

الگوریتم جدید جهت تشخیص عیب ترک نازل انژکتور موتور دیزل با استفاده از آنالیز ارتعاشات، آزمون T و ماشین بردار پشتیبان

مهدی زکی زاده*

دانشجوی دکتری

دانشکده مکانیک دانشگاه گیلان، گیلان

zakizadeh_mahdi@yahoo.com

علی جمالی

دانشیار

دانشکده مکانیک دانشگاه گیلان، گیلان

ali.jamali@guilan.ac.ir

منصور رفیعیان

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

rafeeyan@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸

چکیده

در این پژوهش روشی جدید جهت تشخیص عیب ترک نازل انژکتور موتور لکوموتیو، با استفاده از آنالیز ارتعاشات و استفاده از آزمون‌های آماری، داخل الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، ارائه شده است. در برنامه ارائه شده ابتدا سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه فرکانس دریافت شده و محدوده فرکانسی مورد بررسی به چندین محدوده کوچکتر تقسیم می‌شود. سپس RMS هر محدوده به‌عنوان یک ویژگی فرکانسی استخراج و به‌عنوان ورودی به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان داده می‌شود. به دلیل اینکه انتخاب زیاد ویژگی باعث پایین آمدن دقت طبقه‌بندی شده و همچنین جهت انتخاب ویژگی‌های بهتر، بردار ویژگی استخراج شده ابتدا از فیلترهای آزمون T، با سطوح معناداری مختلف، عبور کرده و سپس به‌عنوان ورودی به الگوریتم SVM^۲ داده می‌شود. استفاده از این روش ضمن افزایش دقت طبقه‌بندی از ۷۸/۴ به ۹۴/۶ درصد، به فرایند تشخیص محدوده‌های فرکانسی، که تحت تأثیر عیب، تغییرات محسوسی دارند، کمک می‌کند. براساس نتایج به‌دست آمده عیب ترک نازل انژکتور بیشتر باعث افزایش شدت ارتعاشات در باندهای فرکانسی بالای ۱۵۰۰ هرتز می‌شود.

واژگان کلیدی: پایش وضعیت، تحلیل ارتعاشات، موتورهای دیزل، انژکتور، پردازش سیگنال، آزمون T، ماشین بردار

پشتیبان

۱. مقدمه

صنعت امروز، خواهان عملکرد ماشین‌ها در حالت سالم و با کمترین میزان خرابی است. این موضوع علاقه مدیران صنایع به روش‌های پیشرفته پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات را

باعث شده است. مزایای استفاده از این روش در صنعت امروز پذیرفته شده است؛ چراکه منافع تشخیص زود هنگام و بهنگام عیوب مکانیکی و سازه‌ای کاملاً روشن است. زیرا تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه‌های نت و افزایش مدت زمان دسترسی به

تجهیزات داشته است. در هر کارخانه معمولاً روش‌های نوین پایش وضعیت برای دستگاه‌هایی استفاده می‌شوند که از تجهیزات بحرانی آن کارخانه باشند. در صنعت ریلی، موتورهای لکوموتیو از تجهیزات بحرانی محسوب می‌شوند که سالانه بودجه زیادی برای تعمیر و نگهداری آنها هزینه می‌شود. خرابی موتورهای لکوموتیو علاوه بر هزینه‌های تعمیراتی، موجب وارد شدن خسارت به صنایع مرتبط با بخش حمل و نقل ریلی می‌شود که این موضوع بر اهمیت تعمیرات و نگهداری بهینه موتور لکوموتیوها می‌افزاید. انژکتورها^۳ یکی از قطعات بسیار مهم در موتورهای دیزل هستند که تأثیر بسیار زیادی روی عملکرد موتور داشته و هزینه و زمان قابل توجهی صرف تعمیرات اضطراری و تعمیرات پیشگیرانه آنها می‌شود.

شکستگی یا ترک نازل، از عیوب رایج در انژکتور لکوموتیوهای آلستوم بوده که موجب تزریق سوخت بیش از حد و به صورت پودر نشده به داخل محفظه احتراق می‌شود. به دلیل اینکه خرابی انژکتورها موجب احتراق ناقص، بالا رفتن دمای موتور، اختلال در سیستم روانکاری و خسارت به دیگر بخش‌های موتور شده و تشخیص خرابی آنها تا زمانی که انژکتور از روی سرسیلندر باز نشده، بسیار دشوار است، نیاز به روش‌های نوین پایش وضعیت، برای تشخیص به موقع خرابی انژکتورها، بسیار احساس می‌شود. در این تحقیق با استفاده از آنالیز ارتعاشات و الگوریتم یادگیری SVM، روشی جدید جهت تشخیص عیب شکستگی یا ترک نازل انژکتورهای موتور لکوموتیو آلستوم ارائه شده تا بتوان بدون پیاده کردن^۴ و در زمان مناسب، ترک نازل در انژکتورها را تشخیص داد. استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق می‌تواند هزینه‌های مربوط به تعمیرات پیشگیرانه انژکتورها را کاهش داده و از خسارت‌هایی که به موتور لکوموتیو، به علت کار کردن با انژکتورهای معیوب وارد می‌شود، جلوگیری کند.

اندازه‌گیری فشار داخل محفظه احتراق، پایش گازهای خروجی سیلندر و آنالیز روغن از روش‌های رایج در تشخیص عیوب انژکتورها بوده که این روش‌ها نسبت به روش ارائه شده در این

تحقیق دارای ضعف‌هایی هستند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اندازه‌گیری فشار احتراق نیاز به باز و بسته کردن شیرهای مخصوص روی سرسیلندر و خاموش و روشن کردن لکوموتیو داشته که در مقایسه با روش ارائه شده بسیار زمان‌بر است.
 - شیرهایی که جهت تست فشار روی سرسیلندر نصب می‌شوند بسیار حساس بوده و در صورت کوچک‌ترین مشکل در نصب و یا گرفتگی مسیر داخل سرسیلندر دقت نتایج بسیار پایین آمده و از لحاظ ایمنی هم بسیار خطرناک است.
 - پایش گازهای خروجی از هر سیلندر به صورت جداگانه امکان‌پذیر نبوده و در صورت پایش گازهای انژکتور، هرچند می‌توان به طور کلی خرابی انژکتورها را تشخیص داد ولی تشخیص این موضوع که کدام یک از انژکتور یا انژکتورها معیوب هستند امکان‌پذیر نیست.
 - با شکستن نازل انژکتورها و عیوبی که باعث افزایش میزان پاشش سوخت می‌شوند مقداری از سوخت به داخل کارتر نفوذ کرده که با آنالیز روغن (تغییر در ویسکوزیته و کاهش نقطه اشتعال روغن) قابل تشخیص است، ولی این روش نیز اطلاعات کلی از تجهیز داده و در تشخیص اینکه کدامیک از ۱۶ انژکتور معیوب هستند ناتوان است.
- بنابراین می‌توان گفت که روش ارائه شده در این تحقیق نسبت به روش‌های دیگر سریع، دقیق و ایمن‌تر است.
- در سال‌های اخیر تحقیقات انجام شده در زمینه عیب‌یابی موتورهای احتراق داخلی، با استفاده از آنالیز ارتعاشات، رو به افزایش بوده و از نمونه‌های کاربردی آن می‌توان به تحقیقات انجام شده در زمینه تشخیص پدیده‌ی کوبش^۵ و ساخت حسگرهای کوبش اشاره کرد [۱، ۲، ۳]. در سال ۲۰۰۷ تحقیقی با موضوع عیب‌یابی موتور احتراق داخلی از طریق اندازه‌گیری منظم و مستمر ارتعاشات و صدای کمپرس، توسط بارلی [۴] انجام شد. در این تحقیق با بررسی نتایج حاصل از یک تست

تجربی روی یک موتور ۱۶ سیلندر در بارهای مختلف، مشخص شد که سیگنال‌های ارتعاشی و صدا، بسیار زیاد وابسته به عوامل داخلی سیلندرها و در ارتباط با بار موتور و فرکانس احتراق هستند. بعد از تحلیل داده‌های گرفته شده، بعضی از سیگنال‌های ارتعاشی و صوتی شاخص، به‌منظور ارزیابی شرایط کاری متفاوت موتور تولید شده و به‌عنوان مقادیر مرجع در نظر گرفته شدند تا با مقایسه شاخص‌های مشابه با مقادیر مرجع، کیفیت احتراق تخمین زده شود. کلینچایم و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به پایش وضعیت موتور بنزینی کوچک چهار زمانه با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی پرداختند [۵]. آنها از این سیگنال‌ها برای پایش فاصله مجاز سوپاپ‌های ورود سوخت و خروج دود استفاده کردند. آنها ضمن تأکید بر کارآمد بودن روش معرفی شده آن را قابل گسترش برای موتورهای پیچیده‌تر و بزرگ‌تر دانسته‌اند. وانگ و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۳ یک روش جدید برای نوفه‌زدایی^۶ سیگنال‌های ارتعاشی نایستا و سپس تشخیص عیب‌های یک موتور دیزل ارائه کردند. فلت و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عیب شیر سوخت یک موتور دیزل پرداختند. این عیب در اثر خرابی فنر شیر یا فاصله غیرنرمال شیر ایجاد می‌شود. در این تحقیق تنها با استفاده از یک شتاب‌سنج که روی بلوکه موتور قرار می‌گیرد شتاب ارتعاشات موتور در حالت سالم و معیوب اندازه‌گیری شده است. انژکتورها یکی از قطعات بسیار مهم در موتورهای دیزل هستند که وظیفه دارند سوخت را با فشار بالا، به شکل پودر شده و در زمان مناسب، به داخل محفظه احتراق تزریق کنند. عیوب انژکتورها شامل نقص در پمپ انژکتور، نقص در مجاری انتقال سوخت و خرابی یا مستهلک شدن نازل انژکتور می‌شود که معمولاً جهت تعمیر یا بررسی میزان استهلاک انژکتور باید انژکتورها پیاده شده و در دستگاه‌های تست انژکتور مورد بررسی دقیق قرار گیرند. به دلیل اینکه باز کردن و تست انژکتورها بسیار مشکل و پرهزینه بوده در سال‌های اخیر تحقیقاتی جهت تشخیص وضعیت انژکتورها با استفاده از داده‌برداری از روی بلوکه موتور یا سرسیلندر انجام شده است.

در سال ۲۰۱۰ ایلامین و همکارانش [۸] به بررسی عیوب انژکتور و تأثیر این عیوب روی فرایند احتراق در موتور دیزل JCB 44T2 با استفاده از سیگنال‌های صوتی پرداختند. آنها با بررسی سیگنال‌ها در حوزه فرکانس و زاویه-فرکانس نشان دادند که می‌توان روند تغییرات احتراق در اینگونه موتورها را با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی به خوبی تشخیص داد. در سال ۲۰۱۴ دیمتریوس و همکاران [۹] روشی جهت تشخیص عیوب انژکتورهای یک تراکتور با استفاده از سیگنال‌های صوتی و شبکه‌های عصبی ارائه دادند. در این تحقیق هفت ویژگی زمانی به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شده و شبکه عصبی با دقت بسیار خوبی قادر به تشخیص انژکتورهای معیوب بود ولی نوع عیب را با دقت بالا تشخیص نمی‌داد. در سال ۲۰۱۸ عزالدین فتوتو و همکارانش [۱۰] تحقیقی جهت تشخیص زود هنگام عیوب انژکتور در یک موتور دیزل شش سیلندر انجام دادند. آنها فشار انژکتور در یکی از سیلندرها را به تدریج از ۱۰ تا ۵۰ درصد مقدار اسمی آن کاهش داده و با پردازش سیگنال در حوزه‌های مختلف نشان دادند که این کاهش فشار، با پردازش سیگنال‌های ارتعاشی، با دقت بالایی، قابل تشخیص است. در سال ۲۰۱۹ تقی‌زاده و همکارانش [۱۱] با پردازش سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان-فرکانس، روشی جهت تشخیص عیوب انژکتور موتور دیزل ارائه دادند. در این تحقیق ارتباط میان میزان ارتعاشات و فرکانس‌های ارتعاشی با عیوبی که منجر به پدیده‌ی ضربه می‌شوند مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که خرابی انژکتورها تأثیر قابل توجهی روی فاکتور کرتوسیس^۷ و جذر میانگین مربعات^۸ (RMS) سیگنال ارتعاشی، در باندهای فرکانسی بالا، دارد.

امروزه استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های یادگیری در زمینه عیب‌یابی تجهیزات مکانیکی و به‌طور کلی در مبحث طبقه‌بندی افزایش یافته است. تاکنون شبکه‌های عصبی متفاوتی مانند MLP، RBF، ANFIS و غیره ارائه شده که عموماً براساس کمینه کردن خطای مدل سازی یا خطای

طبقه‌بندی عمل می‌کنند. در این تحقیق از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یا SVM برای طبقه‌بندی عیوب استفاده شده است. SVM یک ماشین یادگیری است که در سال ۱۹۹۵ توسط والدیمر وپنیک معرفی شد [۱۲]. ماشین‌های بردار پشتیبان به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به جای کمینه کردن خطای مدل‌سازی، ریسک عملیاتی را کمینه می‌کنند و به همین علت عملکرد بهتری در مسائل طبقه‌بندی دارند.

برای دستیابی به یک الگوریتم طبقه‌بندی مناسب با قدرت تشخیص و دقت بالا، نیاز است که مراحل داده‌برداری و داده‌کاوی^۹ به بهترین شکل ممکن انجام پذیرد. بعد از داده‌برداری با پردازش سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس، ویژگی‌هایی استخراج و انتخاب می‌شوند که به‌عنوان ورودی به شبکه SVM داده شده و شبکه با این داده‌ها تحت آموزش و تست قرار می‌گیرد. استخراج و انتخاب ویژگی خوب و خلاقانه می‌تواند به خوبی فضای داده‌ها را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در زمان و افزایش دقت شبکه‌ی SVM شود. انتخاب صحیح ویژگی‌ها، از نظر کمی و کیفی یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند پردازش سیگنال است. ویژگی‌های زمانی استخراج شده از یک سیگنال ارتعاشی مانند: جنر میانگین مربعات، انرژی، انتروپی و غیره در واقع توابع ریاضی هستند که بر روی یک سیگنال اعمال شده و اطلاعات مفیدی از وضعیت تجهیز را به همراه دارند. اما برای تشخیص نوع عیب ویژگی‌های فرکانسی و زمان-فرکانسی اهمیت بسیار بیشتری دارند. بعد از اعمال تبدیل فوریه روی یک سیگنال زمانی، سیگنال فرکانسی به دست آمده که شدت ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. در سامانه‌های دوار بسیاری از عیوب رایج، مشخصات فرکانسی خاصی تولید می‌کنند که با توجه به شدت ارتعاشات در آن فرکانس‌ها می‌توان نوع عیب را تشخیص داد، اما در تجهیزات مکانیکی با ساختار پیچیده‌تر، مانند موتورهای احتراق داخلی، یافتن این موضوع که هر عیب باعث افزایش شدت ارتعاشات در چه فرکانس‌هایی می‌شود امری دشوار است. به همین علت در این

تحقیق تمام محلوده فرکانسی به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و RMS هر محلوده به‌عنوان یک ویژگی در نظر گرفته شده است و سپس با به‌کارگیری فیلتری براساس آزمون T، داخل الگوریتم SVM، روشی جدید برای استخراج و انتخاب ویژگی‌های فرکانسی ارائه می‌شود. استفاده از آزمون‌های آماری جهت انتخاب ویژگی، در زمینه‌های مختلف کاربرد داشته و این آزمون‌ها موجب می‌شوند تا ویژگی‌های بهتر انتخاب شده و ویژگی‌های غیرمؤثر بر تصمیم از فضای بردار ویژگی حذف شوند [۱۳، ۱۴، ۱۵]. در این تحقیق با استفاده از آزمون T، فرکانس‌های متأثر از عیوب مختلف شناسایی شده و با انتخاب شدت ارتعاشات در آن فرکانس‌ها، به‌عنوان ویژگی‌های ورودی به شبکه SVM، دقت شبکه را افزایش یافته است. روش ارائه شده در این تحقیق برای تشخیص عیب ترک در نازل انژکتورهای لکوموتیو آلتوم مورد استفاده قرار گرفته که نتایج آن در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

۲. بیان روش تحقیق

طبق دستورالعمل تعمیراتی لکوموتیوهای آلتوم در کارخانجات تعمیراتی بافق، پیاده کردن و تست انژکتورها در بازدیدهای هشت ماهه انجام می‌شود. در این پژوهش بعد از تعیین نقاط بهینه جهت داده‌برداری ارتعاشی، به مدت یک سال و نیم، قبل از بازدیدهای هشت ماهه، عملیات داده‌برداری از موتور لکوموتیوها صورت گرفته و بعد از بررسی انژکتورها در دستگاه تست انژکتور، داده‌ها به دو بخش انژکتور سالم و انژکتور با ترک نازل، دسته‌بندی شدند. لازم به توضیح است انژکتورهایی با گشاد شدن سوراخ‌های نازل یا سایش بیش از حد سوزن نازل انژکتور، که باعث می‌شوند سوخت به صورت شره (پودر نشده) به داخل محفظه احتراق پاشیده شود، در همان دسته‌ی انژکتورها با عیب ترک نازل قرار می‌گیرند. فشار پاشش در انژکتورها قبل از نصب بین ۳۰۵ تا ۳۱۰ بار تنظیم می‌شود و بعد از هشت ماه کارکرد مقدری افت فشار در آنها طبیعی است. در این تحقیق انژکتورهایی که بعد از باز کردن در بازدیدهای

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

$$df = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1-1} \left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2-1} \left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2} \quad (2)$$

در فرمول‌های ۱ و ۲، \bar{X}_1 و \bar{X}_2 میانگین نمونه‌ای از گروه اول و دوم، S_1 و S_2 واریانس نمونه‌ای از گروه اول و دوم، n_1 و n_2 تعداد نمونه‌های گروه اول و دوم و df درجه آزادی آماره T است.

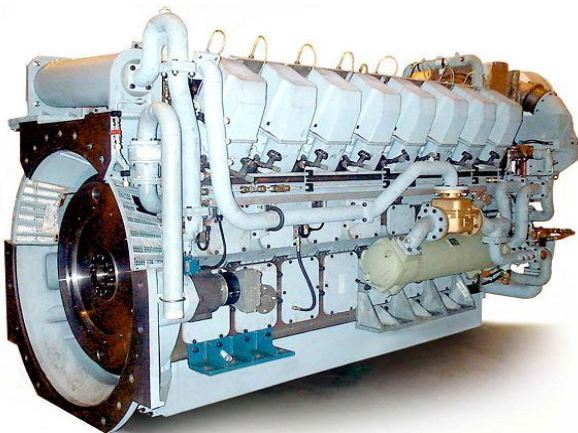
هدف اصلی تحقیق حاضر یافتن فرکانس‌های کلیدی جهت تشخیص شرایط تجهیز و تشکیل بهترین بردار ویژگی از فرکانس‌هایی است که با توجه به مقدار آنها بتوان به بالاترین دقت طبقه‌بندی دست یافت.

برنامه ارائه شده در این تحقیق می‌تواند جهت بررسی‌های اولیه و تشخیص عیوب سیستم‌های پیچیده و ناشناخته بسیار مفید واقع شود.

۳. معرفی تجهیزات و ابزار تحقیق

۳-۱. لکوموتیو آلستوم

شکل ۱ نمایی از موتور دیزل لکوموتیو آلستوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از موتور دیزل لکوموتیو آلستوم [۱۷]

هشت ماهه و تست آنها در دستگاه تست انژکتور، فشار پاشش سوخت‌شان بیشتر از ۲۹۰ بار بود به‌عنوان انژکتورهای سالم دسته‌بندی شدند بعد از دسته‌بندی داده‌ها با پردازش سیگنال‌های ارتعاشی به‌دست آمده در حوزه فرکانس، ویژگی‌هایی جهت آموزش شبکه SVM استخراج شدند در برنامه ارائه شده در این تحقیق ابتدا سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه فرکانس دریافت شده و محدوده فرکانسی مورد بررسی به چندین محدوده کوچک‌تر تقسیم می‌شود. سپس RMS هر محدوده به‌عنوان یک ویژگی فرکانسی استخراج شده تا به‌عنوان ورودی به شبکه SVM داده شوند. برای رسیدن به نتایج دقیق باید محدوده‌های فرکانسی کوچک انتخاب شده که باعث افزایش تعداد ویژگی‌ها می‌شود و تعداد زیاد ویژگی ممکن است باعث پایین آمدن دقت شبکه SVM شود. برای رفع این مشکل ابتدا ویژگی‌های استخراج شده در آزمون آماری T مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌هایی از دو کلاس، که از لحاظ آزمون T دارای تفاوت معناداری هستند به‌عنوان ورودی به شبکه SVM انتخاب می‌شوند. آزمون T یک آزمون آماری بوده که میانگین و واریانس ویژگی‌های استخراج شده از دو کلاس مجزا را با هم مقایسه کرده و ویژگی‌هایی که در کلاس‌های مختلف، اختلاف میانگین بیشتری دارند را انتخاب می‌کند. برای مقایسه‌ی میانگین دو ویژگی از دو گروه مختلف در آزمون T ، ابتدا مقدار T براساس فرمول ۱ به‌دست آمده و با مقدار بحرانی توزیع t مقایسه می‌شود و درحالت کلی اگر مقدار آماره T از مقدار بحرانی توزیع t ، با درجه آزادی ذکر شده در فرمول شماره ۲ و در سطح خطای آلفا کوچک‌تر باشد فرض برابری در میانگین دو جامعه تأیید شده و آن ویژگی از بردار ویژگی حذف می‌شود [۱۶]. در نتیجه آزمون T باعث حذف ویژگی‌هایی می‌شود که در کلاس‌های مختلف رفتار تقریباً مشابهی داشته و ورود آنها به شبکه SVM نه تنها کمکی به فرایند تشخیص نمی‌کند بلکه دقت طبقه‌بندی را نیز کاهش می‌دهد.

۳-۲. تحلیل گر ارتعاشی

برای انجام این تحقیق از تحلیل گر ارتعاشی Lenovo ساخت شرکت SPM استفاده شده است که در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. تحلیل گر ارتعاشی Lenovo ساخت شرکت SPM

مشخصات فنی تحلیل گر ارتعاشی Lenovo در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. مشخصات فنی تحلیل گر [۱۱]

تعداد کانال	۳
رنج فرکانسی	۰/۴۰ kHz
لاین فرکانسی	۲۵۶۰۰ Line
رنج دینامیکی	۱۲۰ dB
نوع حسگر	شتاب سنج پیزوالکتریک Duo Tech ساخت شرکت SPM
قابلیت‌ها	Time Signal, FFT, Live phase, Orbit, HD ENV, EVAM, Bump test, Cepstrum Analysis, SPM Spectrum HD, HDm/HDc, Run up Coast down
حافظه	256MB RAM, 1-8GB SD Card
وزن	۸۹۰g

۴. داده برداری

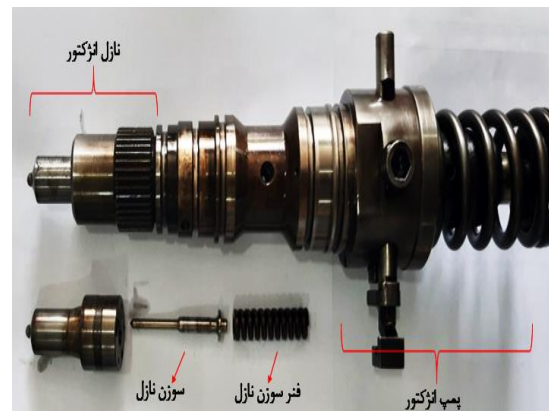
برای داده برداری ابتدا باید محل نصب حسگرها مشخص شوند. در انتخاب محل نصب حسگر، عوامل مختلفی از جمله نزدیک بودن به محل رخداد مورد نظر، راحتی نصب حسگرها و قابل اطمینان بودن سیگنال دریافتی مؤثرند.

در جدول ۱ نیز مشخصات کلی این موتور آورده شده است. انواع خانواده این موتور به صورت ۸، ۱۲ و ۱۶ سیلندری است و مورد مصرف آن در صنایع راه آهن، دریایی و نیروگاهی است. در این تحقیق مدل ۱۶ سیلندر، با نام صنعتی RK 215 مدنظر بوده است.

جدول ۱. مشخصات کلی موتور لکوموتیو دیزل آلستوم [۱۸]

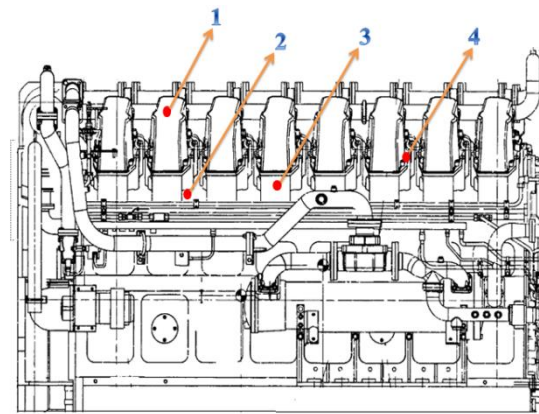
نام صنعتی	RK 215
تعداد سیلندر	۱۶
توان بیشینه	۳۱۶۰ کیلووات
سرعت موتور	۱۰۰۰ دور بر دقیقه
قطر لاینر	۲۱۵ میلی متر
حجم موتور	۱۶۰ لیتر
نسبت تراکم	۱۳/۴
نوع فرارگیری لاینرها	شکل V
ابعاد موتور	۴۳۰۰ در ۱۸۷۴ در ۲۲۲۵ میلی متر
وزن	۱۷۹۰۰ کیلوگرم
نسبت توان به حجم موتور	۱۹/۸
نسبت توان به اندازه	۱۸۵

در لکوموتیوهای آلستوم پمپ و نازل انژکتور به صورت یکپارچه هستند. شکل ۲ نمونه‌ای از این انژکتور به همراه قطعاتی که زیاد مستهلک و معیوب می‌شوند را نشان می‌دهد.



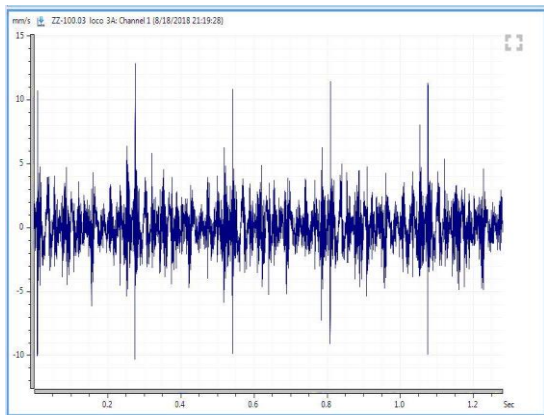
شکل ۲. انژکتور لکوموتیو آلستوم

منظور از صحیح و قابل اطمینان بودن آن است که با وجود پیچیدگی‌های خاص سیگنال‌های گسیلی از موتور و همچنین تأثیر ارتعاش بخش‌های دیگر موتور بر سیگنال دریافتی، باز هم سهم عمده‌ی ارتعاش گرفته شده مربوط به همان بخش مورد نظر، یعنی انژکتور و محفظه‌ی احتراق باشد. با توجه به اینکه عیب مورد بررسی در این تحقیق تأثیر مستقیمی روی احتراق می‌گذارد، نزدیک‌ترین نقاط به محل احتراق به‌عنوان کاندیدهای محل نصب حسگر انتخاب شدند. در ابتدا از هر سیلندر، چهار نقطه‌ی نشان داده شده در شکل ۴ به‌عنوان محل نصب حسگر مورد بررسی قرار گرفتند



شکل ۴. شماتیک موتور لکوموتیو آلستوم و نقاط داده‌برداری اولیه

موتور) به‌دست آمده‌اند. شکل ۵ نمونه‌ای از سیگنال زمانی، با دامنه سرعت، ارتعاشات یک سیلندر، با انژکتور سالم، را نشان می‌دهد. پس از دستیابی به شرایط و پارامترهای مناسب جهت داده‌برداری، به مدت دو سال از ۳۰ دستگاه موتور لکوموتیو آلستوم بیش از ۵۰۰ نمونه گرفته شد که حدود ۳۰۰ نمونه به‌دلیل فاصله زمانی زیاد از زمان داده‌برداری تا باز کردن و تست انژکتور، حذف شد و از ۲۰۰ سیگنال باقی مانده ۳۸ نمونه سالم، ۳۲ نمونه با عیب ترک نازل و بقیه با عیوب متفرقه مثل افت فشار پاشش سوخت، شکستگی فنر نازل، گیرپاژ انژکتور و غیره، تشخیص داده شد.



شکل ۵. سیگنال دریافتی از سیلندر ۳ سمت A لکوموتیو ۲۸۵

۵. نتایج اعمال الگوریتم عیب‌یابی

جهت طبقه‌بندی عیوب با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان، ابتدا باید از طریق پردازش سیگنال، ویژگی‌های مفید از سیگنال ارتعاشی استخراج شده و به‌عنوان ورودی به شبکه SVM داده شود تا شبکه مورد آموزش و تست قرار گیرد. به‌دلیل اینکه یکی از اهداف تحقیق حاضر، ارائه روشی جهت یافتن سریع فرکانس‌های مهم جهت تشخیص عیب یک سیستم ناشناخته بوده و همچنین به‌دلیل تأثیر زیاد ارتعاشات میل‌لنگ و سایر منابع ارتعاشی غیرمرتبط با عیب انژکتور، روی مقدار ویژگی‌های زمانی، تنها ویژگی‌های فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا بازه فرکانسی مورد بررسی، که در این تحقیق ۲ تا ۶۴۰۰ هرتز است، به بخش‌های

پس از داده‌برداری اولیه و بررسی نتایج، نقطه‌ی ۴، واقع در گوشه سمت راست و انتهایی هر سیلندر، به‌عنوان نقطه داده‌برداری انتخاب شد. بنابراین با نصب حسگر به‌صورت عمودی در کنار هر سیلندر، از هر موتور تعداد ۱۶ سیگنال زمانی، با دامنه سرعت، دریافت شد. علاوه بر محل نصب حسگر، زمان داده‌برداری، نرخ داده‌برداری، محدوده فرکانسی و شرایط کارکرد موتور از دیگر پارامترهای مهم در داده‌برداری هستند. در تحقیق حاضر، با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه و شرایط داده‌برداری، زمان داده‌برداری ۱/۲۸ ثانیه، نرخ داده‌برداری برابر با ۱۲۸۰۰ نمونه در هر ثانیه و محدوده فرکانسی بین ۲ تا ۶۴۰۰ هرتز انتخاب شدند. همچنین تمام سیگنال‌ها درحالی‌که موتور در شرایط خنثی یعنی دور ۴۵۰rpm، و در شرایطی که دمای روغن به حالت پایدار رسیده (حدود ۲۰ دقیقه بعد از روشن شدن

کند آزمون T، یک آزمون استنباطی برای تحلیل داده‌های پارامتری است که تفاوت میانگین یک نمونه با جامعه آماری یا تفاوت میانگین دو گروه از دو جامعه مستقل را بررسی می‌کند.

Confusion Matrix

Output Class	0	1	2
	0	1	2
	0	1	2
	0	1	2
	0	1	2
	0	1	2

شکل ۶. ماتریس درهم ریختگی شبکه SVM بدون فیلتر آزمون T

در آزمون T ضریبی به نام ضریب آلفا وجود دارد که سطح معناداری آزمون را مشخص کرده و با تغییر آن میزان سخت‌گیری در انتخاب ویژگی تغییر می‌کند (هرچه ضریب آلفا کمتر شود تعداد ویژگی‌های انتخابی کاهش می‌یابد). از آنجایی که با تغییر ضریب آلفا تعداد ویژگی‌های انتخابی و دقت شبکه تغییر می‌کند برنامه متلب به صورتی نوشته شده که ضریب آلفا از $0/3$ تا $0/100$ تغییر کرده و به‌ازای هر آلفا، یک بردار ویژگی انتخاب و به شبکه SVM داده می‌شود. در نهایت با توجه به دقت شبکه، آلفا و بردار ویژگی بهینه انتخاب می‌شوند. پس از اعمال فیلتر آزمون T، نسبت به ضریب آلفا، بردار ویژگی و در نتیجه دقت شبکه تغییر می‌کند که در بهترین حالت با ضریب آلفای $0/17$ و انتخاب ۲۲ ویژگی فرکانسی، دقت شبکه برابر با $94/6$ درصد می‌شود. شکل ۷ ماتریس درهم ریختگی مربوط به شبکه SVM با همان مشخصات جدول ۳،

کوچک‌تر تقسیم شده و RMS هر بخش به‌عنوان یک ویژگی استخراج می‌شود. در این تحقیق بازه فرکانسی به ۱۰۰ بخش مساوی تقسیم شده و RMS این قسمت‌ها بردار ویژگی را تشکیل داده است. سپس این بردار ویژگی به‌عنوان ورودی به الگوریتم SVM طراحی شده، که مشخصات مهم این شبکه مطابق با جدول ۳ است، داده می‌شود. در این حالت شبکه SVM با دقت $78/4$ درصد توانسته انژکتورهای معیوب و سالم را درست تشخیص دهد که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات الگوریتم SVM

RBF	تابع هسته
۵	پارامتر تابع هسته (سیگما)
۳۰	پارامتر جریمه
۱۰۰	اندازه بردار ویژگی
۷۰	درصد داده‌ها آموزش
۳۰	درصد داده‌ها تست

در شکل ۶ کلاس صفر مربوط به انژکتورهای معیوب و کلاس یک مربوط به انژکتورهای سالم است و همانگونه که مشاهده می‌شود این برنامه $31/8$ درصد از انژکتورهای سالم را معیوب و $6/7$ درصد از انژکتورهای معیوب را سالم تشخیص داده است. با توجه به میزان هزینه و زمانی که تعویض یک انژکتور در پی دارد، این درصد خطا قابل قبول نیست.

در سیستم‌های عیب‌یابی هوشمند فرایند استخراج و انتخاب ویژگی هم از لحاظ کمی و هم از لحاظ کیفی بسیار اهمیت دارد. در صورت انتخاب ویژگی زیاد، بلون بررسی‌های اولیه، این امکان وجود دارد که شبکه عصبی گیج شده و فرایند عیب‌یابی با خطای زیاد همراه شود. در این تحقیق با بررسی‌های اولیه مشخص شد که عیب‌یابی انژکتور باعث افزایش شدت ارتعاشات در تمامی فرکانس‌ها نشده و در بعضی از فرکانس‌ها، سیستم‌های با انژکتور معیوب و سالم رفتار مشابهی دارند. به همین علت از یک فیلتر آزمون T داخل شبکه SVM استفاده شده تا ویژگی‌های نامناسب را حذف

و با فیلتر آزمون T، را نشان می‌دهد که نشان از اثر مثبت این فیلتر روی دقت شبکه دارد.

در انتهای الگوریتم، لیست بهترین فرکانس‌هایی که برای رسیدن به بالاترین دقت شبکه نیاز است، به ترتیب میزان تفاوت در میانگین ویژگی‌ها در دو کلاس مختلف، ارائه می‌شود که در مورد آنژکتورهای سالم و معیوب این فرکانس‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. بنابراین با اجرای این الگوریتم می‌توان ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر در فرایند تشخیص عیب را دارند، تشخیص داد. لازم به توضیح است به دلیل این که در ابتدای الگوریتم محدوده فرکانسی به ۱۰۰ قسمت ۶۴ هرتزی تقسیم و RMS هر قسمت به‌عنوان ویژگی به شبکه SVM داده شد، فرکانس‌های ارائه شده در جدول ۴ در واقع نماینده یک باند فرکانسی ۶۴ هرتزی به مرکز این فرکانس‌ها هستند.

یک آنژکتور با عیب گشاد شدن سوراخ نازل، نشان داده شده، که در آنژکتور معیوب، افزایش شدت ارتعاشات در فرکانس‌های بالا، به خوبی قابل مشاهده است.

Confusion Matrix

Output Class	0	1	93.8 6.3%
	15 40%	1 2.7%	
1	1 2.7%	20 54.1%	95.2 4.8%
			94.6 5.4%
	0	1	
			Target Class

شکل ۷. ماتریس درهم ریختگی شبکه SVM با فیلتر آزمون T

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش ۵ بیان شد الگوریتم ارائه شده، جهت تشخیص عیب شکستگی نازل آنژکتور، با دقت ۹۴/۶ درصد عمل می‌کند و می‌توان از این روش برای ارزیابی سیستم‌هایی که تحقیقات اولیه روی آنها در حال انجام است، استفاده کرد. با توجه به نتایج این تحقیق و نتایج مبحث انتخاب ویژگی می‌توان گفت که ترک نازل آنژکتور یا هر عیبی که باعث شره کردن سوخت به داخل محفظه احتراق شود، باعث افزایش شدت ارتعاشات، به شکل محسوس، در فرکانس‌های ۱۷۰۰ الی ۱۹۰۰، ۳۵۰۰ الی ۳۸۰۰ و ۴۵۰۰ الی ۴۶۰۰ هرتز می‌شود در شکل ۸، به‌عنوان نمونه، نمودار فرکانسی یک آنژکتور سالم و

جهت ادامه این تحقیق و بهبود نتایج، موارد زیر می‌تواند اثرگذار باشد:

(الف) به‌کارگیری روش‌های جدیدتر پردازش سیگنال

(ب) انتخاب هوشمند محدوده‌های فرکانسی

(ج) استفاده از روش‌های دیگر پایش وضعیت، مانند آنالیز صوت

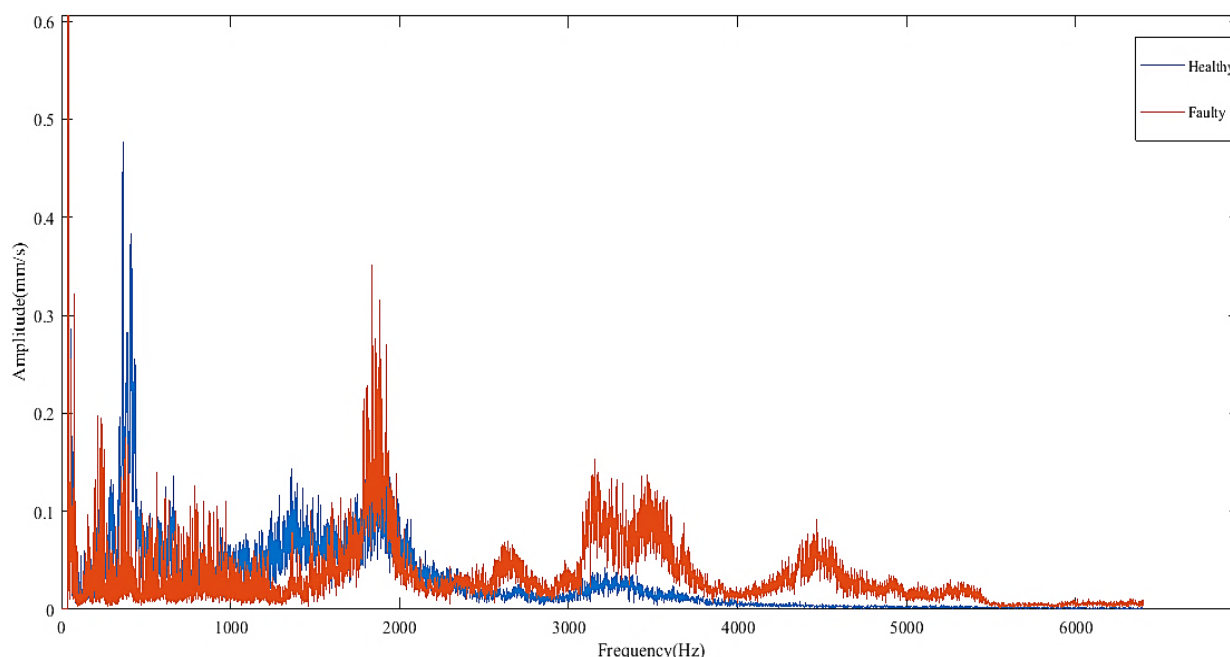
و ترموگرافی و ترکیب اطلاعات استخراج شده از آنها با

اطلاعات استخراج شده از آنالیز ارتعاشات

(ه) تغییر محل یا جهت نصب حسگر

جدول ۴. بردار ویژگی فرکانسی، برحسب هرتز، جهت تشخیص عیب ترک نازل آنژکتور با بالاترین دقت

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
فرکانس مرکزی محدوده انتخاب شده	۹۶	۳۶۸۰	۳۷۴۴	۳۶۱۶	۲۲۷۲	۳۴۲۴	۱۷۶۰	۱۸۲۴	۲۲۰۸	۱۸۸۸	۱۶۳۲
ردیف	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
فرکانس مرکزی محدوده انتخاب شده	۳۴۸۸	۱۵۶۸	۱۵۰۴	۱۳۷۶	۴۵۷۶	۴۵۱۲	۱۶۹۶	۵۷۹۲	۵۷۲۸	۲۳۳۶	۳۵۵۲



شکل ۸. نمودار فرکانسی شدت ارتعاشات در انژکتور با گشاد شدن سوراخ نازل در مقایسه با انژکتورهای سالم

تعمیرات لکوموتیو بافق» به‌ویژه مهندس محمد انوری، به‌خاطر همکاری اجرایی، و مدیران و پرسنل «شرکت توان دیزل سازگار (TDS)» به‌ویژه مهندس محمدمهدی شمالی و مهندس سید علی موسوی‌نیا، به‌خاطر همکاری فنی، کمال تشکر و قدردانی را دارند

۷. تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب یک طرح تحقیقاتی بین راه‌آهن و مرکز تحقیقات مهندسی دانشگاه یزد انجام شده است. بنابراین نویسندگان از شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به‌خاطر حمایت مالی، از مدیران و کارکنان «مجموعه کارخانجات

۸. مأخذ

- [1] Jones, N. B., and Yu-Hua Li., "A review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines", *Tribotest*, 2000, Vol.6, no.3, pp.267-291.
- [2] F. Gu, W. Li, A. Ball, A. Leung, "The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements" part 1: acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals, SAE Technical Paper, 2000.
- [3] Branco, C. M., V. Infante, A. Sousa e Brito, and R. F. Martins, "A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines", *Engineering Failure Analysis*, 2002, Vol.9, no.4, pp.403-421.
- [4] Barelli, L., G. Bidini, C. Buratti, and R. Mariani, "Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements", *Applied Thermal Engineering*, 2009, Vol.29, no.8-9, pp.1707-1713.
- [5] Klinchaeam, Songpon, Pornchai Nivesrangan, and Ming Lokitsangthong, "Condition monitoring of a small four-stroke petrol engine using vibration signals", *CURRENT APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2009, Vol.9, no.1, pp.9-17.

- [6] Wang, Xia, Changwen Liu, Fengrong Bi, Xiaoyang Bi, and Kang Shao, "Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, Vol.41, no.1-2, pp.581-597.
- [7] Flett, Justin, and Gary M. Bone, "Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, Vol.72, pp.316-327.
- [8] Elamin, Fathi, Fengshou Gu, and Andrew Ball, "Diesel engine injector faults detection using acoustic emissions technique", *Modern Applied Science*, 2010, Vol.44, no.9, pp.3-13.
- [9] Moshou, Dimitrios, Athanasios Natsis, Dimitrios Kateris, Xanthoula-Eirini Pantazi, Ioannis Kalimanis, and Ioannis Gravalos, "Fault detection of fuel injectors based on one-class classifiers", *Modern Mechanical Engineering*, 2014 (2013).
- [10] Ftoutou, Ezzeddine, and Mnaouar Chouchane, "Injection fault detection of a diesel engine by vibration analysis", *International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems*, Springer, Cham, 2017.
- [11] Taghizadeh-Alisaraei, Ahmad, and Alireza Mahdavian, "Fault detection of injectors in diesel engines using vibration time-frequency analysis", *Applied Acoustics*, 2019, Vol.143, pp.48-58.
- [12] Cortes, Corinna, and Vladimir Vapnik, "Support-vector networks", *Machine learning*, 1995, Vol.20, no.3, pp.273-297.
- [13] Wang, Deqing, Hui Zhang, Rui Liu, and Weifeng Lv, "Feature selection based on term frequency and T-test for text categorization", In *Proceedings of the 21st ACM international conference on Information and knowledge management*, 2012, pp.1482-1486.
- [14] Abdulmohsin, Husam Ali, Hala Bahjat Abdul Wahab, and Abdul Mohssen Jaber Abdul Hossen, "A New Hybrid Feature Selection Method Using T-test and Fitness Function", *CMC-Computers Materials & Continua*, 2021, Vol.68, no.3, pp.3997-4016.
- [15] Zhou, Nina, and Lipo Wang, "A modified T-test feature selection method and its application on the HapMap genotype data", *Genomics, proteomics & bioinformatics*, 2007, Vol.5, no.3-4, pp.242-249.
- [16] Devore, J., and R. Peck, "Statistics: The exploration and analysis of data. Duxbury Press", 1997.
- [17] H.G. Bramhall Moor Lane, Alstom Maintenance Manual, 2002.
- [18] SPM Instrument, Leonova Diamond, User Guide, 2017.

پی‌نوشت:

-
1. T Test
 2. Support Vector Machine
 3. Injector
 4. Disassembly
 5. Knock
 6. Noise Suppression
 7. Kurtosis
 8. Root Mean Square
 9. Data Mining