

طراحی و ساخت دستگاه تست بیرینگها و طبقه بندی عیوب با استفاده از منطق فازی

علیرضا هاشمی*^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید علوم و تحقیقات کرمانشاه

حجت احمدی

استاد دانشکده علوم مهندسی و فن آوری کشاورزی دانشگاه تهران

محمد کاظم بشارتی

دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه تهران

چکیده

اغلب خرابی‌های ماشین آلات و تجهیزات صنعتی، نشانه‌هایی از خود بروز می‌دهند. لذا می‌توان قبل از رسیدن خرابی به مراحل بحرانی، با برنامه ریزی فعالیت تعمیراتی، خرابی را متوقف ساخت. کاهش مصرف قطعات یدکی و هزینه سرویس، امکان برنامه ریزی ایمنی کار دستگاه، کنترل کیفیت تعمیرات و مواد مصرفی برای نگهداری بیرینگها، روغن و فیلترها کنترل فرسایش غیر عادی و کاهش خرابی‌های زودرس بیشتر ماشین به ویژه در مواقع حساس. تکنیک‌های پایش وضعیت عبارتند از: آنالیز ارتعاشات، آنالیز صدا، آنالیز جریان موتور، ترموگرافی و آنالیز روغن، تست‌های کنترل کیفیت، پذیرش تجهیزات پس از نصب، طراحی سیستم‌های کنترل و ایزوله کردن ارتعاشات. با توجه به در برداشتن اطلاعات فرکانسی عیوب در داخل سیگنال‌های ارتعاشی از آنالیز ارتعاشات با استفاده از سیستم تحصیل داده (Easy-Viber) سیگنال‌های عیوب ثبت میشود و با منطق فازی این سیگنال‌های عیوب تشخیص داده می‌شوند. عیب یابی بیرینگ‌ها قبل از خرابی و حتی تست آنها در زمان تولید در کاهش مصرف بیرینگ در دستور کار مدیران تعمیرات و نگهداری قرار دارد. بنابراین طراحی دستگاهی که بتواند عیب یابی انواع بیرینگ‌ها را انجام دهد احساس می‌شود با توجه به بررسی‌های انجام گرفته می‌توان گفت که در داخل کشور چنین دستگاهی ساخته نشده است. طراحی دستگاهی که بتواند انواع سیگنال‌های ارتعاشی عیوب بیرینگ‌ها را گرفته و با استفاده از منطق فازی عیوب موجود را تشخیص بدهد که کاربرد عمده آن می‌تواند در کارخانجات تولید بیرینگها و صنایع فولاد سازی و ماشین آلات دوار و صنایع نیروگاهی باشد. **واژه‌های کلیدی:** منطق فازی، آنالیز ارتعاشی، پایش وضعیت، بیرینگ

۱-مقدمه

به منظور عیب یابی بیرینگ ماشین آلات که بمنزله قلب ماشین عمل می‌کنند کفایت که نسبت به پیشگیری و اعمال روش‌هایی برای بالا بردن عمر بیرینگها بکار بریم و بدین روش میتوان از بروز خسارت و هزینه‌های تحمیلی مضاعف و جانبی آن جلوگیری کرد که در اصطلاح مونیتورینگ یا پایش وضعیت گویند (باقری، ۱۳۸۹). از روشهای پایش وضعیت می‌توان به آنالیز ارتعاشات، آنالیز صدا، ترموگرافی و ... اشاره کرد. از مزایای مونیتورینگ یا پایش وضعیت میتوان به موارد ذیل اشاره کرد:

- کاهش مصرف قطعات یدکی
- کاهش هزینه سرویس از روش افزایش فاصله زمانی سرویس‌ها
- افزایش امکان برنامه ریزی
- بهبود ایمنی کار دستگاه
- امکان کنترل کیفیت تعمیرات
- امکان کنترل کیفیت مواد مصرفی برای نگهداری همچون روغن و فیلترها
- کنترل فرسایش غیر عادی و کاهش خرابی‌های زودرس

¹ Alirezahashemi@ut.ac.ir

- آماده به کار بودن بیشتر ماشین به ویژه در مواقع حساس (موسویان، ۱۳۹۰).

۲-مرور ادبیات

حیدربیگی (۱۳۸۷) از خصوصیات حوزه بسامد سیگنال ارتعاشی با استفاده از تبدیل سریع فوریه برای استخراج ویژگیها به عنوان ورودی به شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرد و در نرون های خروجی سه حالت شکستگی یک دندان در چرخنده، سایش چرخنده و حالت سالم را قرار داد و با دقت بالای ۸۰ درصد طبقه بندی بین سه حالت را انجام داد. رحمان سیفی و فواد نظری اثر پارامترهای ترک و ضریب سختی یاتاقان بر فرکانس طبیعی شفت را مورد بررسی قرار دادند، اما در تحقیقی که قصد انجام آن را داریم از طیف گسترده تری از عیوب را پوشش می دهیم. بی اچ روه و همکاران به ارایه ی روشی برای محاسبه ی ارتعاش ناشی از روغن در حالت های سالم و معیوب یاتاقان پرداختند که خواص آکوستیک یاتاقان، تجزیه و تحلیل غیر خطی از جمله عدم تعادل روتور برای یک سیستم روتور دار را بدست آوردند. وانگ و تی یوو به مطالعه پویایی و ثبات هیدرودینامیکی یاتاقان های توربین بخار در نیروگاه پرداختند. معادله رینولدز برای تعیین توزیع فشار فیلم روغن در یاتاقان برای نمونه ی هم دما استفاده شد. ونگا و جیانگوو تکنیک تشخیص ارتعاش مورد استفاده برای تشخیص عیوب یاتاقان های اصلی در یک موتور دیزل، ارائه کردند. سامانتا و همکاران به تشخیص عیوب بیرینگ ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و طبقه بندهای شبکه ی عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پرداختند.

۳-مواد آزمایش

بیرینگ محور اصلی گلولی دستگاه تراش TN50C ساخت ماشین سازی تبریز به شماره BY۲۱۵ با برند NACHI ژاپن را به عنوان ماده آزمایش در نظر گرفتیم محور اصلی دستگاه تراش که سه نطن به آن متصل میباشد از اهمیت ویژه ای در ماشین تراش برخوردار است چرا که دقت قطعات و دور بودن آنها به سالم بودن بیرینگ که حامل محور اصلی می باشند متکی است و بیرینگها بارهای شعاعی وارده را تحمل می کنند .



شکل (۱). تصویر کلگی محور اصلی دستگاه تراش TN50B

۳-۱-جمع آوری داده های آزمایشی

در این پژوهش ابتدا ماشینی را طراحی کردیم که بتوانیم ارتعاشات بیرینگ ها را به صورت برون خط (آفلاین) و هنگامی بررسی کنیم.



شکل (۲). تصویر دستگاه تست بیرینگها

هدف از ساخت تست ارتعاش بیرینگها داده برداری انواع بیرینگها میباشد بوسیله این دستگاه میتوان بوسیله اینورتر انواع دورها و گشتاورها را به بیرینگ اعمال کرد. با توجه به اینکه تمامی بیرینگها چه سالم و چه معیوب دارای ارتعاش هستند که توسط دستگاه ایزی وایبر VT60 می توان نسبت به دیتا برداری از سیگنالهای ارتعاشات آنها اقدام کرد. ابتدا موقعیت در نرم افزار مخصوص خود دستگاه (نرم افزار X-Trend) تعریف می شود سپس به دستگاه VT60 انتقال می یابد. پس از هر بار اندازه گیری تمام داده های اندازه گیری مربوط به هر بیرینگ به صورت جداگانه به نرم افزار برگشت داده شد. به منظور تحویل طیف های ارتعاشی نیز از نرم افزار SpectraPRO4 استفاده گردید. پس از پایان اندازه گیری امکان انتقال داده ها به سایر نرم افزارها مانند ورد ۲ و اکسل ۳ وجود دارد (سیگنال ارتعاشات توسط حسگر با پروپ سوزنیدست می آیند. شکل (۳) دستگاه ارتعاش سنج VT60 را نشان می دهد. این دستگاه دارای یک شتاب سنج پیزوالکتریک از نوع VMI 102 می باشد.



شکل (۳). دستگاه VT60 برای اندازه گیری ارتعاش

حسگر سوزنی دستگاه ارتعاش سنج بر روی کنس خارجی بیرینگ به صورت عمودی و یا افقی نگه داشته میشود



شکل (۴). نحوه قرارگیری پروپ حسگر VT60 بر روی بدنه بیرینگ

سیگنال ارتعاشی در دو سطح سرعت دورانی محور اصلی دستگاه تراش ۵۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ثبت گردید در پنج حالت فرضی بیرینگ را بررسی میکنیم:

- بلبرینگ محور اصلی دستگاه تراش
- کچلی ساچمه های بیرینگ
- لقی کنس داخلی بیرینگ
- آسیب دیدگی کنس خارجی
- ارتعاشات بیرینگ سالم



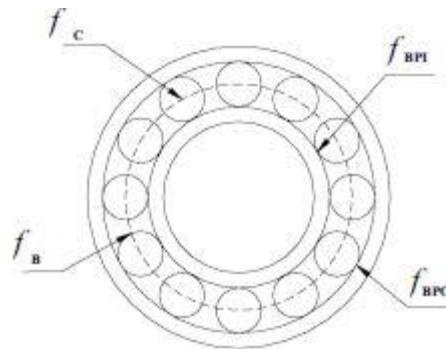
شکل (۵). بیرینگهای آسیب دیده در شرایط واقعی کار



شکل (۶). بیرینگ سالم BV۲۱۵ دستگاه تراش TN50C

۳-۲- فرکانس های اصلی بیرینگ

بسامدهای گذر اصلی اجزاء یک بال بیرینگ، به راحتی به وسیله معادلات استاندارد محاسبه می شوند. شاخص ها با این موارد توصیف می شوند (زارعی ۲۰۱۲):



شکل (۷). فرکانس های اصلی بلبرینگ

BSF: بسامد گردش ساچمه

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

BPFI: بسامد عبوری ساچمه از رینگ درونی

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

BPFO: بسامد عبوری ساچمه از رینگ بیرونی

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

در روابط بالا N برابر با دور بر ثانیه (RPS)، n_b تعداد ساچمه، P_d قطر گام (میلیمتر) و B_d قطر ساچمه (میلیمتر) می باشد.

۴- تجزیه و تحلیل و بیان نتایج حاصل از تحقیق

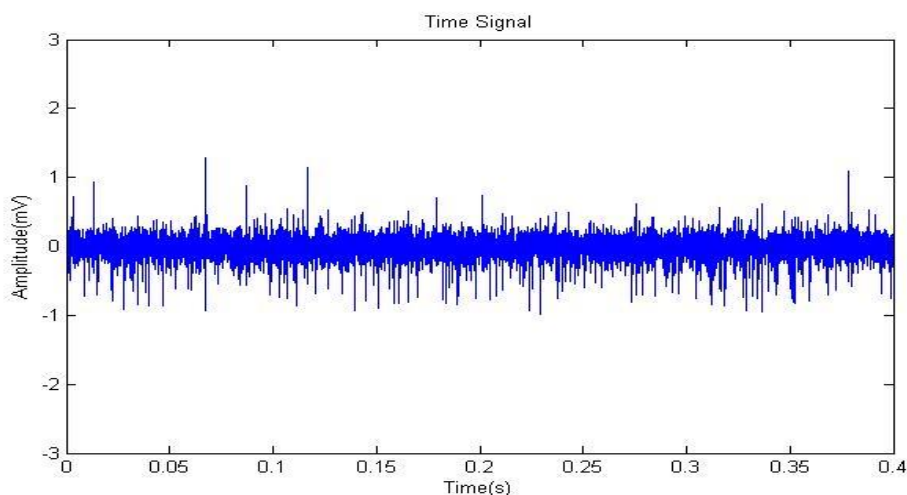
۴-۱ کلیات

این بخش به سه بخش تقسیم‌بندی می‌شود. در بخش اول سیگنال‌های ارتعاشی در شرایط مختلف دستگاه تراش و در دو حوزه زمان و فرکانس و در سرعت‌های دورانی متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در بخش دوم کار تحلیل داده‌ها در حوزه فرکانس، استخراج مدل نهایی قوانین فازی و ایجاد موتور استنتاج فازی ارائه می‌شود و در بخش سوم سامانه هوشمند تشخیص عیب ساخته شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

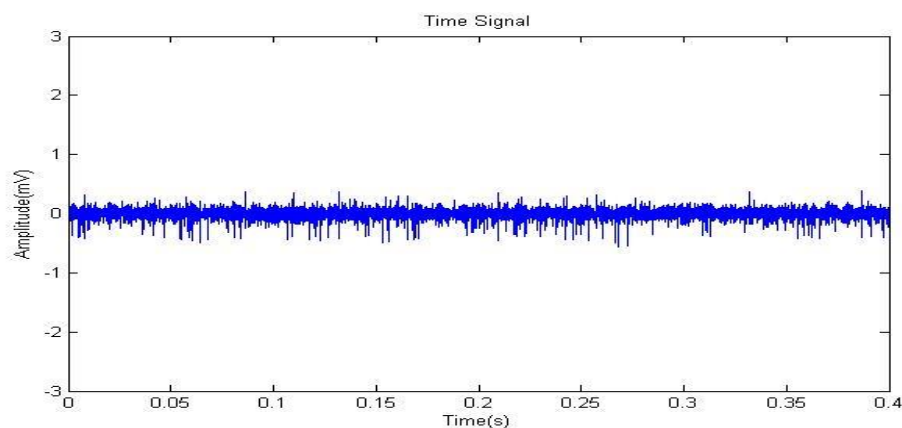
۴-۲- سیگنال‌های بدست آمده در وضعیت‌های مختلف دستگاه تراش

۴-۲-۱ سیگنال‌های بدست آمده در حوزه زمان

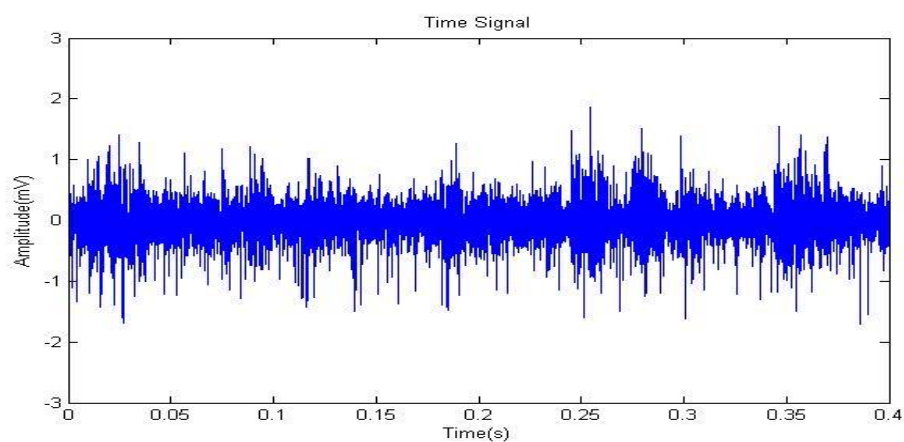
شکل (۸) تا (۱۲) نمودار طیف امواج ارتعاشی بدست آمده از دستگاه تراش در وضعیت‌های مختلف، در حوزه زمان و در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که نمودار نشان می‌دهد داده برداری در مدت ۰/۴ ثانیه انجام گرفته است و با توجه به فرکانس نمونه‌برداری، این بازه شامل ۱۶۳۸۶ نمونه است. همانگونه که شکل نشان می‌دهد با ایجاد خرابی در یاتاقان دامنه امواج افزایش یافته است و با افزایش شدت خرابی در یاتاقان افزایش دامنه ارتعاشات، اغتشاشات سیگنال‌ها و قله‌های ناگهانی نیز افزایش یافته است.



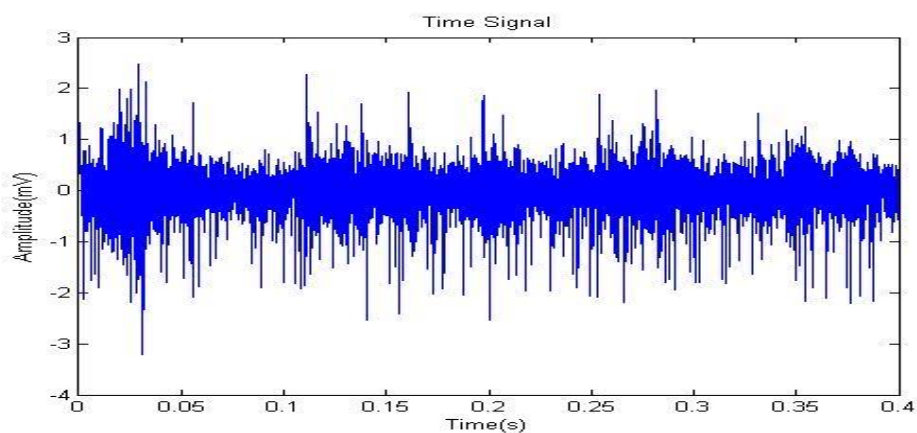
شکل (۸). سیگنال حوزه زمان در حالت سلامت یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰ دور بر دقیقه



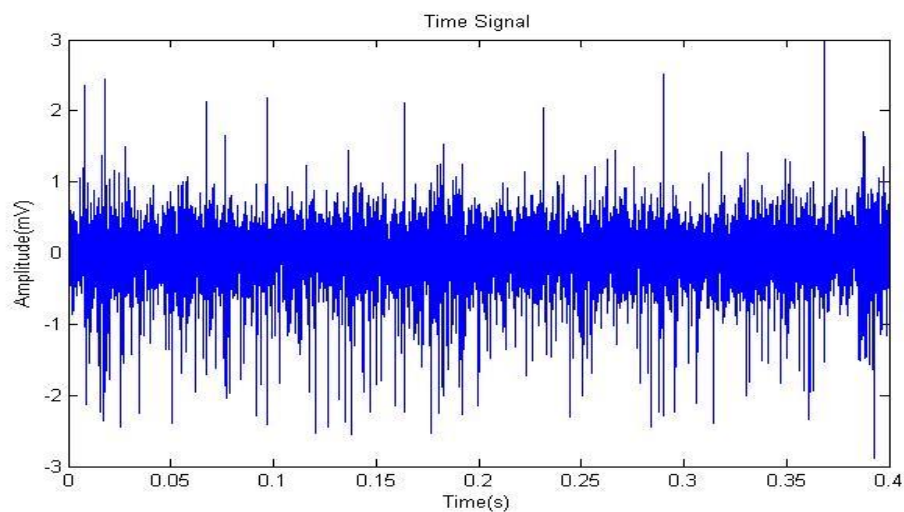
شکل (۹). سیگنال حوزه زمان در حالت سائیدگی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰ دور بر دقیقه



شکل (۱۰). سیگنال حوزه زمان در حالت لقی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

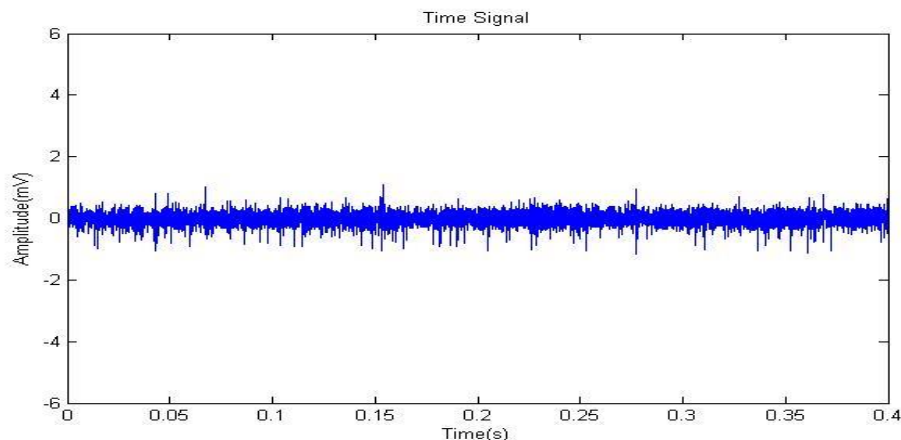


شکل (۱۱). سیگنال حوزه زمان در حالت لقی کنس خارجی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

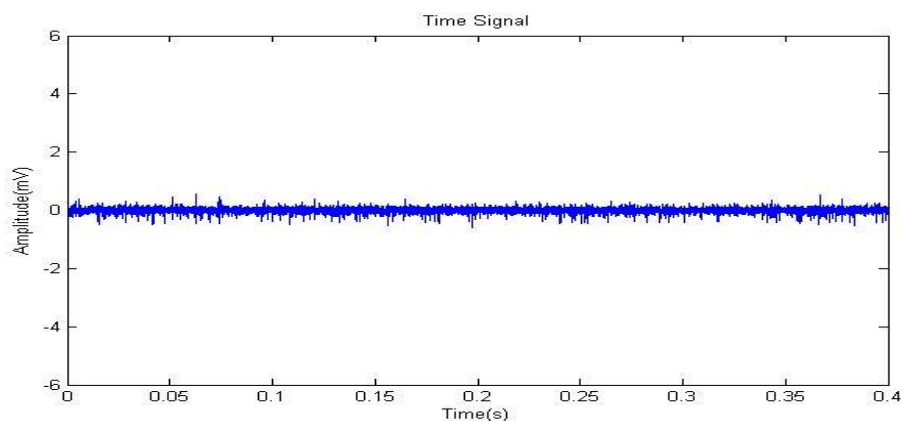


شکل (۱۲). سیگنال حوزه زمان در حالت کچلی ساچمه یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

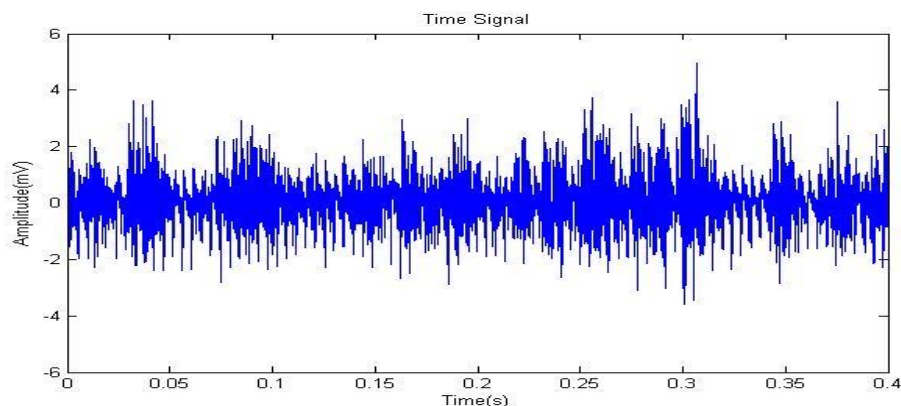
شکل (۱۳) تا (۱۷) نمودار طیف امواج ارتعاشی بدست آمده از دستگاه تراش در وضعیت‌های مختلف، در حوزه زمان و در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. فرکانس داده‌برداری و مدت زمان داده‌برداری تغییر نکرده است. همانگونه که شکل نشان می‌دهد با ایجاد خرابی در یاتاقان دامنه امواج افزایش یافته است و با افزایش شدت خرابی در یاتاقان بجز افزایش دامنه ارتعاشات، اغتشاشات سیگنال‌ها نیز افزایش یافته است. مقایسه سیگنال‌های ارتعاشی در دو سرعت دورانی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد که رفتار عمومی امواج در دو سرعت دورانی شبیه یکدیگر است. اما همانطور که انتظار می‌رفت دامنه امواج در تمامی حالات در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته است، همچنین سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاف بین وضعیت‌های مختلف را بهتر و واضح‌تر از سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد.



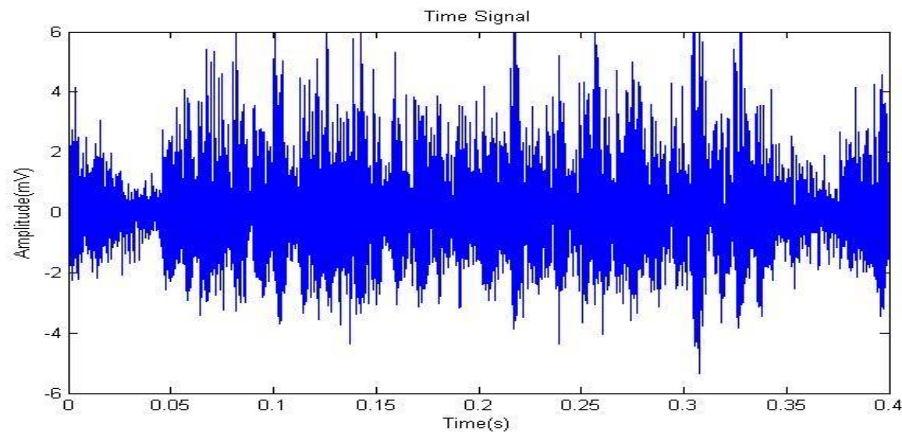
شکل (۱۳). سیگنال حوزه زمان در حالت سلامت یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



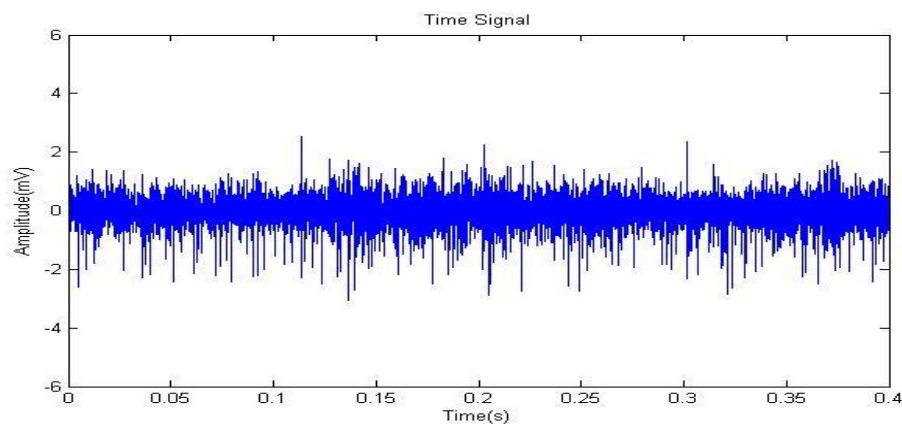
شکل (۱۴). سیگنال حوزه زمان در حالت سائیدگی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۱۵). سیگنال حوزه زمان در حالت لقی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۱۶). سیگنال حوزه زمان در حالت لقی کنس خارجی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

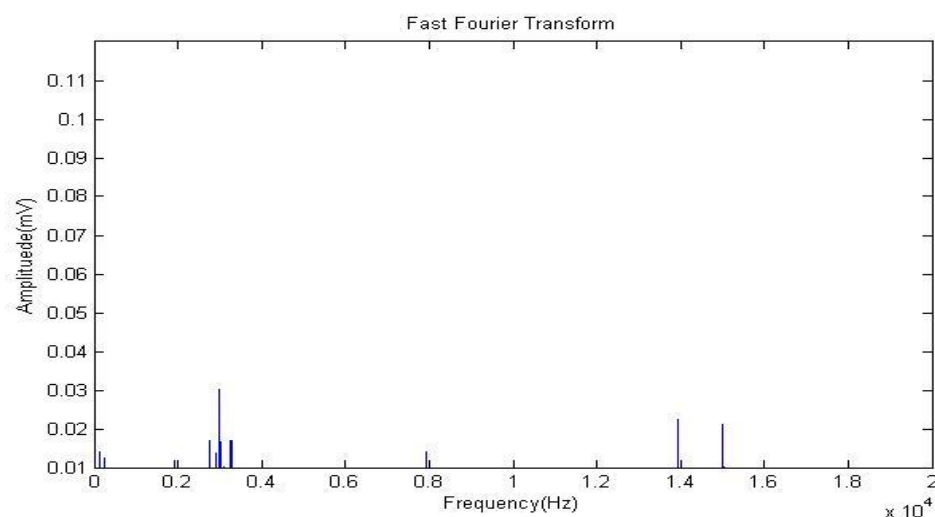


شکل (۱۷). سیگنال حوزه زمان در حالت لقی کچلی ساچمه یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

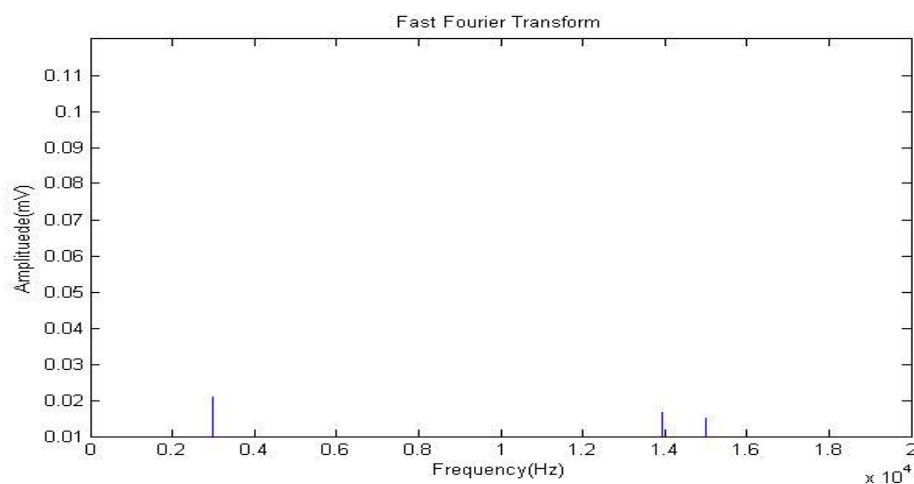
به طور کلی در آنالیز طیف‌های ارتعاشی در حوزه زمان، عیوب دستگاه تراش تا حدود زیادی قابل تشخیص هستند. برای مثال در شرایط سلامت دستگاه، طیف ارتعاش منظمی دیده می‌شود که دامنه تغییرات ناچیزی داشته و سلامت دستگاه تراش را می‌رساند.

۲-۲-۴ سیگنال‌های بدست آمده در حوزه فرکانس

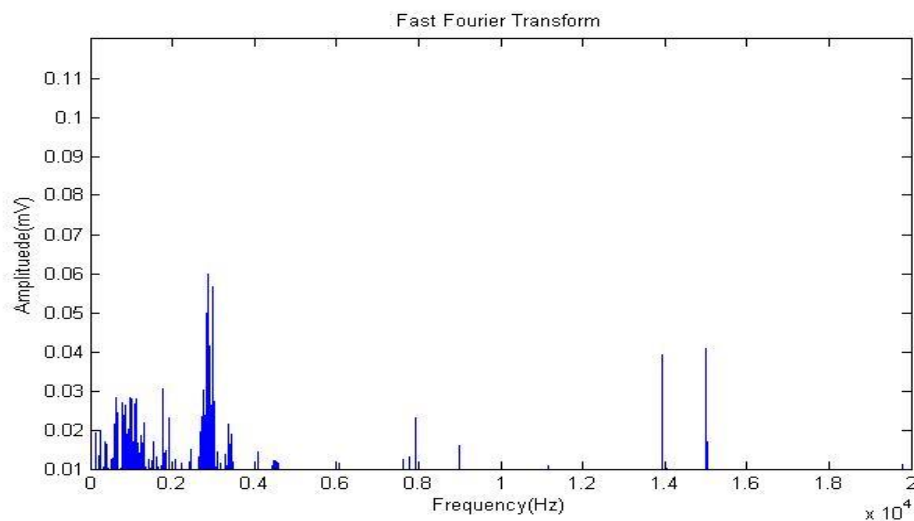
شکل (۱۸) تا شکل (۲۷) تبدیل امواج شکل برای حوزه فرکانس هستند. حداکثر فرکانس قابل دسترسی در داده‌های ذخیره شده برابر با نصف سرعت نمونه‌گیری است. بنابراین حداکثر فرکانس قابل اندازه‌گیری در تحقیق حاضر حدود ۲۰۰۰۰ هرتز است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد FFT تعداد محاسبات مورد نیاز برای تبدیل فوریه سیگنال را از N^2 به $N \cdot \log(N)$ کاهش می‌دهد (شکریان، ۱۳۹۳). برای اینکه دقت تبدیل سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس به حد کافی باشد طول FFT برابر با ۱۰۲۴ ($N=10$) در نظر گرفته شد. با توجه به شکل (۱۸) تا (۲۷) به وضوح می‌توان دریافت که دامنه‌ی تغییرات در حالت لقی در کنس به مراتب بالاتر از کچلی ساچمه و آن نیز بیشتر از وضعیت سلامت دستگاه تراش است. این نشان می‌دهد که هرچه لقی در کنس بیشتر گردد و کچلس ساچمه بیشتر شود شدت ارتعاشات ناشی از دوران آن نیز بیشتر می‌شود.



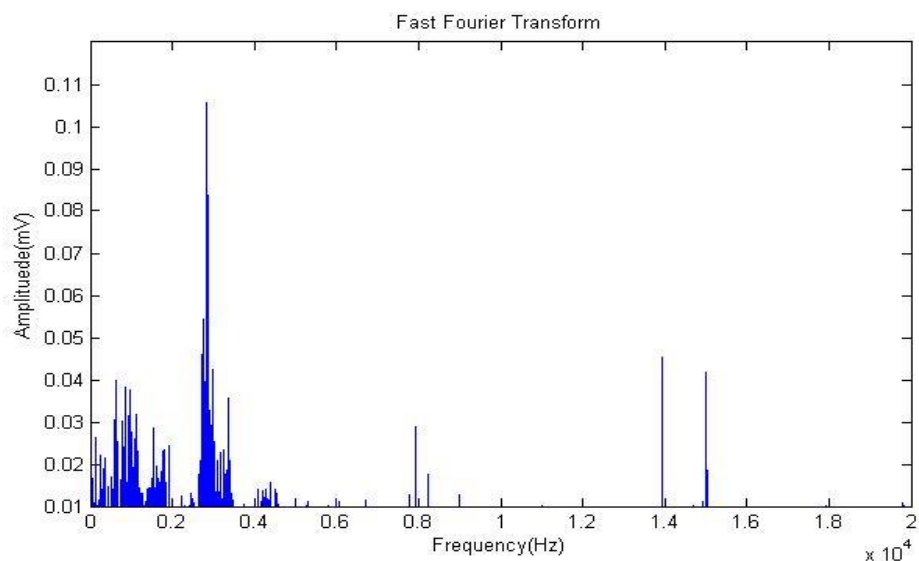
شکل (۱۸). سیگنال حوزه فرکانس در حالت سلامت یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



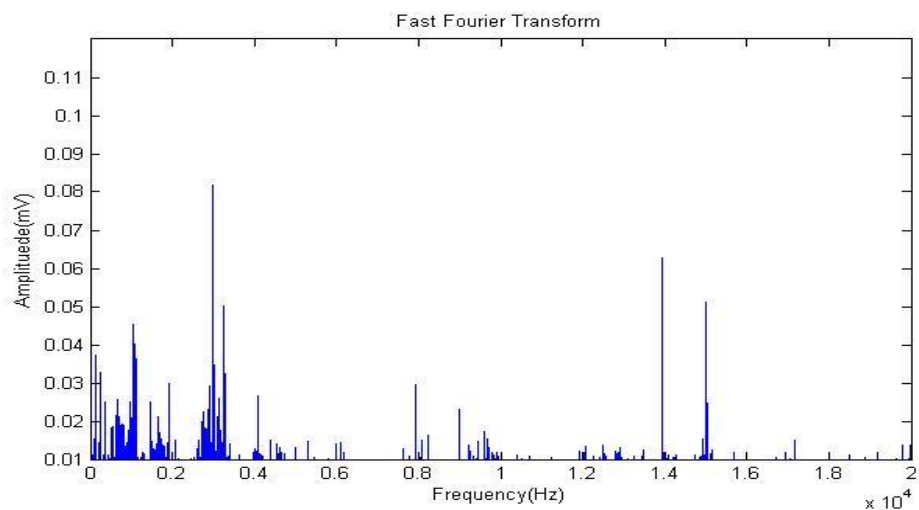
شکل (۱۹). سیگنال حوزه فرکانس در حالت سائیدگی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



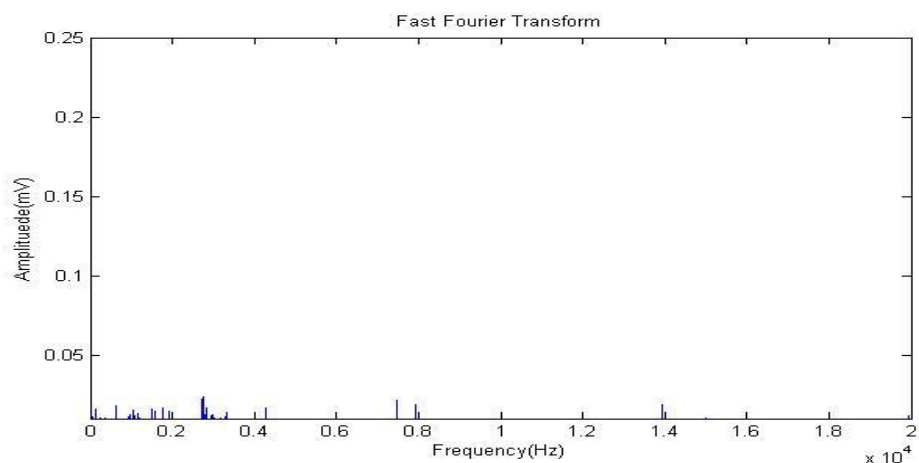
شکل (۲۰). سیگنال حوزه فرکانس در حالت لقی کنس داخلی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



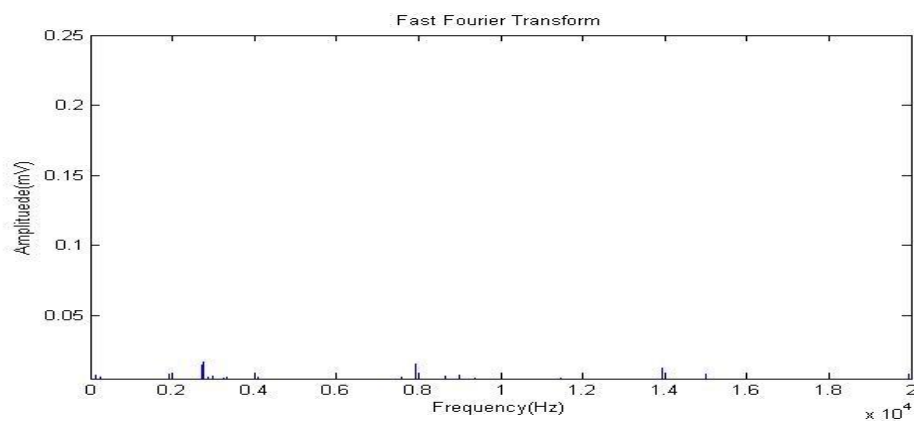
شکل (۲۱). سیگنال حوزه فرکانس در حالت لقی کنس خارجی یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



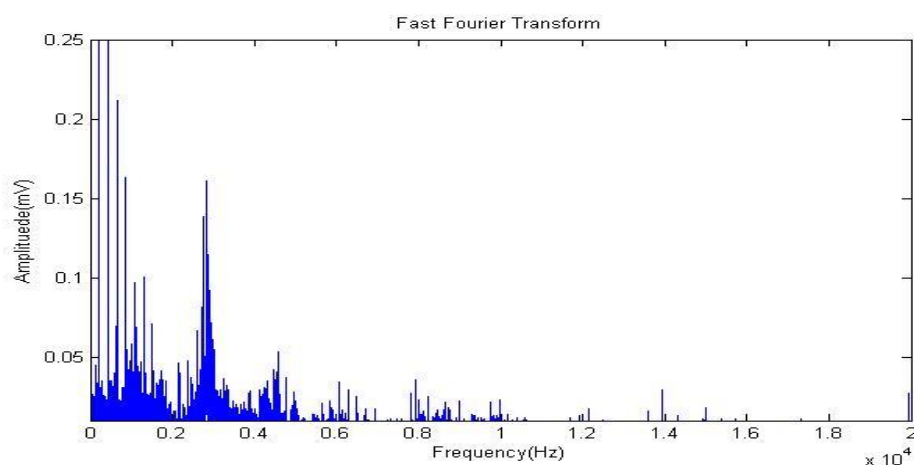
شکل (۲۲). سیگنال حوزه فرکانس در حالت کچلی ساچمه یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



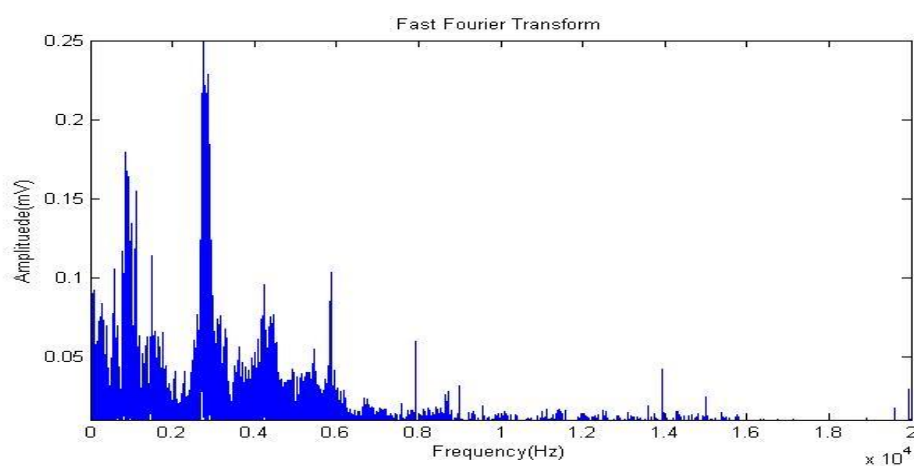
شکل (۲۳). سیگنال حوزه فرکانس در حالت سلامت یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



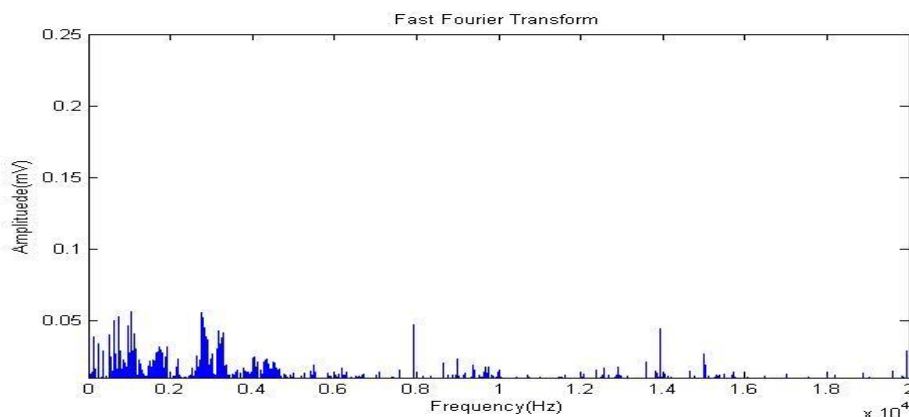
شکل (۲۴). سیگنال حوزه فرکانس در حالت سائیدگی کنس داخلی یا تاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۲۵). سیگنال حوزه فرکانس در حالت لقی کنس داخلی یا تاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۲۶). سیگنال حوزه فرکانس در حالت لقی کنس خارجی یا تاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۲۷). سیگنال حوزه فرکانس در حالت کچلی ساچمه یاتاقان دستگاه تراش در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

مقایسه سیگنال‌های ارتعاشی در دو سرعت دورانی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در حوزه فرکانس نشان می‌دهد که رفتار عمومی طیف‌ها در هر دو دور کاملاً مشابه یکدیگر بوده و با افزایش سرعت دامنه فرکانس‌ها افزایش یافته است. همانطوری که از نمودارها پیداست، عیوب بسته به سرعت ورودی دستگاه تراش در فرکانس‌های مختلف خود را نشان داده و نیز با افزایش سرعت ورودی به میزان دامنه‌ی آن نیز افزوده شده است. در نتیجه از طریق آنالیز ارتعاش دریافتی این تغییرات قابل درک و عیب مورد نظر نیز قابل تشخیص می‌باشد.

۴-۳ نتایج داده کاوی

در این بخش روش و نتایج حاصل از تحلیل و پردازش داده‌ها در بخش‌های جداگانه ارائه می‌شوند.

۴-۳-۱ پردازش داده‌ها و استخراج ویژگی‌ها

در هر یک از سرعت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و برای هریک از حالت‌های دستگاه تراش، داده‌برداری در ۶۵ تکرار انجام گرفت. ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد از داده‌ها برای ارزیابی استفاده شدند (جدول ۱). به منظور تحلیل سیگنال، سیگنال‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس برده شدند و سپس تابع‌های داده کاوی ذکر شده بر داده‌های حاصل از تبدیل فوریه سریع اعمال شدند. بدین ترتیب ۲۳ ویژگی از داده‌های حاصل از تبدیل فوریه استخراج گردیدند. ویژگی‌های استخراج شده از داده‌های حاصل از تبدیل سریع فوریه F1 تا F23 نامیده شدند.

جدول (۱). شرح تقسیم بندی نمونه‌های مورد استفاده

سرعت	کل نمونه‌های برداشت شده	نمونه‌های استفاده شده برای آموزش	نمونه‌های استفاده شده برای آزمون عملکرد
۵۰۰ دور بر دقیقه	۲۲۵ نمونه	۱۸۰ نمونه	۶۵ نمونه
۱۰۰۰ دور بر دقیقه	۲۲۵ نمونه	۱۸۰ نمونه	۶۵ نمونه

۴-۳-۲ ایجاد درخت تصمیم

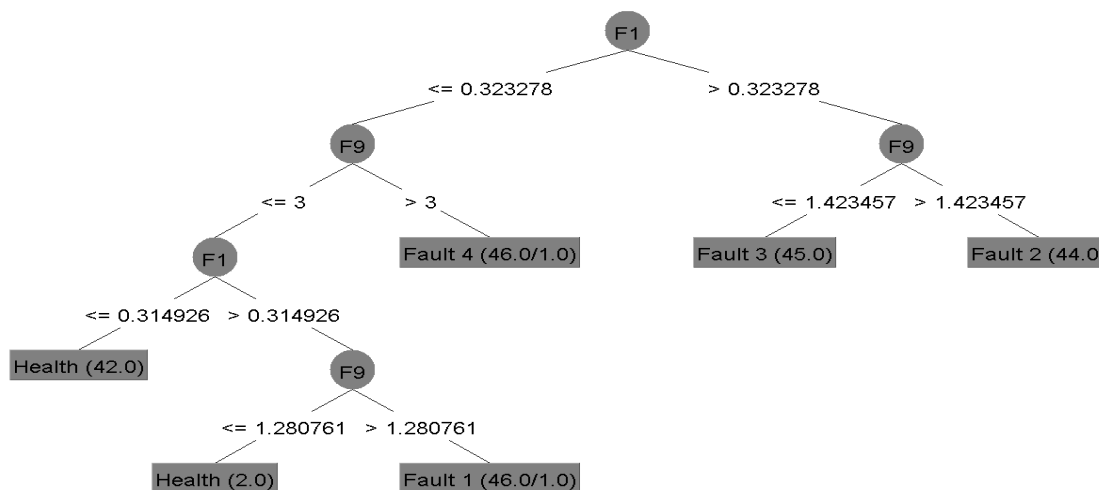
به منظور ایجاد درخت تصمیم برای هر یک از عیوب برچسب طبقه بندی تعریف می‌شود که در جدول (۲) آورده شده‌اند.

جدول (۲). برچسب طبقه بندی برای حالات مختلف یاتاقان

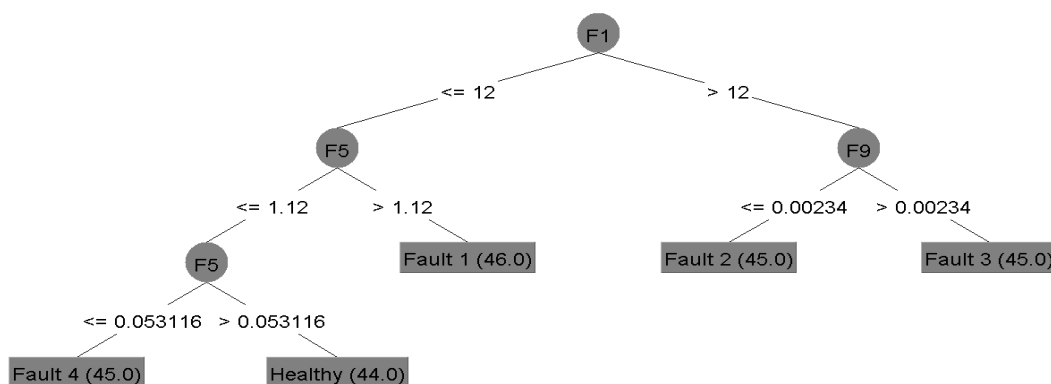
وضعیت یاتاقان	سالم	سائیدگی کنس داخلی یاتاقان	لقی کنس خارجی یاتاقان	لقس کنس داخلی یاتاقان	کچلی ساچمه یاتاقان
برچسب طبقه بندی	Health	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 4

به منظور داده کاوی از الگوریتم J48 استفاده گردید نتایج حاصل از خروجی الگوریتم J48 که بصورت درخت‌های تصمیم شکل‌های (۲۸) تا (۲۹) می‌باشند. این اشکال در واقع رابطه بین ویژگی‌های طیف‌های ارتعاش را با وضعیت دستگاه تراش نشان می‌دهند. ردیابی یک شاخه از

گره‌ی اصلی تا برگ به یک وضعیت دستگاه تراش منتهی می‌شود و رمزگشایی اطلاعات موجود در هر شاخه‌ی درخت به صورت جملات اگر-آنچه فازی، قوانین لازم برای طبقه‌بندی فازی عیوب دستگاه تراش را فراهم می‌آورد. بدیهی است که در هر یک از درخت‌ها، بالاترین گره بهترین گره برای طبقه‌بندی است. سایر ویژگی‌ها در گره‌های درخت تصمیم به ترتیب نزولی اهمیت قرار می‌گیرند. همچنین در درخت تصمیم تنها آن دسته از ویژگی‌های طیف قرار می‌گیرند که برای طبقه‌بندی صحیح اهمیت دارند و ویژگی‌هایی که اهمیت لازم برای طبقه‌بندی عیوب دستگاه تراش را ندارند از مدل بیرون نگه داشته می‌شوند. سطح توزیع داده‌ها برای مجموعه‌ی ویژگی‌هایی که یک طبقه را می‌سازند توسط اعدادی درون پرانتز در درخت تصمیم و در جلوی وضعیت دستگاه تراش در آن طبقه آمده است. اولین عدد درون پرانتز بیانگر تعداد داده‌هایی است که توسط مجموعه ویژگی‌ها به طور صحیح قابل طبقه‌بندی بوده است و دومین عدد بیانگر تعداد داده‌هایی است که بطور اشتباه در آن طبقه قرار گرفته است. در صورتی که اولین عدد درون پرانتز نسبت به کل داده‌هایی که برای بیان عیب در مدل وارد شده‌اند خیلی کوچک باشد، آن طبقه را می‌توان از مدل نهایی حذف نمود. ماتریس‌های اغتشاش به دست آمده از درخت‌های تصمیم در جداول (۳) تا (۵) نشان داده شده است. در ماتریس اغتشاش، اعداد روی قطر اصلی حاوی تعداد نمونه‌هایی است که به درستی توسط درخت تصمیم طبقه‌بندی شده است و در سایر سلول‌ها تعداد نمونه‌هایی که به اشتباه در طبقه‌ی دیگر قرار گرفته‌اند جای می‌گیرد. نتایج جداول ۴-۵ بیانگر آن است که درجه‌ی انطباق درخت‌های تصمیم ایجاد شده از تحلیل فوریه برای سرعت‌های دورانی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۹۶/۸۹ و ۹۹/۵۶ می‌باشد. بالا بودن درجه‌ی انطباق درخت‌های تصمیم نشانگر دقت بالای مدل طبقه بند و عدم پراکندگی در داده‌های برداشته شده می‌باشد.



شکل (۲۸). درخت تصمیم ایجاد شده به وسیله‌ی الگوریتم J48 در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۲۹). درخت تصمیم ایجاد شده به وسیله الگوریتم J48 در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

جدول (۳). ماتریس اغتشاش درخت تصمیم ایجاد شده در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

سرعت دورانی	بر چسب طبقه بندی	Healthy	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 4
۱۵۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۱	۱	۰	۲	۴۱
	Fault 1	۰	۰	۲	۴۴	۰
	Fault 2	۰	۱	۴۳	۰	۰
	Fault 3	۰	۴۵	۰	۰	۰
	Fault 4	۴۵	۰	۰	۰	۰

جدول (۴). ماتریس اغتشاش درخت تصمیم ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

سرعت دورانی	بر چسب طبقه بندی	Healthy	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 4
۱۵۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۰	۰	۰	۰	۴۴
	Fault 1	۰	۰	۰	۴۶	۰
	Fault 2	۰	۰	۴۵	۰	۰
	Fault 3	۰	۴۵	۰	۰	۰
	Fault 4	۴۴	۰	۰	۰	۱

جدول (۵). پارامترهای آماری ارزیابی درخت های تصمیم ایجاد شده

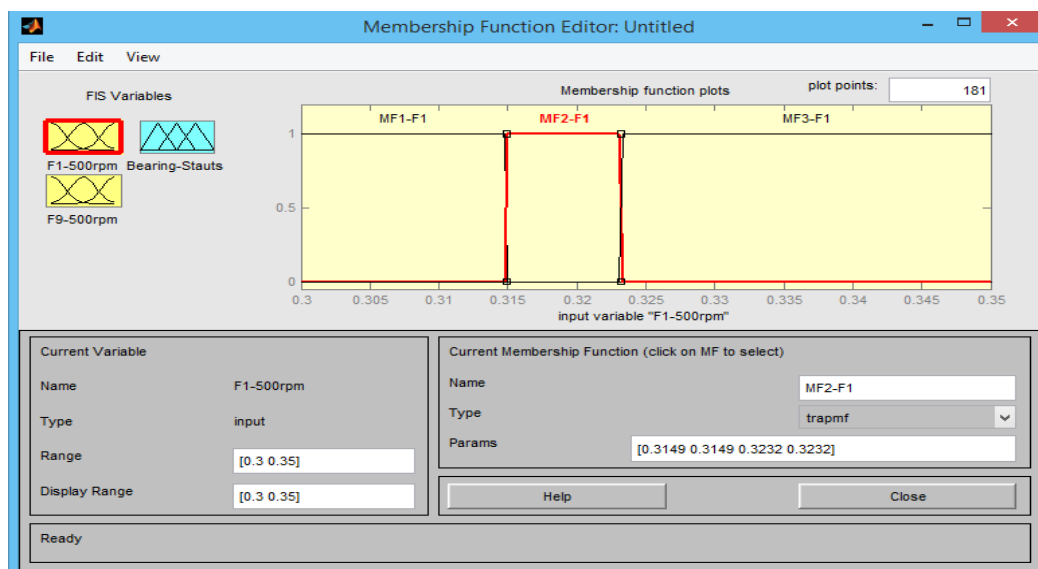
سرعت	بر چسب طبقه بندی	پارامتر مورد ارزیابی	درجه انطباق طبقه بندی کل (%)
۵۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۹۱/۱۱	۹۶/۸۹
	Fault 1	۹۵/۶۵	
	Fault 2	۹۷/۷۲	
	Fault 3	۱۰۰	
	Fault 4	۱۰۰	
۱۰۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۹۷/۷۷	۹۹/۵۶
	Fault 1	۱۰۰	
	Fault 2	۱۰۰	
	Fault 3	۱۰۰	
	Fault 4	۱۰۰	

۴-۳-۳ توابع عضویت

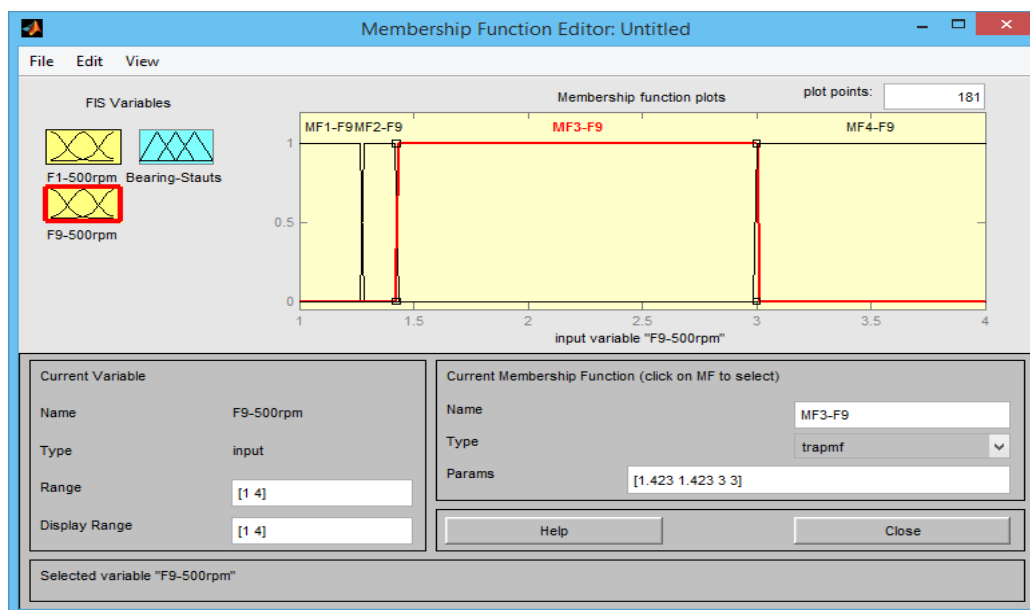
با در نظر گرفتن مقادیر بدست آمده برای ویژگی های آماری طیف های ارتعاشی بر روی درخت های تصمیم و بر اساس اینکه کدام شاخه ها از درخت تصمیم برای وضعیت های مختلف دستگاه تراش ایجاد شده است، توابع عضویت برای آن ویژگی ها در نرم افزار MATLAB به صورت زیر مشخص گردیدند.

توابع عضویت داده‌های ارتعاشی برای سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

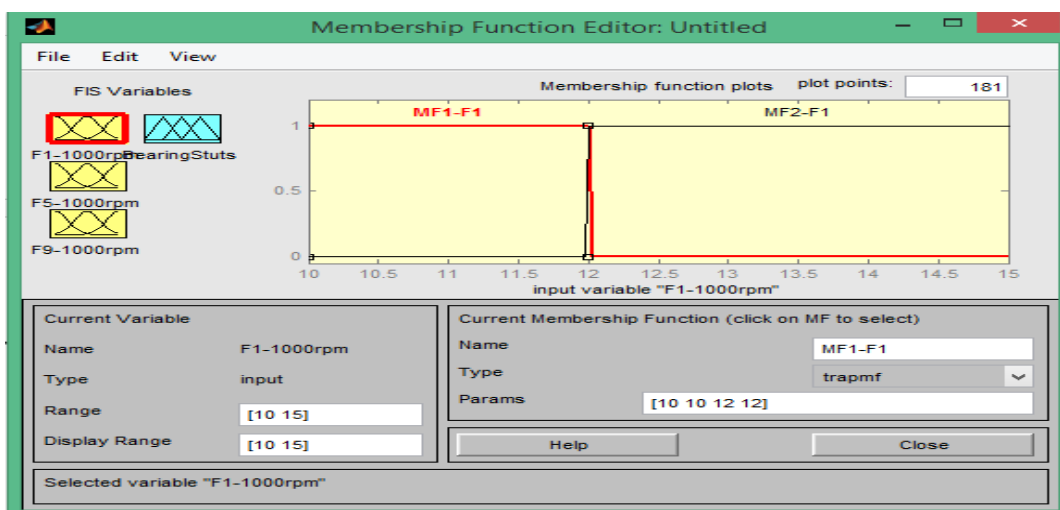
شکل‌های (۳۰) تا (۳۴) تابع عضویت ورودی ایجاد شده برای دستگاه تراش در شرایط سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه را با توجه به درخت تصمیم شکل (۲۸) نشان می‌دهد. از هر دو شکل مذکور می‌توان فهمید که عدد $0/3$ یک آستانه برای مقدار عضویت ویژگی MF1-F1 می‌باشد. تا قبل از این مقدار، تابع عضویت MF1-F1 مقدار عددی صفر و بعد از آن مقدار عددی ۱ را تولید می‌نماید البته با این فرض که بصورت خطی افزایش می‌یابد. تابع عضویتی که چنین پدیده‌ای را بیان دارد، تابع عضویت دوزنقه‌ای است و بنابراین در این پژوهش به عنوان تابع عضویت برای ترسیم نمودن تمامی نقاط در فضای ورودی به یک مقدار عضویت به کار برده شد.



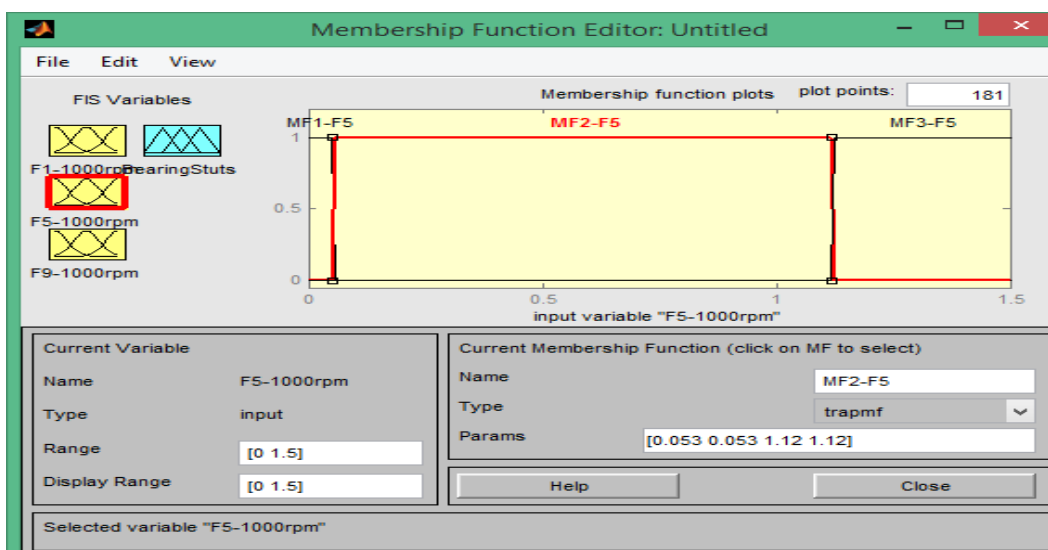
شکل (۳۰). توابع عضویت برای ویژگی F1 برای سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



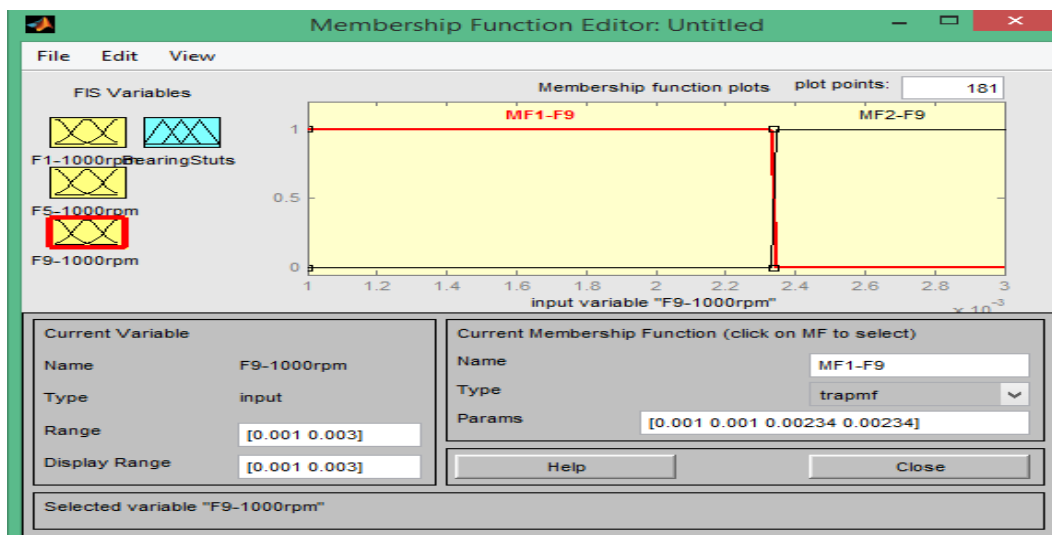
شکل (۳۱). توابع عضویت برای ویژگی F9 برای سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۳۲). توابع عضویت برای ویژگی F1 برای سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



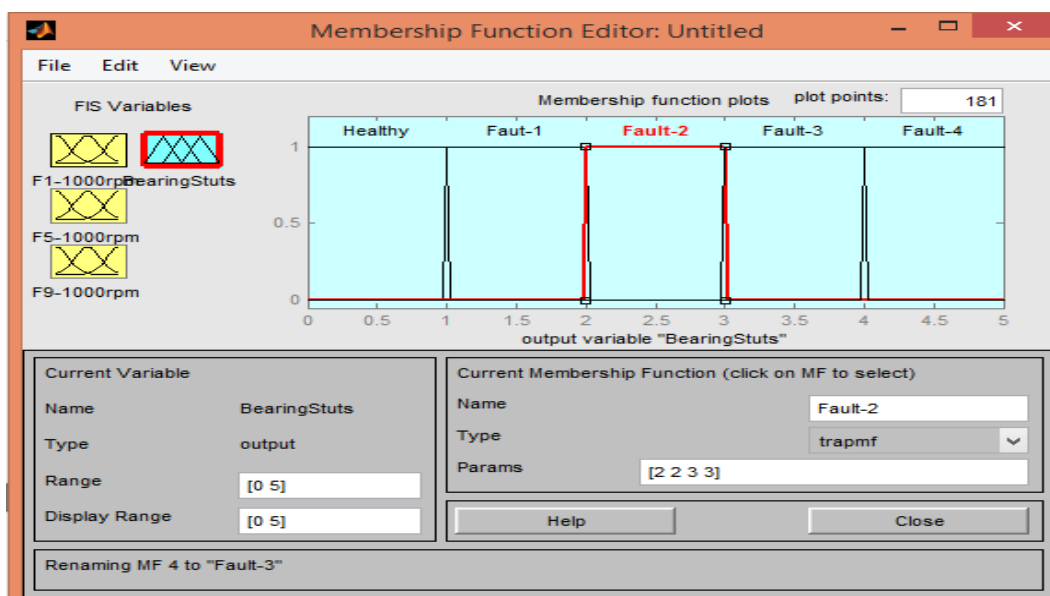
شکل (۳۳). توابع عضویت برای ویژگی F5 برای سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۳۴). توابع عضویت برای ویژگی F9 برای سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

۴-۳-۴ تابع عضویت خروجی

خروجی‌های طبقه‌بند فازی در واقع همان وضعیت‌های دستگاه تراش می‌باشد که به صورت Healthy, Fault 1, Fault 2, Fault 3, Fault 4 برچسب گذاری شده‌اند (ژانگ^۴، ۱۹۹۵). بنابراین ۵ خروجی برای طبقه‌بند فازی وجود دارد و برای آنها ۵ تابع عضویت با محدوده‌ی مساوی در بازه ی ۰ تا ۵ ایجاد گردید شکل (۳۵). محدوده‌ی ۰ تا ۱ برای وضعیت Healthy، محدوده‌ی ۱ تا ۲ برای وضعیت Fault 1، محدوده‌ی ۲ تا ۳ برای وضعیت Fault 2، محدوده‌ی ۳ تا ۴ برای وضعیت Fault 3 و محدوده‌ی ۴ تا ۵ برای وضعیت Fault 4 در نظر گرفته شد. خروجی فازی در هر دو حالت سرعت دورانی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به یک صورت است.



شکل (۳۵). توابع عضویت برای خروجی فازی در سرعت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه

۴-۳-۵ قوانین فازی

با استفاده از درخت‌های تصمیم در شکل‌های ۴-۲۱ تا ۴-۲۲ قوانین فازی به صورت عبارات اگر – آنگاه ایجاد شدند. تمامی این قوانین با درجه‌ی اهمیت مساوی در مدل فازی قرار می‌گیرند و ترتیب قرارگیری قوانین اهمیت ندارد. در زیر قوانین ایجاد شده در هر وضعیت آمده است.

قوانین فازی برای شرایط سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

1. If (F1-500rpm is MF3-F1) and (F9-500rpm is MF3-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-2)
2. If (F1-500rpm is MF3-F1) and (F9-500rpm is MF4-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-2)
3. If (F1-500rpm is MF3-F1) and (F9-500rpm is MF2-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-3)
4. If (F1-500rpm is MF3-F1) and (F9-500rpm is MF1-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-3)
5. If (F1-500rpm is MF2-F1) and (F9-500rpm is MF4-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-4)
6. If (F1-500rpm is MF1-F1) and (F9-500rpm is MF4-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-4)
7. If (F1-500rpm is MF1-F1) then (Bearing-Stauts is Health) (1)
8. If (F1-500rpm is MF2-F1) and (F9-500rpm is MF1-F9) then (Bearing-Stauts is Health)
9. If (F1-500rpm is MF2-F1) and (F9-500rpm is MF2-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-1)
10. If (F1-500rpm is MF2-F1) and (F9-500rpm is MF3-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-1)
11. If (F1-500rpm is MF2-F1) and (F9-500rpm is MF4-F9) then (Bearing-Stauts is Fault-1)

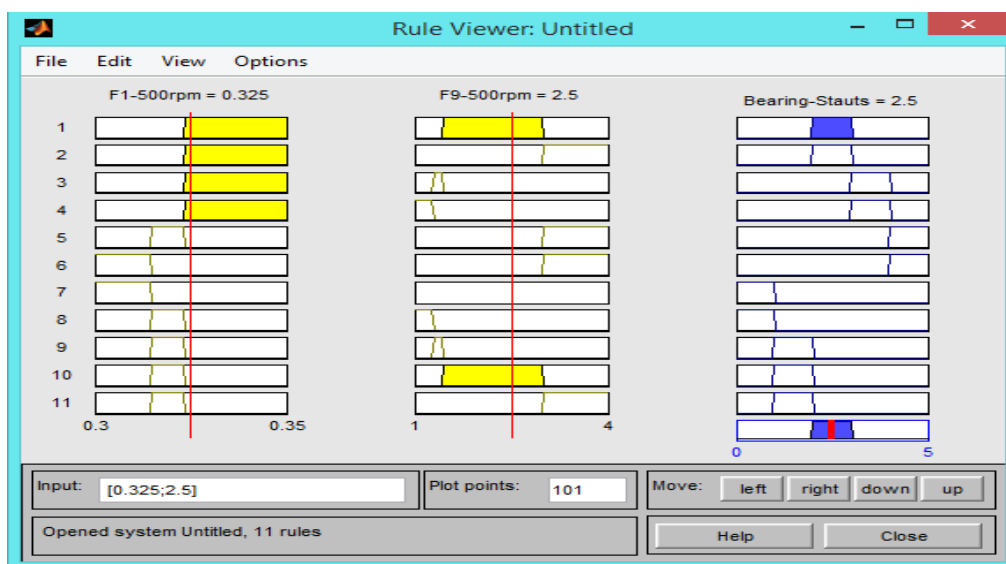
⁴ Zhang

قوانین فازی برای شرایط سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

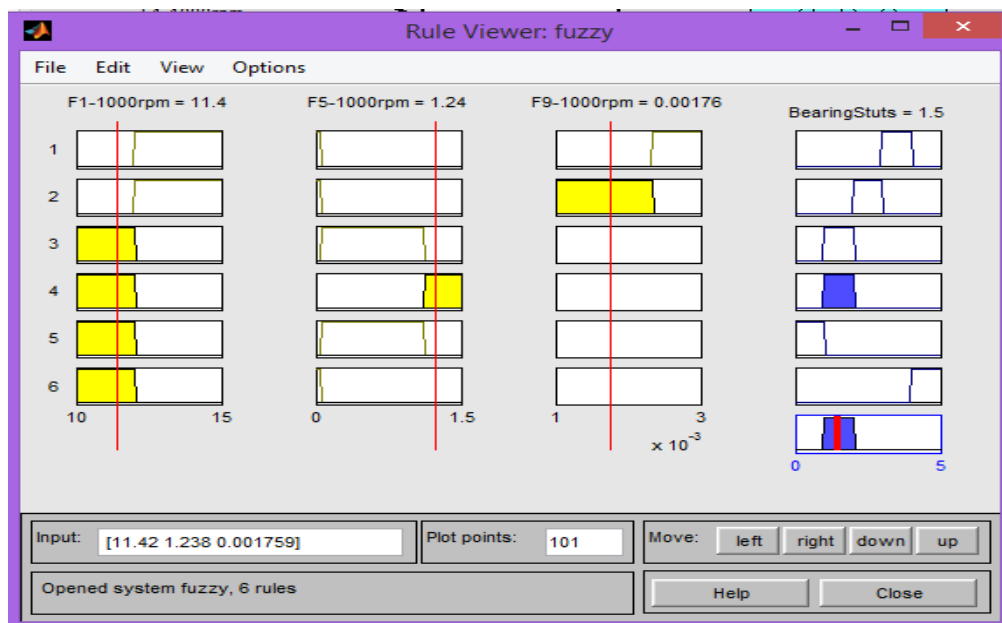
1. If (F1-1000rpm is MF2-F1) and (F5-1000rpm is MF1-F5) and (F9-1000rpm is MF2-F9) then (BearingStuts is Fault-3)
2. If (F1-1000rpm is MF2-F1) and (F5-1000rpm is MF1-F5) and (F9-1000rpm is MF1-F9) then (BearingStuts is Fault-2)
3. If (F1-1000rpm is MF1-F1) and (F5-1000rpm is MF2-F5) then (BearingStuts is Faut-1)
4. If (F1-1000rpm is MF1-F1) and (F5-1000rpm is MF3-F5) then (BearingStuts is Faut-1)
5. If (F1-1000rpm is MF1-F1) and (F5-1000rpm is MF2-F5) then (BearingStuts is Healthy)
6. If (F1-1000rpm is MF1-F1) and (F5-1000rpm is MF1-F5) then (BearingStuts is Fault-4)

۴-۳-۶- خروجی فازی

خروجی‌های سیستم فازی ایجاد شده را می‌توان در ادیتور 'Rule Viewer' مشاهده نمود. Rule Viewer ایجاد شده برای وضعیت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در شکل (۳۶) و (۳۷) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها هر کدام از ردیف‌ها متناظر با یکی از عیوب دستگاه تراش می‌باشند. در شکل (۳۷) دو ستون اول به ترتیب بیانگر ویژگی‌های F1 و F9 می‌باشند. سومین ستون متناظر با توابع عضویت ایجاد شده برای خروجی فازی می‌باشد. با حرکت دادن لغزنده‌ای که روی بلوک‌های هر یک از توابع عضویت ورودی قرار دارد می‌توان خروجی‌های مختلفی را بدست آورد. به کمک نمونه‌های ورودی برای ویژگی‌های F1 و F9 قوانین به صورت زیر آزمایش گردید. برای مقادیر ورودی F1 برابر ۰/۳۲۵ و F9 برابر ۲/۵ که با اولین قانون فازی در وضعیت ۵۰۰ دور بر دقیقه مطابقت دارد و خروجی متناسب با آن حالت Fault 2 می‌باشد که اولین بلوک از خروجی فازی را در شکل شامل می‌گردد.



شکل (۳۶). موتور استنتاج فازی ایجاد شده در دور ۵۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۳۷). موتور استنتاج فازی ایجاد شده در دور ۱۰۰۰ دور در دقیقه

۴-۳-۷- دقت نهایی سیستم

همانطور که قبلاً ذکر گردید ۳۰ درصد از داده ها به منظور ارزیابی طبقه بند استفاده شدند این داده ها در بخش ادیتور "Rule Viewer" وارد شده و پاسخ طبقه بند با شرایط واقعی یاتاقان ماشین تراش مقایسه شدند (ژاو و همکاران، ۲۰۱۱). ماتریس های اغتشاش حاصل از آزمون مدل نهائی در جداول (۳) تا (۵) نشان داده شده اند. مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی نهایی سیستم با توجه به ماتریس های اغتشاش به دست آمده، در جداول (۶) و (۸) آمده است. نتایج بر اساس جداول مذکور نشان می دهد که درجه ای انطباق طبقه بندی کل در آزمون با سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه ۹۲ درصد و در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ۹۶ درصد می باشد. بالا بودن میزان حساسیت نیز گویای دقت بالای آزمون ها بوده و نشان دهنده قابلیت بالای طبقه بند در ارزیابی کیفی یاتاقان گلوبی ماشین تراش می باشد.

جدول (۶). ماتریس اغتشاش درخت تصمیم ایجاد شده از تحلیل فوریه در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه

سرعت دورانی	بر چسب طبقه بندی	Healthy	Fault 1	Fault2	Fault 3	Fault 4
۱۵۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۱	۲	۰	۰	۱۷
	Fault 1	۱	۰	۱	۱۸	۰
	Fault 2	۰	۱	۱۹	۰	۰
	Fault 3	۰	۲۰	۰	۰	۰
	Fault 4	۱۸	۰	۱	۱	۰

جدول (۷). ماتریس اغتشاش درخت تصمیم ایجاد شده از تحلیل فوریه در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

سرعت دورانی	بر چسب طبقه بندی	Healthy	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 4
	Healthy	۰	۰	۱	۰	۱۹

۰	۲۰	۰	۰	۰	Fault 1
۰	۱	۱۸	۱	۰	Fault 2
۰	۰		۲۰	۰	Fault 3
۱	۰	۰		۱۹	Fault 4

جدول (۸). پارامترهای آماری ارزیابی سامانه فازی ایجاد شده

سرعت	برچسب طبقه بندی	پارامتر مورد ارزیابی حساسیت (%)	درجه انطباق طبقه بندی کل (%)
۵۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۸۵	۹۲
	Fault 1	۹۰	
	Fault 2	۹۵	
	Fault 3	۱۰۰	
	Fault 4	۸۰	
۱۰۰۰ دور بر دقیقه	Healthy	۹۵	۹۶
	Fault 1	۱۰۰	
	Fault 2	۹۰	
	Fault 3	۱۰۰	
	Fault 4	۹۵	

۵- بحث و تفسیر و نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج کلی حاصل از این پژوهش را در بندهای زیر می توان خلاصه نمود:

با مقایسه ی دامنه ی تغییرات در نمودارهای حاصل از شرایط مختلف یاتاقان گلویی ماشین تراش به کمک سیگنال های ارتعاش در حوزه زمان و فرکانس، تشخیص وضعیت یاتاقان گلویی ماشین تراش تا حد زیادی امکان پذیر است. استفاده از پارامترهای آماری طیف های ارتعاش، روشی ساده و کاربردی به منظور استخراج ویژگی های طیف می باشد. درجه ی انطباق طبقه بندی کل در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر ۹۲ درصد و در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ۹۶ درصد بدست آمد. نتایج بند قبل بیانگر این واقعیت است که با افزایش سرعت دورانی یاتاقان گلویی ماشین تراش، توانایی تشخیص عیب افزایش می یابد. طراحی و ساخت سامانه ای هوشمند که بتواند با در اختیار داشتن طیف خام ارتعاش، وضعیت یاتاقان گلویی ماشین تراش را با دقت های مذکور پیشگویی کند، کلی ترین و مهم ترین نتیجه این پژوهش بود. با توجه به نتایج و تجربیات حاصل از انجام این پژوهش، نکات زیر برای پژوهش های بعدی در این حوزه پیشنهاد می گردد:

- تعریف کردن سطوح مختلف سایش و سطوح مختلف خرابی به منظور کارآمدتر شدن سامانه پایش وضعیت
- استفاده ی همزمان از داده های ارتعاشی، روغن یا دما به همراه داده های صدا با کمک روش تلفیق داده ها
- بکار گرفتن ویژگی های آماری بیشتر و روش های دیگر انتخاب ویژگی
- بکارگیری طبقه بندهای دیگر مانند شبکه عصبی، عصبی- فازی، روش نزدیکترین همسایگی و ماشین بردار پشتیبان
- ایجاد سامانه ای برای اعمال گشتاور مخالف بر روی یاتاقان گلویی ماشین تراش به منظور افزایش دقت طبقه بند

- موسویان، س.ا. (۱۳۹۰). تشخیص و طبقه بندی عیوب یاتاقان لغزشی توسط ماشین بردار پشتیبان. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران.
- باقری، ب. (۱۳۸۹). پایش وضعیت آکوستیک گیربکس تراکتور مسی فرگوسن 285 و طبقه بندی عیوب آن بر اساس شبکه عصبی. گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران.
- شکریان، ا. (۱۳۹۳). تشخیص عیوب بال بیرینگ براساس روش شبکه های عصبی موجکی (شبکه های موجی) مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران.
- Zhang, Q., & Benveniste, A. (1995). Wavelet Networks. IEEE Trans, On Neural Networks, 3, 889-898.
- Zhao, C., Sun, X., & Sun, S. (2011). Fault Diagnosis of Sensor by Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm and Support Vector Machine. Expert Systems with Applications, 38, 9908-9912