ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران
دانشگاه خوارزمی
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

تشخیص عیب یاتاقان چرخ اتوبوس مسافربری به کمک سیگنال‌های ارتعاشی با استفاده از یادگیری ماشین

علی اکبری[آ*]، رضا تیکنی[ب]

[آ*] ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

[ب] ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشیار

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: ali.akbari7843@gmail.com

چکیده

تشخیص عیوب یاتاقان‌های چرخ اتوبوس‌ها به دلیل تأثیر مستقیم بر ایمنی و کارایی سیستم‌های حمل و نقل عمومی و همچنین کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات یک چالش مهم و ضروری است. خرابی یاتاقان چرخ می‌تواند منجر به توقف‌های ناگهانی، افزایش هزینه‌های تعمیرات و درصورت عدم تشخیص به موقع می‌تواند باعث بروز حوادث خطرناکی از جمله قفل شدن چرخ‌ها و یا لق شدن آن‌ها شود. این پژوهش با هدف استفاده از ابزارهای یادگیری ماشین برای کاربری خاص که تشخیص هوشمند عیب یاتاقان چرخ اتوبوس است، انجام شده است. داده‌های ارتعاشی از یاتاقان چرخ اتوبوس در جاده و در شرایط عملیاتی واقعی با استفاده از یک حسگر دقیق جمع‌آوری و تحلیل شدند تا از تطابق مدل‌های توسعه‌یافته با شرایط واقعی اطمینان حاصل شود. ابتدا داده‌ها پیش‌پردازش شدند و از آن‌ها ویژگی‌های کلیدی استخراج شدند. سپس، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان، یادگیری جمعی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان و K-نزدیک‌ترین همسایه برای توسعه مدل‌های تشخیص عیب استفاده شدند. مدل‌ها با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده آموزش داده شدند و سپس با استفاده از داده‌های آزمون ارزیابی گردیدند. نتایج نشان داد که مدل‌های ماشین بردار پشتیبان با کرنل شعاعی و یادگیری جمعی بر پایه ماشین بردار پشتیبان و کرنل شعاعی عملکرد بهتری در تشخیص عیب یاتاقان داشتند و دقت تشخیص بالاتری ارائه دادند. این مدل‌ها قادر به شناسایی زودهنگام عیب بودند و توانستند از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کنند. استفاده از روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین در این پژوهش به‌طور مؤثری به بهبود ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش بهره‌وری سیستم‌های حمل و نقل عمومی کمک می‌کند. این تحقیق نشان‌دهنده پتانسیل بالای روش‌های پردازش سیگنال و یادگیری ماشین در بهبود عملکرد و ایمنی سیستم‌های مکانیکی پیچیده در شرایط عملیاتی و واقعی است.

کلمات کلیدی: داده‌برداری میدانی، عیب یابی، یادگیری ماشین، یاتاقان چرخ، پردازش سیگنال، ماشین بردار پشتیبان.

۱- مقدمه

ایمنی در حمل‌ونقل عمومی یکی از مهم‌ترین چالش‌های جوامع امروزی به شمار می‌رود. اتوبوس‌ها، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین وسایل نقلیه عمومی، روزانه حجم عظیمی از مسافران را جابجا می‌کنند و نقش کلیدی در زندگی شهری ایفا می‌نمایند. با افزایش تعداد مسافران و پیچیدگی مسیرهای شهری، نیاز به تضمین ایمنی و بهبود عملکرد این وسایل به‌طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. در این میان، یاتاقان‌های چرخ اتوبوس‌ها به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی، نقشی بی‌بدیل در عملکرد روان و ایمن این وسایل دارند. هرگونه خرابی در این قطعات می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری، از افزایش اصطکاک و دمای قطعات مکانیکی گرفته تا بروز خرابی‌های جدی‌تر و حوادث ناگوار، به همراه داشته باشد.

خرابی یاتاقان‌ها نه‌تنها بر عملکرد کلی خودرو تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه هزینه‌های سنگینی برای تعمیر و نگهداری ایجاد می‌کند. شناسایی به‌موقع عیوب یاتاقان‌ها می‌تواند نقشی کلیدی در پیشگیری از این مشکلات داشته باشد و هزینه‌های مربوطه را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. همین موضوع، اهمیت تحقیق و توسعه روش‌های نوین و پیشرفته در این حوزه را دوچندان می‌سازد.

تشخیص زودهنگام عیوب یاتاقان‌ها در سیستم‌های مکانیکی، نقشی کلیدی در افزایش عمر تجهیزات و کاهش هزینه‌های نگهداری دارد. با ظهور الگوریتم‌های یادگیری ماشین، رویکردهای نوینی برای این منظور ارائه شده است که توانسته‌اند دقت و کارایی بالایی را به ارمغان آورند. یکی از نخستین پژوهش‌های برجسته در این زمینه توسط هونگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام شد. آن‌ها از ماشین بردار پشتیبان (SVM)[1] برای تشخیص عیوب یاتاقان‌های غلتشی بهره گرفتند و با استفاده از تکنیک‌های پیش‌پردازش داده، داده، از ویژگی‌های حوزه زمان نظیر RMS[2] و واریانس[3] برای بهبود دقت استفاده کردند [۱]. در همین سال، کوکوچیونی و همکاران روشی هوشمند برای طبقه‌بندی خودکار سیگنال‌های ارتعاشی ارائه دادند که با افزایش مقاومت در برابر نویز، توانست عملکرد سیستم را بهبود بخشد [۲]. پژوهش‌های بعدی، مانند کار باواراجو و همکاران در سال ۲۰۰۹، گام‌های بیشتری در راستای استفاده از SVM برداشتند. آن‌ها موفق به طبقه‌بندی دقیق عیوبی مانند خرابی حلقه داخلی، حلقه بیرونی و ساچمه‌ها شدند [۳].کانکار و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ با مقایسه دو روش یادگیری ماشین، یعنی SVM و شبکه عصبی مصنوعی[4]، نشان دادند که دقت SVM به مراتب بالاتر است و این الگوریتم به عنوان ابزاری مطمئن برای تشخیص سریع و دقیق عیوب معرفی شد [۴].

پژوهش‌های جدیدتر نیز حاکی از اثربخشی این روش‌ها هستند. مطالعه موسویان و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی شناسایی عیوب یاتاقان‌های ژورنال با استفاده از تحلیل ارتعاشات پرداخت. آن‌ها با جمع‌آوری سیگنال‌های ارتعاشاتی در حوزه فرکانس و استخراج ۳۰ ویژگی کلیدی، عملکرد سه روش یادگیری ماشین شامل K نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و تفکیک خطی فیشر (FLD)[5]را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش، برتری الگوریتم SVM را در دقت تشخیص و قابلیت اعتماد نشان داد[۵].

در سال‌های اخیر، پاندا و همکاران در سال ۲۰۱۸ و وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱، با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته‌تری مانند بهینه‌سازی الگوریتم‌ها، توانستند عملکرد SVM را بهبود داده و به دقت‌هایی نزدیک به ۹۸٪ برسند [۶، ۷]. این تحقیقات به وضوح نشان می‌دهند که یادگیری ماشین، به‌ویژه SVM ، ابزاری قدرتمند برای تشخیص زودهنگام عیوب یاتاقان‌هاست.

چرایی و اهمیت این پژوهش به‌خوبی در این نکته نهفته است که با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، می‌توان به شناسایی زودهنگام عیوب یاتاقان‌ها دست یافت. این موضوع نه‌تنها به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به پیشگیری از حوادث و آسیب‌های احتمالی برای مسافران نیز منجر شوداین تحقیق با هدف توسعه یک سیستم هوشمند برای تشخیص عیوب یاتاقان‌های چرخ اتوبوس‌ها در شرایط عملیاتی واقعی انجام می‌شود. هدف اصلی ما ارائه یک راهکار کارآمد و مؤثر برای تشخیص زودهنگام خرابی‌ها است. در این مقاله به بررسی روندهای جدید در تشخیص عیوب یاتاقان‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های موجود در استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین خواهیم پرداخت. امید است که نتایج این پژوهش، گامی مؤثر در راستای ارتقای ایمنی و کارایی وسایل نقلیه عمومی باشد.

[1] Support Vector Machines
[2] Root Mean Square
[3] Variance
[4] Artificial Neural Networks
[5] Fisher Linear Discriminant

۲- داده برداری میدانی،تشخیص عیب و تحلیل نتایج

۲-۱ مراحل اجرای پروژه و داده‌برداری میدانی

برای آغاز این پژوهش، ابتدا مدل‌های مختلف اتوبوس‌ها که امکان انجام تحقیق بر روی آن‌ها وجود دارد، بررسی می‌شوند. پس از انتخاب مدل مناسب، محل نصب حسگر برای داده‌برداری میدانی مشخص می‌شود. هدف از این مرحله، یافتن مکانی است که حسگر بهترین و دقیق‌ترین داده‌ها را جمع‌آوری کند. عوامل متعددی مانند دسترسی به حسگر برای فعال کردن کلید آن و حفظ سلامت حسگر طی فرآیند داده‌برداری در نظر گرفته می‌شوند. پس از نصب حسگر، داده‌برداری در شرایط مختلف انجام می‌شود و داده‌های جمع‌آوری شده تحلیل و بررسی می‌شوند تا اطلاعات لازم برای پیشبرد پژوهش به‌دست آید.

۲-۱-۱ *انتخاب مدل اتوبوس*

برای انتخاب اتوبوس مناسب برای اجرای پروژه، ابتدا با متخصصین واحد چرخبندی تعمیرگاه اتوبوسرانی مشورت شد. هدف این بود که اتوبوسی انتخاب شود که علاوه بر قابلیت نصب حسگرهای ارتعاشی، دارای یاتاقان‌هایی باشد که زودتر دچار خرابی شوند و از این رو تشخیص عیب این مدل اهمیت بیشتری برای سازمان داشته باشد.

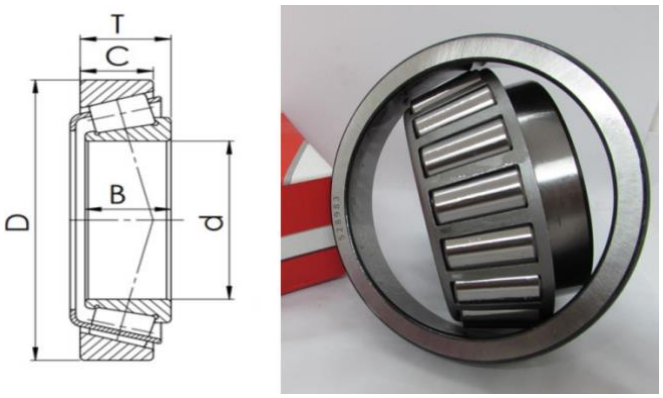
با توجه به توصیه‌های متخصصین، اتوبوس‌های BRT[۶] کینگ لانگ[۷] به عنوان گزینه مناسبی برای این پروژه انتخاب شدند(شکل۱) .

شکل ۱- اتوبوس کینگ لانگ دوکابینه.

این انتخاب به دلیل نوع سرویس‌دهی و خطوط ویژه اتوبوس‌های BRT است که با سرعت بالاتری حرکت می‌کنند. این امر باعث می‌شود یاتاقان‌ها تحت تنش‌های بیشتری قرار گیرند و احتمال خرابی آن‌ها افزایش یابد. همچنین، بار بیشتری که این اتوبوس‌ها تحمل می‌کنند، منجر به افزایش فشار بر یاتاقان‌های چرخ‌ها می‌شود.

یاتاقان مورد بررسی در این پژوهش، علاوه بر اتوبوس‌های کینگ لانگ، در اتوبوس‌های کمنز[۸] ، اتوبوس‌های بنز[۹]۴۵۷، اسکانیا[۱۰] و ولوو[۱۱] نیز استفاده می‌شود. این موضوع اهمیت پژوهش را افزایش می‌دهد زیرا نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به بهبود عملکرد و نگهداری یاتاقان‌های مورد استفاده در طیف گسترده‌تری از اتوبوس‌ها کمک کند. در (شکل۲) یاتاقان مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود.همچنین در جدول۱ مشخصات این یاتاقان آورده شده است.

[6] Bus Rapid Transit
[7] King Long
[8] Cummins
[9] Benz
[10] Scania
[11] Volvo



شکل ۲- یاتاقان مورد استفاده در این پژوهش [۸].

جدول ۱- مشخصات یاتاقان مورد بررسی در این پژوهش.

شماره مدل	528983A
ابعاد کلی	70*130*56.8 mm
قطر داخلی(d)	70 mm
قطر خارجی(D)	130 mm
ضخامت(T)	56.8 mm
وزن	2.77 kg
دسته بندی	یاتاقان غلتکی مخروطی تک ردیفه[۱۲]

۲-۱-۲ *بررسی و انتخاب محل نصب حسگر*

پس از انتخاب مدل اتوبوس و مشخص شدن اهمیت نسبی چرخ جلو، بررسی نقاط مختلف چرخ جلو برای نصب حسگر آغاز شد (شکل۳). هدف از این بررسی، انتخاب مناسب‌ترین و مطمئن‌ترین محل برای نصب حسگر بود.

شکل ۳- نقاط مختلف چرخ جلو برای بررسی برای نصب حسگر.

پس از بررسی‌های انجام شده نشان داد که "سگدست"[۱۳]، مناسب‌ترین محل برای نصب حسگر است. "سگدست" به دلیل ثبات و نزدیکی به یاتاقان، بهترین مکان برای جمع‌آوری داده‌های ارتعاشی است. همچنین، این محل به گونه‌ای است که دسترسی به حسگر برای فعال‌سازی و انجام تنظیمات لازم در حین حرکت اتوبوس امکان‌پذیر است(شکل۴).

[12] Single row taper roller bearing

شکل ۴- محل انتخاب شده برای نصب حسگر.

۲-۱-۳ *نحوه اجرای فرآیند داده‌برداری*

پس از نصب حسگر ، نوبت به اجرای فرآیند داده‌برداری می‌رسد. ابتدا داده‌برداری در حالتی که یاتاقان چرخ سالم است انجام می‌شود. برای افزایش کیفیت و تنوع داده‌ها، داده‌برداری در سرعت‌های مختلف انجام می‌شود. با توجه به اینکه حداکثر سرعت مجاز برای اتوبوس ۷۰ کیلومتر بر ساعت است، داده‌برداری در چهار سرعت ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت با اختلاف یک کیلومتر بر ساعت انجام شد. این کار به منظور بررسی و تشخیص عیب در شرایط مختلف انجام می‌شود.

برای اطمینان از اعتمادپذیری داده‌ها، در هر سرعت تعیین شده، تست‌ها دو مرتبه انجام می‌شوند. این تکرارها به افزایش دقت و قابلیت اطمینان داده‌های جمع‌آوری شده کمک می‌کند و امکان تحلیل دقیق‌تر و قابل اعتمادتر نتایج را فراهم می‌آورد.

بعد از انجام داده‌برداری از یاتاقان چرخ در حالت سالم و بررسی کامل داده‌ها، حالا در مرحله بعد باید از یاتاقان چرخ در حالت خراب داده‌برداری انجام شود. برای این کار، نیاز است که یاتاقان سالم با یاتاقان خراب تعویض شود. همان‌طور که در (شکل۵) مشاهده می‌شود، این کار مراحل متعددی دارد.

شکل ۵- نمونه مراحل تعویض یاتاقان: (الف) بازکردن چرخ (ب) بازکردن توپی چرخ (ج) جایگذاری یاتاقان خراب.

۲-۲ *تشخیص عیب یاتاقان*

پس از کسب داده‌ها از یاتاقان‌های سالم و خراب در سرعت‌های مختلف، باید از این داده‌ها برای تشخیص عیب استفاده شود. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

[13] Steering Knuckle

ابتدا داده‌های خام بررسی و پردازش می‌شوند تا نویزها و سیگنال‌های غیرمرتبط حذف شوند و داده‌های قابل‌اعتماد استخراج شوند. سپس ویژگی‌های مختلفی از این داده‌ها استخراج می‌شود. این ویژگی‌ها می‌توانند شامل پارامترهای آماری مانند میانگین، واریانس، انحراف معیار باشند.

پس از تعیین ویژگی‌های مناسب، داده‌های پردازش شده در مدل‌های یادگیری ماشین و طبقه‌بندی مورد نظر استفاده می‌شوند. مدل انتخاب شده، با استفاده از این ویژگی‌ها، آموزش داده می‌شود تا بتواند یاتاقان سالم و خراب را از یکدیگر تشخیص دهد. این رویکرد به تشخیص دقیق و سریع عیب‌ها کمک می‌کند و به بهبود کارایی و ایمنی سیستم‌های مکانیکی منجر می‌شود.

۲-۲-۱ *پردازش داده‌ها و استخراج و انتخاب ویژگی‌ها*

در این مرحله پیش‌پردازش داده‌ها که شامل جمع‌آوری و حذف نویزهای نامطلوب و کاهش تأثیرات شدید نوسانات جاده‌ای، مانند چاله‌ها، ترک‌ها وانجام می‌شود. گام بعدی استخراج ویژگی‌های مرتبط و مفید از این داده‌ها می‌باشد. در این پژوهش، تعداد ۱۲ ویژگی کلیدی از داده‌ها استخراج شده است که ویژگی‌هایی مانند میانگین، بیشینه، ریشه میانگین مربعات، ضریب زدودگی و ضریب شکل از جمله آن‌ها می‌باشند.

پس از استخراج ویژگی‌ها، گام بعدی انتخاب ویژگی‌های مناسب برای استفاده در طبقه‌بندی و تشخیص عیب است. این مرحله بسیار مهم است، زیرا انتخاب ویژگی‌های صحیح می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت و عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی ایجاد کند. به همین منظور تصمیم گرفته شد که از تابع همبستگی برای انتخاب ویژگی‌ها استفاده شود. استفاده از همبستگی به جای تحلیل بصری نمودارها می‌تواند دقت انتخاب ویژگی‌ها را افزایش دهد، زیرا همبستگی یک معیار کمی و عینی است که از نظر آماری معتبر است و به طور کلی روش همبستگی می‌تواند نتایج واضح‌تر و قابل اعتمادتری ارائه دهد. همچنین این روش خطای انسانی را در فرآیند انتخاب ویژگی کاهش می‌دهد، زیرا تحلیل بصری می‌تواند با تفسیرهای مختلف و سلیقه‌ای همراه باشد.

۲-۲-۲ *طبقه بندی و تشخیص عیب*

پس از بررسی نمودارهای همبستگی ویژگی‌ها در سرعت‌های مختلف، نتایج نشان داد که ویژگی‌های میانگین، ضریب زدودگی و ضریب شکل در مقایسه با سایر ویژگی‌ها تأثیر کمتری در فرآیند تشخیص عیب دارند. به همین دلیل، این ویژگی‌ها از میان ویژگی‌های استخراج‌شده حذف می‌شوند تا مدل طبقه‌بندی بهینه‌تری به دست آید. در این پژوهش، مدل طبقه‌بندی پایه ماشین بردار پشتیبان انتخاب شده است. بعد از برچسب‌گذاری داده‌ها، تمام داده‌ها باید برای انجام فرآیند طبقه‌بندی ترکیب شوند. در این مرحله، ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون اختصاص می‌یابند.

۳- نتایج و جمع‌بندی

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، یاتاقان چرخ یکی از مهم‌ترین قطعات جلوبندی وسایل نقلیه است که خراب شدن آن می‌تواند مشکلات زیادی را هم برای وسیله نقلیه و هم برای سرنشینان آن به وجود آورد. این مشکلات شامل آسیب به تجهیزات دیگر مانند توپی چرخ و پلوس می‌شود و در صورت عدم تشخیص به موقع، می‌تواند باعث قفل شدن لاستیک‌ها و لق زدن چرخ‌ها شود که هر یک از این موارد عواقب خطرناکی را به دنبال دارد.

در این پژوهش، با توجه به اهمیت بالای اتوبوس‌ها و نقشی که در حمل‌ونقل عمومی ایفا می‌کنند، تصمیم به تشخیص عیب یاتاقان چرخ اتوبوس گرفته شد. برای این کار، داده‌برداری در یک محیط کاملاً میدانی و عملی انجام شد. ابتدا داده‌ها جمع‌آوری شدند و سپس طی فرآیند پیش‌پردازش، برخی داده‌هایی که نویز زیادی داشتند، حذف شدند.

پس از آماده‌سازی داده‌ها، ویژگی‌های مناسب از این داده‌ها استخراج شدند. این ویژگی‌ها شامل پارامترهایی بودند که می‌توانند اطلاعات دقیقی از وضعیت یاتاقان‌ها ارائه دهند. سپس، این ویژگی‌ها برای آموزش و تست سه مدل طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان (SVM)، یادگیری جمعی (Bagging-SVM) مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان وK-نزدیک‌ترین همسایه مورد استفاده قرار گرفتند که هر یک از این مدل‌ها برای تشخیص یاتاقان سالم و خراب به کار گرفته شدند.

مدل‌های مذکور پس از آموزش با استفاده از داده‌های پیش‌پردازش شده، بر روی داده‌های جدید آزمون شدند تا دقت و قابلیت اطمینان آن‌ها در تشخیص وضعیت یاتاقان‌ها ارزیابی شود. نتایج حاصل از این ارزیابی‌ها نشان داد که هر سه مدل با دقت بالایی قادر به تشخیص یاتاقان‌های سالم و خراب هستند، اما مدل SVM و Bagging-SVM به خصوص در شرایط پیچیده و با داده‌های نویزی عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

در (جدول۲) و (جدول۳) نیز خلاصه‌ای کلی از نتایج به دست آمده آورده شده است. این جدول‌ها شامل معیارهای مختلف ارزیابی عملکرد مدل‌ها از جمله دقت، صحت[۱۴]، بازیابی[۱۵]و نمره F1[۱۶] می‌باشد. این معیارها به تحلیل‌گران کمک می‌کنند تا عملکرد کلی مدل را در تشخیص عیب یاتاقان‌ها به صورت جامع ارزیابی کنند. نتایج نشان‌دهنده دقت بالا و کارایی مطلوب مدل‌ها در شرایط آزمون‌های مختلف می‌باشد، که این امر تأیید می‌کند که روش‌های استفاده شده در این پژوهش به خوبی قادر به تشخیص صحیح وضعیت یاتاقان‌ها، حتی در مواجهه با داده‌های جدید و ناآشنا هستند.

جدول ۲- نتایج مدل آموزشی در این پژوهش بر روی ۲۰% داده‌ی آزمون جدا شده.

روش طبقه بندی	Accuracy	Precision		Recall		F1-Score	
		یاتاقان سالم	یاتاقان خراب	یاتاقان سالم	یاتاقان خراب	یاتاقان سالم	یاتاقان خراب
SVM	97.96%	99%	97%	97%	98%	98%	98%
Bagging SVM	97.95%	97%	98%	99%	97%	98%	98%
KNN	98%	99%	97%	97%	99%	98%	98%

جدول ۳- نتایج مدل آموزشی در این پژوهش بر روی داده با سرعت تصادفی.

روش طبقه بندی	Accuracy	Precision		Recall		F1-Score	
		یاتاقان سالم	یاتاقان خراب	یاتاقان سالم	یاتاقان خراب	یاتاقان سالم	یاتاقان خراب
SVM	98.6%	100%	97%	97%	100%	99%	99%
Bagging SVM	98.7%	100%	97%	97%	100%	99%	99%
KNN	97.6%	98%	97%	97%	98%	98%	98%

باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان متوجه شد که دقت مدل‌های تشخیص عیب به شدت به انتخاب صحیح ویژگی‌ها، برچسب‌گذاری دقیق داده‌ها و حذف داده‌های نامناسب وابسته است. نتایج حاکی از آن است که مدل‌های ماشین بردار پشتیبان با کرنل شعاعی و یادگیری جمعی مبتنی بر SVM ، ابزارهای قدرتمندی برای تشخیص عیوب یاتاقان‌ها هستند و می‌توانند در سیستم‌های پایش وضعیت و نگهداری پیشگیرانه به کار گرفته شوند. این پژوهش نشان داد که با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته داده‌برداری و پردازش داده، می‌توان به طور موثری عیوب یاتاقان‌های چرخ اتوبوس را تشخیص داد و از بروز مشکلات جدی‌تر و خطرات احتمالی جلوگیری کرد. این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزارهای کارآمد در نگهداری پیشگیرانه و افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری اتوبوس‌ها استفاده شوند.

[14] Precision
[15] Recall
[16] F1-Score

مراجع

[1] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song, "Optimal model selection of support vector classifiers for rolling element bearings fault detection using statistical Time-Domain Features," in Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 2008, vol. 3, PARTS A AND B ed., pp. 1359-1368, doi: 10.1115/DETC2008-49772.

[2] M. Cococcioni, P. Forte, S. Manconi, and C. Sacchi, "A machine learning approach to fault diagnosis of rolling bearings," in *ICCC 2008 - IEEE 6th International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings*, 2008, pp. 209-214, doi: 10.1109/ICCCYB.2008.4721407.

[3] K. M. Bhavaraju, P. K. Kankar, S. C. Sharma, and S. P. Harsha, "Fault diagnosis of ball bearings using soft computing," in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2009, vol. 1, PARTS A AND B ed., pp. 1129-1133, doi: 10.1115/DETC2009-86926.

[4] P. K. Kankar, S. C. Sharma, and S. P. Harsha, "Fault diagnosis of ball bearings using machine learning methods," *Expert Systems with Applications*, Article vol. 38, no. 3, pp. 1876-1886, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.07.119.

[5] A. Moosavian, H. Ahmadi, and A. Tabatabaeefar, "Fault diagnosis of main engine journal bearing based on vibration analysis using Fisher linear discriminant, K-nearest neighbor and support vector machine," *Journal of Vibroengineering*, Article vol. 14, no. 2, pp. 894-906, 2012.

[6] A. K. Panda, J. S. Rapur, and R. Tiwari, "Prediction of flow blockages and impending cavitation in centrifugal pumps using Support Vector Machine (SVM) algorithms based on vibration measurements," (in English), Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, Article vol. 130, pp. 44-56, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.092.

[7] M. Wang *et al.*, "Roller bearing fault diagnosis based on integrated fault feature and SVM," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, pp. 1-10, 2021.

[8] "https://vpk-podshipnik.com.ua/product/528983-7013057," ed.