عیب‌یابی بلبرینگ توسط آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی

اشکان شکریان[1*]، علی جعفری[2]، حجت احمدی[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد،۲- استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۳- استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: ashcan.shokrian@ut.ac.ir

چکیده

نگهداری و تعمیرات در تشخیص عیب برای صنعت، حمل و نقل، هوافضا، صنعت اتوماسیون و غیره بسیار حیاتی است. سازمان‌های صنعتی و نظامی به دنبال قابلیت اطمینان و دردسترس بودن سیستم‌ها و اجزای حیاتی آنها هستند. هدف اصلی، افزایش زمان کارکرد بدون خطا و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات است. چون تعداد نیروی انسانی کاهش یافته و تجهیزات پیچیده‌تر شده‌اند، نگهداری و تعمیرات هوشمند باید جایگزین سیستم‌های نگهداری و تعمیرات قدیمی شود. استفاده از متدهای نوین نگهداری و تعمیرات نظیر برنامه‌های پایش‌وضعیت 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. تشخیص و طبقه‌بندی عیوب برای بلبرینگ مبتنی بر داده‌های ویژگی ارتعاش به‌دست آورده شده. در این مقاله، روشی موثر و مطمئن مبتنی بر تحلیل ارتعاش برای عیب‌یابی بلبرینگ ارائه می‌شود. . بلبرینگ مورد مطالعه در این مقاله بلبرینگ آلترناتور تراکتور مسی فرگوسن۲۸۵ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بلبرینگ، آنالیز ارتعاشات، تبدیل فوریه

۱ - مقدمه

هدف از روش نگهداری و تعمیرات و پایش‌وضعیت (**CM**)، به دست آوردن آثار و نشانه وضعیت ماشین است. در این روش نیازی به توقف دستگاه (برای کسب اطلاع از وضعیت ماشین) نمی‌باشد و دستگاه به فعالیت خود ادامه می‌دهد. اساسی‌ترین هدف اجرای فن‌آوری پایش‌وضعیت، شناسایی عیب و همچنین پیشگیری از بروز احتمالی می‌باشد. اهداف و انتظارات مهم از اجرای **CM** در صنایع مختلف می‌توان به شرح ذیل خلاصه کرد:

۱- تشخیص و کنترل به موقع عیب قبل از بروز خسارت سنگین.

۲- افزایش عمر قطعات مصرفی.

۳- برآورد زمان دقیق تعمیر و برنامه‌ریزی تعمیرات.

٤- کنترل عمر و جلوگیری از تعویض مواد و قطعات قبل از پایان عمر.

حالت‌های خرابی بالقوه زیادی برای یاتاقان‌های عنصر غلتان وجود دارد و بحث کامل درباره همه حالت‌ها برای این مطالعه موردی غیر عملی است. از این‌رو به طور خاص به خرابی خستگی برخورد عنصر غلطان اشاره می‌شود که به عنوان خرد

شدن مطرح می‌باشد. هم‌چنین ممکن است حالت‌های خرابی دیگر شرایطی را بوجود آورند که به خرد شدن زودهنگام منجر شود. بسیاری از عیوب مکانیکی، علایمی را از خود بروز می‌دهند که با اندازه‌گیری ارتعاش دریافت می‌شوند. برای مثال در یک پمپ آب چنانچه یاتاقان موتور آن خراب شود، محور آن تغیر می‌یابد و از محل نسب خارج می‌شود در نتیجه دچار ارتعاش می‌شود.

یکپارچگی روش‌های تشخیص عیوب در بین یک سیستم مدیریت سلامت جامع مستلزم سه گام است که عبارتند از : داده-های دریافتی، سلامت کنونی یاتاقان و سلامت آینده یاتاقان. فرایند پیش‌بینی سلامت روی داده‌های دریافت شده شروع می-شود. نشانه‌های سیگنال سلامت یاتاقان (ارتعاش، پسماند روغن و غیره) برای تعیین شرایط جاری یاتاقان پایش می‌شوند. یک سری آزمایش به منظور تاسیس داده برای تشخیص عیوب انجام شد. سیگنال‌های ارتعاشی از یک یاتاقان ساچمه‌ای که دارای یک ساچمه صدمه دیده می‌باشد، گرفته شد.

بیرینگ‌ها را می‌توان به عنوان 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 موثر یا حرکت باز می دارد. از آن‌جا که اصطکاک و سایش در اجزای مکانیکی غیر قابل اجتناب است، بیرینگ‌ها هم به مرور دچار فرسایش می شوند و عمر مفید آن‌ها به سر آمده و باید تعویض شوند. از این‌رو بیرینگ‌ها جزو قطعات مصرفی به حساب می‌آیند و همواره جزو سبد خرید کارخانه‌ها قرار دارند.

برطبق تجارب و بررسی‌های به عمل 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 گزاف به کشور تحمیل می‌کند. از این‌رو پایش‌وضعیت و کاهش میزان مصرف بیرینگ می‌باید جزو دغدغه مدیران صنعت قرار گیرد (آ قامیرزایی، ۱۳۸۷).

کارکرد مناسب بیشتر ماشین‌ها و دستگاه‌های صنعتی به طور قابل ملاحظه‌ای به حرکت هموار و یکنواخت یاتاقان‌ها بستگی دارد. در کاربردهای صنعتی یاتاقان‌ها به عنوان اجزاء مکانیکی بحرانی شناخته می‌شوند و یک عیب اولیه در این اجزاء اگر به موقع تشخیص داده نشود به ازکارافتادگی کلی دستگاه منجر می شود و امکان دارد بعضی مواقع باعث یک خرابی فاجعه‌بار در ماشین شود. عیوب یاتاقان‌ها امکان دارد در هنگام استفاده یا در هنگام فرآیند ساخت آنها ایجاد شود و تشخیص این عیوب برای پایش وضعیت و نیز برای بالابردن کیفیت بازرسی یاتاقان‌ها بسیار مهم است.

بلبرینگ[1] گونه‌ای از یاتاقان‌ها هستند که کاربرد وسیعی در ابزارهای مختلف دارند. بلبرینگ‌ها می‌توانند هم بارهای شعاعی و هم بارهای محوری را تحمل کنند و معمولاً در جاهایی به کار می‌روند که بار به‌نسبت کوچک باشد. در یک بلبرینگ بار از لایه خارجی به ساچمه‌ها اعمال می‌شود و از آنجا فشار به لایه داخلی منتقل می‌گردد. با توجه به کروی‌بودن ساچمه‌ها، نقطه 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 تغییرشکل یا خردشدن آن‌ها گردد.

[1]Ball Bearing

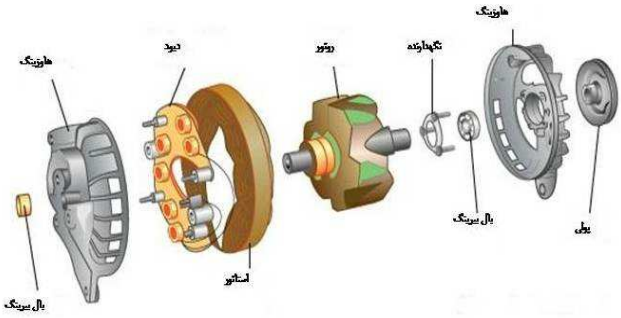
شکل ۱ - نمایی از بلبرینگ

کلمه بلبرینگ از دو بخش **ball** به معنای گوی و **bearing** به معنای تحمل‌کردن تشکیل شده‌است. 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 به شدت کاهش می‌یابد(Sobel, 1995).

معمولا خرد شدن بلبرینگ‌ها به صورت شکاف از زیر سطح حمل کننده بار شروع شده و به تدریج به سطح سرایت می‌کند. یک خرد شدن معمولا بعد از شروع، با سرعت نسبتا زیادی رشد می‌کند که نتیجه آن سطوح ارتعاش بالا و ذرات موجود در روغن است. به دلیل عمر باقیمانده نسبتا کوتاه آغاز خرد شدن به‌صورت معیاری برای خرابی یاتاقان در کارکردهای بحرانی عمل می‌کند (Khiripet, 2001).

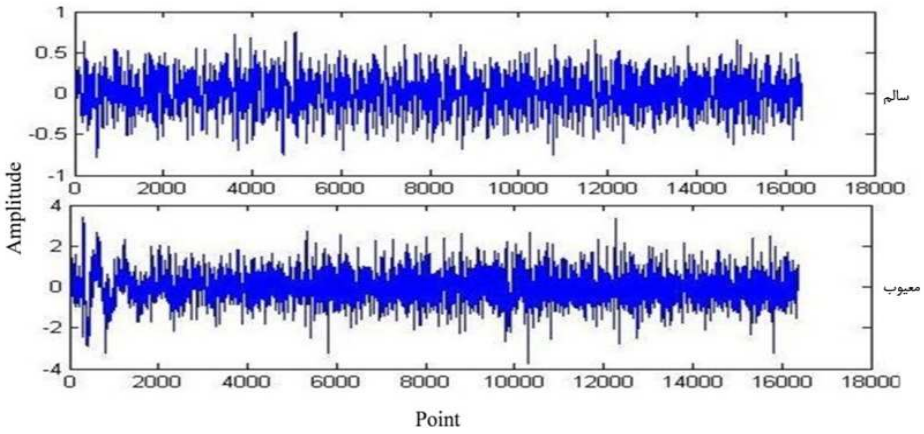
۲- مواد و روش‌ها

برای آزمایش‌های بلبرینگ معیوب، سیگنال‌های ارتعاشی از آلترناتور تراکتور مسی‌فرگوسن ۲۸۵(**MF285**) تحصیل شد. شکل(۲) تصویر شماتیک آلترناتور تراکتور مسی‌فرگوسن را نشان می‌دهد. یاتاقان مورد آزمایش بلبرینگ انتهایی آلترناتور به شماره**SKF6201** می‌باشد**.** بلبرینگ با سرعت ثابت ۳۹۰۰ دور بر دقیقه شروع به کار کرد. سیگنال‌های ارتعاشی از یک شتاب‌سنج سیانواکریلیت- مونتد که سوپر ژل نامیده می‌شود، جمع‌آوری شد.



شکل ۲- اجزای آلترناتور

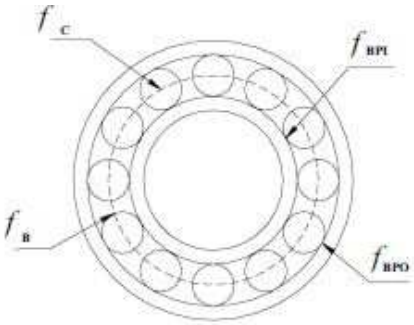
در شکل(۳) سیگنال‌های ارتعاش(در حوزه زمان) از یک یاتاقان سالم و یک یاتاقان معیوب نشان داده شده است.



شکل ۳- سیگنال ارتعاشی بلبرینگ

۲-۱- بسامدهای خرابی بلبرینگ یاتاقان

بسامدهای گذر اصلی اجزاء یک بلبرینگ، به راحتی به وسیله معادلات استاندارد محاسبه می‌شوند. شاخص‌ها با این موارد توصیف می‌شوند(Zarei, 2012):



شکل٤ – فرکانس های اصلی بلبرینگ

BSF: بسامد گردش ساچمه

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} n_b \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2\right) \quad (۱)$$

BPFI: بسامد عبوری ساچمه از رینگ درونی

$$BSFI = \frac{n_b}{2} N \left(1 + \frac{B_d}{P_d}\right) \quad (۲)$$

BPFO: بسامد عبوری ساچمه از رینگ بیرونی

$$BSFO = \frac{n_b}{2} N \left(1 - \frac{B_d}{P_d}\right) \quad (۳)$$

در روابط بالا $\mathbf{N}$ برابر با دور بر ثانیه (**RPS**)، $\mathbf{n_b}$ تعداد ساچمه، $\mathbf{P_d}$ قطر گام (میلیمتر) و $\mathbf{B_d}$ قطر ساچمه می‌باشد.

۲-۲- استخراج ویژگی با استفاده از پوشش بسامد بالا

اگر چه بسامد مشخصه‌های یاتاقان به سادگی قابل محاسبه هستند، اما همیشه به‌وسیله تکنیک‌های متداول حوزه بسامد به‌سادگی کشف نمی‌شوند. مقادیر ارتعاش در این بسامدها اغلب به‌دلیل وجود عیب اولیه و بعضی از نویزها یا عیوب توسعه یافته از نویزهای زمینه قابل تشخیص نیستند و به‌وسیله ارتعاش‌های با مقادیر زیاد از دیگر منابع پوشانده می‌شوند. عیوب

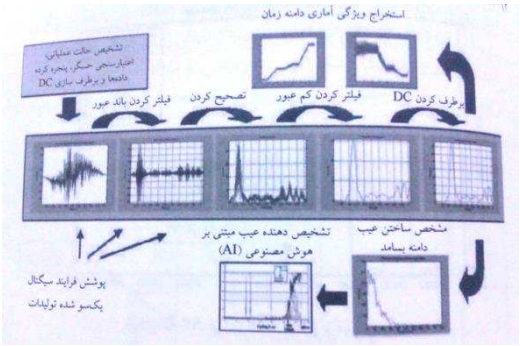
بلبرینگ نیروهای تکانشی به‌وجود می‌آورد و بسامدهای بسیار بالاتری را ایجاد می‌کند.انرژی ضربه یک تکنیک استخراج ویژگی ارتعاش مبتنی بر پوشش چندباندی است که در شکل (۵) نشان داده شده است. فرایند پوششی شامل موارد زیر است (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۰).

۱- فیلتر کردن میان‌گذر سیگنال ارتعاش‌خام

۲- تصحیح سیگنال فیلتر شده میان‌گذر موج کامل برای استخراج پوشش

۳- سیگنال تصحیح شده از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شود تا سیگنال حامل بسامد بالا حذف شود.

٤- حذف سیگنال‌هایی که محتوای **DC** باشند.



شکل ۵- فرایند تفکیک بسامد بالا

فرایند انرژی ضربه در داده‌های آزمایش عیب ایجاد شده که با استفاده از ابزار آزمایشی یاتاقان جمع‌آوری شده‌اند، به‌کار برده شد. برای تامین شناسایی واضح از بسامدهای عیب، از چند فیلتر میان‌گذر و پایین‌گذر استفاده شد تا نواحی مختلف ارتعاش را تحلیل کند. استفاده از چند فیلتر، جستجوی بسیاری از رزوناس‌های ممکن آزمایش سوارکردن یاتاقان و اجزا آنرا امکان-پذیرکرد(رمضانی و همکاران، ۱۳۹۰).

برای ایجاد شناسایی شفاف از بسامد عیب، چند فیلتر میان‌گذر و پایین‌گذر برای تحلیل نواحی مختلف طیف ارتعاش به کار گرفته می‌شوند. استفاده از فلیترهای چندگانه جستجوی پیوندهای احتمالی در بسیاری از وسایل آزمایشی یاتاقان و اجزاء آن‌را امکان‌پذیر می‌کند.

۲-۳- مدل پیشرفت خردشدن

معمولا به محض ایجاد خرابی در بلبرینگ، به سرعت رشد می‌کند. همچنین به علت دمای بالایی که در هنگام چرخش بلبرینگ ایجاد میشود خرابی یاتاقان را شدت می‌دهد. چون پیشرفت خرد شدن معمولا از شروع آن سریع‌تر رخ می‌دهد،

مطالعه‌ای توسط گوتزالس و هریس۲ نشان داد که ۳ تا ۲۰ درصد از عمر مفید باقیمانده یک یاتاقان خاص پس از شروع خرد شدن باقی می‌ماند. این مطالعه دو ناحیه پیشرفت خرد شدن را شناسایی کرد. پیشرفت ساکن خرد شدن با رشد آرام خرد شدن شناخته شده و میزان ارتعاش، پهنای باند کمی را نشان می‌دهد. آغاز پیشرفت غیر ساکن خرد شدن با افزایش مقدار ارتعاش پهنای باند هم‌زمان است(رمضانی و همکاران، ۱۳۹۰).

همچنین کوتزالس و هریس یک مدل پیشرفت خرد شدن را ارایه کردند. این مدل بااستفاده از دو مقدار ثابت **m,C**، نرخ پیشرفت خرد شدن **dSp/dN**را به شباهت خرد شدن **Wsp** مرتبط می‌کند. شباهت خرد شدن بر حسب حداکثر تنش**σmax** (مگاپاسگال)، تنش **برشی** بر میانگین **τavg**(مگاپاسگال) و طول خرد شدن **Sp** (میلیمتر) تعریف می-شود(Kotzalas & Harris, 2001).

$$\frac{dSp}{dN} = C\left(W_{sp}\right)^{m} \qquad (۱)$$

$$W_{sp} = (\sigma_{max} + \tau_{avg})\sqrt{\pi Sp} \qquad (۲)$$

۲-٤- 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 چند لایه به وجود می‌آید. این خسارت معمولا به شکل شکاف‌های کوچک است که با فرسایش به همراه خوردگی۳ یا فرسایش شایشی٤ شکل می‌گیرد. ممکن است شکاف‌های کوچک تحت خستگی – خوردگی در محل تمرکز به وجود آمده حفره‌های خوردگی یا مکانیزم شکنندگی اتفاق بیافتد.تلاش مدل‌سازی نه تنها برای درک بهتر از مکانیزم آسیب خوردگی تعیین کننده است بلکه در تهیه یک پلت‌فرم بنیادین برای تشخیص عیوب نیز مهم است. در ترکیب با اندازه‌گیری واقعی، مدل‌های خوردگی شالوده ارزیابی دقیق و قابل اعتماد را شکل می‌دهند.

۲-۵- تبدیل فوریه سریع

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

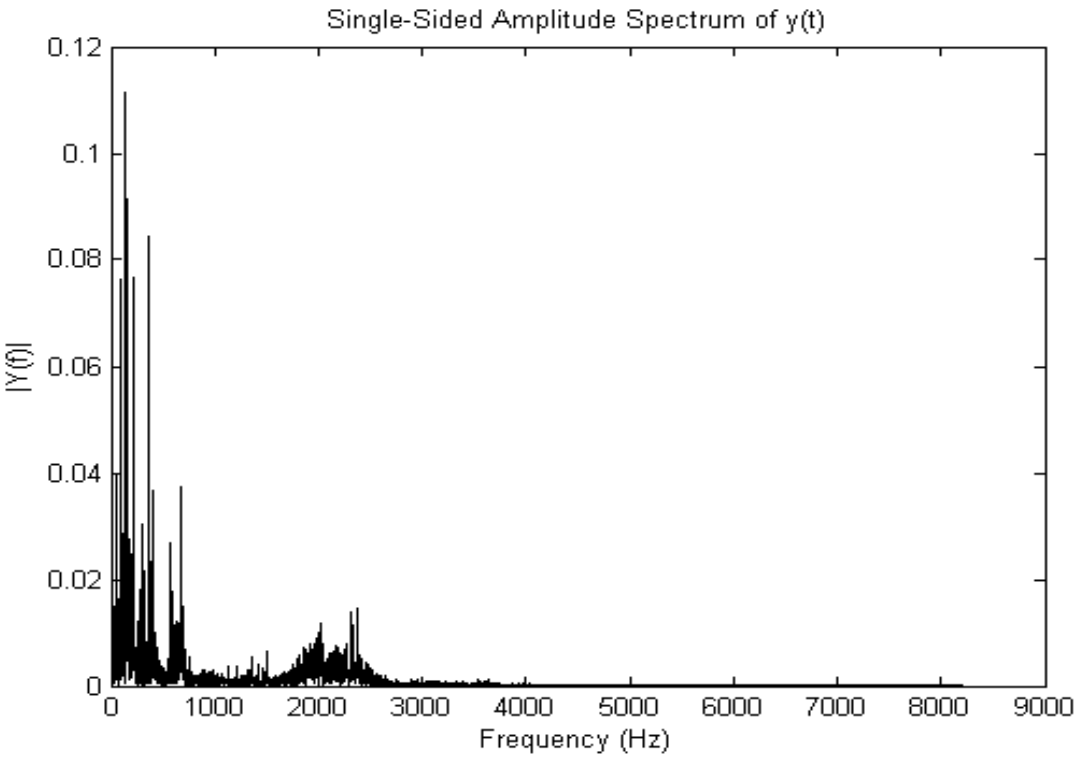
$$G(f_k) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} g(t_n)\, e^{-j2\pi Kk/N} \qquad (۳)$$

[2] Kotzalas and Harris
[3]Corrosion
[4]Fretting Fatigue

در رابطه (۳) $\mathbf{K}$ یک عدد صحیح و $\mathbf{f_k = \frac{K}{T}}$ بیانگر بسامد و $\mathbf{N}$ تعداد تقسیمات یک سیگنال است. تبدیل فوریه سریع[5] (**FFT**) کاربرد همان مفاهیم تبدیل فوریه معمولی را دارد. ولی برای کاربری در تجهیزات الکترونیکی به‌خصوص آنالایزرها دارای اهمیت فراوانی است. همچنین محاسبات روند پیشرفت عیب[6]، در حوزه بسامدی بهتر انجام می‌شود.

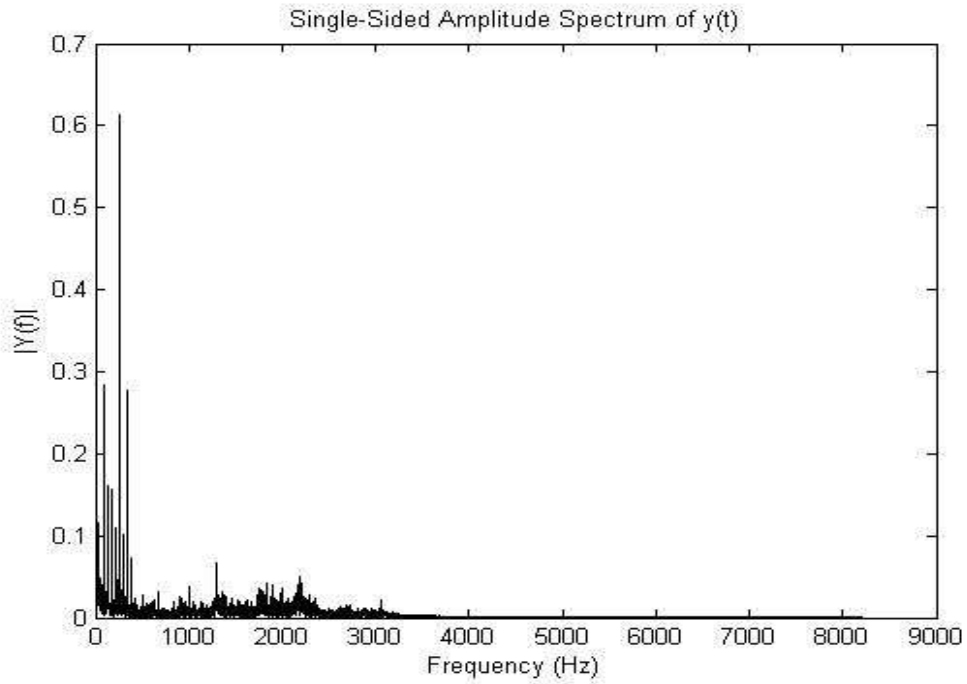
۳- نتیجه‌گیری

در شکل(٦) یک طیف ارتعاش که توسط تبدیل فوریه سریع(**FFT**) ایجاد شده‌اند از مراحل اولیه آزمایش نشان داده شده است. این داده‌ها قبل از آغاز خرد شدن (در حالت سالم) جمع‌آوری شده‌اند. برای مقایسه، یک **FFT** متداول با متوسط حوزه بسامد ۱۰، از داده‌های ارتعاشی حالت معیوب محاسبه شد(شکل۷). در طیف ارتعاشی شکل(۸) قله‌های واضح تعریف شده در این بسامد و نیز در میان هارمونیک‌های بسامد عبوری ساچمه مربوط به رینگ بیرونی، رینگ درونی و ساچمه به چشم می‌خورد که با ایجاد شدن خرابی مقادیر آنها افزایش یافته است.

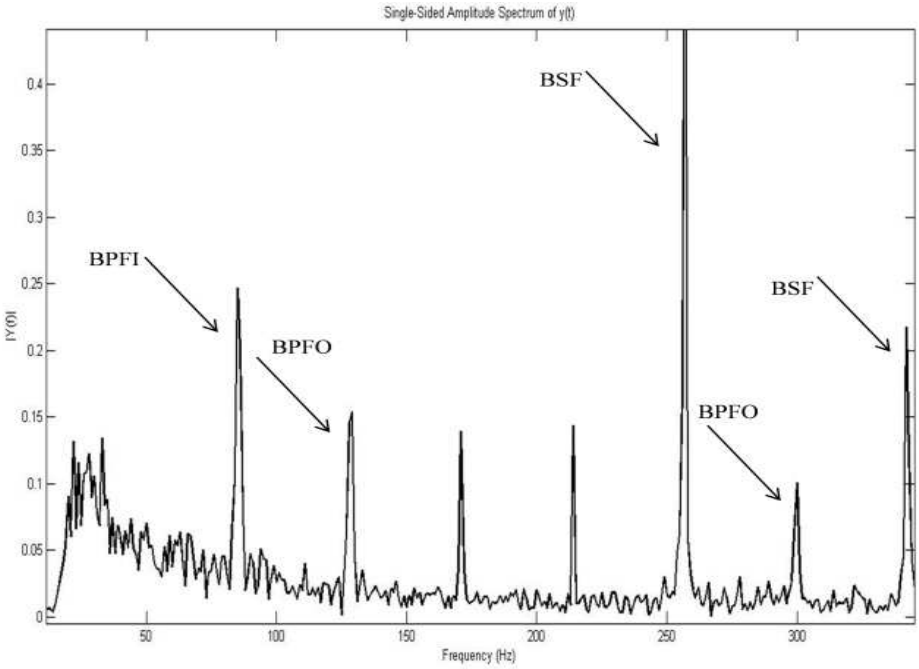


شکل ٦– طیف ارتعاشی بلبرینگ مربوط به حالت سالم

[5] Fast Fourier Transform
[6] Trending



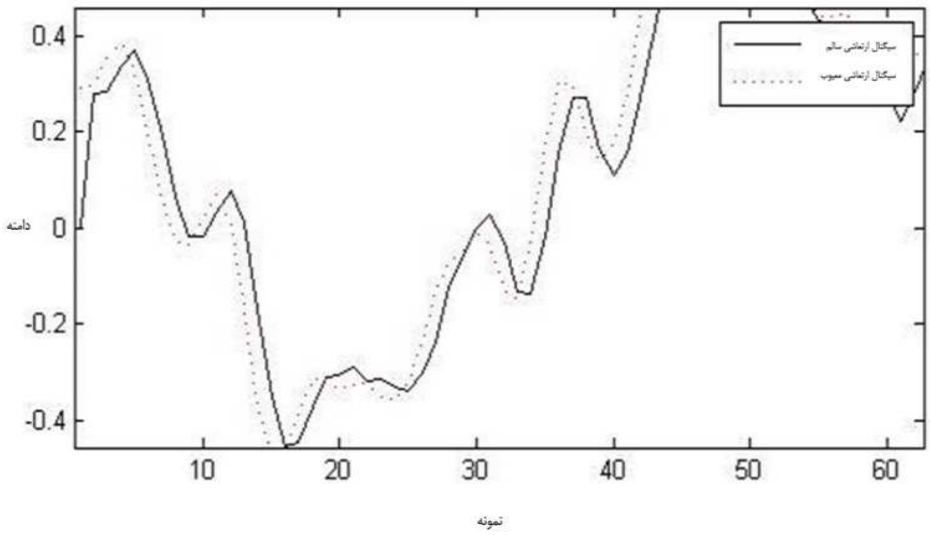
شکل ۷– طیف ارتعاشی بلبرینگ مربط به حالت معیوب



شکل ۸– نمودار FFT بلبرینگ حالت معیوب با بسامدهای ارتعاشی

برجسته‌ترین ویژگی‌ها در طیف فرکانسی، بسامد رینگ درونی و بیرونی و بسامد ساچمه بلبرینگ می‌باشد. مشاهده این ویژگی‌ها نشانگر توانایی تبدیل فوریه در تشخیص عیوب اولیه است.

اگر چه بیشترین نقاط پیک شناسایی شدند، اما هنوز بسیاری از آنها ناشناخته باقی مانده‌اند. شکل(۹) پیشرفت خرد شدن ساچمه بلبرینگ را نسبت به حالت سالم را نشان می‌دهد. این شکل همچنین پراکندگی وسیعی از شروع خرد شدن را که از شیب خطوط قابل استنباط است، را نشان می‌دهد.



شکل ۹- پیشرفت خرد شدن حالت معیوب با حات سالم

۳-نتایج

برای دست‌یابی به قابلیت گسترده پیش‌بینی در حوزه عمر یاتاقان یک جز غلطکی می‌توان از اطلاعات مبتنی بر مدل برای پیش‌بینی شروع یک عیب پیش از ظهور نشانه‌های تشخیص عیب استفاده کرد. در اغلب موارد، این پیش‌بینی‌ها فعالیت‌های نگهداری و تعمییرات "بهنگام" را برای جلوگیری از پیشرفت عیوب بر می‌انگیزد.

اما گاهی به دلیل عدم قطعیت، عیوب ممکن است زودتر از پیش‌بینی ایجاد شوند. در این موارد، پیش‌بینی مبتنی بر مدل را با بروزرسانی مدل برای انعکاس این حقیقت که شروع یک عیب رخ داده است، تکمیل می‌کند.

با استفاده از تبدیل فوریه سریع(**FFT**) می‌توان سیگنال‌های ارتعاشی تحصیل شده از بلبرینگ را که در حوزه زمان می‌باشند را به حورزه فرکانس برده تا فرکانس عیب‌ها(خرابی) به خوبی خود را نشان دهند و با تجزیه و تحلیل طیف‌های فرکانسی به‌توان سالم یا خراب بودن بلبرینگ را تشخیص داد.

مراجع

۱. آ قامیرزایی، ا. ۱۳۸۷. مبانی تکنولوژی بیرینگ. ۷۰ ص.

۲. رمضانی، س. یوسفی، م و طاهری، م ۱۳۹۰ . تشخیص و پیش بینی هوشمند عیوب برای سیستم های هوشمند. چاپ اول. دانشگاه امام حسین (ع). ٤۷۸ص.

3. Kotzalas, M. & Harris, T. 2001. Fatige Failure Progression in Ball Bearing" Triboligy (2), pp. 238-242.

4. Sobel, D. 1995. novel antifriction device that Harrison developed for H-3 survives to the present day caged ball bearings. Longitude. London, Fourth Estate, pp. 103.

5. Khiripet, N. 2001. An Architecture for Intelligent Time Series Prediction with Causal Information. Ph.D thesis, Georgia Institue of Technology.

6. Zarei, J. 2012. Induction motors bearing fault detection using pattern recognition techniques"Expert Systems with Applications. Vol 39, 68-73.

Fault Diagnosis of Ball Bearing Used Vibration Signal Analysis

Abstract

Maintenance is vital for fault diagnosis in different industries such as transportation, aerospace, industrial automation and etc. Industrial and military organizations are seeking reliability and availability of their systems and related aiming to increase the operating time and reduce the maintenance costs. It is necessary to replace the old systems' maintenance with the intelligent maintenance as the human resource has decreased, while the machinery and equipment have become more complex and advanced. Application of new methods of maintenance such as condition monitoring by vibration analysis provides useful information about machine performance for the engineers to help them to support, control and optimize the production. Vibration analysis is used for detection of ball bearing defection. In this paper an efficient and reliable method based on vibration analysis was presented for fault diagnosis in ball bearings. Vibration signals from the alternator of massey ferguson (MF 285) type tractor was studied.

Keywords: Ball Bearing, Vibration Analyze, Furrier Transform