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

میزان‌سازی روتور صلب چهار درجه آزادی با استفاده از یادگیری ماشین

حسام الدین ارغند[آ*]، علیرضا غفوری [ب]

[آ] ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کد پستی: ۴۵۱۷۱۳۸۷۹۱، استادیار گروه مهندسی مکانیک

[ب] ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، کد پستی: ۴۵۱۷۱۳۸۷۹۱، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

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

چکیده

روش‌های متعددی برای میزان‌سازی تجهیزات دوار وجود دارد که دارای مزایا و معایب مختلفی هستند. این پژوهش به معرفی روشی برای میزان‌سازی روتور با استفاده از یادگیری ماشین می‌پردازد. بدین منظور، ابتدا روابط حاکم بر یک روتور صلب با ۴ درجه آزادی تحت تحریک نیروی نامیزانی استخراج شده است و یک شبیه‌ساز برای مطالعه رفتار دینامیکی روتور مذکور توسعه یافته است. در ادامه، با به کار بردن این شبیه‌ساز در ۲۰۰۰ مرتبه تکرار، اثر ارتعاشی ناشی از اعمال یک نامیزانی‌های اولیه تصادفی و سپس اضافه کردن جرم آزمون به همان روتور در چهار نقطه استخراج گردیده است و بدین ترتیب یک مجموعه داده تشکیل شده است. سپس با به کار بردن یک شبکه عصبی پیشخور، به بررسی امکان تشخیص موقعیت نامیزانی اولیه بر اساس داده‌های ارتعاشی سنسورها پرداخته شده است. نشان داده شده است که با استفاده از داده‌های حداقل دو نقطه از چهار نقطه موجود در مرحله اولیه و مرحله اضافه کردن وزنه آزمایشی، می‌توان به مدل مناسبی برای تشخیص مقدار نامیزانی اولیه دست یافت. اما تشخیص موقعیت زاویه‌ای نامیزانی با داشتن این داده‌ها با دقت کافی ممکن نیست و مدل یادگیری ماشین به طور تقریبی توانایی تشخیص موقعیت را داراست.

کلمات کلیدی: روتور صلب؛ ارتعاش؛ میزان‌سازی؛ یادگیری ماشین.

۱- مقدمه

میزان‌سازی در تجهیزات دوار ایجاد انطباق مرکز جرم روی محور چرخش است. نامیزانی در این تجهیزات باعث ایجاد نیروهای دینامیکی و متعاقب آن افزایش ارتعاش، صدا و سایش قطعات شده و در نهایت منجر به خرابی زودرس دیگر اجزا از جمله یاتاقان‌ها می‌شود. روش‌های متعددی برای یافتن موقعیت و مقدار نامیزانی در روتورها پیشنهاد شده است که به کمک آن بتوان میزان‌سازی با دقت کافی را انجام داد[۱]. فرآیند میزان‌سازی در تمام این روش‌ها شامل دو مرحله اساسی و متمایز می‌شود. اولین مرحله، اندازه‌گیری نامیزانی است. در این مرحله، با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری ارتعاشات، مقدار و موقعیت نامیزانی جرم در روتور تعیین می‌شود. دومین مرحله، تصحیح نامیزانی است که با افزودن یا کم کردن جرم اصلاحی، نامیزانی اولیه جبران می‌شود. برای تشخیص نامیزانی اولیه روتور، در تمام روش‌ها، ابتدا پارامترهایی از تجهیز (مانند سطح ارتعاش و زاویه فاز) اندازه‌گیری می‌شود. سپس با اضافه کردن وزنه آزمایشی به روتور در یک یا چند مرحله (در موقعیت‌های مشخص)، با اندازه‌گیری مجدد در وضعیت جدید، اثر آنها روی تغییر پارمترهای قبلی بدست

می‌آید. سپس از روی تغییر پارامترها در مراحل مختلف کار، مقدار و موقعیت نامیزانی اولیه محاسبه می‌شود. روش‌هایی که قابلیت دستیابی به نتایج در تعداد مراحل کمتری دارند، نیازمند استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته‌تر جهت ثبت زاویه فاز هستند. در مقابل، روش‌هایی که بدون زاویه فاز و فقط با ثبت مقدار ارتعاش کار می‌کنند، نیازمند تعداد مراحل بیشتری برای آزمایش هستند. در روتورهای با نسبت طول به قطر کم، میزان‌سازی تک‌صفحه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن صرفاً اضافه کردن یک وزنه اصلاحی می‌تواند به دستیابی به نتیجه مطلوب منجر گردد. در مقابل، در روتورهای با نسبت طول به قطر زیاد، اغلب نیاز به اضافه کردن حداقل دو وزنه اصلاحی (در دو صفحه مختلف) وجود دارد تا بتوان به نتیجه مطلوب دست یافت [۱].

روش‌های متعددی برای میزان‌سازی روتورها با ملاحظات مختلف توسط محققین پیشنهاد شده است. لی و همکاران [۲]، به مرور برخی از رایج‌ترین روش‌های پیشنهاد شده توسط محققین پرداخته‌اند. در سالهای اخیر، استفاده از یادگیری ماشین برای انجام عملیات میزان‌سازی روتورها نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. شوان ژانگ و همکاران [۳]، یک روش میزان‌سازی جدید برای روتور بر اساس یادگیری عمیق بدون نظارت را پیشنهاد کرده‌اند. روش پیشنهادی با استفاده از پیکربندی‌های مشترک جابه‌جایی‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های کلی، نیروهای نامیزانی را یاد می‌گیرد و در نتیجه فرآیند میزان‌سازی بدون نیاز به آزمون‌های وزنه‌گذاری را محقق می‌سازد. هانگ و همکاران [۴]، روشی برای انتقال یادگیری با استفاده از شبیه‌سازی مدل دینامیکی و داده‌های آزمایشی برای مکان‌یابی خطای نامیزانی روتور انعطاف‌پذیر پیشنهاد کرده‌اند. می و همکاران [۵]، با استفاده از یک مجموعه داده ثبت‌شده، شبکه‌های عصبی کاملاً متصل و کانولوشنی، مدل‌های مارکوف مخفی، و طبقه‌بندی‌های جنگل تصادفی بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده به‌طور خودکار از سری‌های زمانی آزمایش کردند و توانستند نامیزانی را تشخیص دهند. هانگ و همکاران [۶]، مدل دینامیکی برای یک روتور توربین ایجاد کردند و پاسخ ارتعاشی روتور با نامیزانی در موقعیت‌های مختلف را تحلیل نمودند و موقعیت نامیزانی روتور را با استفاده از روشی مبتنی بر یادگیری عمیق، شبکه عصبی کانولوشنالی یک بعدی، تخمین زدند.

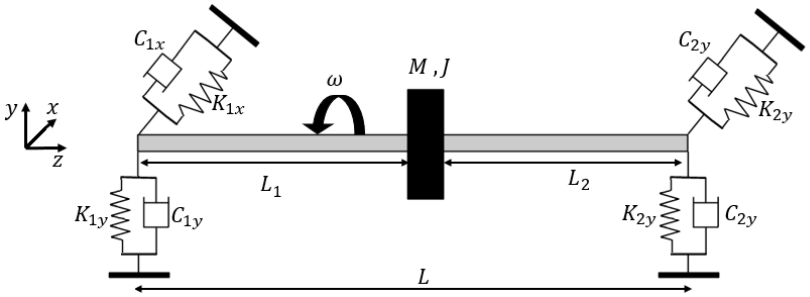
در پژوهش حاضر، امکان دستیابی به تصحیح نامیزانی یک‌صفحه‌ای روتور با به کار بردن یک مدل شبکه عصبی، با هدف کاهش تعداد مراحل قرار دادن وزنه آزمایشی و صرفاً در دست داشتن مقادیر سطح ارتعاش (بدون نیاز به قرائت زاویه فاز) دنبال می‌شود. در این روش، به جای استفاده از تغییر پارامترهای ارتعاشی در یک نقطه، این تغییرات در چند نقطه مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرد و تخمین وزنه اصلاحی مورد نیاز صرفاً بر مبنای مقادیر ثبت شده در مرحله اولیه و یک مرحله افزودن وزنه آزمایشی بدست می‌آید.

۲- توسعه روش میزان‌سازی روتور صلب به کمک یادگیری ماشین

در این بخش ابتدا یک شبیه‌ساز برای مطالعه رفتار روتور تحت تاثیر نامیزانی توسعه داده می‌شود. سپس ساختار مدلی با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی برای به کارگیری در میزان‌سازی روتور معرفی خواهد شد. روش‌های مختلف رایج برای میزان‌سازی نیز به اختصار تشریح خواهد شد. در نهایت مدل پیشنهادی مقاله حاضر برای یافتن وزنه اصلاحی معرفی می‌گردد.

۲-۱ شبیه‌سازی روتور چهار درجه آزادی با نامیزانی

در این بخش یک روتور صلب شامل یک دیسک سوار بر شفت مهار شده بین دو یاتاقان با در نظر گرفتن چهار درجه آزادی (دو درجه آزادی شامل حرکت افقی و قائم برای هر یاتاقان) مورد مطالعه قرار می‌گیرد شکل (۱).



شکل ۱- مدل روتور صلب با ۴ درجه آزادی.

معادلات حاکم توسط روش انرژی استخراج می‌گردد. بدین منظور، ابتدا لازم است توابع انرژی برای سیستم بدست آید. انرژی جنبشی روتور مطابق رابطه (۱) معرفی می‌گردد:

$$T = \frac{1}{2}[J\omega^2 + M(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + J_x\dot{\theta}_x{}^2 + J_y\dot{\theta}_y{}^2 + m((\dot{x}_m - r\omega\sin(\omega t+\varphi))^2 + (\dot{y}_m + r\omega\cos(\omega t+\varphi))^2] \quad (1)$$

که در آن $\dot{x}_m$ و $\dot{y}_m$ به ترتیب پاسخ سرعت‌های افقی و قائم دیسک، ω سرعت زاویه‌ای روتور، M جرم دیسک، J ممان قطبی، J_x و J_y به ترتیب ممان اینرسی حول محورهای x و y و $\dot{\theta}_x$ و $\dot{\theta}_y$ نیز سرعت دوران دیسک حول همان محورها است. همچنین m، r و φ به ترتیب مقدار جرم نامیزانی، فاصله شعاعی آن از محور و موقعیت زاویه‌ای آن است. لازم به توضیح است که پارامترهای جابجایی افقی و قائم دیسک (به ترتیب x_m و y_m) و همچنین دوران‌های زاویه‌ای آن حول محورهای x و y (به ترتیب θ_x و θ_y) با به کار بردن روابط هندسی از روی جابجایی‌های افقی و قائم یاتاقان‌های ۱ و ۲ (یعنی پارامترهای x_1، y_1، x_2 و y_2) قابل استخراج هستند. در ادامه، انرژی پتانسیل (U) ذخیره شده در فنرهای معادل در نظر گرفته شده در مدل به شرح زیر بدست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2}(K_{1x}x_1^2 + K_{1y}y_1^2 + K_{2x}x_2^2 + K_{2y}y_2^2) \quad (2)$$

که در آن K_{1x} و K_{2x} به ترتیب سفتی‌های افقی و K_{1y} و K_{2y} سفتی‌های قائم معادل یاتاقان‌های ۱ و ۲ می‌باشند. در نهایت تابع اتلاف رایلی (R) برای سیستم طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = \frac{1}{2}(C_{1x}\dot{x}_1^2 + C_{1y}\dot{y}_1^2 + C_{2x}\dot{x}_2^2 + C_{2y}\dot{y}_1^2) \quad (3)$$

که در آن C_{1x} و C_{2x} به ترتیب ضرایب میرایی معادل افقی و C_{1y} و C_{2y} ضرایب میرایی معادل قائم در یاتاقان‌های ۱ و ۲ می‌باشند. حال، با در دست داشتن توابع انرژی معرفی شده در روابط (۱) تا (۳)، می‌توان با به کار بردن معادله لاگرانژ (۴) دستگاه معادلات حاکم بر دینامیک سیستم را بدست آورد.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = f_i \quad (4)$$

در معادله (۴)، q_i مختصه تعمیم‌یافته i ام و f_i نیروی تعمیم‌یافته وارد بر سیستم در درجه آزادی i ام است. درجات آزادی سیستم به ترتیب x_1، y_1، x_2 و y_2 در نظر گرفته می‌شود. با اعمال معادله لاگرانژ به ازای تمام درجات آزادی مذکور، معادلات حرکت بدست می‌آید که نهایتاً در فرم ماتریسی به صورت زیر مرتب می‌شوند:

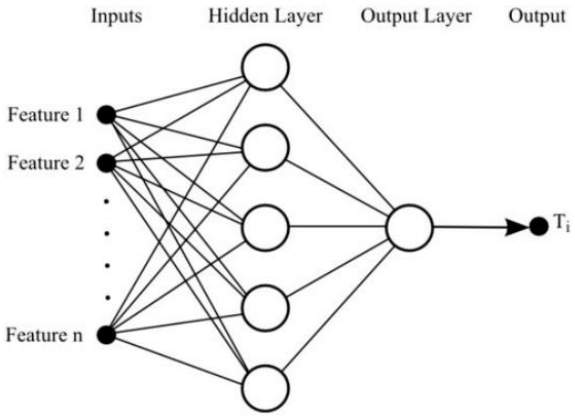
$$[M]\begin{Bmatrix}\ddot{x}_1\\ \ddot{y}_1\\ \ddot{x}_2\\ \ddot{y}_2\end{Bmatrix} + [C]\begin{Bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{y}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{y}_2\end{Bmatrix} + [K]\begin{Bmatrix}x_1\\ y_1\\ x_2\\ y_2\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}l_2 mr\omega^2\cos(\omega t+\varphi)\\ l_2 mr\omega^2\sin(\omega t+\varphi)\\ l_1 mr\omega^2\cos(\omega t+\varphi)\\ l_1 mr\omega^2\sin(\omega t+\varphi)\end{Bmatrix} \quad (5)$$

که در آن l_1 و l_2 به ترتیب نسبت فاصله دیسک از یاتاقان‌های ۱ و ۲ تقسیم بر طول کل (L) است. همچنین ماتریس‌های M، C و K به ترتیب ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سفتی سیستم هستند که عناصر آنها به صورت پارامتری استخراج می‌گردد و به علت محدودیت فضای مقاله حاضر، معرفی کامل این درایه‌ها ممکن نیست.

حال با در دست داشتن دستگاه معادلات معرفی شده در (۵)، یک برنامه کامپیوتری به زبان پایتون به عنوان برای حل معادلات مذکور به روش رانگ کوتای مرتبه ۴ [۷]، با در نظر گرفتن شرایط اولیه همگن توسعه داده شده است که به کمک آن پاسخ گذرا و پایای سیستم به هر نامیزانی دلخواهی بدست می‌آید. در بخش‌های بعدی، از این برنامه به عنوان شبیه‌ساز رفتار روتور یاد خواهد شد.

۲-۲ شبکه عصبی مصنوعی پیشخور

شبکه عصبی پیشخور با یک لایه پنهان شامل تعداد دلخواه پرسپترون و یک تابع فعال‌سازی غیرخطی (مانند تابع سیگموید) که ساختار آن در شکل (۲) نشان داده شده است، یکی از مدل‌های بسیار توانمند تخمین تابع برای مدلسازی مسائل مهندسی است که توسط محققین برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۸].



شکل ۲- ساختار شبکه عصبی پیشخور برای مدل‌سازی مسائل غیرخطی [۸].

برای استفاده از این مدل شبکه عصبی، لازم است ابتدا تمام نمونه‌ها که هر نمونه شامل n ویژگی است (به عنوان ورودی) و خروجی متناظر با هر نمونه آماده گردد. سپس، جهت بررسی توانمندی مدل شبکه عصبی برای ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی، داده‌های به سه دسته شامل داده‌های آموزشی، داده‌های صحه‌سنجی و داده‌های تست تقسیم گردد. داده‌های آموزشی برای آموزش و ساخت مدل استفاده می‌شود. آموزش مدل به معنی تنظیم وزن‌های اولیه برای نزدیک کردن خروجی مدل به مقادیر خروجی متناظر با هر نمونه است. در هر مرحله آموزش داده‌های صحه‌سنجی جهت بررسی دقت بدست آمده پس از هر مرحله اصلاح وزن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که دقت مدل روی داده‌های صحه‌سنجی به کمترین مقدار رسید و پس از آن در چند مرحله از پیش تعیین شده (در پژوهش حاضر این مقدار شش مرحله در نظر گرفته می‌شود) اصلاح وزن‌ها برای بهبود دقت روی داده‌های آموزشی منجر به کاهش دقت روی داده‌های صحه‌سنجی شود، الگوریتم یادگیری متوقف می‌شود. در واقع وقوع این حالت به معنی شروع بیش‌برازش مدل روی داده‌های آموزش است که منجر به از دست رفتن تعمیم‌پذیری مدل خواهد شد. پس از توقف مراحل آموزش و رسیدن به مدل نهایی، عملکرد آن روی داده‌های تست (که تا این مرحله هیچ استفاده‌ای از آنها نشده است) بررسی می‌شود و انتظار می‌رود در صورتی که آموزش با موفقیت انجام شده باشد، نتیجه مطلوبی روی این داده‌ها بدست آیند. در پژوهش حاضر، داده‌ها به نسبت ۰/۷، ۰/۱۵ و ۰/۱۵ برای به کارگیری در آموزش، صحه‌سنجی و تست تفکیک می‌شوند و نتایج روی داده‌های تست مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۳ روش‌های میزان‌سازی تک‌صفحه‌ای روتور

میزان‌سازی دینامیکی فرآیندی است که با اندازه‌گیری، تحلیل و تصحیح توزیع جرم، تعادل دینامیکی جرم دوار را برقرار می‌کند. این کار معمولاً با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری لرزش و حسگرهای دقیق انجام می‌شود در ادامه مهم‌ترین روش‌های مرسوم در صنعت برای میزان‌سازی یک‌صفحه‌ای (برای روتورهای با نسبت قطر به طول زیاد) به اختصار معرفی می‌گردد.

۲-۳-۱ روش برداری

روش برداری یکی از روش‌های توانمند در میزان‌سازی است که برای روتورهایی که با سرعت بالا کار می‌کنند و نیاز به دقت بالایی در میزان‌سازی دارند، استفاده می‌شود. این روش از تحلیل برداری برای نمایش ارتعاش و نامیزانی (به عنوان بردارهای نیرو) استفاده می‌کند. برای این منظور، لازم است در اندازه‌گیری‌های هر مرحله هم دامنه و هم زاویه فاز ارتعاش اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری زاویه فاز لازم است دستگاه مورد استفاده قابلیت اتصال تاکومتر را داشته باشد. برای این منظور یک علامت (برچسب) روی قسمتی از شفت قرار می‌گیرد و علاوه بر سطح ارتعاش که توسط سنسور ارتعاشی قرائت می‌شود، تاکومتر نیز لحظه عبور برچسب از مقابل آن را ثبت می‌کند. سپس تجهیز از روی تاخیر زمانی بین حداکثر شدن ارتعاش ثبت شده توسط سنسور و عبور برچسب از مقابل تاکومتر در هر دور شفت، زاویه فاز ارتعاش را بدست می‌آورد. در روش برداری، نیاز به حداقل دو مرحله توقف و راه‌اندازی برای اندازه‌گیری تجهیز (یک مرحله اندازه‌گیری اولیه و یک مرحله اندازه‌گیری بعد از قرار دادن وزنه آزمایشی) خواهد بود تا بتوان وزنه اصلاحی مورد نیاز را محاسبه کرد. با توجه به اینکه محاسبات برداری به کار رفته خطی است، اما ممکن است ارتعاشات مشاهده شده ماهیت غیرخطی داشته

باشد (به خصوص در نامیزانی‌های اولیه شدید)، لذا در برخی موارد ممکن است پس از اعمال وزنه اصلاحی نیاز به وزنه‌گذاری جدید جهت بهبود وضعیت روتور نیز باشد که این به معنای افزایش تعداد مراحل توقف و راه‌اندازی تجهیز است. جزئیات بیشتر در خصوص مراحل میزان‌سازی به روش برداری در مرجع [۹] تشریح گردیده است.

۲-۳-۲ روش ضریب اثر

روش ضریب اثر نیز از نظر مراحل انجام کار کاملاً شبیه به روش برداری است. با این تفاوت که در آن به جای استفاده از جبر برداری برای محاسبات، از روش اعداد مختلط استفاده می‌شود. در این روش، از روی نسبت مقدار و موقعیت وزنه آزمایشی به تغییرات اندازه و زاویه فاز ارتعاشات روتور در مرحله اندازه‌گیری اولیه و مرحله قرار دادن وزنه آزمایشی، یک عدد مختلط به عنوان ضریب اثر بدست می‌آید که در واقع توصیف‌کننده دینامیک سیستم است و نسبت تحریک به پاسخ را نشان می‌دهد. در گام بعدی به کمک این ضریب اثر، از روی ارتعاش ثبت شده اولیه امکان بدست آوردن مقدار و موقعیت وزنه اصلاحی مورد نیاز وجود خواهد داشت. نکته مهم در این روش، این است که ضریب اثر وابسته به پارامترهای دینامیکی سیستم (جرم، یاتاقان‌ها و سرعت کاری) است و مادامی که تغییری در این پارامترها ایجاد نگردد، ضریب اثر نیز ثابت است. لذا در داشتن ضریب اثر یک روتور، امکان بدست آوردن مشخصات وزنه اصلاحی فقط با یک مرحله اندازه‌گیری (اندازه‌گیری اولیه) وجود خواهد داشت. ویژگی مهم دیگر این روش این است که در میزان‌سازی دوصفحه‌ای (برای روتورهای با نسبت طول به قطر زیاد) به راحتی قابل تعمیم است. جزئیات بیشتر و نحوه محاسبات در مرجع [۹] تشریح گردیده است.

۲-۳-۳ روش چهار مرحله‌ای

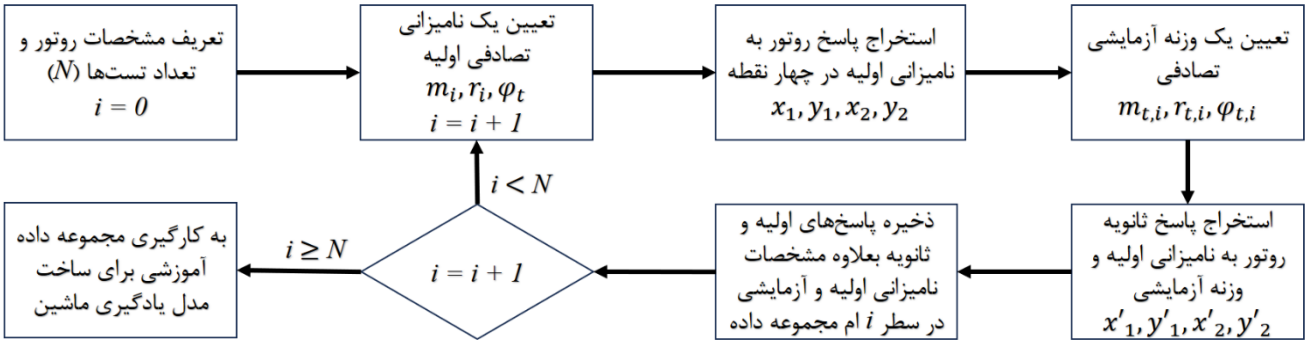
روش چهار مرحله‌ای یکی دیگر از روش‌های میزان‌سازی تک‌صفحه‌ای است که روند آن با استفاده از چهار مرحله اندازه‌گیری جداگانه انجام می‌شود. این روش صرفاً بر اساس مقادیر سطح ارتعاش در اندازه‌گیری‌های انجام شده دنبال می‌شود ولذا در مواقعی که دسترسی به اطلاعات فاز زاویه‌ای امکان‌پذیر نباشد یا از تجهیزاتی که قابلیت اندازه‌گیری فاز را ندارند استفاده شود، به کار می‌رود. در این روش، اندازه‌گیری اول از روتور در وضعیت اولیه انجام می‌شود. سپس در سه مرحله، وزنه آزمایشی مشخصی در سه موقعیت مختلف (معمولاً در زوایای صفر، ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه) روی روتور نصب می‌گردد و در هر مرحله، روتور راه‌اندازی شده سطح ارتعاش از همان نقطه قبلی اندازه‌گیری می‌شود. سپس با به کار بردن محاسباتی با مبنای هندسی، موقعیت و مقدار وزنه اصلاحی بدست می‌آید. جزئیات بیشتر در مورد پروسه و محاسبات این روش در مرجع [۹] تشریح گردیده است.

۲-۴ ارائه مدل پیشنهادی

در روش‌های معمول برای میزان‌سازی روتورها که در بخش ۳-۲ مورد اشاره قرار گرفت محدودیت‌هایی وجود دارد. در روش‌های برداری و ضریب‌اثر، علاوه بر دامنه ارتعاشات اندازه‌گیری شده، ثبت زاویه فاز سیگنال ارتعاشی نیز ضروری است. در این صورت به کمک روش‌های مذکور، می‌توان حداقل پس از دو مرحله اندازه‌گیری (یک اندازه‌گیری اولیه و یک اندازه‌گیری پس از اضافه کردن جرم آزمون) به مقدار و موقعیت جرم اصلاحی دست یافت. استفاده از این روش نیازمند در دست داشتن تجهیزات اندازه‌گیری با قابلیت ثبت زاویه فاز سیگنال است. در مقابل در روش چهارمرحله‌ای، نیازی به ثبت زاویه فاز سیگنال نیست و محاسبه مقدار و موقعیت جرم اصلاحی صرفاً بر اساس در دست داشتن دامنه ارتعاش انجام می‌گیرد. اما این روش از نظر اجرایی طولانی‌تر است و لازم است که در سه مرحله وزنه آزمایشی به روتور اضافه و اندازه‌گیری گردد که با در نظر گرفتن اندازه‌گیری اولیه، در مجموع چهار مرحله اندازه‌گیری مورد نیاز خواهد بود. در انجام عملیات میزان‌سازی میدانی، کاهش تعداد مراحل و دستیابی به نتیجه نهایی در کمترین زمان و آزمایش بسیار حائز اهمیت است. در بسیاری از موارد نیز در خصوص تعداد مراحل توقف و راه‌اندازی مجدد محدودیت وجود دارد و جهت حفاظت و ایمنی دستگاه لازم است بین هر دو توقف زمان استراحت قابل توجهی سپری گردد. در صورت حیاتی بودن تجهیز برای تولید، این وقفه موجب خسارت ناشی از توقف تولید به مجموعه می‌گردد که در مجموعه‌های صنعتی بزرگ بسیار حائز اهمیت است. لذا در این پژوهش روشی معرفی می‌گردد که با بکار بردن یادگیری ماشین، بتوان بدون استفاده از اطلاعات زاویه فاز ارتعاش، با به کار بردن مقادیر ارتعاشی در چند نقطه و در کمترین تعداد مراحل راه‌اندازی ماشین (دو مرحله: شامل یک اندازه‌گیری اولیه و یک اندازه‌گیری پس از اضافه کردن وزنه آزمایشی)

به نتیجه مطلوب در خصوص جرم اصلاحی مورد نیاز دست یافت. در ادامه این بخش به تشریح روش پیشنهادی پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

برای این منظور ابتدای مشخصات یک روتور (پارامترهای مورد نیاز در ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی مورد استفاده در معادله (۵)، در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعدی، در یک حلقه تکرار، نامیزانی اولیه‌ای به صورت تصادفی (شامل پارامترهای جرم، شعاع و زاویه) ایجاد می‌گردد. سپس، معادلات سیستم (۵) برای بدست آوردن پاسخ روتور به نامیزانی تعیین شده حل می‌گردد و پاسخ ارتعاشی به صورت دامنه ارتعاش در جهات افقی و قائم هر دو یاتاقان روتور بدست می‌آید. در ادامه یک وزنه آزمایشی به صورت تصادفی ایجاد می‌گردد و در گام بعدی پاسخ سیستم به وضعیت جدید (وجود نامیزانی اولیه و وزنه آزمایشی) مجدداً از روی حل معادلات (۵) بدست می‌آید. مقادیر سطح ارتعاش در چهار نقطه در دو وضعیت قبل و بعد از اضافه کردن وزنه آزمایشی بعلاوه مقدار و موقعیت نصب وزنه آزمایشی به عنوان داده‌های یک سطر از مجموعه داده مورد نظر ذخیره می‌گردد. این مراحل ذکر شده به تعداد دلخواه (N مرحله) تکرار می‌گردد تا در نهایت یک مجموعه داده شامل N سطر و ۱۴ ستون (۸ ستون مربوط به مقادیر ارتعاشات و ۶ ستون مربوط به مقدار و موقعیت جرم نامیزانی اولیه و جرم آزمون) بدست آید. مراحل تشریح شده در فلوچارت شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- الگوریتم پیشنهادی برای ساخت مدل مبتنی بر شبکه عصبی برای میزان‌سازی روتور.

پس از بدست آوردن مجموعه داده مذکور، یک مدل شبکه عصبی پیشخور مطابق مدل معرفی شده در بخش ۲-۲ به کار برده و آموزش داده می‌شود تا توانمندی آن برای تخمین وزنه اصلاحی از روی مشخصات جرم آزمون و مقادیر ارتعاشات در نقاط مختلف مورد ارزیابی قرارگیرد.

۳- نتایج

در این بخش نتایج مبتنی بر روش پیشنهادی در بخش ۴-۲ ارائه می‌گردد. برای این منظور ابتدا مشخصات یک روتور (بر پایه مدل معرفی شده در بخش ۱-۲) و با معادلات حاکم معرفی شده در (۵)، مطابق جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- مشخصات روتور در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
M	۱۹۱ kg	K_{1x}	۴۸۱۱ kN/m	C_{1x}	۶۰۳۹ $N.s/m$
L	۷۰۰ mm	K_{1y}	۸۹۶۸ kN/m	C_{1y}	۴۸۰۸ $N.s/m$
R	۷۷۶ mm	K_{2x}	۳۱۲۷kN/m	C_{2x}	۸۶۴۰ $N.s/m$
ω	۷۷/۶ rad/s	K_{2y}	۷۵۷۲kN/m	C_{2y}	۹۵۳۹ $N.s/m$

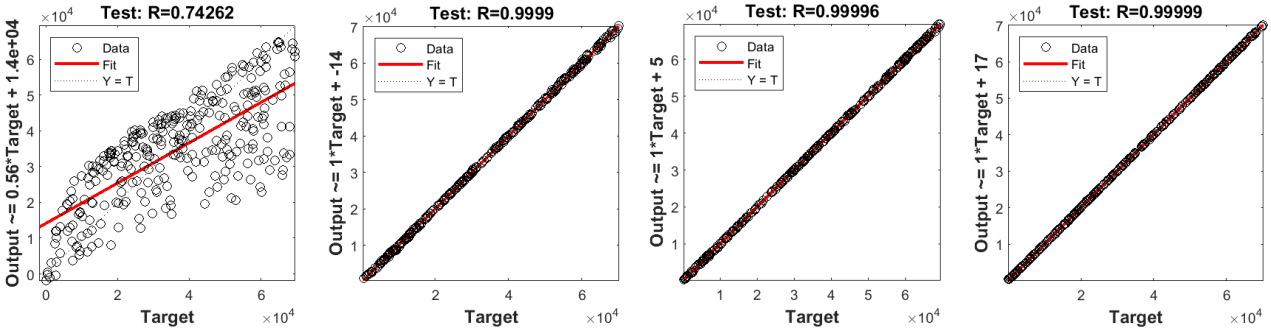
لازم به توضیح است که مقادیر مشخص شده برای پارامترهای جدول (۱) به صورت تصادفی تولید شده و در کل فرآیند ثابت در نظر گرفته می‌شوند. سپس ۲۰۰۰ نمونه آزمایشی بر پایه فلوچارت معرفی شده در شکل (۳) ساخته می‌شود. در مراحل ساخت مجموعه داده، با در نظر گرفتن توزیع یکنواخت برای پارامترهای مربوط به نامیزانی اولیه، در هر گام یک مقدار تصادفی در بازه ۷۰ تا ۷۰۰۰ گرم

سانتی‌متر برای نامیزانی و یک مقدار تصادفی بین صفر تا ۳۶۰ درجه برای موقعیت زاویه‌ای انتخاب می‌شود. به کمک مجموعه دادهٔ نهایی ساخته شده، چهار مدل شبکه عصبی ساخته می‌شود. برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم آموزش LR و تابع فعال‌سازی زیگموید در لایه خروجی استفاده می‌شود. در لایه پنهان نیز در تمام مدل‌های شبکه عصبی از تعداد ۱۰ پرسپترون استفاده می‌شود. جزئیات هدف، ورودی و خروجی چهار مدل شبکه عصبی مذکور در جدول (۲) معرفی شده است.

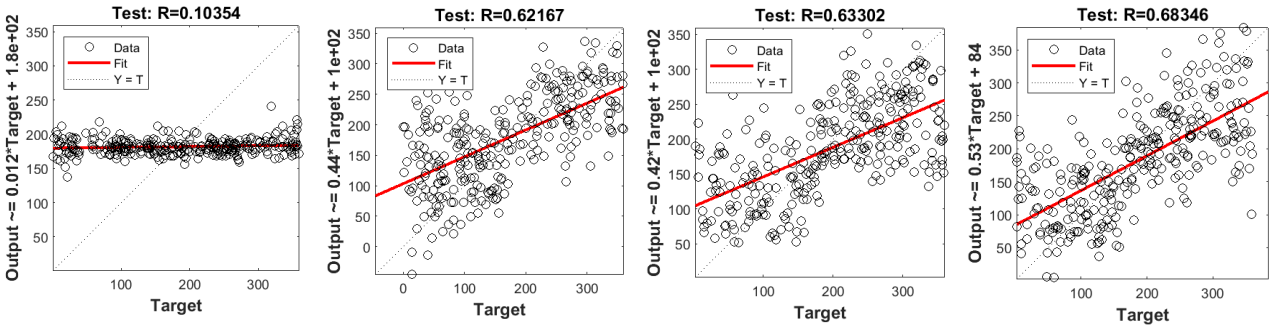
جدول ۲- مشخصات مدل‌های شبکه عصبی ساخته شده برای هدف مطالعه حاضر.

مدل	هدف	ورودی	خروجی
مدل ۱	میزان‌سازی از روی داده‌های یک نقطه	مقدار و موقعیت زاویه‌ای وزنه آزمایشی بعلاوه مقدار ارتعاش در جهت افقی نقطه ۱ در دو مرحله اندازه‌گیری	مقدار و موقعیت زاویه‌ای جرم اصلاحی
مدل ۲	میزان‌سازی از روی داده‌های دو نقطه	مقدار و موقعیت زاویه‌ای وزنه آزمایشی بعلاوه مقدار ارتعاش در جهت افقی و قائم نقطه ۱ در دو مرحله اندازه‌گیری	مقدار و موقعیت زاویه‌ای جرم اصلاحی
مدل ۳	میزان‌سازی از روی داده‌های سه نقطه	مقدار و موقعیت زاویه‌ای وزنه آزمایشی بعلاوه مقدار ارتعاش در جهات افقی و قائم نقطه ۱ و جهت افقی نقطه ۲ در دو مرحله اندازه‌گیری	مقدار و موقعیت زاویه‌ای جرم اصلاحی
مدل ۴	میزان‌سازی از روی داده‌های چهار نقطه	مقدار و موقعیت زاویه‌ای وزنه آزمایشی بعلاوه مقدار ارتعاش در جهات افقی و قائم هر دو نقطه ۱ و ۲ در دو مرحله اندازه‌گیری	مقدار و موقعیت زاویه‌ای جرم اصلاحی

نتایج بدست آمده از اعمال فرآینده طی شده با استفاده از مدل‌های ۱ تا ۴ در ادامه تشریح می‌گردد. در شکل (۴) نمودار مقادیر تخمین زده شده برای مقدار نامیزانی به ازای مقادیر واقعی همین پارامتر برای ۳۰۰ نمونه مورد نظر برای تست (که در فرآیند آموزش مدل‌ها هیچ نقشی نداشته‌اند) توسط هر چهار مدل معرفی در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که مدل ۱ توانسته است همبستگی تقریبی (با ضریب حدود ۰/۷۴) بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده ایجاد کند. اما با افزایش داده‌های در مدل‌های بعدی (مدل‌های ۲، ۳ و ۴)، خروجی بدست آمده با دقت بسیار خوبی بر مقادیر واقعی مطابقت دارد. به همین ترتیب در شکل (۵) نتایج مشابهی برای تخمین موقعیت زاویه‌ای نامیزانی اولیه توسط ۴ مدل ارائه شده است. در اینجا مشاهده می‌شود که مدل ۱ که فقط از داده‌های ارتعاشی در یک نقطه جهت استفاده می‌کند، هیچ موفقیتی در تخمین موقعیت زاویه‌ای نامیزانی اولیه ندارند. اما، با افزایش تعداد داده‌ها (نقاط بیشتر ثبت ارتعاش) مدل توانسته است همبستگی تقریبی بین مقادیر واقعی و مقدار تخمین زده شده ایجاد کند. در خروجی‌های بدست آمده از مدل ۲ ضریب همبستگی بدست آمده در حد ۰/۶۲ است و با افزایش داده‌ها، این ضریب در مدل ۳ و مدل ۴ افزایش جزئی یافته و به ترتیب به مقادیر ۰/۶۳ و ۰/۶۸رسیده است.



شکل ۴- نتیجه تخمین مقدار نامیزانی اولیه توسط چهار مدل معرفی شده در جدول ۲.



مدل ۱ مدل ۲ مدل ۳ مدل ۴

شکل ۵- نتیجه تخمین موقعیت زاویه‌ای نامیزانی اولیه توسط چهار مدل معرفی شده در جدول ۲.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مدلی بر مبنای شبکه عصبی برای بررسی امکان تشخیص نامیزانی در روتورها از روی داده‌های ارتعاشی با هدف به کار بردن اطلاعات ارتعاشی در چند نقطه (به جای یک نقطه که در روش‌های سنتی مرسوم است) با هدف دستیابی به نتیجه در کمترین تعداد مرحله (فقط اعمال یک مرحله وزنه آزمایشی) و در عین حال بدون به کار بردن داده‌های مربوط به زاویه فاز ارتعاش توسعه داده شد. این مدل با ۲۰۰۰ داده بدست آمده از شبیه‌سازی رفتار یک روتور ۴ درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که مدل شبکه عصبی با داشتن داده‌های حداقل ۲ سنسور در دو مرحله اندازه‌گیری می‌تواند به خوبی مقدار نامیزانی را تشخیص دهد. اما در خصوص تعیین موقعیت زاویه‌ای نامیزانی مدل به صورت تقریبی می‌تواند خروجی مورد نظر را تولید کند. افزایش داده‌ها تا ۴ سنسور نیز تاثیر قابل توجهی برای بهبود دقت تشخیص موقعیت زاویه نامیزانی اولیه نداشته است.

مراجع

[1] ISO 21940, Part 12," Procedures and tolerances for rotors with flexible behaviour" 2016. [Online]. Available: www.iso.org

[2] L. Li, S. Cao, J. Li, R. Nie, and L. Hou, "Review of rotor balancing methods," May 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/machines9050089.

[3] S. Zhong, L. Li, H. Chen, and Z. Lu, "A Novel Balancing Method for Rotor Using Unsupervised Deep Learning," *Shock and Vibration*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/1800164.

[4] S. Han, Z. Wang, H. Zhang, F. Zhang, and Q. Han, "Flexible rotor unbalance fault location method based on transfer learning from simulation to experiment data," *Meas Sci Technol*, vol. 34, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.1088/1361-6501/acf67e.

[5] *Proceedings, 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) : Vienna, Austria - Hybrid, 08-11 September, 2020*. IEEE, 2020.

[6] S. Han, T. Yang, Q. Zhu, Y. Zhao, and Q. Han, "Unbalance position of aeroengine flexible rotor analysis and identification based on dynamic model and deep learning," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 237, no. 19, pp. 4410–4429, Oct. 2023, doi: 10.1177/09544062221149316.

[7] "Numerical analysis for applied mathematics, science, and engineering : Greenspan, Donald : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive." Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: https://archive.org/details/numericalanalysi0000gree

[8] M. Behzad, H. A. Arghand, and A. Rohani Bastami, "Remaining useful life prediction of ball-bearings based on high-frequency vibration features," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 232, no. 18, pp. 3224–3234, Sep. 2018, doi: 10.1177/0954406217734885.

[۹] م. رفیعیان، " بالانس ماشین‌های صنعتی"، دانشگاه یزد، ۱۳۸۶.