

طراحی سیستم تشخیص عیوب گیربکس خودروی تندر ۹۰ با استفاده از آنالیز موجک سیگنال صوتی

محمد زادشکویان^۱
دانشیار

گیربکس ها در طول فرایند ساخت، مونتاژ و یا بهره برداری ممکن است دچار عیب گردند در کارخانه های تولید گیربکس، تعیین گیربکس های معیوب جهت جلوگیری از ورود آن ها به چرخه مصرف اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش به عیب یابی هوشمند گیربکس خودرو تندر ۹۰ با استفاده از آنالیز سیگنال های صوتی پرداخته شده است. ابتدا استخراج ویژگی، از سیگنال های پردازش شده در هر سه حوزه انجام گرفت؛ و پس از آن با استفاده از روش آزمون و خطا و همچنین روش استنباط آماری تی ویژگی های مطلوب جهت استفاده در طبقه بندی انتخاب شد. سپس با استفاده از روش های مختلف طبقه بندی شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان، روند هوشمند سازی عیب یابی انجام گرفت. نتایج نشان داد که روش کلاس بندی ماشین بردار پشتیبان با تبدیل گسسته موجک، روی داده های پردازش شده، دارای خطای متوسط کمتر از ۹ درصد هست. که این خطا نسبت به خطای سایر روش ها در این آزمایش کمتر هست.

ابوالفضل غلامی^۲
کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: عیب یابی صوتی، تبدیل موجک، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر از انواع روش های پردازش سیگنال در زمینه های مختلف آنالیز سامانه های مکانیکی استفاده های فراوان شده است. یکی از این کاربردها به کارگیری روش های پردازش سیگنال در عیب یابی سامانه های مکانیکی است که سبب کاهش هزینه ها و افزایش دقت عیب یابی گردیده است. برای این منظور با پردازش سیگنال حاصل از حس گرهای مختلف، اطلاعات لازم برای تحلیل سیستم، استخراج و مورد استفاده قرار می گیرد. در بیشتر موارد، سیگنال به دست آمده توسط حس گرها با نویزهای اندازه گیری همراه است و این نویزها سبب پیچیدگی بیشتر سیگنال برای پردازش شده و مانع استخراج اطلاعات مفید می شود؛ بنابراین روشی برای پردازش سیگنال که بتواند اطلاعات لازم را از سیگنال آلوده به نویز استخراج نماید نقش اساسی در عیب یابی دقیق سامانه ها به عهده دارد. در عمل از انواع تبدیلات خطی و غیرخطی برای پردازش سیگنال استفاده می شود که از آن جمله می توان به تبدیل فوریه، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک و تبدیل بسته

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، جمهوری اسلامی ایران zadshakoyan@tabrizu.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، جمهوری اسلامی ایران abolfazl.gholami@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

موجک اشاره کرد که به طور وسیع در عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی استفاده می‌شوند. بعد از پردازش سیگنال جهت هوشمند سازی عیب‌یابی از روش‌های مختلف طبقه‌بندی استفاده می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های طبقه‌بندی می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان اشاره کرد.

پس از پردازش لازم بر روی سیگنال‌ها، جهت طراحی سامانه‌های هوشمند و تصمیم‌گیری دقیق نیاز به داده‌هایی از سیستم هست که به خوبی سیگنال را توصیف کند و امکان ایجاد تمایز با وضعیت‌های مختلف سیستم را فراهم سازد. این مشخصه‌ها که وضعیت سیگنال را توصیف نموده و جهت طبقه‌بندی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، ویژگی (feature) نام دارد. دلیل استفاده از ویژگی‌ها را می‌توان راحت‌تر شدن تحلیل‌های بعدی، افزایش عملکرد جداکننده بر اساس نمایش بهتر و پایدارتر و حذف اطلاعات تکراری دانست. در روش‌های طبقه‌بندی، روند کاهش ویژگی به دو دسته انتخاب ویژگی و استخراج ویژگی تقسیم می‌شوند. گاهی برخی ویژگی‌های استخراج‌شده در مورد مسائل مختلف، مناسب نمی‌باشند. خصوصاً زمانی که برای یک کلاس‌بندی چندین ویژگی مختلف استخراج‌شده است، جهت به دست آوردن یک کلاس‌بندی با کمترین خطا، لازم است که ویژگی‌ها باهم همخوانی و تطابق کلی داشته باشند در غیر این صورت ضریب خطای کلاس‌ها بیشتر خواهد شد. جهت جلوگیری از این امر و تشخیص و حذف ویژگی‌های اضافی و نامناسب می‌توان از ویژگی‌های استنباط آماری استفاده کرد. یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل آماری، روش استنباط آماری است که به واسطه اطلاعاتی که یک نمونه از جامعه آماری در اختیار می‌گذارد به یک تصمیم در مورد جامعه آماری می‌رسد. آزمون‌های آماری مربوط به میانگین، مانند آزمون تی (T-test) یکی از انواع این روش‌ها است که در مورد میانگین جامعه آماری، دست به قضاوت می‌زند.

پس از استخراج ویژگی‌های مناسبی که سیگنال را به خوبی توصیف کند، جهت خودکارسازی فرآیند عیب‌یابی از روش‌های طبقه‌بندی و هوشمندسازی استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش شبکه عصبی مصنوعی مدل پرسپترون چند لایه برای تشخیص الگوی طبقه‌بندی در عیب‌یابی استفاده شده است.

در سال (۱۹۹۳)، کازلاس و همکارانش، عیوب چرخ‌دنده و بیرینگ گیربکس یک بالگرد را با استفاده از یک شبکه عصبی پرسپترون دو لایه طبقه‌بندی کردند. در این تحقیق، تبدیل فوریه سریع (FFT) برای استخراج بردار ویژگی شبکه عصبی به کار گرفته شد. در این مقاله، علی‌رغم یک شبکه با ساختار بزرگ و نتایج خوب در تشخیص وجود یا عدم وجود عیب، نتایج خوبی در تشخیص خود عیوب به دست نیامد [۱].

سامانتا و همکارانش در سال (۲۰۰۱)، روشی برای عیب‌یابی رولربیرینگ‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه دادند. در این تحقیق، مشخصه‌های سیگنال‌های ارتعاشی یک ماشین دوار در حوزه زمان با بیرینگ‌های نرمال و معیوب به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی پرسپترون که دارای سه لایه ورودی، مخفی و خروجی است، وارد شد [۲].

باربری و همکاران در سال (۲۰۱۷) به بررسی عیوب گیربکس کامیون‌ها توسط آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان فرکانس پرداختند و توانستند عیوب داخل گیربکس را شناسایی کنند [۳].

پری و سینگ در سال (۲۰۱۹) به تشخیص خطای گیربکس با استفاده از سیگنال‌های آکوستیکی، تبدیل موجک پیوسته و سیستم استنتاج عصبی تطبیقی پرداختند. این مقاله روشی برای تشخیص خطا در گیربکس تک‌مرحله‌ای مبتنی بر تحلیل سیگنال‌های آکوستیک به‌دست‌آمده تحت شرایط مختلف خطا، ارائه می‌کند.

سیگنال‌های حاصل به منظور بهبود نسبت سیگنال به نویز میانگین‌گیری شده‌اند؛ بنابراین سیگنال‌های متوسط دامنه با استفاده از تبدیل موجک پیوسته تجزیه می‌شوند. سپس طیف وسیعی از مقیاس‌های بهینه بر اساس نسبت آنتروپی شانون - ضرایب موجک پیوسته تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که سیگنال‌های صوتی می‌توانند به‌طور مؤثر برای تشخیص وضعیت جعبه‌دنده مورد استفاده قرار گیرند ولی به دلیل حجم بالای اطلاعات موجک پیوسته، سرعت پردازش در این روش کمتر بود [۴].

در سال (۱۹۹۳) وانگ و مک فادن برای آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی چرخ‌دنده‌ها که یکی از مهم‌ترین اجزاء ماشین می‌باشند از آنالیز موجک استفاده کردند و فهمیدند که موجک برای کشف انواع عیوب مکانیکی که در مراحل اولیه عیب اتفاق می‌افتد، مناسب هست [۵]. در سال (۲۰۰۲)، تسه و پنگ، تأثیرات موجک را برای عیب‌یابی رولربیرینگ‌ها (Rolling element bearing) استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از تبدیلات موجک برای پیدا کردن عیوب مناسب می‌باشند و موجک از لحاظ محاسبات و زمان سریع‌تر عمل می‌کند [۶]. در سال (۲۰۱۹) سعید نظامیوند و همکاران به روش ترکیبی هوشمند برای عیب‌یابی یاتاقان بر پایه بهبود روش انتخاب ویژگی ارزیابی جبران فاصله و ماشین بردار پشتیبان پرداختند. در این پژوهش از سیگنال‌های ارتعاشی استفاده کردند و یک روش برای عیب‌یابی یاتاقان‌ها در سرعت دورانی‌های مختلف ارائه شده است. سیگنال‌های ارتعاشی در چهار حالت سالم، رینگ داخلی معیوب، رینگ خارجی معیوب و ساچمه معیوب جمع‌آوری شده‌اند. ویژگی‌ها در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان فرکانس استخراج شده است. از تبدیل بسته‌ای موجک برای تجزیه سیگنال‌ها استفاده کردند. از ویژگی‌های منتخب به عنوان ورودی طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی وضعیت یاتاقان استفاده شده است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که ویژگی‌های انتخاب شده به خوبی قادر به تفکیک شرایط مختلف یاتاقان در سرعت‌های مختلف هستند [۷].

امروزه در دنیا، در صنایع مختلف جهت ارائه محصول سالم به بازار از روش‌های سنتی جهت تشخیص و کنترل نهایی محصول کمتر استفاده می‌شود و در اکثر موارد از روش‌های مدرن و فناوری روز بهره می‌برند، روش‌هایی که بیشتر مبتنی بر فناوری هوش مصنوعی و تشخیص و تصمیم توسط ماشین هست. بدین منظور در این پژوهش به توانمندسازی خط مونتاژ گیربکس سواری تندر ۹۰ از این فناوری پرداخته شده است. با توجه به اینکه عملیات تست نویز گیربکس به صورت سنتی و سیستم شنوایی اپراتور انسانی انجام می‌یافت، تصمیم گرفته شد تا از سیستم هوش مصنوعی بر اساس پردازش سیگنال‌های صوتی استفاده گردد.

۲- مواد و روش

با توجه به بررسی پیشینه تحقیقات انجام‌یافته در عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی مشاهده شد که از کمیت ارتعاشات بیشتر از کمیت صوت، جهت عیب‌یابی استفاده شده است؛ اما به دلیل اینکه در مورد این مسئله بررسی کمیت صوتی دارای مزیت‌هایی هست از روش آنالیز سیگنال‌های صوتی در انجام این پروژه استفاده شد. برخی از مزیت‌هایی که باعث شد از کمیت صوتی در این پروژه استفاده شود به شرح زیر هست:

۱- با توجه به اینکه واحد آزمون عملکرد گیربکس در این پروژه داخل اتاق استاندارد و آکوستیک انجام می‌شود، از تأثیر صداها و نویزهای اطراف تا حدود زیادی در مصون هست بنابراین می‌توان از سیگنال‌های صوتی

- به جای ارتعاشات استفاده کرد. چون در اکثر مواردی که ارتعاشات را جایگزین کمیت صوتی کرده‌اند به دلیل تأثیرپذیری پایین ارتعاشات از صدای اطراف بوده است.
- ۲- جهت تشخیص دقیق و کامل عیب توسط کمیت ارتعاشات لازم هست که حداقل ۳ عدد حس‌گر ارتعاش-سنج در سه محور مختلف نصب شود در صورتی که در سیستم داده‌برداری صوتی می‌توان با انتخاب مناسب سیستم، تنها از یک حس‌گر استفاده کرد.
- ۳- قیمت سیستم داده‌برداری ارتعاش‌سنج بالاتر از سیستم داده‌برداری سیگنال‌های صوتی هست.
- ۴- مکان‌یابی دقیق محل نصب حس‌گرهای ارتعاش‌سنج روی گیربکس سخت هست و همواره احتمال خطا وجود دارد و در بعضی موارد، به دلیل ناهموار بودن سطح پوسته گیربکس این امکان وجود ندارد.
- ۵- با توجه به اینکه در این خط مونتاز، عنصر زمان اهمیت بسیاری دارد و هر گیربکس باید در زمان زیر یک دقیقه آزمون شود و با توجه به اینکه نصب حس‌گرهای ارتعاشات حساسیت بالایی دارد و مستلزم زمان کافی هست، استفاده از این کمیت مناسب نیست.
- ۶- با توجه به اینکه گیربکس‌ها به هنگام تست، جهت ایمنی پشت پرده نوری قرار می‌گیرند نصب و برداشتن حس‌گرهای ارتعاشات در هر گیربکس به صورت دستی دچار مختل شدن سیستم ایمنی یاد شده می‌شود و با توجه به تأکید صرفه‌جویی امکان مکانیزه کردن نصب حس‌گرها وجود ندارد.
- ۷- با توجه به اینکه در مورد این مسئله زمان حساسیت زیادی دارد و به دلیل اینکه سیگنال‌های ارتعاشی در سه محور باید داده‌برداری شوند و حجم اطلاعات زیادی را در برمی‌گیرند و محاسبه و آنالیز اطلاعات آن زمان زیادی طول می‌کشد درحالی‌که سیگنال صوتی تنها با یک میکروفن می‌تواند بررسی شود و حجم اطلاعات کم ولی مفیدی نسبت به ارتعاشات خواهد داشت، پس ارجحیت روش آنالیز صوتی مشخص است.

۲-۱- پردازش سیگنال

به دست آوردن اطلاعات مفید و ضروری که به هر دلیل از سیگنال اولیه قابل دریافت نیست. حذف و کاهش تأثیر نویز، دستیابی به محتوای پنهان سیگنال‌ها، استفاده از اطلاعات فرکانسی و زمان فرکانسی و تشکیل سیگنالی بهتر برای داده‌کاو مؤثرتر از ضرورت‌های پردازش سیگنال هست.

توابع مورد استفاده در مهندسی و توابع نمایانگر سیگنال‌ها، معمولاً توابعی از زمان هستند یا به عبارت دیگر توابعی که در میدان زمان تعریف شده‌اند. برای حل بسیاری از مسائل بهتر است که تابع در دامنه فرکانس تعریف شده باشد زیرا این دامنه ویژگی‌هایی دارد که به راحتی محاسبات می‌انجامد. در ریاضیات، جوزف فوریه (Joseph Fourier) ریاضیدان فرانسوی در قرن ۱۹ میلادی، نشان داد که هر تابع متناوب را به صورت جمعی از توابع نوسانی ساده (سینوسی، کسینوسی و یا تابع نمایی مختلط) می‌توان نوشت که با استفاده از آن می‌توان محاسبات پیچیده‌ی حوزه زمان را به راحتی در حوزه فرکانس انجام داد برای این منظور از تبدیل فوریه سریع استفاده می‌شود و با عکس تبدیل فوریه که به تبدیل کپستروم (cepstrum Transform) معروف است می‌توان به حوزه زمان انتقال داد. در سال (۱۹۴۶) دنیس گابور، آنالیز فوریه را جهت تحلیل نواحی گذرای سیگنال، در یک پنجره زمانی اصلاح نمود که تحت عنوان تبدیل فوریه زمان کوتاه شناخته شد [۸]. در حوزه یک بعدی، زمان یا فرکانس، هیچ‌کدام به روشنی اطلاعات حوزه دیگر را نمایش نمی‌دهد. همچنین طیف یک سیگنال که

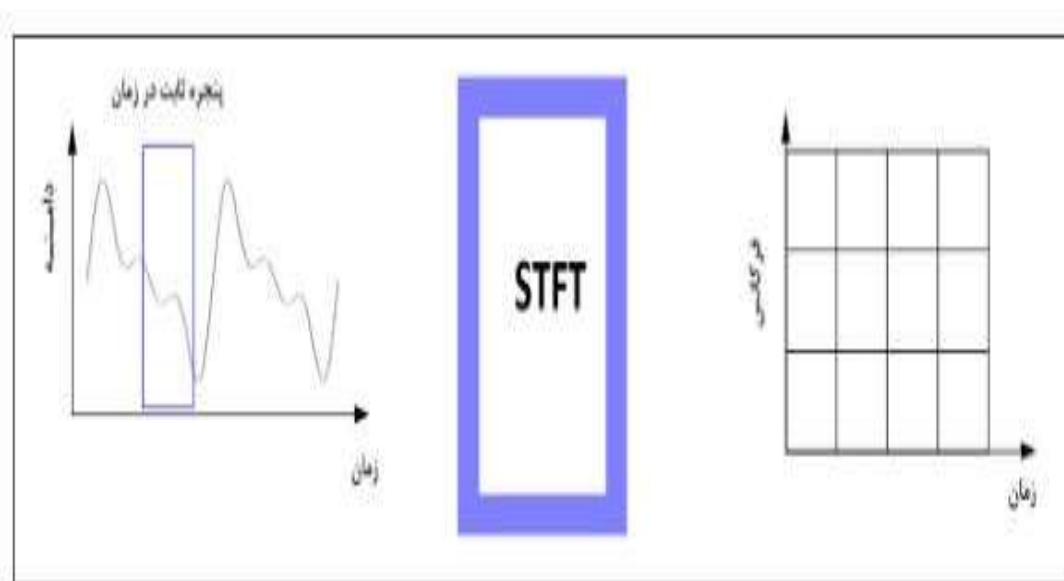
از تابع حوزه زمان با کمک تکنیک تبدیل فوریه بدست می‌آید و بیانگر شدت و چگالی هر جزء فرکانسی از سیگنال است، اطلاعات دقیق و کافی را در خصوص سیگنال‌های گذرای حامل انرژی بالا در حوزه زمان نمی‌دهد؛ بنابراین بررسی دقیق‌تر انرژی سیگنال‌ها و به دست آوردن توصیف لحظه‌ای از انرژی و جواب دادن به برخی سؤالات در مورد توزیع انرژی مستلزم تحلیل زمان - فرکانس است.

برای اولین بار جهت رفع معایب تبدیل فوریه، تبدیل فوریه زمان کوتاه توسط گابور ارائه شد [۸]. در این تبدیل، سیگنال به یک تابع دو بعدی زمان و فرکانس نگاشت شده و اطلاعاتی را شامل اینکه در چه زمانی و در چه فرکانسی یک عیب در سیگنال رخ داده است، را ارائه می‌کند.

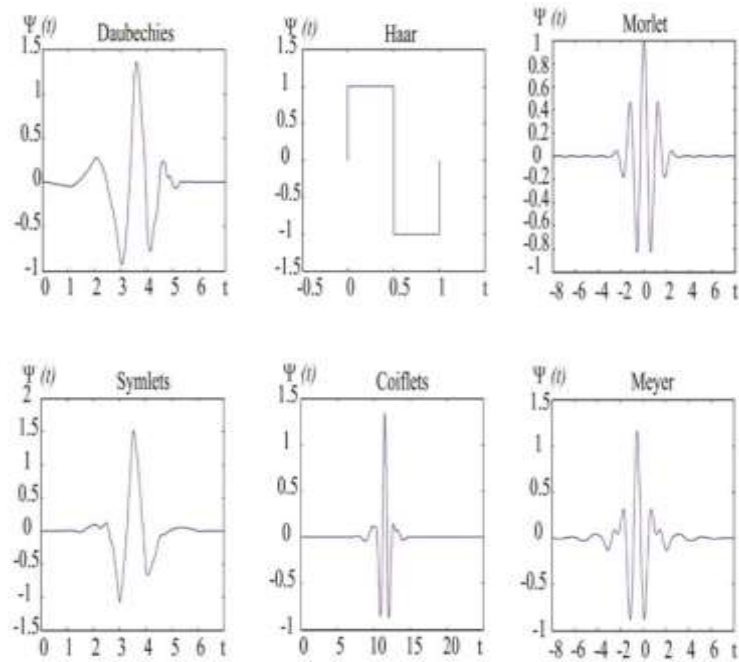
STFT برای اولین بار بین نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس ارتباطی ایجاد نمود. با این روش، اطلاعاتی در مورد این که چه فرکانس‌هایی در چه زمان‌هایی رخ داده‌اند، به دست می‌آید؛ اما دقت دستیابی به این اطلاعات محدود بوده و به اندازه‌ی پنجره وابسته است؛ اما متأسفانه این روش نیز با یک مشکل روبرو است. در این روش مطابق شکل (۱) یک پنجره با اندازه‌ی ثابت در زمان، برای تحلیل تمامی فرکانس‌ها استفاده می‌شود [۹].

با توجه به مشکل مطرح شده در تحلیل STFT، تکنیک پنجره‌گذاری با پنجره‌هایی با اندازه‌های متغیر؛ قدم منطقی بعدی است که با نام تحلیل موجک شناخته می‌شود. تحلیل موجک اجازه می‌دهد تا هنگامی که اطلاعات فرکانس پایین مدنظر است از بازه‌های زمانی طولانی استفاده شود وقتی به اطلاعات فرکانس بالا نیاز هست از بازه‌های زمانی کوچک استفاده شود.

در تبدیل فوریه، یک سیگنال به صورت مجموع یک سری موج‌های سینوسی با فرکانس‌های مختلف بیان می‌شود ولی در تحلیل موجک، سیگنال معادل مجموع یک سری از موجک‌های بدست آمده از جابجا شدن و انبساط و انقباض یک موجک مادر است. موجک برخلاف یک موج سینوسی که تابعی نامتناهی و کاملاً پیوسته و متناوب است، یک سیگنال زمانی محدود با متوسط دامنه صفر و انرژی محدود است. چند نمونه از موجک در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۱- اعمال تبدیل STFT به سیگنال [۸]



شکل ۲- چند نمونه تابع موجک مادر [۸]

روش های متداولی که در چند دهه اخیر در مورد آنالیز سیگنال در اکثر مقالات بدان اشاره شده است عبارتند از تبدیل فوریه، تبدیل موجک و از روش های مختلف طبقه بندی می توان به شبکه های عصبی مصنوعی مدل پرسپترون چند لایه، سیستم فازی، الگوریتم های مختلف و ... اشاره کرد که می توان از مناسب ترین آن ها نیز به شبکه عصبی پرسپترون و ماشین بردار پشتیبان اشاره کرد که در این پروژه به بررسی و مقایسه این روش ها پرداخته شده است تا در نهایت مناسب ترین روش آنالیز سیگنال و مناسب ترین سیستم طبقه بندی برای این پروژه انتخاب شوند.

۲-۲- استخراج توابع ویژگی

استخراج ویژگی از دیدگاه کمی و کیفی حائز اهمیت هست. انتخاب تعداد کم ویژگی ها عملاً باعث می شود تا خواص و حالات یک سیگنال به خوبی برجسته نشود و در نتیجه نتوان بین دو سیگنال متفاوت تمایزی قائل شد؛ و انتخاب تعداد فراوان توابع ویژگی نیز باعث می شود تا در تجزیه و تحلیل اطلاعات بدست آمده سردرگمی ایجاد شود و در این حالت مجدداً نمی توان رفتار یک سیگنال را به دقت پیش بینی نمود. این ایراد هنگامی تشدید می شود که ویژگی های مناسبی هم استخراج نشده باشند.

همچنین کیفیت ویژگی های انتخاب شده از اهمیتی حیاتی برخوردار است. بدین معنا که باید ویژگی هایی انتخاب شود که برای شناسایی آن نوع سیگنال مفید باشد. به عنوان مثال برای شناسایی سیگنال هایی که ماهیت ضربه ای دارند، کورتوسیس و فاکتور ضربه ویژگی های مناسب است، در حالی که میانگین یک ویژگی مناسب به شمار نمی رود در مقابل برای پایش رفتار سیگنال هایی که مربوط به یک حالت پایدار یا گذار طولانی هستند، میانگین و میزان مؤثر سیگنال ویژگی های مناسبی به شمار می روند [۱۰]. در ادامه روابط توابع ویژگی مهمی که در این پژوهش استفاده شده است، آورده شده است.

۲-۲-۱- تابع میانگین

$$\text{Mean} = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)}{N} \quad (1)$$

۲-۲-۲- جذر میانگین مربعات

میزان مؤثر یک سیگنال را نشان می‌دهد.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n))^2}{N}} \quad (2)$$

۲-۲-۳- انحراف از معیار

میزان پراکندگی مقادیر سیگنال نسبت به میانگین را نشان می‌دهد. هنگامی که میانگین سیگنال به سمت صفر میل کند، انحراف از معیار و میزان مؤثر سیگنال باهم برابر می‌شوند.

$$\text{STD}(x(n)) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \text{Mean}(X(n)))^2}{N - 1}} \quad (3)$$

۲-۲-۴- فاکتور ضربه

ماهیت ضربه‌ای یک سیگنال را بیان می‌کند. در پایش رفتار ضربه‌ای سیگنال‌ها اهمیت بسزایی دارد؛ و برای پایش سیگنال‌های دارای تغییرات زیاد و گذرا بسیار کاربرد دارد، وقتی میانگین سیگنال‌ها به سمت صفر میل کند دچار مشکل می‌شود.

$$F_z = \frac{\text{Max}(x(n))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|} \quad (4)$$

۲-۲-۵- فاکتور کرس (Crest Factor)

فاکتور کرس حاصل تقسیم بیشینه سیگنال بر میانگین جذر مربعات یک سیگنال است. این روش برای ماشین‌های ساده که چند منبع ارتعاشات ندارند کاربرد دارد.

$$\text{Crest Factor}(X(n)) = \frac{M}{\text{RMS}} = \frac{\text{Max}(x(n))}{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X(n))^2}{N}}} \quad (5)$$

۲-۲-۶- فاکتور کورتوسیس (kurtosis Factor)

فاکتور کورتوسیس برای تشخیص عیب در جعبه‌دنده‌ها و بیرینگ‌های غلتشی و عیوب ریز و کوچک مناسب هست برای حالت کارکرد طبیعی یک سیستم کورتوسیس آن اندازه‌گیری می‌شود. با بروز عیب، کورتوسیس افزایش می‌یابد. تشخیص و پیش‌بینی بروز عیب در سامانه‌های مکانیکی از طریق پایش میزان کورتوسیس سیگنال ارتعاشی معمولاً انجام می‌گیرد.

$$\text{Kurtosis}(X(n)) = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \text{Mean}(X(n)))^4}{(N - 1) \cdot (\text{STD}(X(n)))^4} \quad (6)$$

۷-۲-۲- میانگین هارمونیک (Harmonic Mean)

نوع دیگری از میانگین سیگنال را نشان می‌دهد، در مواردی که میانگین هندسی تعریف نشده باشد از این میانگین می‌توان استفاده نمود.

$$\frac{N}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{x(n)}} \quad (7)$$

۸-۲-۲- مومنتوم ها (Momentums)

مقدار نرمال شده سیگنال نسبت به میانگین را نشان می‌دهد.

$$\text{Momentum3} = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^3}{N - 1} \quad (8)$$

۹-۲-۲- انرژی (Energy)

میزان انرژی یک سیگنال بیانگر میزان اغتشاش آن است. سطح بالاتر سیگنال نشان‌دهنده افزایش میزان انرژی سیگنال هست. انرژی زیاد سیگنال نشان از بروز یک پدیده دارد: معیوب بودن سامانه، ایراد در نصب و غیره.

$$\text{Energy} = \sum_{n=1}^N (x(n))^2 \quad (9)$$

۱۰-۲-۲- آنتروپی (Entropy)

از ویژگی‌های بسیار مهم در پایش رفتار یک سیگنال است.

$$\text{Entropy} = \sum_{n=1}^N (x(n) * \log(\frac{1}{x(n)}))^2 \quad (10)$$

۱۱-۲-۲- اسکیونس (Skewness) یا چولگی

کشیدگی یا چولگی یک سیگنال به یک سمت را نشان می‌دهد. چولگی برابر با گشتاور سوم نرمال شده است. چولگی در حقیقت معیاری از میزان تقارن تابع توزیع هست. برای یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر چولگی مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچک‌تر مقدار چولگی منفی است.

$$\text{skewness} = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \text{mean}(x(n)))^4}{(N-1) * (\text{STD}(x(n)))^3} \quad (11)$$

۱۲-۲-۲- واریانس و کوواریانس (variance and covariance)

فرمول محاسبه کوواریانس شبیه فرمول محاسبه واریانس است. واریانس را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{var}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{n - 1} \quad (12)$$

ماتریس کوواریانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (13)$$

این دقیقاً همان فرمول واریانس است به جز آن که در دومین مجموعه از پرانتزها، y جایگزین x شده است. از آنجاکه ارزش کوواریانس را بین هر دو بعد در مجموعه اطلاعات می توان حساب کرد، این تکنیک اغلب برای پیدا کردن ارتباط بین بعدها در ابعاد بزرگ مجموعه اطلاعات که تجسم آن مشکل است استفاده می شود.

۳-۲- ماشین بردار پشتیبان

ماشین های بردار پشتیبان از تکنیک های فراگیری ماشین (Machine Learning) بر اساس تئوری آماری و به عنوان ابزاری قوی در طبقه بندی داده ها محسوب می شود. روند کلی این روش طبق مراحل زیر انجام می گیرد [۱۱]:

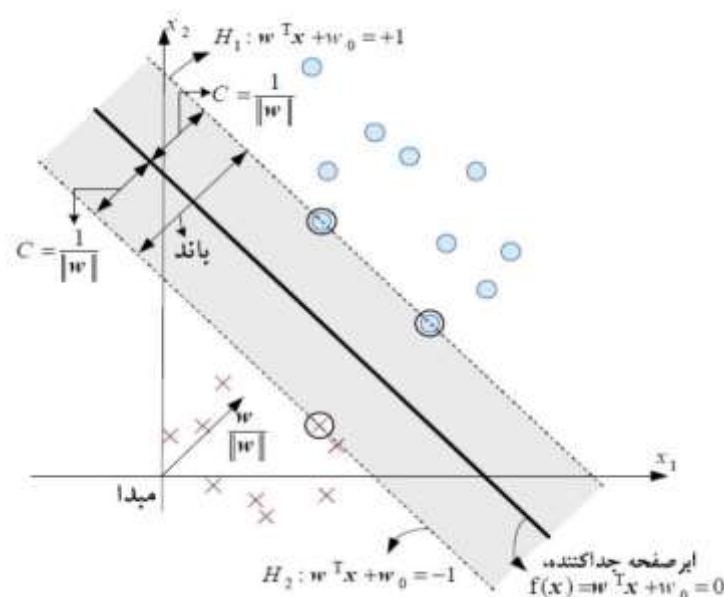
۱. نگاشت بردار ورودی به یک فضای ویژگی

۲. جستجوی تقسیمات خطی بهینه جهت ایجاد یک ابر صفحه جهت طبقه بندی دو کلاس مختلف که قابلیت گسترش به طبقه ای بیشتر را نیز داراست.

فرآیند آموزش SVM به دنبال حل بهینه ای هست که دچار بیش برازش نشود و در عین حال قابلیت ارتباط با تعداد زیادی از ویژگی ها را داشته باشد. شکل (۳) ابر صفحه جداکننده خطی بهینه برای دو کلاس کاملاً جدا در ماشین بردار پشتیبان را نشان می دهد.

این الگوریتم از مجموعه ای به نام مجموعه داده های آموزش یاد می گیرد و سعی می کند تا آن را جامع کند و پیش بینی های صحیحی را با توجه به داده های جدید به دست آورد. در ادامه، مفاهیم پایه ای روش ماشین بردار پشتیبان تشریح داده شده اند. داده های x_i ($i = 1, \dots, n$) را در نظر بگیرید که به صورت کلاس های مثبت $y_i = +1$ یا منفی $y_i = -1$ برچسب شده اند. ابر صفحه جداکننده بهینه $f(x) = w \cdot x + b$ را می توان با حل مساله بهینه سازی زیر به دست آورد [۱۲]:

$$\min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^N \xi_i \right) \quad (14)$$



شکل ۳- ابر صفحه جداکننده خطی بهینه برای دو کلاس کاملاً جدا در ماشین بردار پشتیبان [۵]

$$\text{subject to: } \begin{cases} y_i(w \cdot x + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

که ξ_i فاصله بین ابرصفحه و نمونه‌های قرار گرفته در طرف اشتباه ابرصفحه را اندازه می‌گیرد و C پارامتر جریمه است. با معرفی ضرایب لاگرانژ α_i و β_i ، یک مساله بهینه سازی درجه دوم به دست می‌آید. اگر α_i^* مقدار بهینه‌ای برای پارامتر α_i باشد که با حل این معادله بدست می‌آید، آن می‌توان پارامترهای بهینه ابرصفحه را محاسبه نمود. در نهایت، تابع طبقه‌بندی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i(x_i x_j) + b) \quad (16)$$

در حالتی که در فضای ورودی، دسته‌بندی غیرخطی است، می‌توان روش SVM را با نگاشت داده‌ها به فضای ویژگی با ابعاد بالاتر اعمال نمود. در این حالت می‌توان از یک تابع غیرخطی همچون $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_l(x))$ برای نگاشت بردار ورودی n بعدی X به فضای ویژگی l بعدی استفاده نمود، به طوری که تابع تصمیم به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i,j=1}^N \alpha_i y_i K(x_i x_j) + b) \quad (17)$$

که $K(x_i x_j)$ تابع هسته است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K(x_i x_j) = (\varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)) \quad (18)$$

تابع هسته‌ای که در کاربردهای عملی SVM به طور گسترده‌ای تابع پایه شعاعی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K(x_i x_j) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (19)$$

۴-۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله ابزارهای پرکاربرد محاسباتی برای آزمون داده‌ها، تقریب توابع و ایجاد مدل‌های خطی و غیرخطی از ساختار داده‌ها و سامانه‌ها هستند و طی دهه‌های اخیر حضور موفق این روش در مسائل مختلف مهندسی مشاهده شده است.

هرچند نحوه مدل کردن نورون جزء اساسی‌ترین نکات کلیدی در کارایی شبکه عصبی مصنوعی هست اما نحوه برقراری اتصالات و چیدمان (توپولوژی) شبکه نیز فاکتور مهم و اثرگذاری است. باید توجه داشت که توپولوژی مغز انسان آنقدر پیچیده است که نمی‌توان از آن به‌عنوان مدلی برای اعمال به شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمود، چراکه مدلی که استفاده می‌شود، یک مدل ساده شده است درحالی‌که در چیدمان مغز از المان‌های بسیار زیادی استفاده می‌کند.

یکی از ساده‌ترین و درعین‌حال کارآمدترین چیدمان‌های پیشنهادی برای استفاده در مدل‌سازی عصب‌های واقعی، مدل پرسپترون چندلایه یا به اختصار MLP هست که از یک‌لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک‌لایه خروجی تشکیل یافته است. در این ساختار، تمام نورون‌های یک‌لایه به تمام نورون‌های لایه بعد متصل‌اند. این چیدمان اصطلاحاً یک شبکه با اتصالات کامل را تشکیل می‌دهد.

شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه یک نوع از شبکه‌های پیش‌رونده می‌باشند که شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و تعداد دلخواه لایه مخفی می‌باشند. با وجود اینکه از لحاظ تئوری هیچ محدودیتی در انتخاب لایه‌های مخفی وجود ندارد، تعداد لایه‌های مخفی معمولاً یک یا دو لایه در نظر گرفته می‌شوند. یک شبکه عصبی پرسپترون با چهار لایه یعنی دارای سه لایه مخفی و یک لایه خروجی قابلیت حل هر مسئله‌ای را با هر گونه پیچیدگی دارا هست. هر لایه به صورت کامل به لایه متوالی متصل می‌شود. شبکه‌های عصبی پرسپترون دارای کاربردهای فراوانی می‌باشند که شامل آنالیز صدا، پردازش تصویر، پیش‌بینی و پیش‌گویی (Forecasting and prediction)، پیگردی چندهدفه (Multi-target tracking) و غیره می‌باشند [۱۳].

۳- آزمایش های تجربی

هدف از انجام این پژوهش، کنترل نهایی سالم بودن گیربکس دستی خودروی سواری تندر ۹۰ در خط مونتاژ بوده است که توسط آنالیز سیگنال‌های صوتی با استفاده از کلاس‌بندی مناسب مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل (۴) نمای داخل گیربکس سواری مورد نظر را نشان می‌دهد.

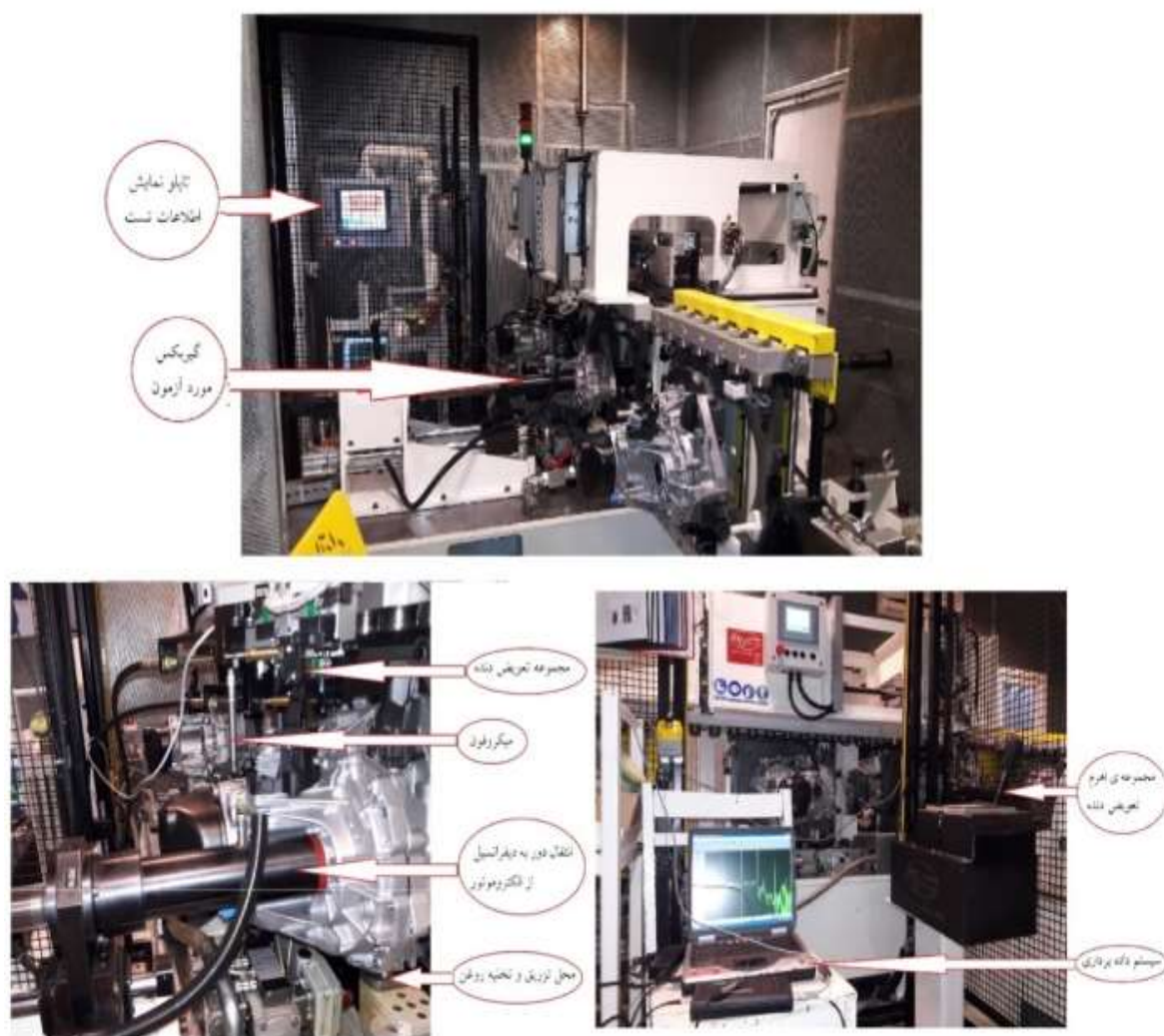
در انجام این پژوهش به واحد آزمون نهایی عملکرد خط مونتاژ گیربکس تندر ۹۰ در شرکت چرخشگر تبریز، مراجعه شد و ملاحظه گردید که در اتاق آزمون این شرکت، گیربکس مورد نظر توسط موتور الکتریکی مناسب دوران یافته و در دنده‌های مختلف آزمون صدا و آزمون جاروی دنده انجام می‌گردد. آزمون صدا در دنده‌های مختلف، این گونه بود که صدای گیربکس توسط اپراتور مربوطه شنیده می‌شد و به صورت تجربی سالم یا غیرسالم بودن گیربکس تشخیص داده می‌شد؛ و در صورت تشخیص غیرسالم بودن، توسط اپراتور به گیربکس مورد نظر کارت زرد داده می‌شد و جهت بازبینی و تعویض قطعه معیوب به واحد تعمیرات ارسال می‌شد. جهت بالا بردن دقت تشخیص و کاهش معایب آن، تصمیم گرفته شد تا سیستمی جهت تشخیص هوشمند سالم و غیرسالم بودن عیوب گیربکس طراحی شود.



شکل ۴- نمای داخل گیربکس سواری تندر ۹۰

مراحل به دست آوردن داده‌های تجربی بدین صورت بود که تعداد ۱۶۸ عدد از گیربکس‌های نو، در خط تولید مورد آزمون قرار داده شد که از این تعداد ۹۶ عدد سالم و ۷۲ عدد معیوب بودند. ابتدا سالم و غیرسالم بودن گیربکس‌ها توسط اپراتور ماهر و باتجربه، توسط ادراک شنوایی آن حین آزمون عملکرد مشخص شد و بر اساس شماره گیربکس‌ها طبقه‌بندی و ثبت شد. بعد از آن سیگنال‌های صوتی تولید شده به هنگام عملکرد گیربکس به صورت مجزا در دنده‌های ۱ تا ۵، توسط دستگاه مربوطه هارمونیا (HARMONIE Measurement System) داده‌برداری شد و سپس پیش‌پردازش و پردازش در نرم‌افزار متلب روی داده‌ها انجام گرفت، سپس داده‌های به دست آمده در دو طبقه‌بندی سالم و غیرسالم (که توسط اپراتور آزمون ماهر مشخص شده بود) قرار داده شد. در نهایت جهت طراحی سیستم هوشمند تشخیص، از داده‌ها به صورت ۷۰ درصد آموزش (Training)، ۱۵ درصد اعتبارسنجی (Validation) و ۱۵ درصد آزمون (Testing) در کلاس‌بندی داده‌ها استفاده شد.

بدین ترتیب پس از برداشت سیگنال‌های صوتی، گیربکس در پنج حالت (دنده‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵) بررسی می‌شود؛ و شماره دنده یا دنده‌هایی که دارای صدای غیرعادی می‌باشند، توسط سیستم هوشمند مشخص می‌شود تا واحد تعمیرات بعد از باز کردن گیربکس به راحتی عیب مورد نظر را جستجو نماید و قطعه معیوب را پیدا و تعویض نماید. شکل (۵) بستر آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۵- بستر آزمون

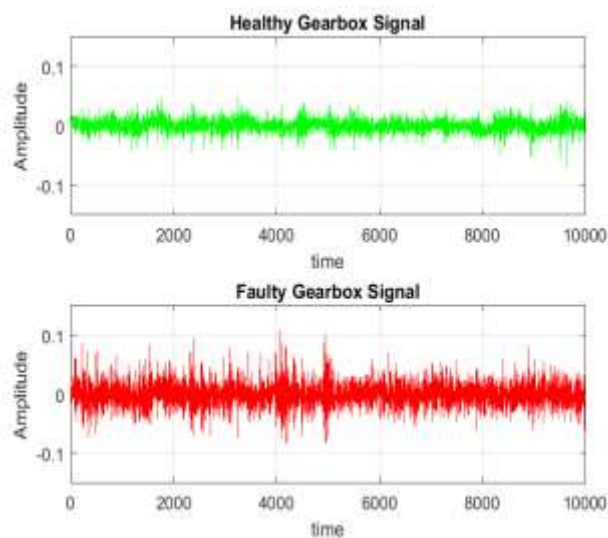
۳-۱- راستی آزمایی نتایج

گیربکس های مورد آزمون توسط اپراتور ماهر و با تجربه توسط حس شنوایی به هنگام کارکرد آن در اتاق تست، جهت راستی آزمایی در دو طبقه بندی سالم و غیرسالم قرار می گیرند. جهت اطمینان بیشتر از تشخیص صحیح اپراتور مربوطه، گیربکس ها را بعد از اتمام عملیات تست و برداشت سیگنال های صوتی، باز نموده و قطعات داخلی آن از هم جدا شده و زیر ذره بین بررسی می شود تا عیوب احتمالی آن مشاهده گردد.

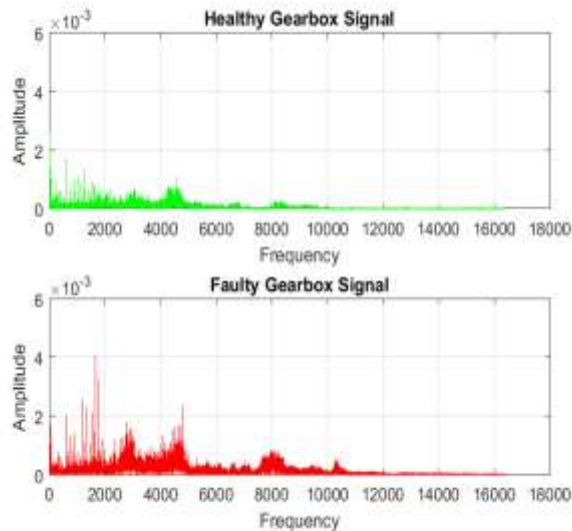
۳-۲- تفسیر و تحلیل نتایج

ابتدا سیگنال حوزه زمانی مورد بررسی قرار گرفته شد. به این صورت که بعد از فراخوانی داده ها در نرم افزار متلب عملیات پیش پردازش روی داده ها انجام گرفت. در شکل (۶) سیگنال حوزه زمان به طول ۱۰۰۰۰ با فرکانس نمونه برداری ۲۵۰۰۰ هرتز در دو نمونه ی گیربکس سالم و معیوب در دنده ۳ نشان داده شده است. محور X ، زمان را در واحد میلی ثانیه با ضریب 0.4 و محور Y فشار صوت را در واحد پاسکال نشان می دهد. مطابق شکل مشاهده می شود که سیگنال زمانی گیربکس سالم که با رنگ سبز نشان داده شده است نسبت به سیگنال قرمز رنگ گیربکس معیوب، دارای اغتشاش و بی نظمی و شدت صوت کمتری هست که این نشان از بدون ایراد بودن گیربکس هست. جهت بررسی سیگنال ها در حوزه فرکانس، از سیگنال های حوزه زمانی، تبدیل سریع فوریه (FFT) گرفته شده است؛ و به این ترتیب اطلاعات فرکانس داده ها به دست آمده است. در شکل (۷) نمودار FFT دو سیگنال نمایش داده شده در شکل (۶)، نشان داده شده است در این شکل محور X ، فرکانس در واحد هرتز و محور Y شدت دامنه هر فرکانس را نشان می دهد.

در این شکل تفاوت نمودار FFT دو سیگنال سالم و معیوب کاملاً مشهود است. همان طور که ملاحظه می شود شدت دامنه فرکانس در سیگنال سالم در اکثر محدوده فرکانسی پایین تر از سیگنال گیربکس معیوب هست. همان طور که در شکل ملاحظه می شود از محدوده فرکانس ۵۰۰۰ به بعد که معمولاً متاثر از نویز هست، تقریباً به صفر میل کرده است و محدوده پایین تر از فرکانس ۵۰۰۰ نیز به دلیل کاهش اثر نویز، دارای اغتشاش و شدت کمتری شده است.

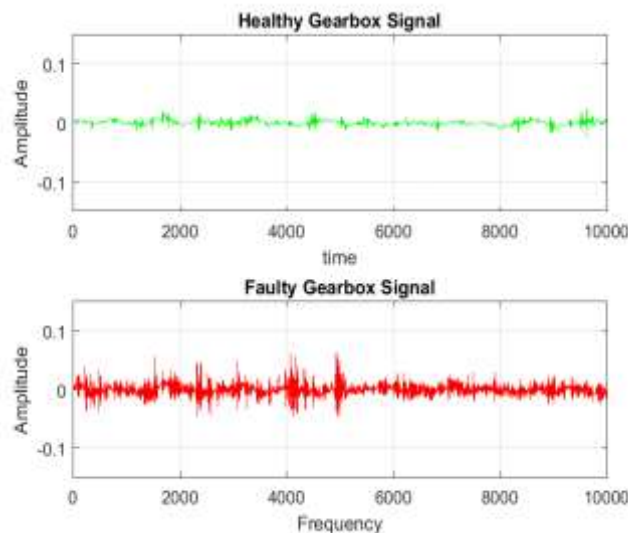


شکل ۶- سیگنال زمانی دنده ۳ برای یک نمونه گیربکس سالم و معیوب

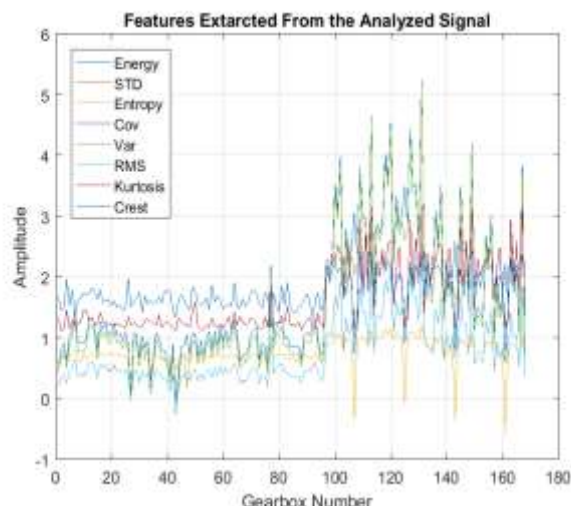


شکل ۷- سیگنال FFT برای یک نمونه گیربکس سالم و معیوب در دنده ۳

در تحلیل سیگنال در حوزه زمان فرکانس، از آنالیز موجک استفاده شده است. مطابق شکل (۸) سیگنال‌های دو عدد گیربکس سالم (سبز رنگ) و معیوب (قرمز رنگ) بعد از انجام تبدیل موجک و نویزدایی مبتنی بر موجک مجدداً سیگنال بازسازی و در حوزه زمان نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سیگنال سالم با سیگنال معیوب تفاوت مشهودی دارد و سیگنال سالم دارای شدت دامنه کمتری هست. ۸ ویژگی توسط آزمون استنباط آماری تی از بین ویژگی‌های استخراج شده در حوزه زمان انتخاب شد که عبارتند از: انرژی، انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس، کورتوسیس، کرس. نمودار این ۸ ویژگی استخراج شده برای سیگنال حوزه زمانی در شکل (۹) نشان داده شده است از تعداد ۱۶۸ سیگنال، ۹۶ سیگنال اول سالم و ۷۲ سیگنال بعدی از طرف اپراتور ماهر آزمون به صورت تجربی، معیوب معرفی شده بود که در این نمودار نیز صحت این نتیجه مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تمامی نمودارهای ویژگی در شکل تا شماره ۹۶ شدت نسبتاً کمتری از شماره ۹۶ به بعد دارند.

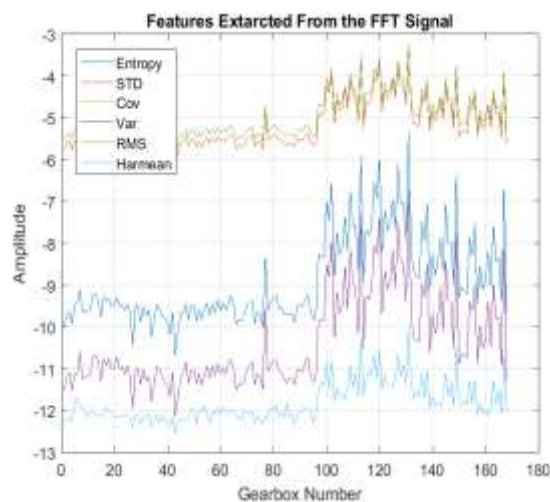


شکل ۸- سیگنال بازسازی شده بعد از تبدیل موجک در دنده ۳ برای دو گیربکس سالم و معیوب

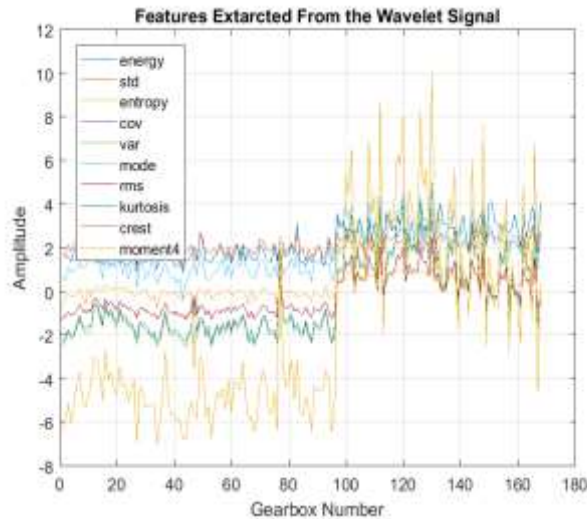


شکل ۹- ویژگی‌های استخراج‌شده در حوزه زمان برای ۱۶۸ گیربکس در دنده ۳

۶ ویژگی توسط آزمون استنباط آماری تی از بین ویژگی‌های استخراج شده، در حوزه فرکانس انتخاب شد که عبارتند از: انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس، مومنتوم، مد و انرژی. نمودار این ۶ ویژگی استخراج‌شده برای سیگنال حوزه فرکانس در شکل (۱۰) نشان داده شده است از تعداد ۱۶۸ سیگنال، ۹۶ سیگنال اول سالم و ۷۲ سیگنال بعدی از طرف اپراتور ماهر آزمون به صورت تجربی معیوب معرفی شده بود که در این نمودار نیز صحت این نتیجه مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تمامی نمودارهای ویژگی در شکل تا شماره ۹۶ شدت نسبتاً کمتری از شماره ۹۶ به بعد دارند. ۱۰ ویژگی انتخابی توسط آزمون استنباط آماری تی از بین ویژگی‌های استخراج شده، در حوزه زمان-فرکانس انتخاب شد که عبارتند از: انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس، مومنتوم، مد و انرژی. نمودار این ۱۰ ویژگی استخراج‌شده برای سیگنال حوزه زمان-فرکانس در شکل (۱۱) نشان داده شده است از تعداد ۱۶۸ سیگنال، ۹۶ سیگنال اول سالم و ۷۲ سیگنال بعدی از طرف اپراتور ماهر آزمون به صورت تجربی معیوب معرفی شده بود که در این نمودار نیز صحت این نتیجه مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تمامی نمودارهای ویژگی در شکل تا شماره ۹۶ شدت نسبتاً کمتری از شماره ۹۶ به بعد دارند.



شکل ۱۰- ویژگی‌های استخراج‌شده در حوزه فرکانس برای ۱۶۸ گیربکس در دنده ۳



شکل ۱۱- ویژگی‌های استخراج‌شده در حوزه زمان فرکانس با تبدیل موجک برای ۱۶۸ گیربکس در دنده ۳

مطابق جدول (۱) میزان خطای تشخیص گیربکس‌ها در هر دو نوع طبقه‌بندی شبکه عصبی و روش ماشین بردار پشتیبان برای تمامی دنده‌های ۱۶۸ سیگنال گیربکس سواری تندر ۹۰ در حوزه زمان نشان داده شده است.

مطابق جدول (۲) میزان خطای تشخیص گیربکس‌ها در هر دو نوع طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی و روش ماشین بردار پشتیبان برای تمامی دنده‌های ۱۶۸ سیگنال گیربکس سواری تندر ۹۰ بعد از تبدیل فوریه در حوزه زمان-فرکانس نشان داده شده است.

مطابق جدول (۳) میزان خطای تشخیص گیربکس‌ها در هر دو نوع طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی و روش ماشین بردار پشتیبان برای تمامی دنده‌های ۱۶۸ سیگنال گیربکس سواری تندر ۹۰ بعد از آنالیز موجک در حوزه زمان-فرکانس نشان داده شده است.

جدول ۱- مقایسه میزان خطای تشخیص روش‌های مختلف طبقه‌بندی در دنده‌های مختلف روی سیگنال‌های حوزه زمان

دنده ۵	دنده ۴	دنده ۳	دنده ۲	دنده ۱	
۷/۱۴	۷/۱۴	۸/۰۰	۸/۷۰	۱۴/۰۰	روش شبکه عصبی مصنوعی
۱۰/۵	۸/۷۷	۵/۸۰	۱۲/۷۷	۱۰/۰۰	روش ماشین بردار پشتیبان

جدول ۲- مقایسه میزان خطای تشخیص روش‌های مختلف طبقه‌بندی در دنده‌های مختلف بعد از آنالیز تبدیل فوریه

دنده ۵	دنده ۴	دنده ۳	دنده ۲	دنده ۱	
۱۴/۲۰	۱۰/۷۱	۴/۹۰	۱۳/۰۴	۱۲/۰۰	روش شبکه عصبی مصنوعی
۱۴/۰۰	۷/۰۲	۵/۹۰	۱۰/۶۴	۱۴/۰۰	روش ماشین بردار پشتیبان

جدول ۳- مقایسه میزان خطای تشخیص روش‌های مختلف طبقه‌بندی در دنده‌های مختلف بعد از آنالیز تبدیل گسسته موجک

دنده ۵	دنده ۴	دنده ۳	دنده ۲	دنده ۱	
۱۴/۷	۱۰/۷۱	۸/۰۰	۸/۷۷	۱۰/۰۰	روش شبکه عصبی مصنوعی
۵۷/۳	۹/۰۴	۱/۹۶	۷/۱۴	۹/۱۲	روش ماشین بردار پشتیبان

۴- نتیجه گیری

در این پروژه که به بررسی روش‌های پردازش سیگنال در حوزه‌های مختلف، استخراج ویژگی‌ها و طبقه‌بندی عیوب با استفاده از سیگنال‌های صوتی بر روی گیربکس سواری تندر ۹۰ در خط مونتاژ آن پرداخته شد. پس از معرفی روش‌های عیب‌یابی و انتخاب کمیت صوت به عنوان یکی از کمیت‌های تحلیلی متداول در عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی که دارای ویژگی‌های برتری نسبت به بقیه کمیت‌ها در مورد این پروژه بود و همچنین اشاره به سوابق تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه، به تحلیل سیگنال‌های صوتی در حوزه‌های زمان، فرکانس (تبدیل فوری سریع) و زمان-فرکانس (تبدیل گسسته موجک) پرداخته شد. با توجه به اینکه عملیات داده‌برداری از گیربکس در اتاق آکوستیک و عایق صدا انجام می‌شد، بنابراین پیش‌بینی می‌شد که اثر نویز حداقل باشد و تأثیر زیادی روی نتایج نداشته باشد؛ که با انجام این پژوهش به بررسی این امر نیز پرداخته شد. در تبدیل موجک گسسته، پایه‌های موجک مختلف از خانواده دابشیز (۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۴)، جهت عیب‌یابی مقایسه و بررسی شد و نتایج نشان داد موجک مادر ۲۰db نتایج بهتری را نسبت به بقیه ارائه می‌دهند.

نتایج نشان داد که ویژگی‌های انرژی، انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس، کورتوسیس و فاکتور کرسست از سیگنال‌های حوزه زمان جهت طبقه‌بندی مناسب بودند. در حوزه فرکانس ویژگی‌های انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس و میانگین هندسی از سیگنال FFT نتایج خوبی در طبقه‌بندی‌ها نشان دادند.

در حوزه زمان فرکانس ویژگی‌های انحراف معیار، آنتروپی، واریانس، جذر متوسط مربع، کوواریانس، مومنتوم، مد و انرژی برای طبقه‌بندی مناسب، انتخاب شدند.

شبکه‌ی عصبی مصنوعی مدل پرسپترون چند لایه و ماشین بردار پشتیبان، روش‌های مورد استفاده جهت طبقه‌بندی و کلاس‌بندی ویژگی‌ها بودند. روش‌های طبقه‌بندی در هر ۳ حوزه زمان، زمان-فرکانس و فرکانس بررسی شدند. نتایج نشان داد که روش کلاس‌بندی ماشین بردار پشتیبان روی داده‌های پردازش شده با تبدیل گسسته موجک، دارای خطای متوسط کمتر از ۹ درصد هست. که این خطا نسبت به خطای سایر روش‌های پردازش سیگنال و طبقه‌بندی در این آزمایش کمتر هست.

تشکر و قدردانی

از شرکت چرخشگر تبریز که امکانات را برای انجام این پژوهش فراهم نمودند، تشکر می‌شود.

مراجع

[1] Lymariiev, I., Subbotin, S., Oliinyk, A., and Drokin, I., "Diagnostic Signal Nonstationarity Reduction to Predict the Helicopter Transmission State on the Basis of Intelligent Information Technologies." In CEUR Workshop Proceedings, pp. 510-522, (2019).

- [2] Samanta, B., and Al-Balushi, K., "Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element Bearings using Time-domain Features", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, pp. 317-328, (2003).
- [3] Barbieri, N., Barbieri, G.de.S.V., Martins, B.M., and Barbieri, L.de.S.V., "Damage Analysis in Automotive Gearbox", *Procedia Engineering*, Vol. 199, pp. 1858-1863, (2017).
- [4] Parey, A., and Singh, A., "Gearbox Fault Diagnosis using Acoustic Signals, Continuous Wavelet Transform and Adaptive Neuro-fuzzy Inference System", *Applied Acoustics*, Vol. 147, pp. 133-140, (2019).
- [5] Peng, Z., and Chu, F., "Application of the Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics: A Review with Bibliography", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, pp. 199-221, (2004).
- [6] Peter, W.T., and Peng, Y., "Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 123, pp. 303-310, (2001).
- [7] Nezamivand Chegini, S., Bagheri, A., and Najafi, F., "A New Hybrid Intelligent Technique Based on Improving the Compensation Distance Evaluation Technique and Support Vector Machine for Bearing Fault Diagnosis", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19(4), pp. 865-875, (2019).
- [8] Hill, P.C., "Dennis Gabor-contributions to Communication Theory and Signal Processing", In *EUROCON 2007-The International Conference on Computer as a Tool*, doi.org/10.1109/EURCON.2007.4400546, Sept. 9-12, Warsaw, Poland, pp. 2632-2637, (2007).
- [9] Mirtavousi, A., "*Wavelet Toolbox in Matlab*", 3rd Edition, Tehran, Galam Mehrgan, pp. 50-55, (2017).
- [10] Demuth, H., and Beale, M., "*Neural Networks Toolbox for use with MATLAB*" 3rd Edition, pp. 740-763, (1994).
- [11] Widodo, A., and Yang, B.S., "Support Vector Machine in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21(6), pp. 2560-2574, (2007).
- [12] Tabrizi, A.A., Al-Bugharbee, H., Trendafilova, I., and Garibaldi, L., "A Cointegration-based Monitoring Method for Rolling Bearings Working in Time-varying Operational Conditions", *Meccanica*, Vol. 52(4-5), pp. 1201-1217, (2017).
- [13] pirrozbakht, M., "*Training Algorithm Forecasting Accuracy*", Second Edition, Tehran Mojak Publication, (2017).

فهرست نمادهای انگلیسی

$x(n)$ مقدار یک سیگنال

N تعداد نقاط یک سیگنال در طول زمان

Abstract

Gearboxes may malfunction during the manufacturing, assembly, or operation process. In gearbox manufacturing factory, it is important to identify defective gearboxes to prevent them from entering the consumption cycle. For this purpose, various methods are used, including sound detection by the test operator's hearing, the use of vibration analysis methods, and the use of sound analysis methods. In this research, the intelligent troubleshooting of the Thunder 90 gearbox has been done using the analysis of audio signals. The received audio signals were first processed in the domains of time, frequency (fast Fourier conversion) and time-frequency (discrete waveform). The properties were then extracted from the processed signals in all three domains; then, using the error test method and t-test method, the desired characteristics were selected for use in classification. Then, using various artificial neural network classification methods and support vector machine, the process of intelligent troubleshooting was performed. The characteristics of standard deviation, entropy, variance, mean square root, and covariance together in all three domains yielded good results. The energy, kurtosis, and crest factors were selected from the time field signals and the geometric mean feature from the FFT signal, and the momentum, mode, and energy characteristics in the frequency time domain were selected for the appropriate classification. The results also showed that the support vector machine classification method on processed data with discrete waveform conversion has an average error of less than 9%. This error is less than the error of other signal processing and classification methods in this experiment.