



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



مطالعه اثر محل نصب سنسور ارتعاش سنج در تشخیص عیوب چرخ دنده با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

امیرحسین خیبری نژاد^ا، حسام الدین ارغند^{ب*}

^ا ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

^ب ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، استادیار مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: arghand@znu.ac.ir

چکیده

جعبه دنده‌ها به دلیل شرایط کاری دشوار و متناوب پتانسیل خرابی بالایی دارند و تشخیص به موقع عیب در آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. یکی از پرکاربردترین روش‌های پایش سلامت جعبه دنده‌ها استفاده از آنالیز ارتعاشات است که از طریق سنسورهای ارتعاش سنج، سیگنال ارتعاشات جعبه دنده اندازه‌گیری می‌شود تا وضعیت سلامت آن از طریق پردازش سیگنال و تحلیل آن مشخص گردد. در نتیجه تعیین بهترین نقطه و جهت نصب سنسور از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش از داده‌های ارتعاشات اندازه‌گیری شده از ۶ نقطه-جهت مختلف چیدمان آزمایشگاهی جعبه دنده، خصیصه‌های مختلفی که بیانگر وضعیت سلامت جعبه دنده و چرخدنده می‌باشند، استخراج شده است. برای تعیین بهترین نقطه-جهت نصب سنسور، از خصیصه‌های استخراج شده هر سنسور یک مدل طبقه‌بند SVM با کرنل‌های خطی و غیرخطی ساخته شده است. نشان داده شد که کرنل‌های غیرخطی دچار بیش‌برازش می‌شوند و همچنین بهترین نقطه-جهت بدست آمده از هر سه مدل ساخته شده با دقت متفاوت مربوط به خروجی جعبه دنده در جهت عمودی می‌باشد.

کلمات کلیدی: تشخیص عیب؛ استخراج خصیصه؛ ماشین بردار پشتیبان؛ مکان سنسور.

۱- مقدمه

امروزه جعبه دنده‌ها کاربرد فراوانی در صنایع دارند. معیوب شدن اجزای داخلی جعبه دنده مانند چرخدنده می‌تواند کارکرد ماشین را مختل کند و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به عمل آورد. از این رو عیب‌یابی جعبه دنده‌ها امری حیاتی محسوب می‌شود. امروزه از آنالیز ارتعاشات برای پایش وضعیت سلامت و عیب‌یابی تجهیزات دوار استفاده می‌شود. آنالیز ارتعاشات با استفاده از اندازه‌گیری ارتعاشات تجهیز به کمک سنسورهای ارتعاش سنج صورت می‌پذیرد. در جعبه دنده‌ها امکان دسترسی به اجزای داخلی در حین کارکرد وجود ندارد؛ از این رو سنسور ارتعاش سنج در مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین نقطه به منابع مولد ارتعاش نصب می‌شوند. در نتیجه یافتن

بهترین نقاط و جهات نصب سنسور ارتعاش‌سنج یک چالش محسوب می‌گردد، چرا که استفاده از تعداد زیاد سنسور هزینه‌بر می‌باشد و همچنین هزینه محاسباتی تحلیل سیگنال‌های اندازه‌گیری شده افزایش خواهد یافت. برای جلوگیری از خطای انسانی و نیز افزایش بهره‌وری، استفاده از روش‌های مختلف یادگیری ماشین جهت تشخیص عیب به صورت هوشمند مور استفاده قرار می‌گیرد.

محققین مختلفی به تشخیص عیب انواع جعبه‌دنده‌ها با روش‌های مختلف در منابع پرداخته‌اند. شارما و پری [۱] در یک پژوهش مروری به بررسی و جمع‌بندی منابع مربوط به خصیصه‌های معرف وضعیت چرخنده برای عیب‌یابی آنها پرداختند. خصیصه‌های معرف وضعیت، اطلاعات دقیق در مورد وضعیت اجزای مختلف در سطوح مختلف زوال (اولیه، در حال رشد و یا شدید) ارائه می‌کنند. در این پژوهش به این خصیصه‌ها از نظر حوزه مورد بررسی و استخراج پرداخته شده و ویژگی‌های آنها بیان شده است. با استخراج خصیصه‌ها معرف وضعیت سلامت از سیگنال ارتعاشات، می‌توان وضعیت سلامت تجهیز را تعیین کرد و با استفاده از روش‌های مختلف، به عیب‌یابی پرداخت. وسر و همکاران [۲] با استفاده از خصیصه‌های معرف وضعیت سلامت چرخنده، که از سیگنال ارتعاشات چیدمان آزمایشگاهی استخراج شده است، به تشخیص عیب سایش^۱ در چرخنده‌ها پرداختند. آنها نشان دادند که خصیصه‌های ریشه میانگین مربعات و پیک در تعیین وضعیت کلی جعبه‌دنده کارآمد می‌باشند. ونگ و همکاران [۳] به عیب‌یابی جعبه‌دنده تحت بارگذاری متغیر با رویکرد تبدیل موجک^۲ پرداختند. از تبدیل موجک پیوسته مورلت^۳ برای تجزیه سیگنال ارتعاشات باقی‌مانده^۴ استفاده شده است. آنها بر اساس دامنه تبدیل موجک، پارامتری مبتنی بر رشد عیب معرفی کردند که نسبت به تغییر شرایط کاری حساس نمی‌باشد و می‌تواند عیوب چرخنده را تشخیص دهد. پیچیدگی فرآیند عیب‌یابی محققین را به استفاده از روش‌های هوشمند سوق داده است. استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین^۵ در حال حاضر به دلیل محاسبات سریع، دقت بالا و ثبات عملکردی، بخش مهمی از پیش وضعیت ماشین‌های مکانیکی و الکتریکی بوده است و وابستگی به نیروی کار متخصص و مجرب را کاهش می‌دهد. سرادا و همکاران [۴] به تشخیص عیوب مختلف چرخنده ساده با استفاده از الگوریتم مرکب جنگل تصادفی^۶ پرداختند. آنها همچنین از الگوریتم ژنتیک^۷ استفاده کردند تا ابعاد ویژگی‌های مورد استفاده در جنگل تصادفی را کاهش دهند و نشان دادند که دقت تشخیص مدل، با ابعاد کاهش یافته همچنان بالا می‌باشد. در پژوهشی مشابه تاهی و همکاران [۵] با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم^۸ مدلی برای تشخیص عیب تجهیزات دوار ارائه دادند. در این پژوهش خصیصه‌های آماری حوزه زمان از سیگنال‌های ارتعاشات شتاب، سرعت و جابجایی استخراج شد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابعاد خصیصه‌ها کاهش داده شد و از خصیصه‌های کاهش داده شده برای آموزش مدل استفاده گردید. نتایج بکارگیری مدل روی داده‌های آزمایشگاهی نشان دهنده دقت بالای الگوریتم توسعه داده شده می‌باشد. دبیش و جابر [۶] در پژوهشی به مقایسه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۹ (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی^{۱۰} در پیش وضعیت و عیب‌یابی جعبه‌دنده پرداختند. در این پژوهش از تحلیل موجک و تحلیل‌های آماری برای استخراج ویژگی‌های مورد استفاده در فرآیند یادگیری ماشین استفاده شده است. در ادامه آنها با استفاده از نرخ بهره، خصیصه‌های منتخب را برای استفاده در مدل‌های مذکور برگزیدند. آنها نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی نسبت به ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی عیوب جعبه‌دنده برتری دارد. در این پژوهش، طبقه‌بندی هوشمند عیوب چرخنده و یافتن بهترین نقطه-جهت(ها) نصب سنسور ارتعاش‌سنج مورد هدف می‌باشد. برای این منظور از داده‌های ارتعاشات جعبه‌دنده آزمایشگاهی که از ۶ نقطه-جهت مختلف اندازه‌گیری شده است، خصیصه‌های مختلفی برای آموزش SVM با کرنل‌های^{۱۱} مختلف استفاده شده است.

¹ Wear

² Wavelet

³ Morlet

⁴ Residual

⁵ Machine learning

⁶ Random forest

⁷ Genetic algorithm

⁸ Decision tree

⁹ Support Vector Machine (SVM)

¹⁰ Artificial Neural Network (ANN)

¹¹ Kernels

۲- معرفی روش‌ها

به طور معمول سیگنال ارتعاشات تجهیزات دوار در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس بررسی می‌گردد و عملیات پردازشی مختلفی روی آنها اعمال می‌شود. خصیصه‌های مختلفی از سیگنال‌های ارتعاشات در هر یک از حوزه‌های مذکور استخراج می‌شود. این خصیصه‌ها، وضعیت سلامت تجهیز را ارزیابی می‌کنند و برخی از آنها معرف عیوب مختلف اجزای تجهیز می‌باشند که در منابع [۷-۲-۱] به آنها اشاره شده است. در ادامه از خصیصه‌های استخراج شده برای توسعه مدل طبقه‌بند SVM با کرنل‌های مختلف جهت تشخیص عیب و تعیین بهترین نقطه-جهت اندازه‌گیری استفاده می‌شود.

۲-۱ معرفی خصیصه‌ها

خصیصه‌های مختلفی توسط محققان برای تعیین وضعیت سلامت تجهیزات دوار مانند جعبه‌دنده معرفی شده است که در ردیف ۱ تا ۱۱ جدول (۱) نام و رابطه ریاضی آنها ارائه شده است. این خصیصه‌ها از سیگنال خام ارتعاشات بدست می‌آیند. همچنین به طور خاص برای عیوب چرخ‌دنده نیز خصیصه‌های مختلفی در منابع آورده شده است که از سیگنال‌های فیلتر شده استخراج می‌شوند و در ردیف ۱۲ تا ۱۶ جدول (۱) ارائه شده‌اند. سه نوع سیگنال فیلتر شده به نام‌های سیگنال باقی‌مانده، سیگنال دیفرانسیل^۱ و سیگنال منظم^۲ وجود دارد. برای استخراج این سیگنال‌ها ابتدا الگوریتم میانگین‌گیری همگام زمانی^۳ روی سیگنال خام ارتعاشات اعمال می‌گردد تا پدیده‌هایی که مضرب صحیح یک فرکانس مشخصه مانند فرکانس دوران محورهای جعبه‌دنده نیستند، از سیگنال حذف گردد. در ادامه اگر از سیگنال میانگین‌گیری همگام زمانی، فرکانس دوران محورها و فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها به همراه مضارب دوم آنها حذف گردد، سیگنال باقی‌مانده تشکیل می‌شود. اگر علاوه بر فرکانس‌های مذکور، فرکانس‌های باندهای کناری مرتبه اول فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها نیز حذف شود، سیگنال دیفرانسیل ایجاد می‌شود. سیگنال منظم نیز از اختلاف سیگنال میانگین‌گیری همگام زمانی و سیگنال باقی‌مانده محاسبه می‌شود.

جدول ۱. معرفی خصیصه‌های استخراج شده و رابطه ریاضی آنها [۷-۲-۱]

ردیف	نام خصیصه	نماد خصیصه	نوع سیگنال	رابطه ریاضی
۱	واریانس	VAR	سیگنال خام	$\sigma_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$
۲	انحراف معیار	STD	سیگنال خام	$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$
۳	ریشه میانگین مربعات	RMS	سیگنال خام	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i ^2}$
۴	پیک	P	سیگنال خام	$P = \max(x)$
۵	پیک به پیک	P2P	سیگنال خام	$P2P = x_{\max} - x_{\min}$
۶	فاکتور کرس	CF	سیگنال خام	$CF = \frac{P}{RMS}$
۷	کور تویسیس	K	سیگنال خام	$K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma_x^4}$
۸	چولگی	S	سیگنال خام	$S = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma_x^3}$

¹ Differential signal

² Regular signal

³ Time Synchronous Averaging (TSA)

$EO = \frac{N \sum_{i=1}^N (\Delta s_i - \Delta \bar{s})^4}{\left(\sum_{i=1}^N (\Delta s_i - \Delta \bar{s})^2 \right)^2}$	سیگنال خام	EO	عملگر انرژی	۹
$\bar{J}(t) = \frac{d\bar{a}(t)}{dt}$	سیگنال خام	J	جرک	۱۰
$IF = \frac{Peak}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$	سیگنال خام	IF	فاکتور ضربه	۱۱
$FM0 = \frac{P2P}{\sum_{i=1}^N A(i)}$	سیگنال خام	FM0	FM0	۱۲
$FM4 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right)^2}$	سیگنال دیفرانسیل (d)	FM4	FM4	۱۳
$M6A = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^6}{\left(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right)^3}$	سیگنال دیفرانسیل (d)	M6A	M6A	۱۴
$M8A = \frac{N^3 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^8}{\left(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right)^4}$	سیگنال دیفرانسیل (d)	M8A	M8A	۱۵
$ER = \frac{\sigma(d)}{\sigma(r)}$	سیگنال دیفرانسیل (d) و سیگنال منظم (r)	ER	نرخ انرژی	۱۶

۲-۲ ماشین بردار پشتیبان

مفهوم اساسی در طبقه‌بندی توسط الگوریتم SVM، یافتن ابرصفحه‌ای است که به عنوان مرز تصمیم عمل کند و بتواند داده‌هایی با دو کلاس مثبت (+۱) و منفی (-۱) را با حداکثر حاشیه ممکن از یکدیگر جدا کند. حاشیه مجموع فواصل مرزها از ابرصفحه می‌باشد که توسط نزدیک‌ترین داده‌های هر دو کلاس تعریف شده است. داده‌های ذکر شده که در تعریف مرزها نقش دارند، بردارهای پشتیبان نامیده می‌شوند.

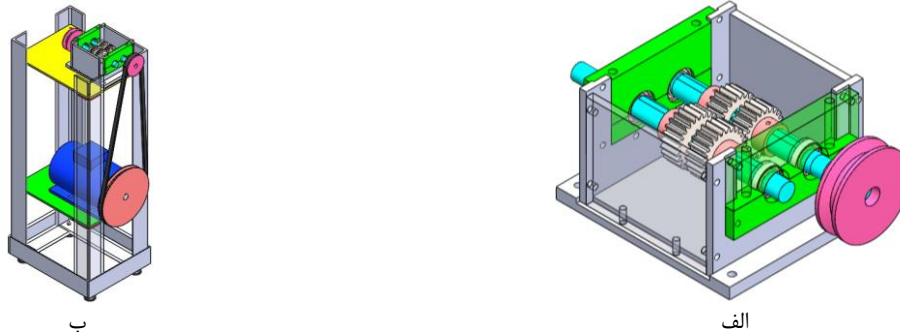
فرض شود که مجموعه داده D به صورت $D = \{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ وجود دارد که در آن $x_i \in R^d$ نشان دهنده ویژگی‌های ورودی (شامل d ویژگی اسکالر) و $y_i \in \{-1, +1\}$ نشان دهنده کلاس‌های داده‌ها است. در این صورت معادله ابرصفحه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۸].

$$\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} + b = 0 \quad (1)$$

که در آن w ضرایب ویژگی‌ها و b مقدار ثابت (شبهه عرض از مبدأ) است. هدف از ساخت مدل SVM پیدا کردن بهترین مقادیر برای ضرایب مذکور است به طوری که حاشیه جداکننده دو کلاس از هم به بیشترین مقدار ممکن برسد. انجام این کار منجر به یک مسأله بهینه‌سازی می‌گردد که جزئیات روش حل آن برای دستیابی به طبقه‌بند در مرجع [۸] تشریح شده است. لازم به توضیح است که در شرایطی که داده‌ها به صورت خطی قابل تفکیک نیستند، روش SVM می‌تواند با استفاده از کرنل‌ها به فضای ویژگی‌های بالاتر انتقال یابد و یک طبقه‌بند با مرزهای غیرخطی را در فضای ویژگی‌ها شناسایی کند. برخی از کرنل‌های محبوب شامل کرنل خطی، کرنل چند جمله‌ای و کرنل گاوسی هستند [۸].

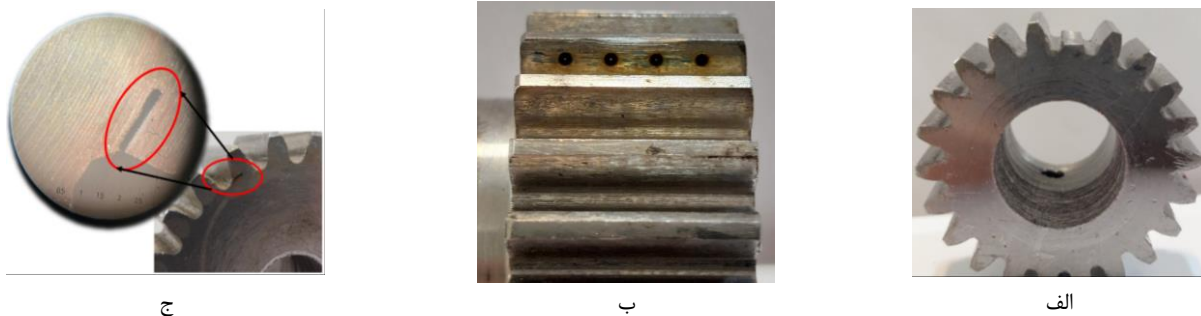
۳- معرفی مجموعه داده آزمایشگاهی

برای اهداف مورد نظر در این پژوهش یک چیدمان آزمایشگاهی در آزمایشگاه نت مبتنی بر وضعیت دانشگاه زنجان جهت انجام آزمایش‌های مختلف روی عیوب چرخدنده طراحی و ساخته شده است (شکل (۱)).



شکل ۱. الف) جعبه‌دنده طراحی شده در نرم‌افزار سالدورک، ب) سازه طراحی شده در نرم‌افزار سالدورک به همراه تجهیزات مونتاژ شده

جعبه‌دنده این چیدمان، دارای دو محور می‌باشد که روی هر یک از آنها دو چرخدنده نصب شده است. هر محور دارای دو یاتاقان غلتشی است که در ابتدا و انتها محور قرار می‌گیرند. گشتاور از الکتروموتور ۱/۴۹ کیلووات توسط مکانیزم تسمه-پولی به جعبه‌دنده منتقل می‌شود و روی محور خروجی جعبه‌دنده، پولی نصب شده است تا بارگذاری روی جعبه‌دنده توسط آن اعمال شود. چرخ‌دنده‌هایی که در جعبه‌دنده استفاده شده‌اند از نوع ساده بوده و روی محور ورودی، چرخدنده ۲۵ دندانه و روی محور خروجی چرخدنده پینیون ۲۲ دندانه نصب شده است. همچنین مدول، زاویه فشار و عرض چرخدنده‌ها به ترتیب برابر با ۲ میلی‌متر، ۲۰ درجه و ۲۰ میلی‌متر است. در هر آزمایش تنها یک جفت از چرخدنده‌ها درگیر می‌باشند. این موضوع به سهولت و کاهش عملیات مونتاژ و دمونتاژ جعبه‌دنده کمک می‌کند. جهت بررسی اثر عیوب رایج چرخدنده‌ها روی ارتعاشات جعبه‌دنده، عیوب مصنوعی مختلف روی چرخدنده پینیون واقع روی شفت خروجی ایجاد شده است. در هر آزمایش، پینیون‌های سالم و معیوب با چرخدنده‌های سالم درگیر شده و ارتعاشات جعبه‌دنده تحت شرایط مشخص اندازه‌گیری می‌شود. شکستگی دندانه، ترک ریشه و سطح حفره‌دار عیوب مصنوعی ایجاد شده روی پینیون هستند که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. عیوب مصنوعی چرخدنده، الف) چرخدنده با شکستگی دندانه، ب) چرخدنده با دندانه حفره‌دار و ج) چرخدنده با ترک ریشه

از فاکتورهای قابل کنترل و تغییر در جعبه‌دنده چیدمان حاضر می‌توان به سرعت دورانی، بارگذاری روی محور خروجی جعبه‌دنده و وضعیت سلامت چرخدنده‌های درگیر اشاره کرد. طراحی آزمایش بر مبنای فاکتوریل کامل انجام شده است و برهم‌کنش‌های بین فاکتورهای آزمایش در نظر گرفته نشده است. سناریوهای انجام آزمایش مطابق جدول (۲) انجام شده است. لازم به ذکر است که سرعت ارائه شده در جدول (۲) مربوط به اینورتر می‌باشد که با یک مرحله افزایش سرعت با نسبت ۲/۷۷ توسط تسمه-پولی از موتور سه فاز ۴ قطبی به محور ورودی جعبه‌دنده منتقل می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری در اندازه‌گیری‌های انجام شده ۶۵۵۳۶ نمونه بر ثانیه می‌باشد. در مجموع ۷۹۲ سیگنال ارتعاشات در آزمایش‌های طرح‌ریزی شده حاضر ثبت شده است.

جدول ۲. سناریوهای انجام آزمایش روی چیدمان آزمایشگاهی

وضعیت درگیری	پینیون	سالم، شکستگی دندان، ترک ریشه، سطح حفره‌دار
چرخنده‌ها	چرخنده	سالم، سالم، سالم، سالم
بارگذاری:	بدون بارگذاری	بدون وزنه
نیروی کشش (گرم)	بارگذاری متوسط	۶۳۰
فرکانس اینورتر (هرتز)	بارگذاری سنگین	۹۱۰
	۱۱ سرعت	۳۰ و ۲۸، ۲۶، ۲۴، ۲۲، ۲۰، ۱۸، ۱۶، ۱۴، ۱۲، ۱۰

۴- نتایج

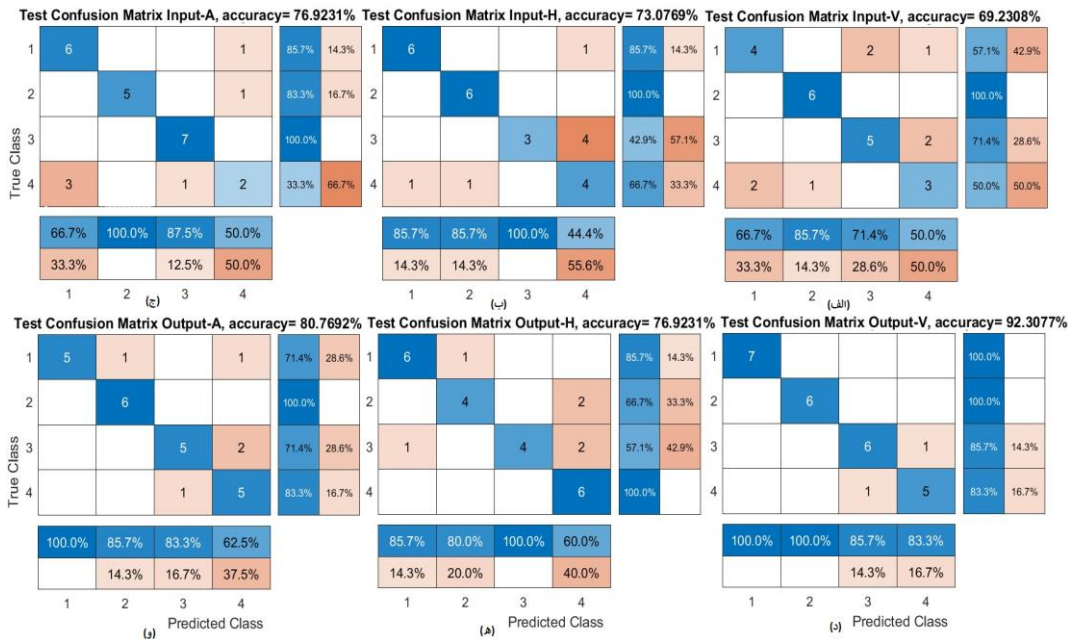
مجموعه داده مورد استفاده برای توسعه مدل SVM از خصیصه‌های استخراج شده هر سنسور ساخته شده است. مجموعه داده آموزش و آزمایش با انتخاب تصادفی به نسبت ۸۰ به ۲۰ از مجموعه داده اصلی تشکیل شده است. همچنین برای اینکه بتوان عملکرد مدل ساخته شده با داده هر نقطه-جهت را با سایر نقطه-جهت‌های دیگر مقایسه کرد، تقسیم تصادفی با اندیس‌های ثابت اتفاق می‌افتد. برای تشخیص عیب چرخنده، از مجموعه داده بدست آمده هر سنسور یک مدل SVM ساخته می‌شود و دقت آن توسط مجموعه داده آزمایش همان سنسور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین برای بررسی عملکرد SVM در تشخیص عیب، از کرنل خطی، کرنل غیرخطی مرتبه ۲ و مرتبه ۳ استفاده شده است. در جدول (۳)، دقت مدل‌های SVM با هر سه کرنل مذکور برای هر نقطه-جهت ارائه شده است. لازم است اشاره شود که کلاس‌های مورد استفاده در این پژوهش به صورت ۱، ۲، ۳ و ۴ نام‌گذاری شده است که به ترتیب مربوط به چرخنده با وضعیت سالم، شکستگی دندان، ترک ریشه دندان و حفره‌دار شدن سطح می‌باشد.

جدول ۳. دقت مدل‌های طبقه‌بند SVM با سه کرنل خطی و غیرخطی روی مجموعه داده آموزش و آزمایش هر نقطه-جهت

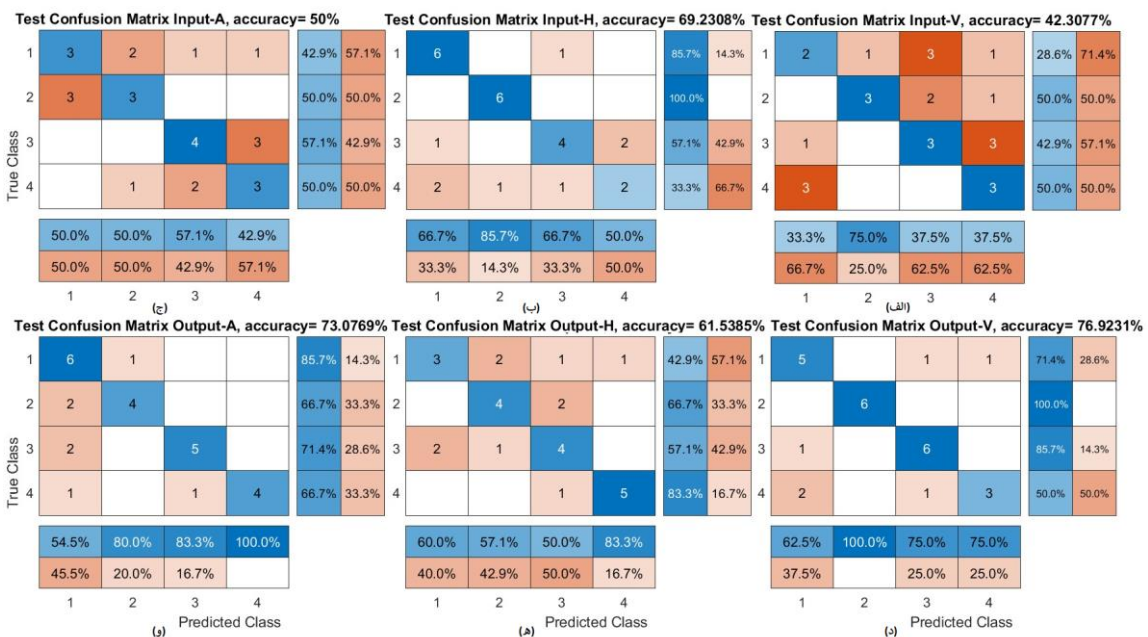
نقطه-جهت اندازه‌گیری	کرنل	ورودی- محوری	ورودی-افقی	ورودی- عمودی	خروجی- محوری	خروجی-افقی	خروجی- عمودی
دقت روی مجموعه داده آموزش (درصد)	خطی	۸۲/۰۸	۷۷/۳۶	۸۶/۷۹	۸۹/۶۲	۸۳/۹۶	۸۸/۶۸
دقت روی مجموعه داده آزمایش (درصد)		۷۶/۹۲	۷۳/۰۸	۶۹/۲۳	۸۰/۷۷	۷۶/۹۲	۹۲/۳۱
دقت روی مجموعه داده آموزش (درصد)	چندجمله‌ای مرتبه ۲	۹۹/۰۶	۹۹/۰۶	۹۶/۲۳	۱۰۰	۹۸/۱۱	۱۰۰
دقت روی مجموعه داده آزمایش (درصد)		۵۰	۶۹/۲۳	۴۲/۳۱	۷۳/۰۸	۶۱/۵۴	۷۶/۹۲
دقت روی مجموعه داده آموزش (درصد)	چندجمله‌ای مرتبه ۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
دقت روی مجموعه داده آزمایش (درصد)		۴۲/۳۱	۵۰	۷۳/۰۸	۷۶/۹۲	۶۹/۲۳	۸۰/۷۷

با توجه به نتایج ارائه شده، دقت مدل‌های طبقه‌بند روی مجموعه داده آموزش با کرنل غیرخطی بیشتر از خطی می‌باشد؛ اما با توجه به دقت پایین مجموعه آزمایش در کرنل غیرخطی، این احتمال وجود دارد که مدل طبقه‌بند دچار بیش‌برازش شده باشد و انعطاف مدل در مواجهه با داده‌هایی که در ساخت مدل نقش نداشته‌اند کاهش یافته است. دقت مجموعه داده آموزش مدل با کرنل خطی در بیشتر نقطه-جهت‌ها نیز از مدل با کرنل غیرخطی بیشتر است. مشاهده می‌شود که داده‌های سنسور خروجی جعبه‌دنده در جهت عمودی بیش‌ترین دقت روی مجموعه آزمایش را دارد (هر ۳ مدل). در شکل (۳) تا شکل (۵)، به ترتیب ماتریس درهم‌ریختگی مجموعه داده آموزش مدل‌های ساخته شده با کرنل خطی و چندجمله‌ای مرتبه ۲ و ۳ نشان داده شده است. اعداد زیر هر ماتریس

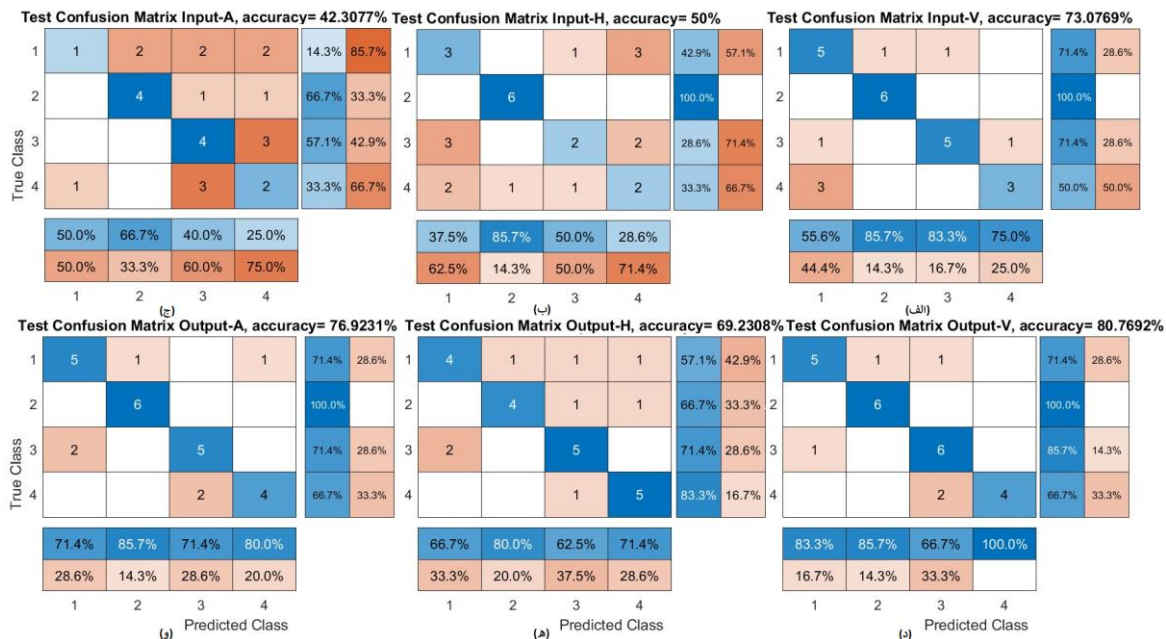
نشان دهنده مقدار درستی و اعداد سمت راست هر ماتریس بیانگر میزان فراخوانی مدل است. مشاهده می‌شود که در بهترین نقطه - جهت (نقطه خروجی - جهت محوری) نمونه‌های مربوط به کلاس ۳ و ۴ (وضعیت ترک ریشه دندان و سطح حفره‌دار) به اشتباه در مدل خطی تشخیص داده شده‌اند. در مدل‌های غیرخطی مرتبه ۲ و ۳ نیز ۵ نمونه در کلاس‌های مختلف به اشتباه تشخیص داده شده‌اند.



شکل ۳. ماتریس درهم‌ریختگی مجموعه داده‌های آزمایش مدل با کرنل خطی (الف: نقطه ورودی - جهت عمودی، ب: نقطه ورودی - جهت افقی، ج: نقطه ورودی - جهت محوری، د: نقطه خروجی - جهت عمودی، ه: نقطه خروجی - جهت افقی و و: نقطه خروجی - جهت محوری)



شکل ۴. ماتریس درهم‌ریختگی مجموعه داده‌های آزمایش مدل با کرنل چندجمله‌ای مرتبه ۲ خطی (الف: نقطه ورودی - جهت عمودی، ب: نقطه ورودی - جهت افقی، ج: نقطه ورودی - جهت محوری، د: نقطه خروجی - جهت عمودی، ه: نقطه خروجی - جهت افقی و و: نقطه خروجی - جهت محوری)



شکل ۵. ماتریس درهم‌ریختگی مجموعه داده‌های آزمایش مدل با کرنل چندجمله‌ای مرتبه ۳ خطی (الف: نقطه ورودی-جهت عمودی، ب: نقطه ورودی-جهت افقی، ج: نقطه ورودی-جهت محوری، د: نقطه خروجی-جهت عمودی، ه: نقطه خروجی-جهت افقی و و: نقطه خروجی-جهت محوری)

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، با استفاده از خصیصه‌های استخراج شده از سیگنال ارتعاشات ۶ نقطه-جهت مختلف یک چیدمان آزمایشگاهی، مجموعه داده‌ای برای ساخت مدل طبقه‌بند با الگوریتم SVM استفاده شد. نشان داده شد که با غیرخطی کردن مدل، بیش‌برازش اتفاق می‌افتد و انعطاف مدل ساخته شده در برابر نمونه‌های آزمایشی کاهش می‌یابد. داده‌های بدست آمده از سنسور نصب شده روی نقطه خروجی جعبه‌دنده در جهت عمودی در هر سه مدل توسعه داده شده، بیشترین دقت را روی مجموعه داده آموزش و آزمایش دارد و برترین نقطه شناخته می‌شود. همچنین نشان داده شد که در بیشتر نقطه-جهت‌ها، مدل با کرنل خطی بیشترین دقت را روی مجموعه داده آزمایش دارد.

منابع

1. Sharma, Vikas, and Anand Parey. "A review of gear fault diagnosis using various condition indicators." *Procedia Engineering* 144 (2016): 253-263.
2. Večeř, P., Marcel Kreidl, and R. Šmíd. "Condition indicators for gearbox condition monitoring systems." *Acta Polytechnica* 45, no. 6 (2005).
3. Wang, Xiyang, Viliam Makis, and Ming Yang. "A wavelet approach to fault diagnosis of a gearbox under varying load conditions." *Journal of sound and vibration* 329, no. 9 (2010): 1570-1585.
4. Cerrada, Mariela, Grover Zurita, Diego Cabrera, René-Vinicio Sánchez, Mariano Artés, and Chuan Li. "Fault Diagnosis in Spur Gears Based on Genetic Algorithm and Random Forest." *Mechanical Systems and Signal Processing* 70-71 (2015): 87-103.
5. Tahí, M., A. Miloudi, J. P. Dron, and B. Bouzouane. "Decision tree and feature selection by using genetic wrapper for fault diagnosis of rotating machinery." *Australian Journal of Mechanical Engineering* (2020).
6. Dubaish, Asaad A., and Alaa Abdulhady Jaber. "Comparative Analysis of SVM and ANN for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Gearboxes." *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 11, no. 4 (2024).
7. Ahmed, Hosameldin, and Asoke K. Nandi. *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. John Wiley & Sons, (2020).
8. Mining, What Is Data. *Introduction to data mining*. New Jersey: Pearson Education, Inc, (2006).