

تحلیل Offline سیگنال های ارتعاشی جهت تشخیص عیوب مکانیکی با استفاده از تحلیل موجک و روش های حسابگری نرم

دانیال بوستان
دانشگاه فردوسی مشهد
dbustan@ieee.org

ناصر پریرز
دانشگاه فردوسی مشهد
n-pariz@ferdowsi.um.ac.ir

کلمات کلیدی: تحلیل موجک، سیگنال های ارتعاشی، حسابگری نرم

۱- مقدمه

سالها تجربه و کاربردهای گوناگون، مزایای تشخیص به موقع عیب را بر همگان روشن ساخته است. دسترسی بیشتر به ماشین آلات، جلوگیری از توقف ناخواسته آنها، کاهش میزان خسارات وارده بر ماشین ها، طولانی تر شدن بازه زمانی بازدیدهای کلی و دوره های و... تنها چند نمونه از مزایای تشخیص به موقع عیب در ماشین آلات می باشد.

برای بهره مندی از مزایای فوق و مزایای دیگر نیاز به آگاهی از وضعیت فعلی عملکرد ماشین است. ارتعاشات ماشین، وضعیت یاتاقان ها، سرعت و سایر متغیرها، می توانند به عنوان معیاری از وضعیت کارکرد فعلی ماشین به کار روند. انتخاب پارامتر مناسب و بازه اندازه گیری نه تنها به پیچیدگی و مقادیر متغیر، بلکه به اهمیت ماشین در روند اجرای پروسه تولید نیز وابسته است. بطور کلی دو روش کلی جمع آوری اطلاعات موجود است.

۱. **جمع آوری آنی و در لحظه اطلاعات (Online)** که وضعیت کارکرد ماشین را بصورت دائمی و به کمک سنسورها و دستگاه هایی که به طور دائم در سیستم موجود هستند، نشان می دهد.

۲. **جمع آوری اطلاعات بصورت برون خطی (Offline)** که همان اطلاعات به کمک دستگاه های قابل حمل اندازه گیری و ثبت می شوند. معمولاً دستگاه های مورد استفاده در این روش از دقت و حساسیت بالاتری نسبت به دستگاه های مورد استفاده در روش قبل برخوردار هستند.

وضعیت ماشین به کمک اندازه گیری هایی نظیر ارتعاشات ماشین، جابجایی، دما و... به راحتی قابل تشخیص است. اما اندازه

گیری این پارامترها به شدت وابسته به میزان نویز محیط و شرایط کارکرد ماشین است بطوریکه در برخی موارد شدت نویز به حدی است که متغیر اندازه گیری شده در مقابل آن ناچیز فرض می شود و در مواردی نیز وضعیت ماشین در حالت کاری عادی خود (مثلاً در بار کامل) با شرایط کاری دیگری (مانند بی باری) کاملاً متفاوت تشخیص داده می شود.

در مورد جمع آوری اطلاعات به روش Offline نیز حساسیت به لحظه شروع نمونه برداری جزء مهمترین ضعف های روش های موجود بشمار می رود.

مشکلات فوق و نیز عدم قطعیت در تشخیص عیب - زیرا گاهی اوقات ماشین در شرایطی قرار ندارد که لزومی به توقف کارکرد آن باشد و این شرایط با شرایط ایده آل ماشین نیز فاصله زیادی دارد- پژوهشگران را در سال های اخیر به جستجوی روش های جدیدتر و کاراتر واداشته است. نتیجه این پژوهش ها، استفاده از روش های تحلیلی جدیدتر و استفاده از روش های استنتاج هوشمند بجای روش های مشاهده ای و مقایسه ای سنتی است.

۲- ساختار

در این پژوهش به کمک تحلیل موجک و به کمک wavelet toolbox نرم افزار MATLAB داده های ارتعاشی، تا هشت مرحله و با استفاده از موجک db3 مورد تحلیل قرار گرفته و از هر مرحله یک نمونه - که نماینده آن مرحله به شمار می رود - به عنوان ورودی سیستم استنتاج برگزیده می شود. سیستم استنتاج و تصمیم گیری به کمک این ورودی ها و نیز یک ورودی دیگر که نمایانگر وضعیت کارکرد ماشین است، به تهیه مدلی از وضعیت ماشین می پردازد. این مدل که متشکل از تعدادی قواعد زبانی است، از این پس قادر خواهد بود که با داشتن ورودی های جدید، وضعیت ماشین را مشخص نماید. در این سیستم خروجی حدود 0 به معنای سالم بودن سیستم و خروجی بالاتر از 0.5 به معنای وجود عیب در سیستم خواهد بود. سیستم استنتاج استفاده شده در این پژوهش بکمک نرم افزار Adaptive Fuzzy Modeller (AFM) نسخه 2 تولید شده است. سپس این سیستم دوباره توسط MATLAB فراخوانی شده و سایر مراحل مانند تعیین وضعیت داده های جدید توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

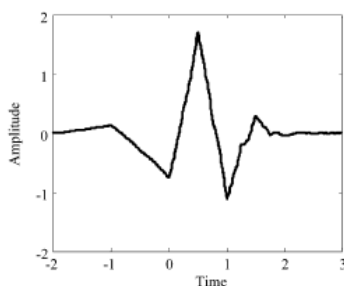
۳- تبدیل موجک

موجک ها توابع ریاضی هستند که سیگنال را به قسمت های مختلف فرکانسی تشکیل دهنده خود، تجزیه می کنند و هر قسمت را با توجه به دقتی که وابسته به فرکانس آن می باشد، مورد بررسی قرار می دهد. مزایای موجک در برابر تحلیل فوریه در سیگنال- هایی که دارای ناپیوستگی یا تغییرات سریع هستند، مشخص می شود [10].

مفهوم موجک اولین بار توسط Morlet در سال ۱۹۸۴ مطرح شد و او با کمک Grossman، تبدیل موجک پیوسته را مطابق رابطه (۱) فرموله نمود [6]:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^{\infty} s(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

همانطور که در تبدیل فوریه، یک سیگنال بصورت مجموع یک سری موج‌های سینوسی با فرکانسهای مختلف بیان می‌شود، در تحلیل موجک، سیگنال به مجموع یک سری از موجک‌های بدست آمده از جابجا کردن و گسترش دادن (Scaling) یک موجک مادر (Mother Wavelet) شکسته می‌شود. موجک، بر خلاف موج سینوسی (پایه تبدیل فوریه) که نامتناهی و کاملاً پیوسته و متناوب است، یک سیگنال زمانی محدود با متوسط دامنه صفر و معمولاً نامتقارن و بی نظم است. یک نمونه موجک در شکل ۱ نمایش داده شده است.



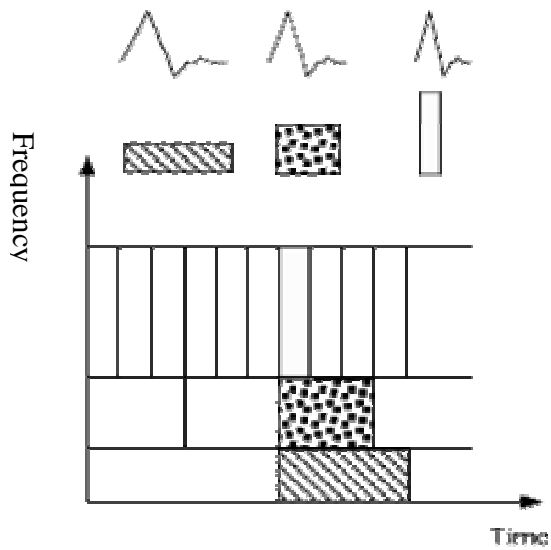
شکل ۱: یک نمونه موجک

تعریف تبدیل موجک پیوسته در رابطه (۱) آورده شده است. در این رابطه $\psi(t)$ موجک مادر، علامت ستاره نشانه مزدوج مختلط، کمیت a ضریب انبساط (Scale) موجک و بیانگر میزان کشیدگی موجک ($a \neq 0$) و کمیت b جابجایی زمانی موجک است [6].

وقتی از ضرایب a بزرگتر (بزرگتر از یک) استفاده می‌کنیم، موجک منبسط شده و روی فرکانسهای کوچکتر تمرکز پیدا می‌کند و برعکس وقتی از ضرایب a کوچکتر (کوچکتر از یک) استفاده می‌کنیم، موجک منقبض شده و روی فرکانسهای بزرگتر تمرکز پیدا می‌کند. همانطور که از رابطه (۱) برمی‌آید، به ازای هر a (هر ضریب انبساط) در b های مختلف (زمان‌های مختلف)، عددی بدست می‌آید که بیانگر میزان انطباق موجک $\psi(t/a)$ با سیگنال $s(t)$ در زمان b است.

همانطور که گفته شد، موجک مادر تابعی از ضریب انبساط موجک a و زمان تاخیر موجک b است. رزولوشن زمانی و فرکانسی این تابع پایه، وابسته به کمیت a است. با افزایش a رزولوشن زمانی کاهش و رزولوشن فرکانسی، افزایش می‌یابد و برعکس. در نتیجه تحلیل موجک در فرکانس‌های پایین دارای رزولوشن فرکانسی خوب و در فرکانسهای بالا دارای رزولوشن زمانی خوب است [6].

شکل ۲ این مطلب را به شکل ترسیمی نمایش می‌دهد. در این شکل تغییر رزولوشن با تغییر فرکانس به خوبی مشهود است.



شکل ۲: تغییر رزولوشن با تغییر فرکانس

از آنجا که انتخاب مقادیر a و b بصورت پیوسته باعث افزایش حجم محاسبات می شود، معمولاً a و b بصورت گسسته در نظر گرفته می شوند. یک انتخاب مناسب بصورت $a = 2^{-j}$ و $b = k2^{-j}$ می باشد که در آن k مقادیر صحیح می باشد. در این صورت رابطه تبدیل موجک که به تبدیل موجک دو تایی معروف است، تابعی از k و j بوده و به صورت رابطه (۲) درمی آید.

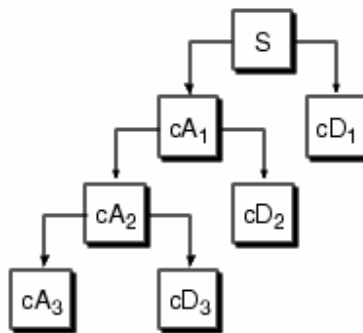
$$W_f(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{j}{2}} \psi^*(2^j t - k) dt \quad (2)$$

با استفاده از ساختار بانک فیلتری، تبدیل موجک گسسته با فیلتر مقیاس $h(n)$ که یک فیلتر پایین گذر مربوط به تابع مقیاس $\varphi(t)$ است و فیلتر موجک $g(n)$ که یک فیلتر بالا گذر مربوط به تابع موجک $\psi(t)$ است، مطابق روابط زیر پیاده می شود [12]:

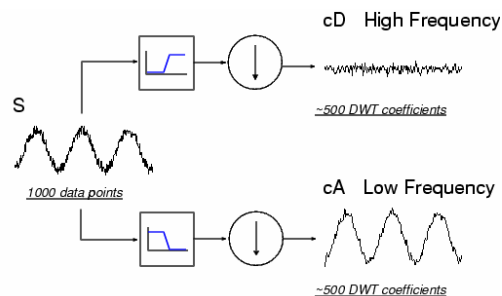
$$\varphi_j(t) = \sum_k h(k) 2^{\frac{j+1}{2}} \varphi(2^{j+1}t - k) \quad (3)$$

$$\psi_j(t) = \sum_k g(k) 2^{\frac{j+1}{2}} \varphi(2^{j+1}t - k) \quad (4)$$

مراحل اساسی تبدیل موجک در شکل ۳ نشان داده شده است که می تواند در دو جهت مختلف انجام شود. تجزیه و بازسازی. در مرحله تجزیه، سیگنال گسسته f از فیلترهای پایین گذر L و بالاگذر H عبور می کند و بردارهای cA_1 و cD_1 بدست می آیند. المانهای بردار cA_1 ضرایب تقریب و المانهای بردار cD_1 ضرایب جزئیات نام دارند. علامت \downarrow در شکل ۴ نشان دهنده کاهش نرخ نمونه برداری با ضریب ۲ می باشد. عمل فوق دوباره بر روی cA_1 اجرا شده تا ضرایب cA_2 و cD_2 بدست آیند. دوباره عمل فوق روی cA_2 اجرا شده و به همین ترتیب این روند می تواند ادامه پیدا کند تا تنها به یک نمونه از سیگنال پائین گذر برسیم.



شکل ۳: مراحل اساسی تبدیل موجک



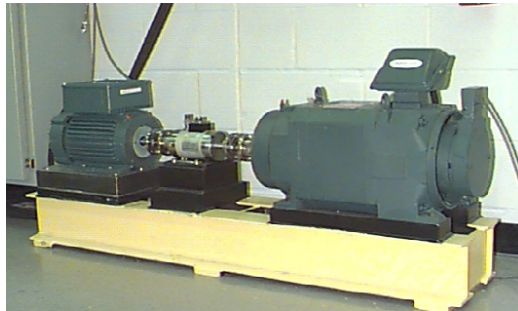
شکل ۴: عبور سیگنال از فیلترها و عمل Down sampling

۳-۱- تبدیل موجک بسته ای

در تبدیل موجک متعامد در هر مرحله ضرایب تقریب به دو قسمت تقسیم می شوند و پس از تقسیم، یک بردار از ضرایب تقریب و یک بردار از ضرایب جزئیات را خواهیم داشت. بنابراین تقسیم بندی صفحه زمان-فرکانس، همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، به صورت لگاریتمی انجام می شود. به همین دلیل مؤلفه های فرکانس پایین با دقت بیشتری بررسی می شوند، در حالیکه به علت بزرگ بودن پهنای فرکانسی پنجره در فرکانسهای بالا، تجزیه و تحلیل مؤلفه های فرکانس بالا با دقت کمتری انجام می شود. تبدیل موجک بسته ای در واقع تعمیم تبدیل موجک می باشد که در هر سطح آن ضرایب

تقریب و ضرایب جزئیات به دو قسمت تقسیم می شوند. بنابراین صفحه زمان-فرکانس به صورت خطی تقسیم بندی می شود که در نتیجه دقت فرکانسی در تمام نواحی یکسان می گردد. ضرایب تبدیل موجک بسته ای از فرمول هایی که کمی با فرمول های تبدیل موجک متفاوتند بدست می آیند که این فرمول ها در [12] آورده شده اند.

۴- سیستم مورد آزمایش



شکل ۵: سیستم مورد آزمایش

همانطور که در شکل ۵ دیده می شود، سیستم مورد آزمایش، شامل یک موتور 2 hp است که در سمت چپ قرار دارد، یک سنسور گشتاور سنج/ یک انکدر که در وسط شکل دیده می شود، مدارات کنترل الکترونیکی که در شکل دیده نمی شوند و یک دینامومتر که در سمت راست شکل دیده می شود، نیز به موتور ذکر شده متصل شده اند.

بلبرینگ هایی که آزمایش روی آنها انجام می شود، نگه دارنده شافت موتور هستند. دو بلبرینگ یکی در قسمتی Drive End و دیگری در قسمت Fan End مورد آزمایش قرار گرفته اند. بلبرینگ ها ساخت شرکت SKF می باشند. روی این بلبرینگ ها آسیب هایی به بزرگی 0.007 in ، 0.014 in و 0.021 in ایجاد شده است.

داده های ارتعاشی توسط شتاب سنجی اندازه گیری می شوند که به کمک پایه مغناطیسی به سیستم متصل شده است. این داده ها توسط DATA recorder ۱۶ کاناله جمع آوری می شوند. سپس وارد محیط MATLAB شده و به صورت فایل هایی با پسوند mat ذخیره می شوند. سه نوع آسیب بر روی بلبرینگ ها ایجاد شده است (آسیب بر روی حلقه داخلی، آسیب بر روی حلقه خارجی و آسیب بر روی جسم لغزنده (ساجمه)). در این پژوهش چون بنا تنها بر تشخیص خطا گذاشته شده بود، تنها از یک نوع خطا (آسیب بر روی حلقه داخلی) استفاده شده است.

کلیه داده های مربوط به یاتاقانها و سیستم تحت آزمایش که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت مربوط به آزمایشگاه Case Western Reserve University و با اجازه Dr. Kenneth A. Loparo است.

۵- آنالیز داده ها

داده های بدست آمده، توسط نرم افزار MATLAB مجدداً فراخوانی شده و در حافظه کامپیوتر قرار می گیرند. سپس تحلیل

موجک روی این داده ها تا مرحله هشتم انجام می شود. با این تفاوت که بجای انجام تحلیل بر روی ضرائب CA تحلیل بر روی CD انجام گرفت تا از مزایای خطی بودن صفحه زمان-فرکانسی تحلیل موجک بسته ای استفاده شود. در زمینه تشخیص عیب با عدم قطعیت روبه رو هستیم، لذا از سیستم فازی برای استنتاج حالت سالم یا معیوب بودن سیگنال انتخاب گردید.

برای استنتاج وضعیت سیگنال باید به نحوی ضرائب بدست آمده در تحلیل موجک را به سیستم فازی وارد کرد. اما بخاطر محدودیت در تعداد ورودی ها و تعداد قوانین باید تنها یک نمونه از هر مرحله تبدیل موجک را انتخاب کرد. این نمونه باید شامل اطلاعاتی از سیگنال باشد که به کمک این اطلاعات سیستم فازی، توانایی تشخیص وضعیت را داشته باشد.

در مقالاتی که در این زمینه موجودند، از بزرگترین عنصر در هر مرحله به عنوان نمونه و نماینده آن مرحله استفاده می شود [7]. این انتخاب نتایج مطلوبی در مورد تعداد داده های با طول مشخص دارد. اما متأسفانه این انتخاب حساسیت زیادی به لحظه شروع سیگنال در سیگنال های با طول نامشخص دارد. بطوریکه احتمال آنکه با انتخاب قسمت دیگری از سیگنال به جوابی کاملاً متفاوت با قسمت اولیه برسیم، زیاد است.

داده های بدست آمده پس از هشت مرحله تحلیل موجک با موجک db3، وارد مرحله انتخاب نمونه شده و معیار نسبت ماکزیمم به انحراف از معیار سیگنال به عنوان معیار انتخاب نمونه برای استفاده در سیستم فازی در نظر گرفته شد. این معیار در سیستم های مخابراتی برای حذف وابستگی به شرایط اولیه استفاده می شود [8]. در این مساله نیز لحظه شروع سیگنال را می توان به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفت که تاثیر مخربی بر روند استنتاج دارد.

۶- طراحی سیستم استنتاج فازی

سیستم استنتاج فازی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، توسط نرم افزار Adaptive Fuzzy Modeller (AFM) که محصول شرکت SGS-Thomson می باشد، ساخته شد.

با استفاده از این نرم افزار، می توان یک سیستم را با استفاده از داده هایی با ساختار فازی بدست آورد. عمده ترین قابلیت این نرم افزار، توانایی آن در تولید خود کار یک بانک اطلاعاتی است که این بانک اطلاعاتی شامل قوانین استنتاج و پارامترهایی است که توابع عضویت را توصیف می کنند. Knowledge Base تولید شده حاصل یک تقریب بهینه از داده هایی است که به عنوان ورودی به سیستم داده شده است.

همانگونه که گفته شد، این نرم افزار این قابلیت را داراست که با داشتن یک مجموعه ورودی خروجی، می تواند سیستم فازی مربوطه را ایجاد نماید. برای این منظور مراحل زیر در این نرم افزار انجام می شوند

۱) ساخت قوانین: توسط یک روش Unsupervised Learning که بر اساس الگوریتم Winner take all کار

می کند، به ایجاد قوانین می پردازد. سپس موقعیت اولیه توابع عضویت (به کمک پارامترهایی مانند مرکز تابع و...) که از این پس آنها را به اختصار MF می نامیم، مشخص می گردد. این موقعیت ها در مرحله بعد بهینه می شوند. می توان سرعت ساخت سیستم مورد نظر را با مشخص کردن MF ها و موقعیت آنها زیاد کرد. در انتهای این مرحله فایلی که حاوی عبارات زبانی است تولید می گردد.

۲) این مرحله شامل تعیین شکل MF ها و روش اشتراک گیری سیستم فازی است. با استفاده از فایلی که در مرحله قبل ایجاد شده است، این مرحله به هر مجموعه فازی یک شکل MF استاندارد اولیه (یکی از شکل های مثلثی و یا گاوسی) تخصیص می دهد که این شکل در فاز یادگیری تنظیم می گردد.

تنظیمات MF ها توسط یکی از روشهای Supervised Learning (multilayer backward propagation) است صورت می پذیرد. در انتهای این مرحله می توان بصورت گرافیکی تمام جزئیات مجموعه های فازی را که به متغیرها اختصاص داده شده اند، مشاهده کرد.

تنظیماتی که در این پژوهش برای این نرم افزار به کار رفت به شرح زیر است:

تعداد ورودی و خروجی ها: ۸ ورودی و ۱ خروجی

تعداد MF ها برای هر ورودی: ۲ MF مثلثی برای هر ورودی

روش اشتراک گیری سیستم فازی: مینیم

۷- داده های مورد استفاده برای مراحل آموزش و آزمایش سیستم

♦ مرحله آموزش

برای این مرحله ۸۰۰۰ نمونه اول داده های بلبرینگ سالم و ۸۰۰۰ نمونه اول دو بلبرینگ آسیب دیده با بزرگی 0.007 in در فرکانس نمونه برداری 12KHz در دو بار 0hp و 1hp انتخاب شد.

بعد از حدود ۱۴۰ مرحله یادگیری سیستم به خطای مورد نظر خود که 1×10^{-5} بود رسید.

♦ مرحله آزمایش

برای این مرحله داده های مختلفی به شرح زیر انتخاب شد.

۸۰۰۰ نمونه اول داده های بلبرینگ سالم در دو بار 2hp و 3hp

۸۰۰۰ نمونه اول داده های بلبرینگ آسیب دیده با بزرگی 0.007 in در فرکانس نمونه برداری 12KHz در دو بار 2hp و 3hp

۸۰۰۰ نمونه اول داده های بلبرینگ آسیب دیده با بزرگی 0.021 in و 0.014 in در فرکانس نمونه برداری 12KHz در چهار بار 0hp و 1hp و 2hp و 3hp

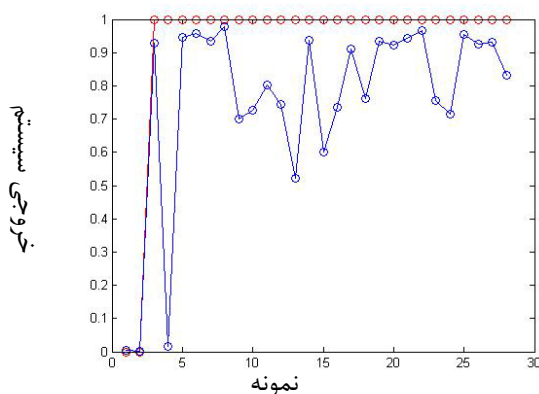
۸۰۰۰ نمونه دوم داده های بلبرینگ آسیب دیده با بزرگی 0.021 in و 0.014 in در فرکانس نمونه برداری 12KHz در چهار بار 0hp و 1hp و 2hp و 3hp

۸۰۰۰ نمونه سوم داده های بلبرینگ آسیب دیده با بزرگی 0.021 in و 0.014 in در فرکانس نمونه برداری 12KHz در چهار بار 0hp و 1hp و 2hp و 3hp

۸- نتیجه

با مشاهده خروجی سیستم در مرحله قبل (شکل ۸)، در صورتیکه خروجی بیشتر از 0.5 را معیوب بنامیم - که فرض قابل قبولی نیز می باشد -، توانایی سیستم در یافتن عیب بخوبی روشن می شود. زیرا این سیستم تنها با ۴ نمونه آموزش دیده است و تنها ۱ تشخیص نادرست در میان ۲۸ نمونه تشخیص، آمار قابل قبولی است.

باید خاطر نشان کرد که سیستم فوق در مقایسه با سیستم های مشابه [7] دارای تعداد قوانین بسیار کمتری است. این سیستم تنها از $2^8 = 256$ قانون بهره می برد



شکل ۷: داده های مربوط به فاز آزمایش.

۹- مراجع

- [1] Dash, S., Venkatasubramanian, V., "Challenges in the industrial application of fault diagnosis systems", Computer and Chemical Engineering, 24(2000), 785-791.
- [2] Sotudeh Chafi, M., "Design and Simulation of an intelligent Fuzzy-Neuro system for fault detection and diagnosis of dynamic system", MSc thesis, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran, 2000 (In Persian)
- [3] [Xinsheng Lou, Kenneth A. Loparo, "Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference", Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 1077-1095
- [4] Nyberg, M., "Automatic design of diagnosis systems with application to an automotive engine", Control Engineering Practice, 7(1999), 993-1005.
- [5] Shan, J., Bauer, B., "The Joint Time-Frequency and its Application for Vibration Diagnosis of Machines", Institute of Mining and Metallurgical Machine Engineering, 2003.
- [6] Sung, C.K., Chen, C.W., "Locating Defects of a Gear System by the Technique of Wavelet Transform", Mechanism and Machine Theory, 2000.
- [7] 1-L. Cristaldi, M. Lazzaroni, A. Monti, and F. Ponci, "A Neurofuzzy Application for AC Motor Drives Monitoring System", IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2004
- [8] S. Narahashi, K. Kumagai and T. Nojima, "Minimising peak-to-average power ration of multitone signals using steepest decent method", ELECTRONICS LETTERS, Vol. 31 No. 18, 31st August 1995]
- [9] پورخادم نمین، حسین، "پایش سامانه های مکانیکی با بهره جویی از حسابگری نرم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، تابستان ۸۲
- [10] Amara Graps, "An introduction to wavelets", IEEE Computational Science and Engineering, summer 1995
- [11] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1274-1279, Nov./Dec. 1995.
- [12] S. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press, 1998.