، تنش پسماند و میکروساختار ماده و شیمی ماده مانند PH و تمرکز یون‌های کلرید و دیگر یون‌های فلزی می‌باشد. خوردگی اغلب در سطوح، مانند سوراخ‌های بست و بین لایه‌های اتصالات چندلایه به وجود می‌آید. این خسارت معمولاً به شکل شکاف‌های کوچک است که با فرسایش به همراه خوردگی<sup>۱۲</sup> یا فرسایش شایشی<sup>۱۳</sup> شکل می‌گیرد. ممکن است شکاف‌های کوچک تحت خستگی -



شکل ۶. سیگنال ارتعاشی بلبرینگ

### ۴. بسامدهای خرابی بلبرینگ یاتاقان

بسامدهای گذر اصلی اجزای یک بلبرینگ، به راحتی توسط معادلات استاندارد محاسبه می‌شوند. شاخص‌ها با این موارد توصیف می‌شوند [۶]:



شکل ۷. فرکانس‌های اصلی بلبرینگ

بسامد گردش ساچمه<sup>۹</sup>:

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} n_b \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \right)^2 \right) \quad (1)$$

بسامد عبوری ساچمه از رینگ درونی<sup>۱۰</sup>:

$$BPF = \frac{n_b}{2} N \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \right) \quad (2)$$

بسامد عبوری ساچمه از رینگ بیرونی<sup>۱۱</sup>:

$$BPFO = \frac{n_b}{2} N \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \right) \quad (3)$$

به طوری که در روابط فوق،  $N$  برابر با دور بر ثانیه،  $n_b$  تعداد ساچمه،  $P_d$  قطر گام (میلی‌متر) و  $B_d$  قطر ساچمه است.

خوردگی در محل تمرکز به وجود آمده حفره‌های خوردگی یا سازوکار شکنندگی اتفاق بیافتد. تلاش مدلسازی نه تنها برای درک بهتر از سازوکار آسیب خوردگی تعیین کننده است، که در تهیه یک پلت فرم بنیادین برای تشخیص عیوب نیز مهم است. در ترکیب با اندازه گیری واقعی، مدل های خوردگی شالوده ارزیابی دقیق و قابل اعتماد را شکل می دهند.

## ۷. تبدیل فوریه سریع

در عمل سیگنال زمانی ارتعاشات که به وسیله تجهیزات الکترونیکی ثبت شده است، برای پردازش به صورت گسسته نمونه برداری می شود. اگر سیگنال زمانی گسسته باشد، تبدیل فوریه آن نیز به صورت گسسته خواهد بود و انتگرال به یک سری تبدیل خواهد شد. در این حالت تبدیل فوریه به شکل زیر بیان می شود:

$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) e^{-\frac{j2\pi n}{N} f_k} \quad (6)$$

به طوری که در رابطه اخیر  $K$  عددی صحیح و  $f_k$  بیانگر بسامد و  $N$  تعداد تقسیمات یک سیگنال است. تبدیل فوریه سریع کاربرد همان مفاهیم تبدیل فوریه معمولی را دارد، برای کاربری در تجهیزات الکترونیکی، به خصوص آنالایزرها، نیز دارای اهمیت فراوانی است. همچنین محاسبات روند پیشرفت عیب در حوزه بسامدی بهتر انجام می شود.

## ۸. نتایج و بحث

جدول ۱ ابعاد یاتاقان آزمایشی را نشان می دهد. ابعاد بر حسب میلی متر می باشد. در شکل ۸ یک طیف ارتعاش، که توسط تبدیل فوریه سریع ایجاد شده است، از مراحل اولیه آزمایش نمایش داده شده است. این داده ها قبل از آغاز خراب شدن (در حالت سالم) جمع آوری شده اند. برای مقایسه، یک تبدیل فوریه سریع متداول با متوسط حوزه بسامد ۱۰ هرتز، از داده های ارتعاشی حالت معیوب محاسبه شد (شکل ۹). همان طور که مشخص است، دامنه ارتعاشی

در حالت بلبرینگ معیوب به علت وجود خرابی نسبت به حالت سالم افزایش یافته است. این افزایش دامنه به این علت است که هر المان یاتاقان دارای یک مشخصه فرکانسی است که در صورت وجود یک عیب روی این المان، افزایش انرژی ارتعاشات در مشخصه فرکانسی چرخشی آن دیده خواهد شد. بیشترین مقدار دامنه ارتعاشی در نزدیکی بسامد ۱۰۰ هرتز حادث شده است.

جدول ۱. مشخصات بلبرینگ

شماره یاتاقان	قطر ساچمه	تعداد ساچمه	قطر گام
۶۲۰۱	۵/۵۳	۷	۲۱/۹۹

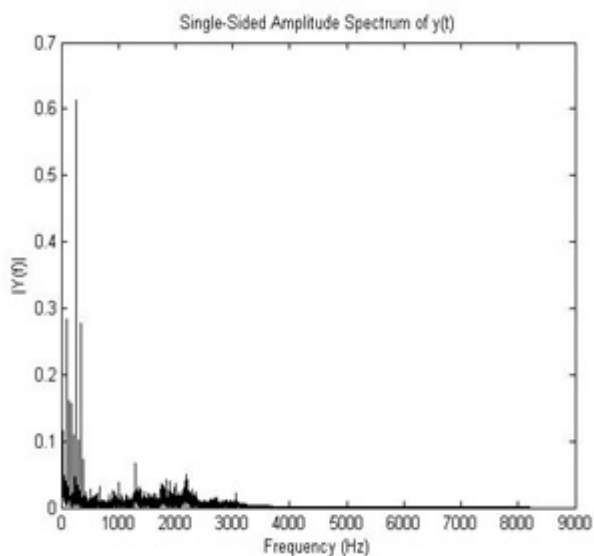
برای اینکه این افزایش دامنه بهتر مشخص شود، سه فرکانس اصلی در طیف ارتعاشی برای حالت سالم و معیوب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ قله های تعریف شده در این بسامد و نیز در میان هارمونیک های بسامد عبوری ساچمه مربوط به رینگ بیرونی، رینگ درونی و ساچمه مقادیر دامنه آنها نسبت به حالت سالم به دلیل وجود عیب (خرابی) افزایش یافته است.

## ۹. نتیجه گیری

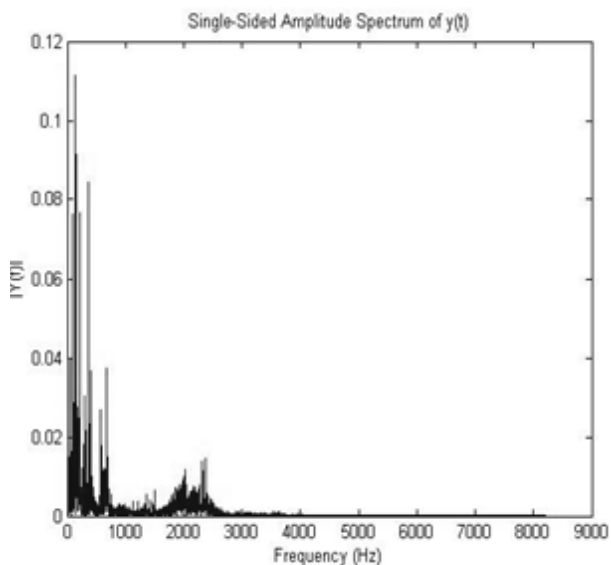
برای دستیابی به قابلیت گسترده پیش بینی در حوزه عمر یاتاقان یک جز غلطکی می توان از اطلاعات مبتنی بر مدل برای پیش بینی شروع یک عیب پیش از ظهور نشانه های تشخیص عیب استفاده کرد. در اغلب موارد، این پیش بینی ها فعالیت های نگهداری و تعمیرات به هنگام را برای جلوگیری از پیشرفت عیوب بر می انگیزد. اما گاهی به دلیل عدم قطعیت، ممکن است عیوب زودتر از پیش بینی ایجاد شوند. در این موارد، پیش بینی مبتنی بر مدل را با بروزرسانی مدل برای انعکاس این حقیقت که شروع یک عیب رخ داده است، تکمیل می کند. با استفاده از تبدیل فوریه سریع می توان سیگنال های ارتعاشی حاصل از بلبرینگ را، که در حوزه زمان می باشند، به حوزه فرکانس

به دلیل وجود عیب (خرابی) افزایش می‌یابد. با مشاهده این افزایش در دامنه طیف سیگنال ارتعاشی می‌توان معیوب بودن بلبرینگ را تشخیص داد. این روش تشخیص، روشی مؤثر و مطمئن برای عیب‌یابی بلبرینگ‌ها می‌باشد.

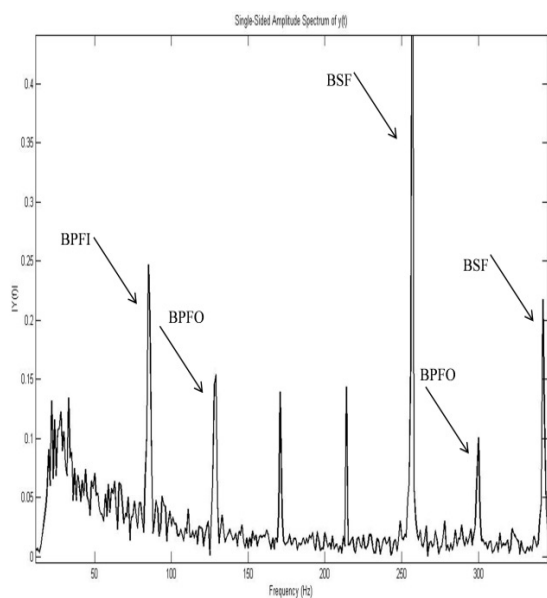
برده تا فرکانس عیب‌ها (خرابی) به خوبی خود را نشان دهند و با تجزیه و تحلیل طیف‌های فرکانسی بتوان سالم یا خراب بودن بلبرینگ را تشخیص داد. در حالت بلبرینگ معیوب دامنه فرکانس‌های خرابی نسبت به بلبرینگ سالم



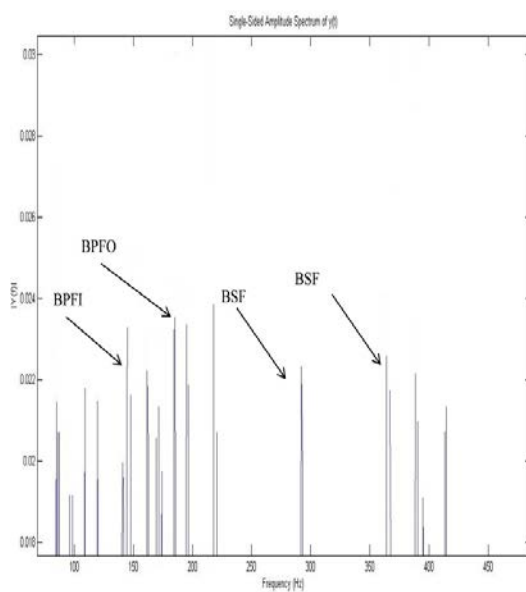
شکل ۹. طیف ارتعاشی بلبرینگ مربوط به حالت معیوب



شکل ۸. طیف ارتعاشی بلبرینگ مربوط به حالت سالم



شکل ۱۱. نمودار FFT بلبرینگ حالت معیوب با بسامدهای ارتعاشی



شکل ۱۰. نمودار FFT بلبرینگ حالت سالم با بسامدهای ارتعاشی

## ۱۰. مأخذ

- [۱] جوادیان، رسول. پایش وضعیت در ارتقای بهره‌وری ماشین‌آلات، تهران: پژوهشکده حمل‌ونقل وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰.
- [۲] آقامیرزایی، اعظم. مبانی تکنولوژی بیرینگ، ۱۳۸۷.
- [3] Sobel, Dava. "Novel antifriction device that Harrison developed for H-3 survives to the present day caged ball bearings." Longitude. London, Fourth Estate, 1995.
- [4] Khiripet, Noppadon. "An Architecture for Intelligent Time Series Prediction with Causal Information." Ph.D thesis, Georgia Institute of Technology, 2001.
- [5] Tandon, Choudhury. "A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings." *Tribology Int.* 32 (1999), pp. 469–480.
- [6] Zarei, Jafar. "Induction motors bearing fault detection using pattern recognition techniques." *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, (2012), pp. 68-73
- [۷] رضانی، سعید، مصطفی یوسفی، محسن طاهری. تشخیص و پیش‌بینی هوشمند عیوب برای سیستم‌های هوشمند، تهران: دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۹۰.
- [8] Harris, Kotzalas. "Fatigue failure progression in ball bearing." *Tribology*, No. 2, (2001), pp. 238-242.

## پی‌نوشت

- 
1. Fault diagnosis
  2. Fault Analysis
  3. Fault Correction
  4. ball
  5. bearing
  6. MF285
  7. SKF6201
  8. Varying Compliance Vibration
  9. BSF
  10. BPFI
  11. BPFO
  12. Corrosion
  13. Fretting Fatigue