

تشخیص عیب بلبرینگ ماشین‌های صنعتی از طریق صوت‌سنجی

با استفاده از شبکه عصبی

معصومه امیرابراهیمی خوشمهر

کارشناس ارشد مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مدیریت و اقتصاد، گروه مدیریت صنعتی، تهران، ایران

عباس طلوعی اشلقی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مدیریت و اقتصاد، گروه مدیریت صنعتی، تهران، ایران

سید احمد شیبیت‌الحمیدی (نویسنده مسئول)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، فیروزکوه، ایران

محمد مهدی موحدی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، فیروزکوه، ایران

چکیده

هدف اصلی این پژوهش شناسایی عوامل ایجاد ارتعاش و عیوب قابل شناسایی بلبرینگ از طریق صوت‌سنجی به کمک شبکه عصبی چند لایه است. شبکه‌ی عصبی از روش‌های هوشمند محسوب می‌شود و با توجه به خاصیت‌های اصلی آن یعنی قابلیت بالایش برای تخمین توابع غیرخطی و یادگیری تطبیقی، برای عیب‌یابی ارتعاشات مکانیکی ماشین‌آلات یعنی صوت‌سنجی بلبرینگ و تحلیل فرکانسی آنها مورد استفاده قرار گرفته است. برای جمع‌آوری داده‌ها، یک نوع بلبرینگ مخروطی ساچمه‌ای سالم و یک بلبرینگ مشابه آن که ساچمه‌هایش معیوب بودند، در دستگاه‌های مته رومیزی و مته رادیال پایه‌دار، در ۵ دور مختلف مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، با توجه به شبکه‌ای دارای ۱۰ لایه پنهان، فرکانس سیگنال به عنوان ورودی شبکه عصبی چند لایه در نظر گرفته شده و در نهایت عیوب بلبرینگ و علت احتمالی آن تعیین گردیده و اقدامات اصلاحی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: ارتعاش، بلبرینگ، شبکه عصبی، عیب‌یابی، کنترل کیفیت

۱- مقدمه

بنماید و از آسیب‌های جانی و مالی ناشی از عملکرد معیوب وسیله جلوگیری کند و در بالابردن کیفیت تولید و زمان‌بندی بازدیدها و تعمیرات دوره‌ای کمک نماید [۱].

شبکه‌های عصبی مصنوعی که یک مفهوم ریاضی توسعه داده شده و الهام گرفته از سیستم بیولوژیکی و عصبی انسان است [۲]، عنصر کلیدی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه‌ی پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به هم پیوسته با نام نورون

اطمینان از کارکرد صحیح تجهیزات و ماشین‌آلات صنعتی، همیشه مسئله‌ی مهمی در به کارگیری آنها به شمار می‌رود. یکی از مهم‌ترین دلایل از کارافتادگی ماشین‌آلات، بروز آسیب در بلبرینگ‌های موجود در آنها است. بنابر این تشخیص آسیب‌های موجود در بلبرینگ پیش از آنکه شدت این آسیب‌ها به مراحل بحرانی برسد و باعث از کارافتادگی سیستم گردد، می‌تواند کمک شایانی به حفظ پیوستگی کارکرد یک ماشین

تشکیل می‌شود که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می‌کنند و توسط ارتباطات الکترومغناطیسی اطلاعات را منتقل می‌نمایند، این شبکه‌ها قادر به یادگیری اند [۳].

هدف اصلی این پژوهش استفاده از تکنیک هوشمند شبکه عصبی با کمک تحلیل صوتی برای عیب‌یابی بلبرینگ و پیش‌بینی خرابی آن است. تشخیص عیوب بلبرینگ از طریق صدای آن در ماشین‌آلات و استفاده از شبکه‌های عصبی که قابلیت آموزش دارند می‌تواند نقش عمده‌ای را در جهت افزایش بازدهی ماشین‌آلات ایفا می‌کند و جایگزین مناسبی به جای افراد خیره باشد.

پیشینه پژوهش

بسیاری از عیوب ایجاد شده در ماشین‌آلات، علائمی به صورت صدا ایجاد می‌کنند. از جمله می‌توان به مشکلات مربوط به بلبرینگ‌ها، جعبه دنده‌ها، پمپ‌ها، کمپرسورها اشاره کرد. صوت در اثر رهاشدن انرژی در یک محیط مادی ایجاد می‌شود و به صورت موج در محیط منتشر می‌گردد. در تحلیل صدا معمولاً این محیط مادی هوا است و شدت انرژی منتشر شده، به وسیله سنسورهای مخصوص اندازه‌گیری می‌شود. به این ترتیب می‌توان از شدت صدای ایجاد شده برای بررسی وضعیت ماشین استفاده نمود. علاوه بر این، امکان تحلیل طیفی صدا هم وجود دارد. پایش وضعیت، با تکنیک و روش‌های مختلفی اجرا می‌گردد. هر روش، به طور خاص، بر روی برخی علائم مشخصه از وضعیت کارکرد ماشین تمرکز دارد و پارامترهای خاصی را اندازه‌گیری می‌نماید که نشان‌دهنده وضعیت سلامت ماشین است. به عنوان مثال این پارامتر می‌تواند ارتعاشات یا صدای ایجاد شده توسط ماشین، ذرات آلاینده موجود در روغن، یا دمای نقاط مختلف ماشین باشد [۴]. در حال حاضر برای تحلیل ارتعاشات سه نوع سنسور وجود دارد: ۱- شتاب سنج ۲- سرعت سنج ۳- سنسور جابجایی [۲]. سرعت ارتعاش یک ورقه‌ای نازک با استفاده از نظریه میدان صوتی خیلی نزدیک، از طریق اندازه‌گیری فشار صوت، محاسبه شده است [۵]. یانگ به همراه همکارانش، تحقیقی به نام عیب‌یابی ماشین‌های دوار انجام داده است و سیگنال‌های ارتعاشی به صورت خام در بعد زمان به وسیله شتاب‌سنج از ماشین شبیه‌سازی شده جمع‌آوری گردیده است [۶]. نمونه‌برداری‌های ارتعاشی در این پژوهش توسط یک حس‌گر شتاب‌سنج بوده است. یوشی یوکا و فوجی وارا (۱۹۸۴)، نشان دادند که تحلیل صدا قادر است عیوب یاتاقان‌ها را زودتر از تحلیل ارتعاشات و قبل از ظاهرشدن آثار

قابل اندازه‌گیری با پراب شتاب‌سنج مشخص کند [۷]. میواجیکا و همکاران (۲۰۰۲)، نیز از تحلیل صوت برای مطالعه پدیده‌ی خستگی خمشی دندانه‌های چرخ‌دنده استفاده کردند [۵]. ویست‌نر (۱۹۹۳)، انتشار صوت در لحظه‌ی ایجاد ترک در دندانه‌های چرخ‌دنده را بررسی نمود [۸].

در سال‌های اخیر، تحلیل صدا مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتکی با استفاده از تبدیل هیلبرت روی سیگنال صوتی بررسی شده است [۹]. در سال ۲۰۰۴ همچنین پنگ و همکاران، با بیان نظریه یک میدان صوتی خیلی نزدیک با اندازه‌گیری فشار صوت، سرعت ذره را محاسبه کردند. از آنجایی که بلبرینگ‌ها به طور گسترده‌ای در انواع ماشین‌آلات و وسایل نقلیه استفاده می‌شوند، عیب‌یابی زود هنگام آنها یکی از موضوع‌های با اهمیت به شمار می‌رود. بنابر این با توجه به اهمیت نقش بلبرینگ در ماشین‌آلات و تحلیل صدا که امکان بررسی وضعیت ماشین را مقدور می‌کند در این پژوهش صوت‌سنجی بلبرینگ به منظور تشخیص الگوی صدای عیب ارائه شده است و عوامل ایجاد صدا و عیوب قابل شناسایی بلبرینگ به کمک شبکه عصبی انجام گرفته است و در نهایت عیوب بلبرینگ و علت احتمالی آنها شناسایی شده و اقدام‌های اصلاحی پیشنهاد شده است [۱۰].

روش شناسی پژوهش

از اوایل دهه ۱۹۷۰ مسئله ردیابی و تشخیص عیب در فرآیندهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته و تاکنون چند روش مبتنی بر مدل‌های تحلیلی و دانش و داده استفاده شده‌اند. تحقیقات اولیه مبتنی بر مدل‌های تحلیلی بوده است. در این روش‌ها با استفاده از ابزارهای ریاضی مدل فرآیند شبیه‌سازی می‌شود و بر پایه آن ردیابی انجام می‌گیرد. در این ارتباط، عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی که به دلیل خطی‌سازی، نادیده‌گرفتن برخی از عوامل جزئی، تغییر پارامترهای فرآیند و اغتشاشات به وجود می‌آید، باعث ناکارآمدی سیستم عیب‌یاب می‌شود و موجب اعلام هشدارهای نادرست در باره وجود عیب می‌گردد. به همین دلیل تحقیقات برای استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی شکل گرفته است در حال حاضر روش‌های مبتنی بر مفاهیم محاسبات نرم به عنوان روش‌های قدرتمندی در طراحی سیستم‌های عیب‌یاب محسوب می‌شوند [۱۱].

روش متداول برای تشخیص خرابی‌ها شامل بررسی تغییرات قابل اندازه‌گیری سامانه با توجه به رواداشت مقادیر به دست

ناشناخته و غیر خطی، از قبیل تشخیص الگوها، تشخیص های پزشکی، پیش بینی سری های زمانی و سایر موارد مناسب کرده است. در جدول ۱ به معیارهای انتخاب شبکه اشاره شده است [۱۷].

جدول ۱. معیار انتخاب شبکه

نوع کاربرد شبکه	انواع شبکه ها	کاربردها
پیش بینی	انتشار برگشتی	کاربرد مقادیر ورودی برای پیش بینی خروجی ها
طبقه بندی	انتشار برگشتی شبکه عصبی احتمالاتی کمی سازی و کتور یادگیری	کاربرد مقادیر ورودی برای تعیین طبقه آنها
ارتباطدهی داده ها	هاپفیلد شبکه همینگ	مشابه با طبقه بندی اما با قابلیت تشخیص داده های محتوی خطا
مفهوم سازی داده ها	شبکه انطباق رزونانس نقشه های خود سازمانده	تحلیل داده ها برای تشخیص ارتباط بین گروه ها

شبکه های انتشار برگشتی معادل شبکه های عصبی چند لایه پیش خور است، که با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا آموزش داده شده است. این شبکه ها از کاربرد موفقی در شبیه سازی تراکمها (با آموزش آنها برای بازتصویر کردن ورودی ها بر روی خودشان)، پیش بینی، شناسایی گفتار و تشخیص الگوها هم برخوردار بوده اند. تعمیرات در مراحل اولیه قابل تشخیص بوده و با توجه به روند پیشروی آن می توان تصمیم دقیق تری برای خواباندن ماشین و زمان مناسب تعمیر آن گرفت. برای رسیدن به این اهداف بایستی سه مرحله پیش وضعیت را اجرا نمود که عبارتند از: ۱- کشف پیشرفت خرابی در مراحل اولیه، ۲- تشخیص مبدا عیب و ۳- پیش گیری [۶]. توانایی شبکه عصبی دو لایه بسیار محدود است، اکثر آنها دارای ساختمانی سه لایه یا بیشتر می باشند شبکه عصبی از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده

آمده از پایش وضعیت دستگاه با حالت سلامت می باشد. این روش نیاز به شخصی خیره به منظور اعمال نظر برای سالم یا معیوب بودن دستگاه دارد [۱۲]. برندان و همکاران در سال ۲۰۱۵، سرعت ارتعاش یک ورقه ی نازک را با استفاده از تئوری میدان صوتی، از طریق اندازه گیری فشار صوت، محاسبه نمودند [۱۳]. شا فنگ لیو، نشان داد که تحلیل صدا قادر است عیوب یاتاقان ها را زودتر از تحلیل ارتعاشات و قبل از ظاهر شدن آثار قابل اندازه گیری با پراب شتاب سنج مشخص کند [۱۴]. سیانو و همکاران، هم از تحلیل صوت برای مطالعه ی پدیده ی خستگی خمشی دندانه های چرخ دنده استفاده کردند [۱۵]. عمر و همکاران، انتشار صوت در لحظه ی ایجاد ترک در دندانه های چرخ دنده را بررسی نمود [۱۶].

از آنجایی که بلبرینگ ها به طور گسترده ای در انواع مختلف ماشین آلات و وسایل نقلیه استفاده می شوند، عیب یابی زود هنگام آن ها یکی از موضوعات با اهمیت به شمار می رود. لذا با توجه به اهمیت نقش بلبرینگ در ماشین آلات و آنالیز صدا که امکان بررسی وضعیت ماشین را مقدور می کند در این پژوهش صوت سنجی بلبرینگ به منظور تشخیص صدای عیب انجام گرفته است، و در نهایت عیوب بلبرینگ، علت احتمالی عیوب و اقدامات اصلاحی ارائه می شود.

شبکه های عصبی، با قابلیت قابل توجه آنها در استنتاج معانی از داده های پیچیده یا مبهم، می تواند برای استخراج الگوها و شناسایی روش هایی که آگاهی از آنها برای انسان و دیگر تکنیک های کامپیوتری بسیار دشوار است به کار گرفته شود. یک شبکه عصبی تربیت یافته می تواند به عنوان یک متخصص در مقوله اطلاعاتی ای که برای تحلیل به آن داده شده به حساب آید و برای برآورد وضعیت های دلخواه جدید می توان از آن استفاده کرد. تمامی شبکه های عصبی مصنوعی براساس مفاهیم نورون ها، اتصال ها و توابع انتقال استوار هستند و عمده تفاوت های موجود بین آنها، به دلیل وجود قوانین گوناگون آموزشی و چگونگی اصلاح توپولوژی شبکه توسط این قوانین است. اساساً کاربرد این شبکه ها در مدل سازی و شناسایی، دسته بندی، تشخیص الگو، بهینه سازی، کنترل، کاربردهای صنعتی، ارتباطات و پردازش سیگنال ها خلاصه می شود. توانایی یادگیری ارتباط موجود بین ورودی ها و خروجی ها، یکی از اساسی ترین مزایای شبکه های عصبی است که جذابیت زیادی به آنها بخشیده است. در این ارتباط الگوریتم های یادگیری کارایی برای تعیین وزن های شبکه پیشنهاد شده اند. این توانایی یادگیری شبکه های عصبی، آنها را برای مسائلی با ساختارهای

با استفاده از میکروفن آن ضبط گردیده است. این سنسور دارای قابلیت‌های: نمایش شکل موج و طیف فرکانس صوت در حالت‌ها و نمونه‌های مختلف، تحلیل پیشرفته ارتعاشات، بالانس و اندازه‌گیری در حالت استارت ماشین، ذخیره اطلاعات در حافظه داخلی است. اندازه‌گیری‌ها برای ثبت فرکانس و دامنه آن در دور موتورهای ذکر شده با، سنسور تیپ MA231S سری N. 491201 انجام شده و داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری گردیده است.

جدول ۲. عوامل ایجاد خرابی در بلبرینگ

درصد	توضیحات	عوامل خرابی
۳۶٪	اثر انتخاب نادرست و اعمال مقدار ناکافی روان ساز	روانکاری ضعیف
۳۴٪	خرابی‌های ناگهانی یا غیر منتظره تحت بار زیاد یا آنهایی که سرویس دهی خوب نشده اند	خستگی
۱۶٪	از نصب نادرست و عدم آگاهی از وجود تجهیزات نصب صحیح	نصب غلط
۱۴٪	ورود آلودگی به محیط	آلودگی

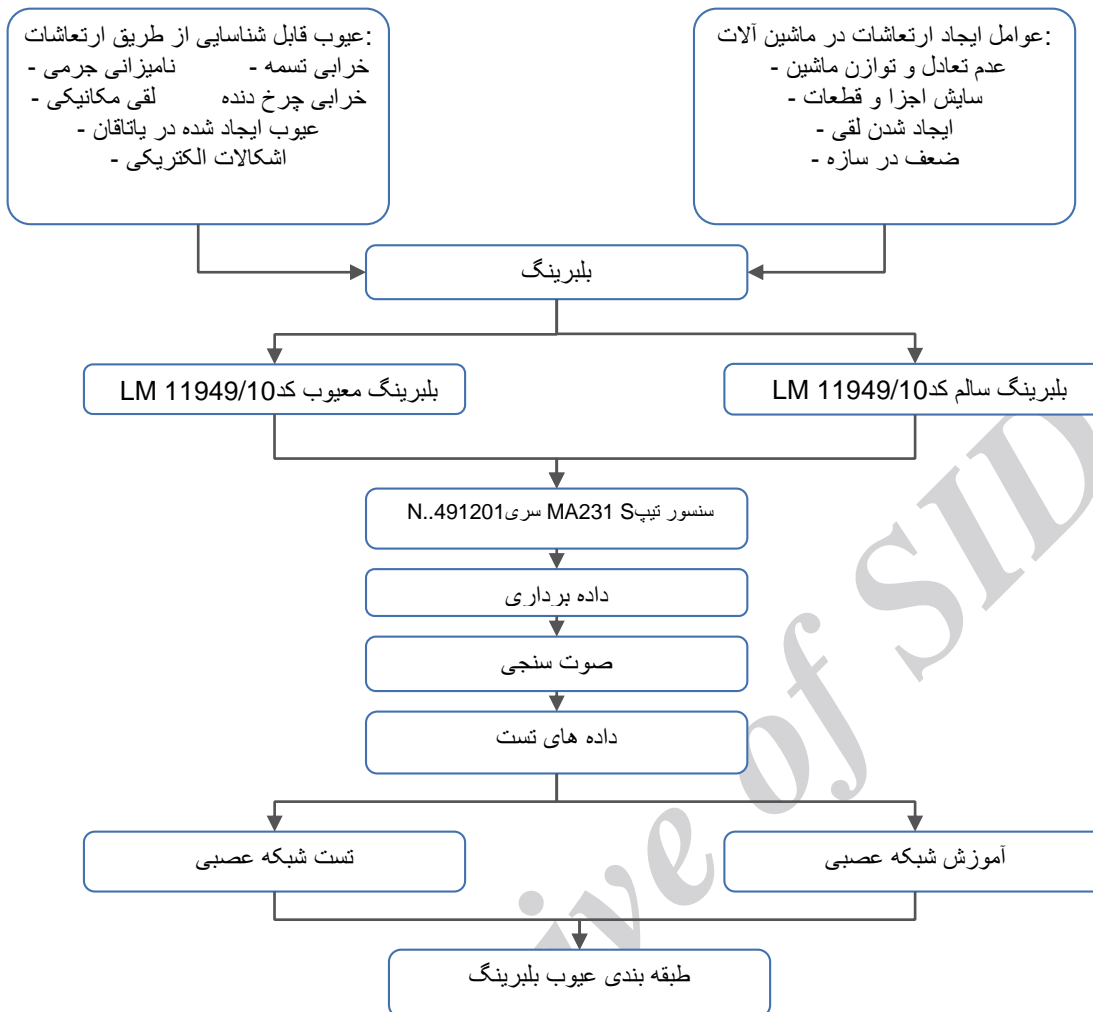
مدل مفهومی

انتخاب شبکه عصبی چندلایه با هدف عیب‌یابی، با توجه به دستاوردهای مطالعات قبلی در مورد این فرآیند انجام می‌گیرد. در جدول ۲ به عوامل ایجاد خرابی در بلبرینگ‌ها اشاره شده است. با توجه به جدول ۲ و این نکته که عیوب ایجاد شده در ماشین‌آلات، علائمی به صورت صدا ایجاد می‌کنند، از تحلیل صوت استفاده شده است. برای این منظور، سیگنال‌های صوتی از بلبرینگ در دو حالت سالم و معیوب گرفته شده و طیف فرکانس صوتی حالت سالم و معیوب مشخص شده است. دامنه‌ی صوتی در حالت معیوب به دلیل وجود خرابی در بلبرینگ نسبت به حالت سالم افزایش داشته است. با افزایش دامنه صوت می‌توان معیوب بودن بلبرینگ را تشخیص داد. داده‌های جمع‌آوری شده در محیط نرم‌افزاری Matlab مورد تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۱ فرآیند کلی پژوهش ارائه شده است.

است. در هر یک از این لایه‌ها تعدادی نرون جای گرفته‌اند. لایه دوم، لایه پنهان نامیده می‌شود که گاهی خود لایه پنهان نیز بیشتر از یک لایه دارد. با تغییر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها در هر لایه کارکرد شبکه عصبی می‌تواند بهتر یا بدتر گردد. یکی از انواع شبکه‌های عصبی، پرسپترون می‌باشد که به صورت پرسپترون تک لایه و چند لایه موجود است. پرسپترون تک لایه تنها می‌تواند مسائل مجزای خطی را دسته‌بندی کند و برای مسائل پیچیده‌تر لازم است از تعداد بیشتری لایه استفاده گردد. الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا از نوع یادگیری با ناظر است. در یادگیری با ناظر، هنگامی که ورودی به شبکه اعمال می‌شود جواب شبکه با جواب هدفی که برای شبکه تعیین شده است مقایسه می‌گردد و سپس خطای یادگیری محاسبه شده و از آن برای تنظیم پارامترهای شبکه استفاده می‌شود، به گونه‌ای که اگر دفعه بعد به شبکه همان ورودی اعمال شود خروجی شبکه به جواب هدف نزدیک‌تر باشد.

در این پژوهش می‌خواهیم سامانه‌ی هوشمند تشخیص عیب را ارائه دهیم به طوری که این سامانه در دادن اطلاع سریع در مورد سالم یا معیوب بودن بلبرینگ بدون نیاز به شخص خبره کمک کند. برای این منظور داده‌های صوتی برای تشخیص عیب استفاده گردیدند. این پژوهش از لحاظ آماری، مدل‌سازی و از نظر روش، یک پژوهش توصیفی و از لحاظ هدف، در حیطه پژوهش‌های کاربردی محسوب می‌شود. در این پژوهش برای جمع‌آوری اطلاعات هم از روش کتابخانه‌ای و هم از روش میدانی استفاده شده است. از مقاله‌های موجود در نشریات معتبر که از سایت‌های علمی اینترنتی اخذ گردیده است، به علاوه مجله‌های علمی، نمایه‌ها، پایان‌نامه‌های دکترا و کارشناسی ارشد و کتاب‌های مرتبط با موضوع استفاده شده است. به طور کلی می‌توان مراحل انجام این پژوهش از ابتدا تا پایان را به قسمت‌های زیر تقسیم نمود: تهیه داده، اصلاح داده‌های خام برای ارائه به شبکه، ایجاد یک شبکه مناسب و آموزش شبکه. در این پژوهش برای تهیه داده، به پژوهشگاه نیرو مراجعه شد. برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از یک نوع بلبرینگ مخروطی ساچمه‌ای سالم و یک بلبرینگ معیوب مشابه آن که ساچمه‌هایش معیوب بودند استفاده شده است. داده‌های جمع‌آوری شده در حالت سالم برای هر کدام از دور موتورهای شامل ۳۲۰۱ و در حالت معیوب برای هر کدام از دور موتورهای شامل ۳۲۰۱ داده است، دورهای موتور ۷۰۰، ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۷۰۰، ۲۲۴۰ دور بر دقیقه، در دستگاه‌های مته رومیزی و مته رادیال پایه‌دار، استفاده شده است. صدای هر یک از بلبرینگ‌های سالم و معیوب به طور جداگانه توسط سنسور، و

Archive of SID



شکل ۱. فرآیند کلی اجرای پژوهش

نمونه‌های مختلف، آنالیز پیشرفته ارتعاشات، بالانس و اندازه گیری در حالت استارت ماشین، ذخیره اطلاعات در حافظه داخلی است. اندازه گیری‌ها برای ثبت فرکانس و دامنه آن، با سنسور تیپ MA231S سری N.. 491201 انجام شد و اطلاعات و داده‌ها جمع‌آوری گردید.

مرحله سوم انتخاب متها برای آزمایش: الف) مته MS20 رومیزی: تمامی قطعاتی که در این ماشین به کار رفته طوری طراحی و ساخته شده است که با استانداردهای بین‌المللی مطابقت نمایند و همچنین این ماشین از نظر قدرت و سرعت تغذیه بار در حدی است که می‌تواند نیازمندی‌های تولیدی و صنعتی استفاده کنندگان را برآورده نماید. مشخصات فنی ماشین مته رومیزی در جدول ۳ نشان داده شده است.

مراحل انجام پژوهش

مراحل کلی اجرای پژوهش به صورت زیر است که در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.

مرحله اول انتخاب بلبرینگ سالم و معیوب: برای اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از یک بلبرینگ مخروطی ساچمه‌ای سالم و یک بلبرینگ مشابه آن که ساچمه‌هایش معیوب بودند، با کد بلبرینگ LM 11949/10 مورد استفاده قرار گرفته است.

مرحله دوم انتخاب سنسور مناسب: سنسور انتخابی دارای قابلیت‌های: نمایش شکل موج و طیف ارتعاش در حالت‌ها و

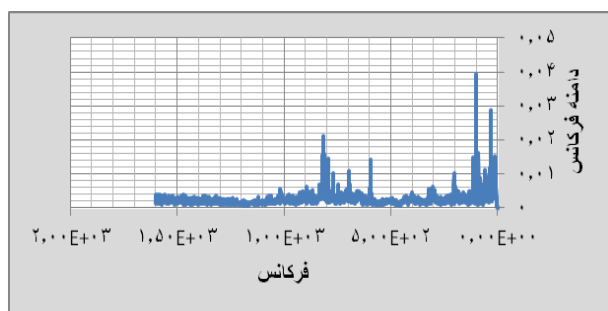
جدول ۳. مشخصات فنی ماشین مته رومیزی

مقدار	واحد	مشخصات فنی
۲۰	Mm	قطر مته کاری (فولاد)
۱۳۰	Mm	قطر عمق سوراخکاری
۴۰۰-۷۰۰-۱۱۰۰- ۱۷۰۰	Rpm	سرعت محور : محدوده
۰/۵۵	Kw	الکتروموتور: قدرت
۲۷۵*۲۳۵	mm*mm	سطح بست میز پایه
۱۱۶۵	Mm	بلندی ماشین
۶۷۰*۴۱۵	mm*mm	مساحت زمین مورد احتیاج ماشین
۱۳۰	Kg	وزن ماشین با متعلقات

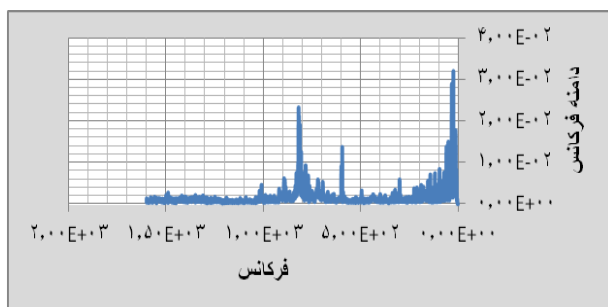
ب) مته MS32B رادیال پایه‌دار: این ماشین برای سوراخ‌کاری، قلاویزنی، برقوزنی، خزینه‌زنی، در تولیدات تکی و انبوه طراحی شده است. از نظر مشخصات، طراحی، استحکام، قدرت، سرعت و تغذیه بارها این ماشین طوری طراحی و ساخته شده که کلیه احتیاجات تولیدی را برآورده نماید. از مزایای چشم‌گیر ماشین می‌توان به میدان عمل بیشتر سرعت‌های محور، دارای چهار بار تغذیه، تنظیم بدنه فوقانی به صورت عمودی و چرخشی، سطح بست میز به صورت عمودی و افقی، سیستم حفاظتی برای بارهای بیش از حد مجاز، مجهز به مجموعه خنک‌کاری (آب صابون)، حرکت راست گرد و چپ‌گرد محور، مجهز به ترمز الکتریکی اشاره کرد. مشخصات فنی این ماشین در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات فنی ماشین مته رادیال پایه دار

مقدار	واحد	مشخصات فنی
۳۲	Mm	ظرفیت سوراخکاری (فولاد)
۳۲	Mm	حداکثر قطر قلاویزنی
۲۰۰	Mm	حداکثر عمق سوراخکاری
۲۲۴۰ ۵۶-	Rpm	محدوده سرعت محور
۲/۲	Kw	الکتروموتور: قدرت
۶۴۵	Kg	وزن تقریبی
۴۰۰ ۳۱۶	mm mm	سطح بست میز وسط : افقی
۵۱۰ ۲۰۰	mm mm	سطح بست میز وسط : عمودی



شکل ۲. طیف بلبرینگ سالم در دور موتور ۷۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۳. طیف بلبرینگ معیوب در دور موتور ۷۰۰ دور بر دقیقه

مرحله پنجم انتخاب ساختار مدل، شبکه‌های عصبی: این حوزه یکی از پویاترین حوزه‌های تحقیق در دوران معاصر محسوب می‌شود که افراد متعددی را از رشته‌های گوناگون علمی به خود جلب کرده است. استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های ژنتیک در حل مسایل پیچیده کاربردی این روزها بیش از پیش رواج یافته است. یک شبکه عصبی مصنوعی از

مرحله چهارم داده‌برداری و پردازش سیگنال‌ها: یکی از مشخصه‌های مهم ارتعاش، فرکانس ارتعاشی است و به ویژه ارتباط آن با فرکانس کاری ماشین (دور ماشین) که در بسیاری از موارد تعیین کننده نوع عیب و یا حداقل ناحیه آن می‌باشد. نمونه طیف فرکانسی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سنسور در حالت‌های سالم و خرابی بلبرینگ در دور موتور ۷۰۰ دور بر دقیقه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است [۱۸].

الگوریتم پس انتشار خطا

روش تندترین شیب نزولی، سعی می کند تا با حداقل کردن خطا به فرضیه مناسبی دست پیدا کند. اما تضمینی برای اینکه این الگوریتم به حداقل مطلق برسد وجود ندارد. آموزش یک شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا طی گام های زیر صورت می گیرد:

۱- چند زوج آموزشی جهت آموزش شبکه در نظر گرفته می شود. این زوج ها شامل ورودی های شبکه و خروجی های صحیح متناظر با این ورودی ها می باشد.

۲- برای وزن ها مقادیر تصادفی کوچکی (عموماً بین صفر و یک) انتخاب می شود.

۳- اولین ورودی به شبکه اعمال می شود و خروجی شبکه محاسبه می گردد.

۴- اختلاف موجود بین خروجی های شبکه و خروجی های صحیح محاسبه می شود.

۵- چنانچه خطای کل شبکه از مقداری خاص که به عنوان یک حد آستانه ای تعریف می شود، کمتر نشود، گام های ۶ تا ۱۳ تکرار می گردند.

۶- هر نرون ورودی، ورودی های مربوط به زوج آموزشی مورد نظر را دریافت می کند و سپس خروجی های متناظر با این ورودی ها تعیین می گردند.

۷- اختلاف موجود بین خروجی های شبکه و خروجی های صحیح در این زوج آموزشی مشخص می شوند.

$$\delta_k^n = t_k - \alpha_k^n \quad (2)$$

t_k : خروجی شبکه، و α_k^n : خروجی های صحیح هستند.

۸- این خطاها در مشتق تابع تحریک نرون های خروجی ضرب شده و برای هر نرون خروجی یک عبارت خطا به دست می آید.

تعداد زیادی گره و پاره خط های جهت دار که گره ها را به هم ارتباط می دهند، تشکیل شده است. گره هایی که در لایه ورودی هستند گره های حسی و گره های لایه خروجی گره های پاسخ دهنده نامیده می شوند؛ بین نرون های ورودی و خروجی نیز، نرون های پنهان قرار دارند. اطلاعات از طریق گره های ورودی به شبکه وارد شده و سپس از طریق اتصالات به لایه های پنهان متصل می شود و در نهایت خروجی شبکه از گره های لایه خروجی به دست می آید. هر واحد پردازش اطلاعات، مجموع حاصل ضرب اطلاعات ورودی و وزن های ارتباطی را محاسبه می کند. بنابراین اگر X_i اطلاعات ورودی و W_i وزن های ارتباطی باشند، واحد پردازش اطلاعات عبارت $net = \sum_{i=1}^n w_i x_i$ را به دست می دهد.

شبکه عصبی چندلایه

شبکه های عصبی پرسپترون، به ویژه پرسپترون چندلایه که توانایی بیشتری نسبت به شبکه های عصبی تک لایه دارد، در زمره کاربردی ترین شبکه های عصبی هستند و قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه ها و سلول های عصبی، که اغلب زیاد هم نیستند، یک نگاشت غیر خطی را با دقت دلخواه انجام دهند. به طوری که شبکه های عصبی پیشخور دولایه با توابع محرک سیگموئید در لایه اول قادرند هر تابعی را با دقت دلخواه تقریب بزنند. شبکه های چند لایه می توانند برای یادگیری مسائل غیر خطی و همچنین مسائلی با تصمیم گیری های متعدد به کار روند. برای اینکه بتوانیم فضای تصمیم گیری را به صورت غیر خطی از هم جدا کنیم، لازم است تا هر سلول واحد را به صورت یک تابع غیر خطی تعریف نمائیم [۶]. برای نرون های لایه های مختلف در شبکه عصبی چند لایه، به مشتق گیری از توابع تبدیل نرون ها احتیاج است. از این رو بایستی توابعی مورد استفاده قرار بگیرند که دارای مشتق باشند، در این پژوهش از تابع مشتق پذیر سیگموئید (رابطه ۱)، استفاده شد.

$$Y = F(net) = F(\beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i) \quad (1)$$

$$= \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 X_0 - \beta_1 X_1 - \dots - \beta_i X_i}}$$

برای یادگیری وزن های یک شبکه چندلایه از روش الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده است. این الگوریتم بر اساس روش تندترین شیب نزولی عمل می کند، تا مربع خطای بین خروجی های شبکه و تابع هدف حداقل شود [۱۸].

$$\Delta w_{j,i}^{n-1,n-2} = \alpha \cdot \delta_j^{n-1} \cdot \alpha_i^{n-2} \quad (۸)$$

$$f(n_k^n) \cdot (t_k - \alpha_k^n) = \delta_k^n \quad (۳)$$

$$w_{j,i}^{n-1,n-2}(new) = w_{j,i}^{n-1,n-2}(old) + \Delta w_{j,i}^{n-1,n-2} \quad (۹)$$

در رابطه فوق: n_k^n : ورودی وزن دار شده نرون k ام در لایه n شبکه (لایه خروجی شبکه)، و

۱۲- گام های ۱۰ و ۱۱ تا رسیدن به لایه ورودی و تصحیح کلیه وزن ها تکرار می شوند.

f : مشتق تابع تحریک است.

۱۳- یک دوره آموزش، عبارت از یک مرتبه ارائه تمام زوج های آموزشی به شبکه است.

۹- کلیه وزن های منتهی به نرون خروجی k به صورت زیر تصحیح می گردند.

$$\Delta w_{k,j}^{n,n-1} = \alpha \cdot \delta_k^n \cdot \alpha_j^{n-1} \quad (۴)$$

عموماً برای آموزش یک شبکه عصبی با الگوریتم آموزش پس انتشار خطا نیاز به دوره های زیادی می باشد که تعداد آنها ممکن است به چندین هزار برسد. وزن ها پس از ارائه هر زوج آموزشی به شبکه اصلاح می گردند، به صورتی که می توان این تغییرات وزن ها را جمع نمود و در پایان یک دوره اعمال کرد.

$$w_{j,i}^{n-1,n-2}(new) = w_{j,i}^{n-1,n-2}(old) + \Delta w_{j,i}^{n-1,n-2} \quad (۵)$$

در رابطه فوق:

نتایج کمی مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی

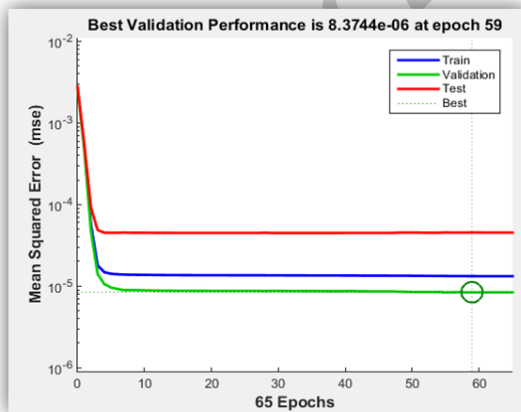
نتایج برای دور موتور ۷۰۰ دور بر دقیقه

نمودار شکل ۴ نشان دهنده کمترین مقدار خطا برای داده های آموزشی، آزمایشی و ارزیابی می باشد. در شکل ۴، مشاهده می شود که در پنجاه و نهمین تکرار بلبرینگ سالم خطای موجود داده ارزیابی کمترین مقدار را دارد، و در شکل ۵، بلبرینگ معیوب در پنجمین تکرار کمترین مقدار را دارد. پس از آن روند کاهش در خطا مشاهده نمی شود.

$w_{k,j}^{n,n-1}$: وزنی که نرون j از لایه $(n-1)$ را به نرون k از لایه n متصل می کند،

α_j^{n-1} : خروجی نرون j از لایه $(n-1)$ است، و

α : نرخ یادگیری است (این نرخ سرعت آموزش شبکه را تعیین می کند، مقادیر زیاد آن باعث ایجاد اغتشاش در آموزش و مقادیر کم آن باعث کندی آموزش شبکه خواهد شد. مقدار آن با سعی و خطا به دست می آید).



شکل ۴. ارزیابی خطا در بلبرینگ سالم

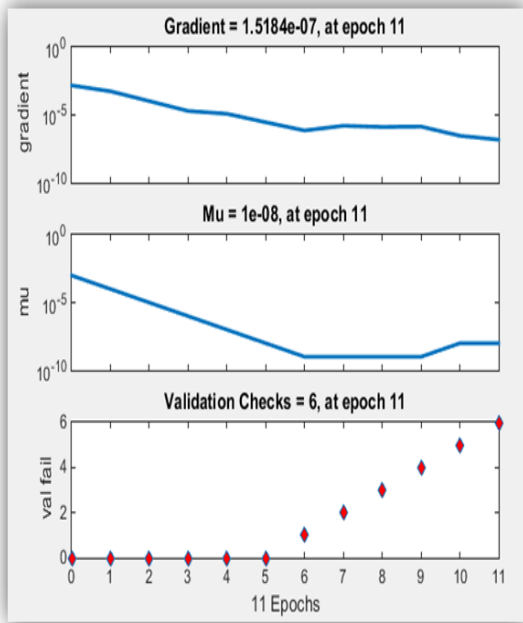
۱۰- در هر نرون لایه پنهان های δ های ارسالی از لایه بالاتر با هم جمع می شوند.

$$\delta_j^{n-1} = \sum_k \delta_k^n \cdot w_{k,j}^{n,n-1} \quad (۶)$$

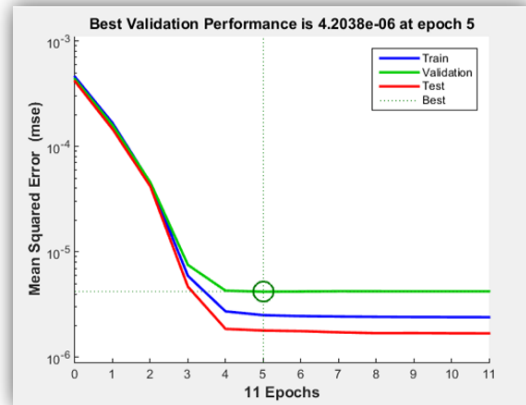
با ضرب این مقدار در مشتق تابع تحریک عبارت خطا محاسبه می شود.

$$\delta_j^{n-1} = \delta_j^{n-1} \cdot f(n_j^{n-1}) \quad (۷)$$

۱۱- کلیه وزن های منتهی به نرون j واقع در لایه $(n-1)$ ، از لایه $(n-2)$ ، به صورت زیر تصحیح می گردند.



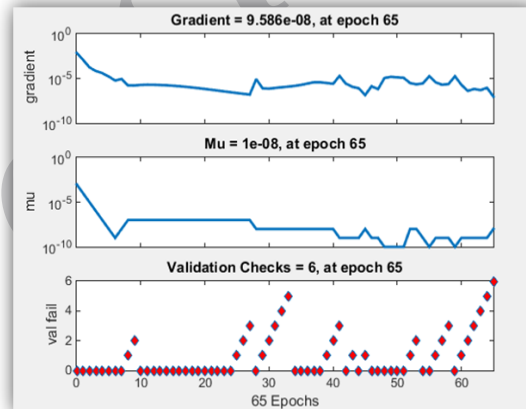
شکل ۷. گرادیان بلبرینگ معیوب



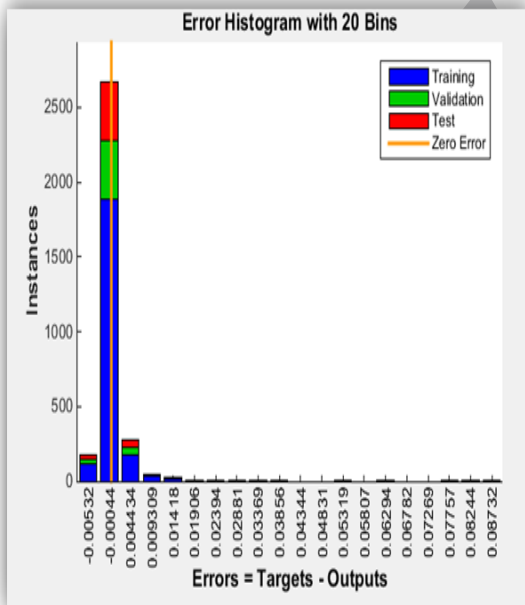
شکل ۵. ارزیابی خطا در بلبرینگ معیوب

در شکل های ۶ و ۷، گرادیان نشان داده شده است، که مشتق تابع خطا هست.

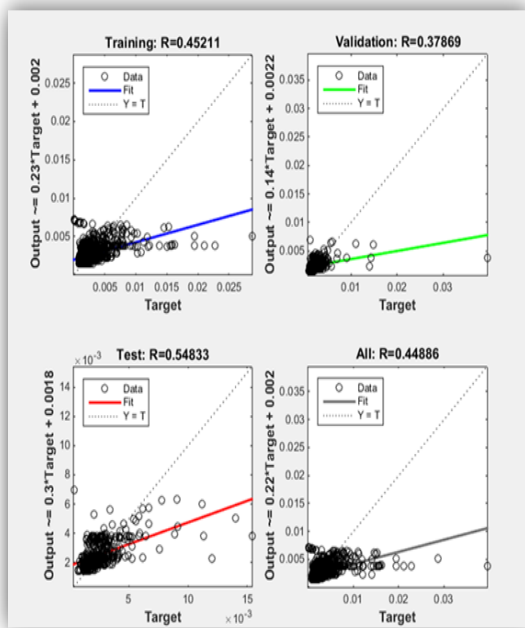
شکل های ۸ و ۹، رابطه بین خطا و تعداد داده های استفاده شده را نشان می دهند. در بلبرینگ سالم خطای ۰.۰۰۰۴۴- / تعداد داده های استفاده شده ۱۹۹۶ مورد می باشد. و در بلبرینگ معیوب به طور مثال در خطای ۰.۰۰۰۳ / . تعداد داده های استفاده شده ۱۵۱۰ مورد می باشد.



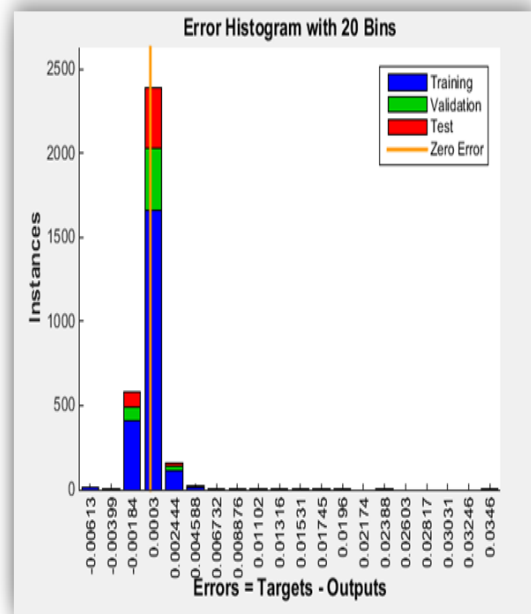
شکل ۶. گرادیان بلبرینگ سالم



شکل ۸. رابطه بین خطا و تعداد داده ها در بلبرینگ سالم



شکل ۱۱. رگرسیون در بلبرینگ معیوب



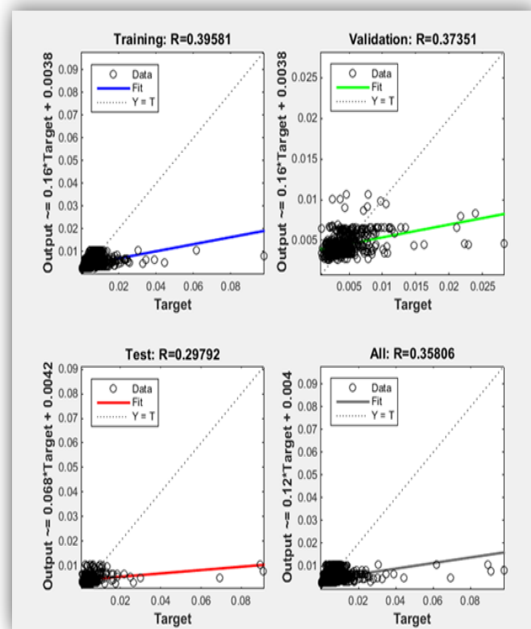
شکل ۹. رابطه بین خطا و تعداد داده‌ها در بلبرینگ معیوب

نتیجه‌گیری

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، رگرسیون در بلبرینگ‌های سالم و

معیوب نشان داده شده است.

در صنعت ماشین‌های گردشی مثل موتورهای صنعتی، پمپ‌ها، پنکه‌ها با بال‌برینگ سروکار داریم تحلیل سیگنال بال‌برینگ‌ها یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های نگهداری به شمار می‌رود. سیگنال اندازه‌گیری شده در نقاط مشخص مثل ساچمه‌های بال‌برینگ می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد وضعیت کارکرد یا خرابی‌های مختلفی که ممکن است وجود داشته باشد به ما بدهد. بال‌برینگ‌ها دارای عمر محدود و مشخص می‌باشند و معمولاً پس از اتمام طول عمر آنها باید تعویض گردند. ولی در حین کار می‌توان آنها را چک نمود و با بررسی وضعیت ارتعاشی آنها نسبت به ادامه کار یا تعویض آنها تصمیم‌گیری کرد. عیوب بال‌برینگ‌ها ناشی از جداسدن موضعی مواد، ترک‌های ناشی از خستگی روی سطوح تماسی و خوردشدن یا ترک برداشتن اجزا غلتکی (ساچمه‌ها) است که در اثر روغن کاری ناقص و یا اعمال نیروهای اضافی روی آنها می‌تواند اتفاق بیفتد و در اثر تغییر ساختمان هندسی بال‌برینگ، در زمانی که سطوح آسیب دیده با هم درگیر می‌شوند باعث تولید ارتعاشات و ضربه‌های لحظه‌ای (شوک) در فرکانس‌های بالا شوند.



شکل ۱۰. رگرسیون در بلبرینگ سالم

جدول ۵. علت عیوب در بلبرینگ ها

وضعیت عیب	علت احتمالی	اقدامات اصلاحی
پوسته شدن وقتی اتفاق می افتد که تکه های ریزی از سطوح بسیار صاف کنس های داخلی یا خارجی یا غلتک ها در اثر خستگی سطوح کنده شوند، که نتیجه آن ناصافی و زبری در تار و پود بلبرینگ می شود.	<ul style="list-style-type: none"> - بار بیش از حد - مسائل نصب - ورود ذرات خارجی - خمیدگی زیاد محور 	<ul style="list-style-type: none"> - نحوه انتخاب و شرایط بار چک شود. - نحوه نصب بهبود داده شود. - مکانیزم آب بندی بهبود داده شود، تا ذرات خارجی وارد نشوند. - از روغن یا گریس با ویسکوزیته مناسب استفاده شود. - روش روغن کاری بهبود داده شود.
وقتی لکه های تیره ای (ابری شکل) با حالت سائیدگی درخشان روی سطح ایجاد می شود از این لکه ها ترک های خیلی ریزی به عمق ۵ تا ۱۰ میکرون ایجاد می شود و ذرات ریز بر روی آن می افتند و پوسته شدن وسیع تر می شود.	<ul style="list-style-type: none"> - روان کار نامناسب - وارد شدن ذرات خارجی - داخل روغن 	<ul style="list-style-type: none"> - انتخاب روان کار مناسب - بهبود دادن مکانیزم آب بندی
خط افتادن، از صدمه خوردن سطح در اثر جمع شدن ذرات ریز که با چرخش نامناسب روغن با موقعیت عملیاتی بین سطوح قرار می گیرند خسارت ها به صورت راه راه روی محیط سطح کنس ها و غلتک ها ظاهر می شوند.	<ul style="list-style-type: none"> - افزایش بار - روغن کاری ناکافی - خمیدگی محور - گیر افتادن ذرات بین سطوح کنس های خارجی و داخلی 	<ul style="list-style-type: none"> - مقدار بار چک شود. - روغن و روش روغن کاری بهبود داده شود.
شکستگی ناشی از خرد شدن ذرات کوچک است که در اثر افزایش بار یا بارهای ضربه ای بر اجزا وارد می شود.	<ul style="list-style-type: none"> - ضربات ناشی از نصب - بار اضافی - اشکال های حمل و نقل 	<ul style="list-style-type: none"> - نحوه نصب بهبود داده شود. - نحوه اعمال بار بهبود یابد. - هنگام نصب دقت کافی داشته باشیم.
سایش، وقتی اتفاق می افتد که دو سطح به کرات روی هم لغزیده شوند. سایش برای توصیف قرمز شدن، خرمایی شدن، و سیاه شدن اجزا است.	<ul style="list-style-type: none"> - روغن کاری ناقص - ارتعاش با دامنه کم - ناکافی بودن انطباق 	<ul style="list-style-type: none"> - استفاده از روغن مناسب - چک کردن انطباقات - مالیدن روغن بین سطوح تماسی
جوش خوردگی، هنگامی که درجه حرارت در حین کار به صورت ناگهانی تغییر می کند باعث تغییر رنگ می شود و سپس کنس ها تغییر شکل و آسیب می بینند.	<ul style="list-style-type: none"> - روغن کاری ناقص - بالا بردن بار و بالا بودن دور - کم بودن لقی های داخلی 	<ul style="list-style-type: none"> - بررسی روغن و روش روغن کاری - بررسی مناسب بودن نوع بلبرینگ - بهبود شرایط نصب - بهبود مکانیزم آب بندی

- [8] Wheatner, J. , D. Houser, C. Blazakis. "Gear tooth bending fatigue crack detection by Acoustic Emissions and tooth compliance." A SME technical paper 93 FTM9, 1993, pp. 1-7.
- [9] Parsian, Amir, Martin Magnevall, Tomas Beno, Mahdi Eynian, 2017, Sound Analysis in Drilling, Frequency and Time Domains, Procedia CIRP, Volume 58, 2017, Pages 411-415
- [10] Peng Z. K. , Chu F. L. , Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography, Mechanical systems and signal processing, 2004, vol. 18, pp. 199-221.
- [11] Moavenian, M. (2007). Troubleshooting vehicle active suspension system with regard to non-linear behavior Hydraulic actuator and controller. noticeably impaired. Second Technical Conference of machinery condition monitoring and fault detection. Pp.417-428.
- [12] Mosavian, A. (2012). Fault diagnosis in engine spark plug by vibration analysis using neural network. The journal of engine research. Vol.28,pp.21-29.
- [13] Brendan Smith, Qing Zhao (2015) Modal Structure Imbalance Fault Detection For Rotating Machines, IFAC-Papers On Line, Volume 48, Issue 21, Pages 1420-1425
- [14] Shafabakhsh, GH.(2011). Choose the optimal neural network algorithm for analysis of rigid pavement roads, Journal of Transportation Engineering, Vol. 3(1),pp.43-54.
- [15] Siano, M.A. Panza, 2017, Sound quality analysis of the powertrain booming noise in a Diesel passenger car, Energy Procedia, Volume 126, September 2017, Pages 971-978
- [16] Omar D. Mohammed, Matti Rantatalo, 2016, Dynamic response and time-frequency analysis for gear tooth crack detection, Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 66-67, January 2016, Pages 612-624
- [17] Shafabakhsh, GH.(2011). Choose the optimal neural network algorithm for analysis of rigid pavement roads, Journal of Transportation Engineering, Vol. 3(1),pp.43-54.
- [18] Sadeghi, H. (2007). Troubleshooting intelligent transmission using neural networks and discrete wavelet transform. The journal of engine research Tabriz, pp.1-10.

در این پژوهش تحلیل ارتعاشات صدای بلبرینگ در ماشین‌های مته‌های رومیزی و رادیال پایه‌دار با استخراج طیف فرکانسی انجام شد. و نتیجه به این صورت حاصل گردید که اگر فرکانس غالب ارتعاشی اندازه‌گیری شده از طیف‌های ارتعاشی مربوط به کنس داخلی بال برینگ باشد به احتمال زیاد علت خرابی به دلیل نیروهای ارتعاشی داخلی اعمال شده نظیر نابالانسی و خمیدگی محور اتفاق افتاده است. و اگر فرکانس غالب ارتعاشی اندازه‌گیری شده از طیف‌های ارتعاشی مربوط به غلتک‌ها باشد احتمالاً خرابی می‌تواند ناشی از روغن کاری ناقص، داغ کردن و یا وجود جریان‌های الکتریکی باشد که از بال‌برینگ عبور می‌کند. و اگر فرکانس غالب ارتعاشی اندازه‌گیری شده روی طیف‌های ارتعاشی مربوط به کنس خارجی بال‌برینگ باشد احتمالاً علت خرابی ناشی از لرزش زمینه، هم‌محور نبودن دستگاه بوده است. در جدول ۵، علت عیوب و اقدام‌های اصلاحی پیشنهادی ارائه گردیده است.

References

- [1] Nasr azadani, M. (2006), Rolling bearing publication refinery, Isfahan, Iran (In Persian).
- [2] Noori kamary, M. (2011), Rotating machines trouble shooting by Fuzzy-Neural Network, master thesis, university of Rajaee, Department of Mechanical Engineering, Tehran, Iran (In Persian).
- [3] Menhaj, M. B. (2000), Fundamentals of neural networks, p534-529, 1388 (In Persian).
- [4] Khodabakhshian karegar, R. (2008). Engineering preventive maintenance and condition monitoring in machine building. 5th International conference on maintenance, pp.44-57.
- [5] Chacon, Juan Luis Ferrando, Vassilios Kappatos, Wamadeva Balachandran, Tat-Hean Gan. "A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique" Applied Acoustics, vol. 89, 2015, pp. 88-100.
- [6] yang Dou, Jianguo Yang, Jiongtian Liu, Yingkai Zhao, A rule-based intelligent method for fault diagnosis of rotating machinery, Knowledge-Based Systems, Volume 36, December 2012, Pages 1-8
- [7] Yoshioka T. , T. Fujiwara. "New acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue", 1984, pp. 183-186.