

بازشناخت الگوی نیروهای یاتاقانی محور چرخان صلب دارای نامیزانی‌های جرمی

محمد رضا همایی نژاد^{۱*}، محمد حسین سعیدی مستقیم^۲، فرنود عرب^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، خیابان پردیس، پلاک ۷، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

کد پستی: ۱۹۹۹۱-۴۳۳۴۴-mrhomaeinezhad@kntu.ac.ir

چکیده

در سیستم‌های چرخان صنعتی به دلایل مختلف مانند ناهمراستایی یاتاقانی و وجود نامیزانی‌های جرمی، نیروهای مختلفی در یاتاقان تولید می‌شود. با تحلیل الگوی نیروهای یاتاقانی می‌توان در مورد مشخصات و محل نامیزانی‌ها قضاوت کرد. با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل الگوی نیروهای یاتاقانی، می‌توان استانداردهایی را تدوین نمود که بر اساس آن مهندسان تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات دوار بتوانند نسبت به وجود نامیزانی‌های جرمی زیان‌آور و افزایش‌دهنده هزینه های نگهداری ماشین، اقدامات لازم را انجام دهند. برای انجام این تحقیق، نامیزانی‌های جرمی متعدد با زوایا و فواصل متغیر در صفحات مختلف، در شرایط کاری مختلف اعم از سرعت و موقعیت روی یک محور چرخان قرار داده می‌شوند و سپس معادلات حرکت و نیروهای موجود در یاتاقان‌های غیر منعطف صلب و کاملاً همراستا بدست می‌آیند. با داشتن معادلات و حل عددی آنها، الگوهای نیرویی یاتاقان استخراج و تأثیر هر کدام از متغیرهای دینامیکی روتور مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، الگوی نیروهای یاتاقانی بازشناخت شده و مشخصات جرم‌های نامیزان اعم از مقدار، فاصله از محور چرخان و زاویه و همچنین نوع نامیزانی مورد بررسی قرار داده می‌شوند. دقت میانگین دستیابی به هر ۸ متغیر نامیزانی ۴۱ درصد و پس از زدودن همپوشانی‌ها دقت دستیابی به ۵ متغیر نامیزانی ۹۵ درصد گزارش شد. همچنین با پیاده سازی شبکه‌ی عصبی تعداد سنسورهای مورد نیاز کاهش پیدا کرد و در ادامه با بهره گیری از شبکه‌ی عمیق، امکان بالانس کردن هر نامیزانی دینامیکی با استفاده از تنها دو جرم مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی

نامیزانی جرمی، روتور صلب، عیوب دینامیکی روتور، بازشناخت الگوی نیروها، هوش مصنوعی.

اجتناب از عیوب مکانیکی در ایده‌آل‌ترین سیستم‌ها نیز ممکن نیست، [۱]. نقص‌های مکانیکی سیستم‌ها عموماً در فرایند ساخت و نصب آن‌ها ایجاد می‌شوند، [۲]، بنابراین با فرض نقصان مکانیکی ماشین‌ها به عنوان امری ذاتی، به‌کارگیری مهندسان تعمیر و نگه‌داری برای افزایش طول عمر دستگاه‌ها، امری الزام‌آور است. ۱۵ تا ۶۰ درصد هزینه‌های ماشین‌آلات تا پایان عمر کاری آنها، صرف تعمیر و نگهداری می‌شود. همچنین خسارات ناشی از فرآیند تعمیر و نگهداری ضعیف ماشین‌سالیانه حدود ۶۰ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود، [۳].

به‌طور کلی برای نگهداری و پایش وضعیت ماشین می‌توان چهار سیر کلی را تعریف کرد، که هر مورد تاریخچه و کاربرد خاص خود را داشته و در شرایطی مخصوص به خود می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد، [۱].

نگهداری به روش کارکرد تا شکست، نگهداری به روش پیشگیرانه، نگهداری به روش پیشبینی‌کننده، نگهداری به روش پرواکتیو (Proactive). در این تحقیق از روش پیشبینی‌کننده استفاده شده است، و در ادامه به صورت مختصر به توضیحی از آن پرداخته می‌شود، [۳].

ایده اصلی این روش این است که برنامه‌های پایش و تعمیر ماشین بر اساس عیب و نقص‌های تشخیص داده شده، تشکیل می‌شوند. شرایط مکانیکی و کارکرد دستگاه به‌طور مرتب کنترل می‌شود و وقتی که یک روندی مبتنی بر نقص موجود در قطعات مشاهده شود، برای تعمیر و انجام اقدامات لازم برنامه‌ریزی می‌گردد. بنابراین دستگاه در شرایطی که مناسب باشد، متوقف شده و اقدامات تعمیر و نگه‌داری و جایگزینی انجام می‌گیرد. اگر به این عیب و نقص‌ها بی‌توجهی شود، هر کدام از آنها می‌تواند باعث زیان‌های بسیاری شود، [۱].

یکی از مزیت‌های این روش برنامه‌ریزی فرآیند نگه‌داری و تعمیر برای قطعه مورد نظر است، که از تهیه قطعات یدکی بیهوده برای تمامی قطعات، ما را بی‌نیاز می‌سازد و امکان استفاده از تمام عمر یک قطعه را فراهم ساخته و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با این پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بهره‌وری تولید را می‌توان افزایش داد، [۴].

برای این روش نیاز به ابزارها، سنسورها، وسایل و ماشین‌هایی است تا با کمک نیروهای متخصص و یا پرسنلی که به‌طور کامل آموزش دیده‌اند روند سلامت دستگاه بررسی شود. بنابراین نسبت به اصول پیشین به فعالیت بیشتری احتیاج دارد، [۱]. آنالیز ارتعاشات دستگاه بدون شک مهمترین روش برای تشخیص عیب‌های مکانیکی، بخصوص در ماشین‌هایی با اجزای چرخان، است.

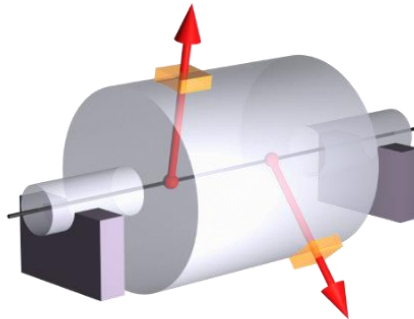
امروزه نیاز به قابلیت اعتماد بالا به دستگاه‌ها و روتورها نسبت به گذشته بسیار بیشتر ضروری است و روز به روز به اهمیت آن افزوده می‌شود. شناسایی، مکان‌یابی و تحلیل نقص‌های دستگاه نقشی حیاتی در زمینه فعالیت ماشین‌ها دارد. برای اشاره به برخی از عیب‌های رایج ماشین می‌توان به آنبالانسی یا نامیزانی جرمی، عیوب روتور اورهانگ (overhung)، شفت خمیده، خروج از مرکز، ناهمراستایی دو شفت متصل، لقی، مشکلات چرخ دنده، مشکلات یاتاقان، کلوپتاسیون، شفت ترک خورده و سایش روتور اشاره کرد، [۱] و [۴]. یکی از رایج‌ترین عیوب ماشین که موجب ارتعاشات آن می‌شود آنبالانس بودن اجزای ماشین بوده و حدود ۴۰ درصد از عیوب سیستم‌های چرخان را تشکیل می‌دهد [۳]، بنابراین در این تحقیق به بررسی این عیب مکانیکی پرداخته شده است.

می‌توان آنبالانسی را توزیع غیریکنواخت جرم حول محور چرخش روتور نامید، [۳]. در این مورد دو مفهوم محور چرخش و محور مرکز هندسی تعریف می‌شوند: محور چرخش به محوری گفته می‌شود که روتور حول آن می‌چرخد؛ اگر توسط یاتاقان‌ها محدود نشده باشد. به آن محور اصلی ممان اینرسی نیز می‌گویند. محور مرکز هندسی جرم به خط مرکزی روتور می‌گویند، [۱].

زمانی که این دو محور بر یک دیگر منطبق شوند روتور در حالت تعادل قرار می‌گیرد. اما زمانی که این دو محور منطبق نباشند، روتور آنبالانس تلقی می‌شود. حالت‌های مختلفی برای روتورهای آنبالانس پیش می‌آید که در ادامه آن‌ها بررسی می‌شوند.

در آنبالانسی استاتیکی، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر موازی هستند. در آنبالانسی کوپل، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر در مرکز جرم تلاقی دارند. در آنبالانسی دینامیکی، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر متناظر هستند و به عبارتی نه یکدیگر را قطع می‌کنند و نه موازی هستند، (شکل ۱). در آنبالانسی شبه استاتیکی، دو محور یکدیگر را در نقطه‌ای به غیر از مرکز جرم قطع می‌کنند.

روتورهای اورهانگ نیز نوعی از روتورها هستند که در آنها بین دو یاتاقان، جرمی جز شفت وجود نداشته و روتور و جرم اصلی در بیرون این محل قرار دارند. همچنین در روتورهای اورهانگ هر چهار نوع آنبالانسی می‌تواند وجود داشته باشد.



شکل ۱ شماتیک نامیزانی دینامیکی

حوزه‌های تحقیقاتی در پایش ماشین به دلیل وسیع بودن گرایش‌ها بسیار گسترده بوده که در این مبحث تنها موضوع مورد تمرکز در نقص‌های روتور، نامیزانی‌ها می‌باشند. مدارهای چرخش، تشخیص و بالانس کردن از جمله موارد مورد نظر خواهند بود. امروزه زمینه‌های تحقیق و پژوهش در حوزه‌ی نامیزانی‌های روتور و مدارات چرخش رو به گسترش هستند. در تحقیق [۵] محققان با استخراج دیتاست متعلق به سیگنال‌های نامیزانی در سرعت‌های مختلف توسط سه سنسور سرعت، با استفاده از شبکه‌های عصبی موفق شدند به ۹۸/۶ درصد دقت در تشخیص مقادیر آنبالانسی دست یابند. در این تحقیق از تبدیل فوریه و شبکه‌های کانولوشنی بهره گرفته شده است. در تحقیق [۶] محققان با استفاده از نرم افزار آدامز و استخراج دیتا در ۴۸ جرم مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی موفق به دستیابی به دقت ۹۴ درصد در تشخیص مقادیر نامیزانی رسیدند. مدلسازی روتور چرخان در حالت ۶ درجه آزادی و مقادیر نامیزانی‌ها در چهار صفحه‌ی گوناگون و شعاع‌ها و اندازه‌ی جرم‌های مختلف بود. در مقاله [۷] محققان به استفاده یادگیری ماشین موفق شدند روش‌های تشخیص و طبقه بندی نقص‌های ماشین چرخان را بررسی کرده و با استفاده از روش تجربی، استخراج داده و مدلسازی دینامیکی روتور با ۱۲۵۰ سری داده از عیوب ماشین در حالت مدلسازی و ۱۵۰ سری داده در حالت تجربی، چند روش از یادگیری ماشین را در تشخیص و طبقه بندی عیوب ماشین با استفاده از عکس اسپکتروم نیرو بررسی کنند. در تحقیق [۸] محققان با مدلسازی نامیزانی در روتور سوار بر یاتاقان تویی طیف نیرویی سوار بر یاتاقان را در حالت‌های مختلف نامیزانی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق طیف‌های نیرویی و مدارات چرخش در سرعت‌های مختلف مدلسازی و بررسی شدند. در پژوهش [۹] محققان به تشخیص مقدار نامیزانی روتور منعطف تحت شرایط نامیزان پرداختند و با دقت قابل قبولی توانایی تشخیص مقادیر نامیزانی را بدست آوردند. در تحقیق [۱۰] محوری تحت شرایط نامیزانی و ناهمراستایی پیاده شده بر یاتاقان فعال مغناطیسی مدلسازی و مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. در مطالعه [۱۱] نیز به صورت تئوری دینامیک غیر خطی روتور صلب نامیزان سوار بر یاتاقان ژورنال مدلسازی شد و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدارهای چرخش مربوطه در انتهای مقاله استخراج شده‌اند. در مطالعه [۱۲] نیز بالانس کردن روتور نامیزان با استفاده از نرم افزار متلب تحت شرایط یاتاقان صلب، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. محققان [۱۳] روتوری منعطف را تحت شرایط نامیزان مدلسازی کرده‌اند که مشخصات توابع فرکانسی مربوطه استخراج شده است. مطالعه [۱۴] نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی به تشخیص مقادیر نامیزانی در یک سیستم متشکل از روتور نامیزان و یاتاقان‌های صلب پرداخته است. در کار پژوهشی [۱۵] با استفاده از پردازش سیگنال، به تحقیقی کلی برای تشخیص و طبقه بندی نوع عیب دستگاه چرخان پرداخته شده است. کاربرد هوش مصنوعی برای تشخیص و بالانس کردن روتور نامیزان را می‌توان در مطالعه [۱۶] مشاهده کرد، که با مدلسازی روتوری صلب تحت یاتاقان‌های ژورنال صورت گرفته است. استخراج مدارهای چرخش (اوربیت) و دقت شبکه در این تحقیق قابل توجه است. تشخیص نامیزانی‌ها در روتور منعطف تحت مقادیر مختلف با استفاده از شکل روتور در حین عملکرد با استفاده از سرعت چرخش یکی دیگر از روش‌های عیب یابی و بالانس کردن روتور بوده که در تحقیق [۱۷] به آن پرداخته شده است. روشی دیگر برای تشخیص جرم نامیزان در آنبالانسی دینامیکی روتور چرخان، تحلیل پاکت و بررسی مشخصات الکتریکی سیستم بوده که در کار پژوهشی [۱۸]

مورد تحلیل و بررسی قرار داده است. در مقاله [۱۹] به طبقه بندی عیوب ماشین با استفاده از ماشین بردار پشتیبان در روتور معیوب در چند محور پرداخته شده است. استفاده از یادگیری عمیق برای تشخیص نوع نقص روتور چرخان در مطالعه [۲۰] به طور واضح مشهود بوده که با استفاده از استخراج داده به صورت تجربی این امر صورت گرفته است. تحقیق [۲۱] نیز با مدلسازی روتوری با عیب ناهمراستایی به استخراج و بررسی مدارهای چرخش پرداخته است. تحقیق [۲۲] نیز با مدلسازی دینامیکی روتور چرخان به استخراج مدارهای چرخش پرداخته و روش‌های تشخیص عیوب ماشین را مورد بررسی قرار داده است.

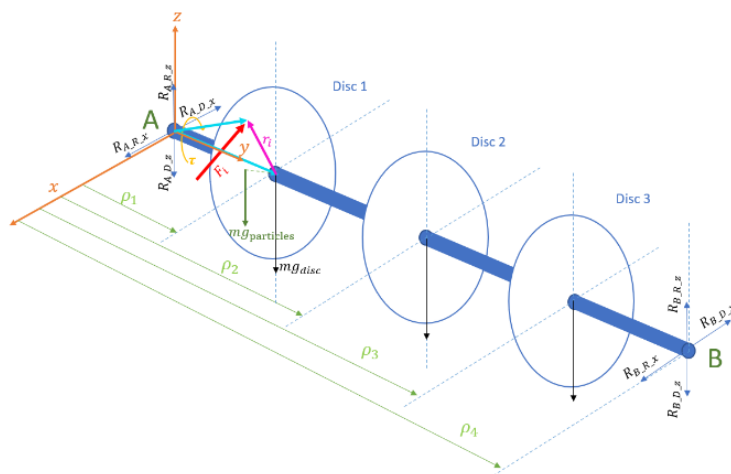
در این تحقیق هدف اصلی طراحی مجموعه‌ای از الگوهای نیرویی یاتاقانی نهان در سیگنال‌های نیرویی و طراحی شبکه‌ی عصبی از جهات گوناگون برای امکان سازی و کمک به حل مسائل دینامیکی است. موضوعات زیر در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- ارائه‌ی مجموعه‌ای از الگوهای نیرویی استخراج شده و تحلیل آنها، که قابلیت بهره برداری توسط مهندسان تعمیر و نگهداری را داشته باشد،

- طراحی و بکارگیری شبکه‌ی عصبی جهت هموار ساختن فرایند تشخیص.

۲- مدل دینامیکی سیستم با نقص آنبالانسی

برای بررسی آنبالانسی سیستم، نیاز به مدلسازی دینامیکی این سیستم می‌باشد. همچنین با داشتن مدل دینامیکی سیستم می‌توان به تحلیل سیستم و استخراج الگوی های ارتعاشاتی و بررسی تأثیر هر کدام از متغیرها و همپوشانی آنها در فرکانس خروجی پرداخت.



شکل ۲ شماتیک روتور دوار با ۱۵ جرم نامیزان روی ۳ صفحه موازی با فواصل متفاوت

برای مدلسازی، یک روتور دوار با یاتاقان‌ها و شفت صلب، به همراه سه دیسک در فواصل متفاوت که در هرکدام از آنها ۵ جرم نامیزانی با شعاع‌ها و زوایای گوناگون وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود. همچنین روتور و یاتاقان‌ها صلب در نظر گرفته شده و از اثر میرایی و فنریت در یاتاقان‌ها صرف نظر می‌گردد. با استفاده از اصل دالامبر (D'Alembert's principle) معادلات دینامیکی سیستم بدست می‌آیند.

$$\sum \underline{\mathbf{F}} + (-\underline{\dot{\mathbf{G}}}) = 0 \quad (۱)$$

$$\underline{\mathbf{G}} = m\underline{\mathbf{v}} \quad (۲)$$

$$\underline{\mathbf{F}} = \frac{d}{dt}(m\underline{\mathbf{v}}) = m \frac{d}{dt}(\underline{\dot{\theta}} \times \underline{\mathbf{r}}) \quad (۳)$$

که معادلات ۱ تا ۳، \mathbf{F} نیروی وارده توسط هر ذره به محور دوران، \mathbf{G} تکانه خطی هر ذره، m جرم هر ذره، \mathbf{v} سرعت هر ذره، $\dot{\theta}$ سرعت زاویه‌ای هر ذره و \mathbf{r} شعاع هر ذره می‌باشد. با نوشتن معادله دینامیک دورانی حول نقطه A و مجموع برداری نیروها روابط ۴ تا ۸ را بدست می‌آید.

$$\ddot{\theta} = \frac{-[\tau + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos(\theta_i)]}{[I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} (m_i r_i^2)]} \quad (۴)$$

$$R_{Ax} = - \left[\sum_{i=1}^{15} [m_i r_i \ddot{\theta} \sin(\theta_i) + m_i r_i \dot{\theta}^2 \cos(\theta_i)] - \frac{\sum_{i=1}^{15} [l_i m_i r_i \ddot{\theta} \sin(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \cos(\theta_i)]}{l_B} \right] \quad (۵)$$

$$R_{Az} = - \left[\sum_{j=1}^3 m_j g - \frac{\sum_{i=1}^{15} [m_i g - m_i r_i \ddot{\theta} \cos(\theta_i) + m_i r_i \dot{\theta}^2 \sin(\theta_i)] + [\sum_{i=1}^{15} [l_i m_i g - l_i m_i r_i \ddot{\theta} \cos(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \sin(\theta_i)] + \sum_{j=1}^3 \rho_j m_j g]}{l_B} \right] \quad (۶)$$

$$R_{Bx} = - \frac{\sum_{i=1}^{15} [l_i m_i r_i \ddot{\theta} \sin(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \cos(\theta_i)]}{l_B} \quad (۷)$$

$$R_{Bz} = - \frac{[\sum_{i=1}^{15} [l_i m_i g - l_i m_i r_i \ddot{\theta} \cos(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \sin(\theta_i)] + \sum_{j=1}^3 \rho_j m_j g]}{l_B} \quad (۸)$$

که در آن:

$$I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} (m_i r_i^2) = J \quad (۹)$$

برای استفاده از معادلات ۴ تا ۸ به دلیل وجود پارامترهای **غیر خطی** نیاز به حل آنها از طریق روش‌های حل غیر خطی می‌باشد. در این بخش با استفاده از روش چند گامی آدامز-بشفورث (Adams-Bashforth) و زبان برنامه نویسی پایتون به حل آن پرداخته می‌شود.

۳- بازساخت الگوهای نیرویی روتور

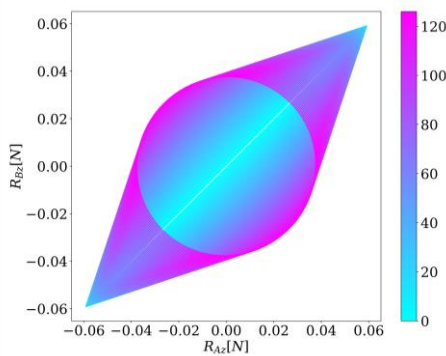
۳-۱- مقدمه

در این بخش نحوه استخراج مجموعه الگوهای نیروهای یاتاقانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. با استخراج سیگنال نیرو در هر چهار یاتاقان و ترسیم آنها نسبت به یکدیگر می‌توان این الگوها را بدست آورد. این الگوها می‌توانند در تشخیص نوع آنبالانسی به کمک مهندسان تعمیر و نگهداری بیایند. در هر قسمت پس از رسم شکل، جدول مشخصات رسم و توضیحاتی مختصر برای تحلیل شکل ارائه شده است.

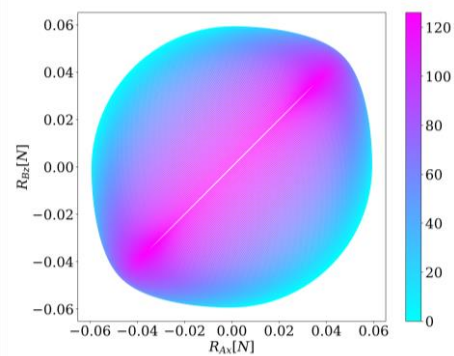
۳-۲- بررسی تاثیر تغییر اختلاف زاویه دو جرم متقارن در آنبالانسی دینامیکی در الگوی نیروهای یاتاقانی

با بررسی شکل ۳ قسمت های الف تا ح می‌توان تاثیر تغییر اختلاف زاویه اجرام نامیزان در آنبالانسی دینامیکی را مشاهده نمود. ستون چپ شکل ۳ ابتدا که آنبالانسی، مشابه نامیزانی استاتیکی است، خطی مورب را تشکیل می‌دهد که به معنی برابر بودن نیروهای ثبت شده توسط سنسورهای هم-فاز است. با افزایش اختلاف زاویه این خط مورب به یک بیضی تبدیل شده که در همان جهت اولیه خط شروع به رشد کرده ولی از اندازه‌ی قطر بزرگ آن کاسته می‌شود. این بیضی را در اختلاف زاویه ۹۰ درجه می‌توان در شکل ۳-ت مشاهده کرد. با افزایش این مقدار تا زاویه ای حدود ۱۲۶ درجه، این بیضی به یک دایره تبدیل شده که شماتیک آن را می‌توان در شکل ۳-ب مشاهده کرد. تبدیل بیضی به دایره نماد تغییر جهت قطر بزرگ بیضی در جهت دیگر است که تنها ناشی از کوچک تر شدن قطر بزرگ اولیه در جهت مورب اولیه می‌باشد. کوچک شدن قطر بزرگ بیضی تا حدی ادامه پیدا می‌کند تا در اختلاف

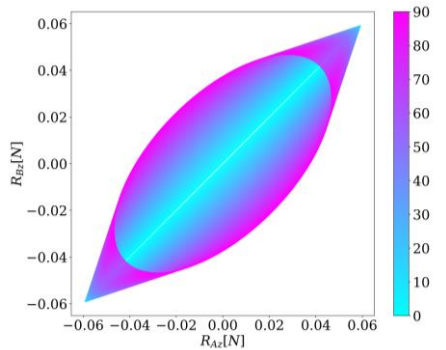
زاویه‌ی ۱۸۰ درجه خطی مورب در جهت عمود بر خط مورب اولیه تشکیل شود. این خط نشان دهنده‌ی آن است که سنسورهای هم-فاز اندازه‌های برابر اما خلاف جهت یکدیگر را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است کوچک تر شدن خط مورب ثانویه نسبت به خط مورب اولیه بیانگر این امر است که در **آنبالانسی** کوپل چون نامیزانی‌ها در خلاف جهت یکدیگر قرار دارند از اثر **ارتعاشاتی** کاسته می‌شود. در ادامه‌ی این روند تا اختلاف فاز ۳۶۰ درجه، این مراحل همانند گذشته به عقب باز می‌گردد. همانطور که در شکل ۳-پ و ۳-ت مشاهده می‌شود، شکل ابتدایی این سیگنال‌های ناشی از این سنسورها به صورت دایره‌ای است که نشان دهنده‌ی اختلاف فاز ۹۰ درجه ای بین سیگنال‌های ورودی است. با افزایش اختلاف فاز، این شماتیک ابتدا خط موربی را تشکیل داده که در ابتدای این تغییر شکل سبب بزرگ تر شدن قطر بزرگ بیضی در حالت گذار نسبت به قطر دایره‌ی اول است. بعد از تشکیل خط (در زاویه‌ی ۱۲۶ درجه در شکل ۳-الف) با ادامه افزایش اختلاف زاویه این خط مورب با تشکیل بیضی‌های متوالی، تشکیل یک دایره‌ای کوچک تر از دایره‌ای اولیه در حالت نامیزانی استاتیکی می‌دهد. با ادامه فرایند تغییر زاویه همین روند در جهت عکس و وارونه اتفاق می‌افتد، (شکل ۳-چ و ۳-ح). همچنین جدول ۱ نشان دهنده مشخصات نامیزانی‌های مورد استفاده در نامیزانی دینامیکی می‌باشد.



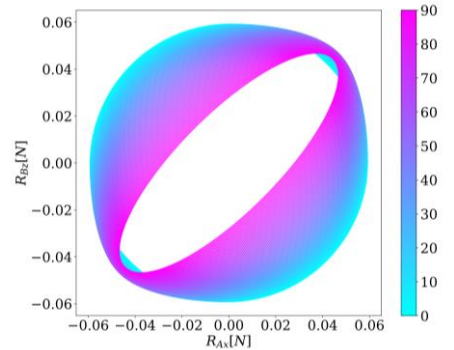
(ب)



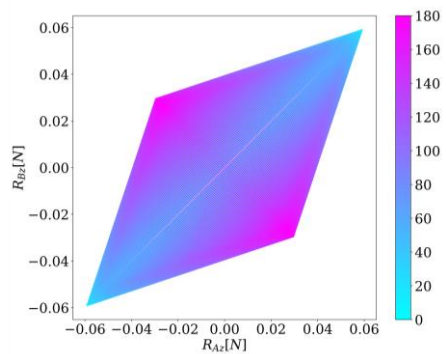
(الف)



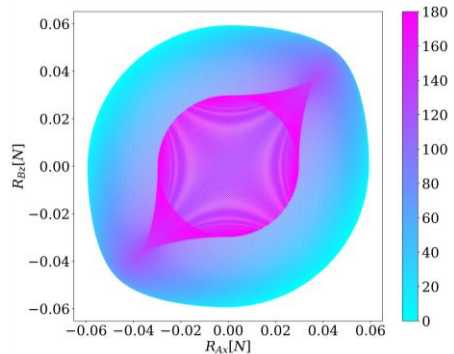
(ت)



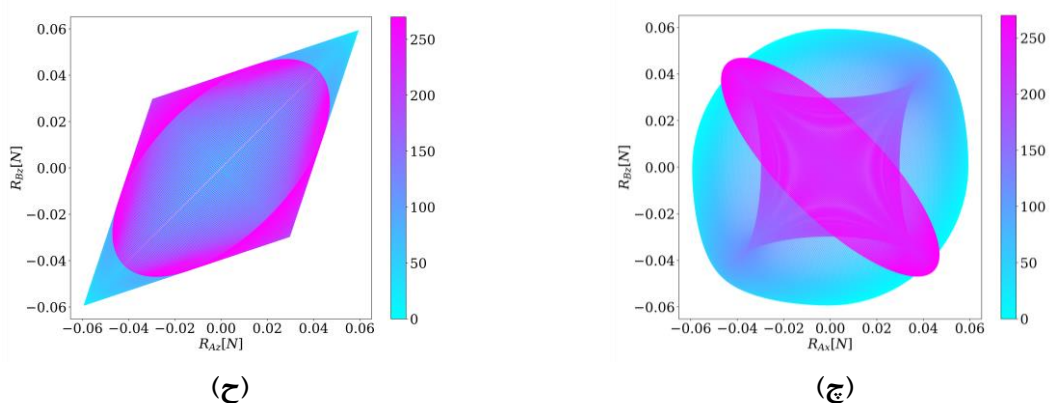
(پ)



(ج)



(ث)



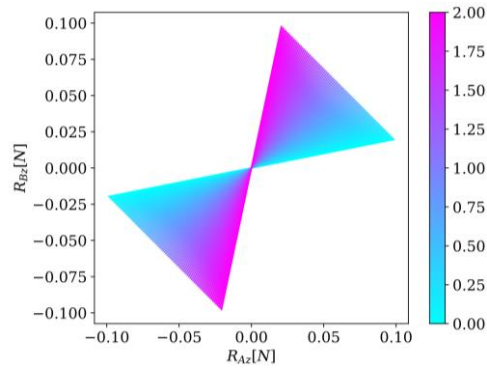
شکل ۳ الگوی نیروهای یاتاقانی آنبالانسی دینامیکی متقارن، با بررسی تغییر اختلاف زاویه نامیزانی‌ها بر حسب درجه با تغییر از: ۰ تا ۱۲۶ درجه برای الف) (R_{Ax} و R_{Bx} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۹۰ درجه برای پ) (R_{Ax} و R_{Bx} و ت) R_{Az} و R_{Bz} ، ۰ تا ۱۸۰ درجه برای ث) (R_{Ax} و R_{Bx} و ج) R_{Az} و R_{Bz} ، ۰ تا ۲۷۰ درجه برای چ) (R_{Ax} و R_{Bx} و ح) R_{Az} و R_{Bz}

جدول ۱- اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی نامیزانی‌های دینامیکی برای بررسی تاثیر اختلاف زاویه‌ی اجرام نامیزان

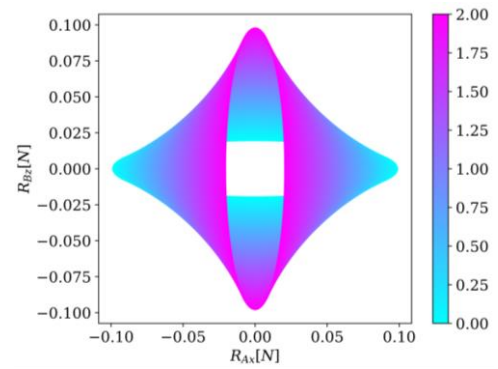
مقدار	مشخصات آنبالانسی
۰,۰۰۰۱	جرم‌ها (کیلوگرم)
۰,۱۵	شعاع (متر)
۲	اندازه‌ی شفت
۱۰	فرکانس (هرتز)
۰ تا ۳۶۰	بازه‌ی تغییرات اختلاف زاویه‌ی اجرام (درجه)
۱	فاصله مرکز تا یاتاقان‌ها (سانتی متر)

۳-۳- بررسی تاثیر تغییر فاصله‌ی دو نامیزانی در آنبالانسی دینامیکی غیر متقارن بر روی محور چرخان

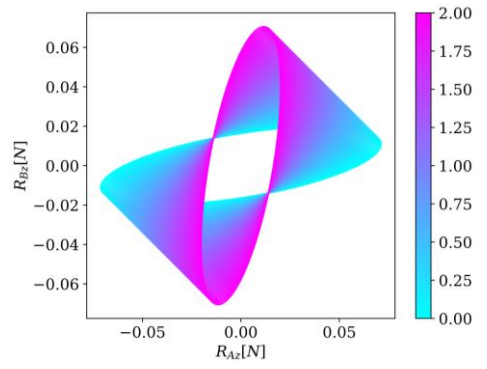
در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان در آنبالانسی دینامیکی متقارن بررسی می‌شوند. با بررسی شکل ۴ قسمت‌های الف تا ح نتیجه می‌شود که در سنسورهای هم-فاز با افزایش فاصله از روی یک یاتاقان تا یاتاقان دیگر شکل ترسیم شده خطی زاویه دار است که با حرکت مرکز نامیزانی‌ها به نسبت آن می‌چرخد. در سنسورهای ناهم-فاز نیز شکل ترسیم شده یک بیضی بوده که در حالت افقی قرار دارد که با تغییر فاصله در جهت پادساعتگرد می‌چرخد تا به حالت عمودی برسد. نکته قابل توجه در این شکل‌ها تاثیر اختلاف زاویه‌ی اجرام نامیزان است. با افزایش اختلاف زاویه در حالت سنسورهای همفاز، به میزان چرخش افزوده می‌شود. همچنین در این حین خط تبدیل به بیضی شده و با افزایش بیشتر اختلاف زاویه قطر کوچک این بیضی بزرگتر می‌شود. همچنین در سنسورهای غیر هم-فاز قطر کوچک بیضی اولیه با افزایش اختلاف فاز تا ۱۲۰ درجه کوچکتر و کوچکتر شده تا اینکه تبدیل به یک خط شود، (در اختلاف زاویه‌ی ۱۲۶ درجه این اتفاق می‌افتد). بعد از خط، دوباره قطر کوچک بیضی رشد می‌کند. لازم به ذکر است که در حین این روند میزان چرخش بیضی کمتر می‌شود. نکته‌ای قابل توجه در این اشکال، کوچکتر شدن قطر بزرگ بیضی و سپس بزرگ شدن آن حین تغییر فاصله در سنسورهای غیر همفاز است. جدول ۲ نشان‌دهنده مقادیر مورد استفاده در این قسمت است.



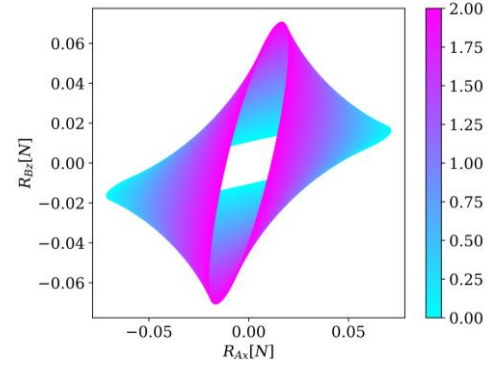
(ب)



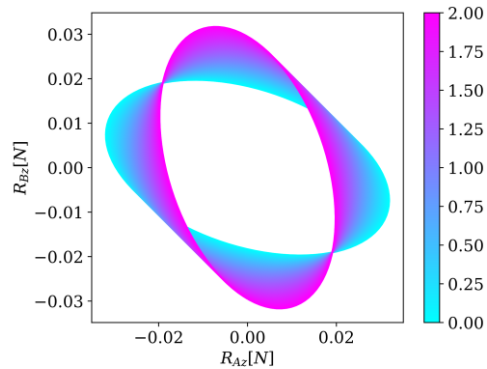
(الف)



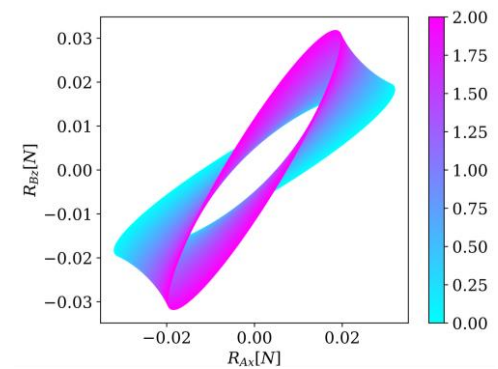
(ت)



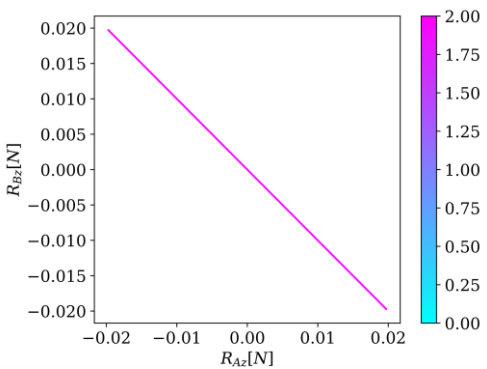
(پ)



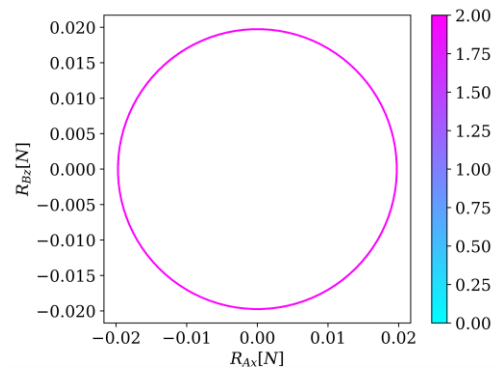
(ج)



(ث)



(ح)



(چ)

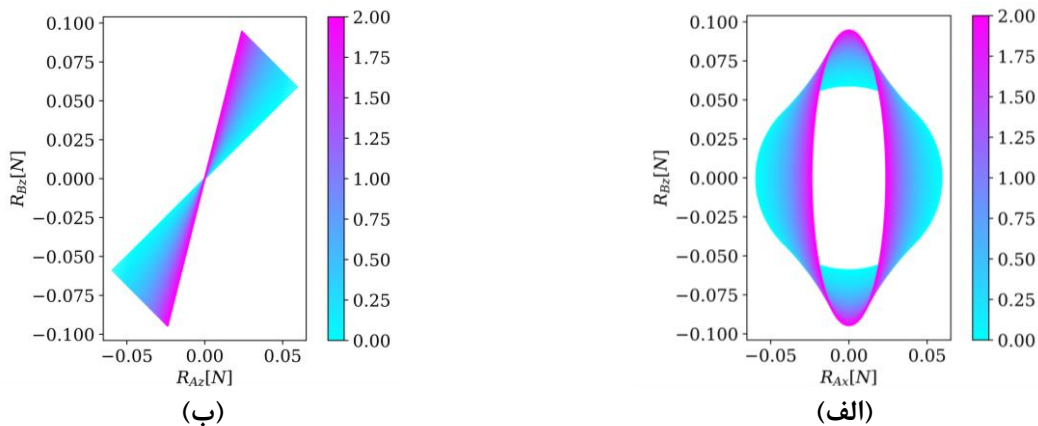
شکل ۴ الگوی نیروهای یاتاقانی آنبالانسی دینامیکی غیر متقارن، با بررسی تغییر فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان‌ها بر حسب متر با تغییر از ۰ تا ۲ متر با اختلاف زاویه‌های، ۰ درجه برای الف) R_{Ax} و R_{Bx} و R_{Bz} (ب) R_{Az} و R_{Bz} (ت) R_{Bz} و R_{Ax} و R_{Bx} (پ) ۹۰ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bx} و R_{Bz} (ج) R_{Az} و R_{Bz} (ث) R_{Ax} و R_{Bx} و R_{Bz} (ح) R_{Az} و R_{Bz} و R_{Ax} (چ) ۱۸۰ درجه برای چ) R_{Ax} و R_{Bx} و R_{Bz} و R_{Az} و R_{Bz}

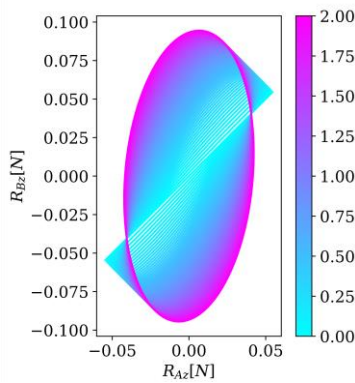
جدول ۲- اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی در نامیزانی‌های
دینامیکی غیرمتقارن برای بررسی تأثیر فاصله‌ی اجرام نامیزان از یاتاقان‌ها

مقدار	مشخصات آنبالانسی
۰,۰۰۰۱	جرم‌ها (کیلوگرم)
۰,۱۵	شعاع (متر)
۱۰	فرکانس (هرتز)
۰ تا ۲ متر	بازه‌ی تغییرات فاصله از یاتاقان
۲ متر	اندازه‌ی محور روتور

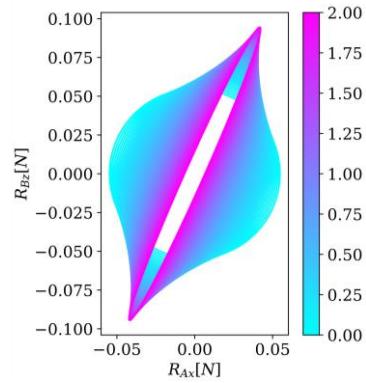
۳-۴- بررسی تأثیر تغییر فاصله‌ی بین دو جرم نامیزان در آنبالانسی متقارن بر روی محور چرخان

در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی فاصله‌ی بین دو نامیزانی از یاتاقان در آنبالانسی دینامیکی متقارن و در اختلاف زوایای متفاوت بررسی می‌شوند. شکل ۵-الف تا ۵-ح تأثیر فاصله‌ی بین دو جرم نامیزان را در آنبالانسی دینامیکی که یکی از پارامترهای دیگر مورد نیاز برای بالانس کردن یک روتور نامیزان است را در اختلاف زوایای گوناگون بررسی می‌کنند. شکل‌های ۵-الف و ۵-ب حالت بدون اختلاف زاویه را نشان داده که در آن، در حالت سنسورهای هم‌فاز، شکل ترسیم شده، یک خط بوده که تا حدی چرخش کرده و اندازه آن نیز بزرگ تر می‌شود. در حالت سنسورهای نا-هم‌فاز شکل اولیه یک دایره بوده که با افزایش فاصله بین دو نامیزانی این دایره در حالت عمودی شروع به تبدیل شدن به یک بیضی می‌کند. با افزایش اختلاف زاویه بین جرم‌ها و تکرار روند قبلی، در حالت سنسورهای هم‌فاز، شکل اولیه همچنان خط بوده و چرخش می‌کند اما در حین چرخش از حالت خط به یک بیضی تبدیل می‌شود و هر چه اختلاف زاویه‌ی بین دو جرم بیشتر باشد زاویه چرخش و قطر بزرگ بیضی بیشتر شده و در ابتدای افزایش اختلاف زاویه، قطر کوچک بیضی رشدی ناگهانی خواهد داشت. در نهایت با افزایش اختلاف زاویه بین دو جرم، قطر بزرگ بیضی رشد کرده ولی قطر کوچک بیضی کاهش می‌یابد تا به یک خطی مورب تبدیل شود که در این حالت، چرخشی به دلیل ناچیز بودن نیروها دیده نمی‌شود. در حالت سنسورهای غیر هم‌فاز نیز، تأثیر اختلاف زاویه سبب کمتر شدن چرخش بیضی‌ها و کوچکتر شدن دایره‌ی اولیه شده که در نهایت کاملاً زیر بیضی‌های ثانویه قرار می‌گیرد. جدول ۳ نشان دهنده‌ی اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در این قسمت می‌باشد.

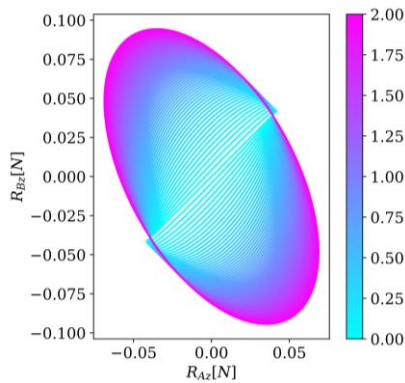




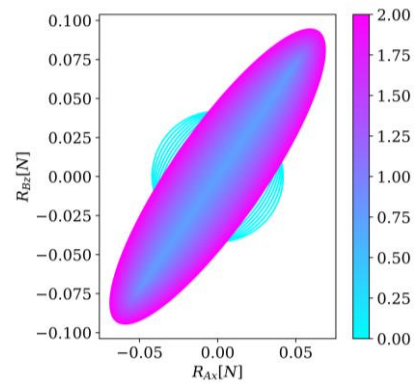
(ت)



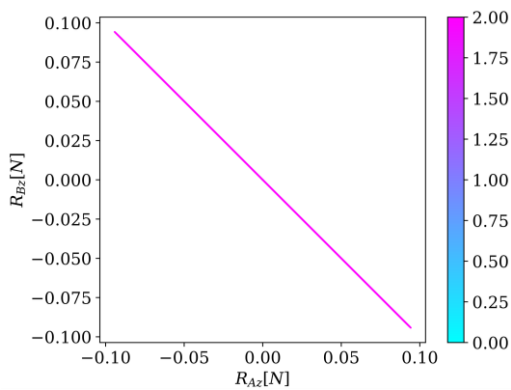
(پ)



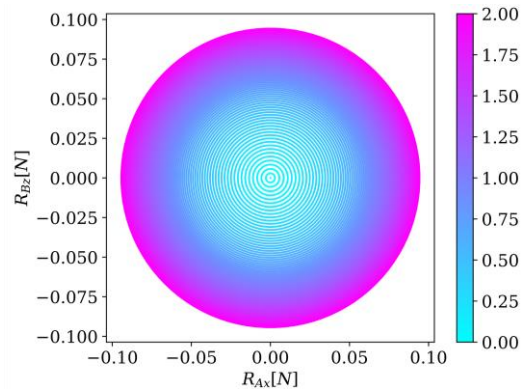
(ج)



(ث)



(ح)



(چ)

شکل ۵ الگوی نیروهای باتاقانی آنبالانسی دینامیکی متقارن، با بررسی تغییر فاصله‌ی نامیزانی‌ها از باتاقان‌ها بر حسب متر با تغییر از مرکز شفت تا روی باتاقان‌ها به اندازه ۰ تا ۲ متر با اختلاف زاویه‌ی ۰ درجه برای الف) R_{Ax} و R_{Bx} و ب) R_{Bz} و R_{Az} ، ۴۵ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bx} و ت) R_{Bz} و R_{Az} ، ۹۰ درجه برای ث) R_{Ax} و R_{Bx} و ج) R_{Bz} و R_{Az} ، ۱۸۰ درجه برای چ) R_{Ax} و R_{Bx} و ح) R_{Bz} و R_{Az}

جدول ۳- اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای باتاقانی در

نامیزانی‌های دینامیکی متقارن برای بررسی تأثیر فاصله‌ی بین اجرام نامیزان

مقدار	مشخصات آنبالانسی
۰,۰۰۰۱	جرم‌ها (کیلوگرم)
۰,۱۵	شعاع (متر)
۱۰	فرکانس (هرتز)
۰ تا ۱ متر	بازه‌ی تغییرات فاصله از باتاقان
۲ متر	اندازه‌ی محور روتور
۰ تا ۲ متر	بازه‌ی تغییرات فاصله از جرم دیگر

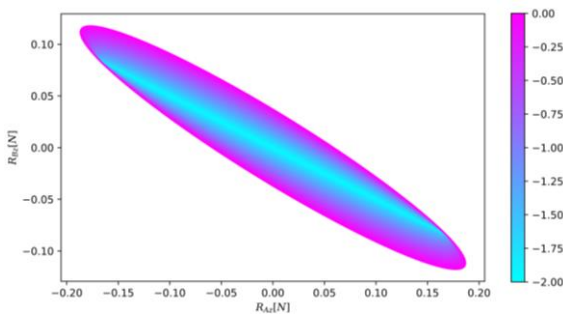
۳-۵- بررسی تاثیر فاصله ی بین دو جرم نامیزان در آنبالانسی دینامیکی روتور اورهانگ

در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی تأثیر فاصله در آنبالانسی دینامیکی روتور اورهانگ، مطابق شکل ۶ تحلیل و بررسی شده که مقادیر موجود در جدول ۴ برای تشکیل آنها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با افزایش اختلاف زاویه در شکل ۶-ب در حالت ابتدایی یک خطی مورب مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف فاصله بین دو جرم نامیزان و ثابت ماندن فاصله‌ی مرکز نامیزانی ها از یاتاقان، این خط مورب به یک بیضی تبدیل شده و چرخش محسوسی نیز در آن مشاهده می‌شود. همچنین در سنسورهای ناهم‌فاز نیز در ابتدا یک بیضی در حالت افقی قرار گرفته و با ادامه روند، اندازه‌ی بیضی بزرگتر شده و چرخشی محسوس همچنان مشاهده می‌شود. در بررسی افزایش اختلاف فاز در این حالت بازه‌ی تغییرات بیضی با مقادیر بیشتری مواجه می‌شود.

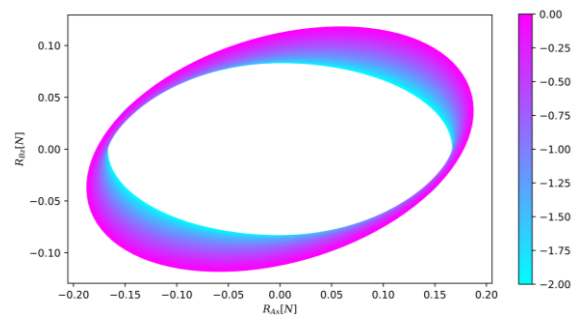
جدول ۴- اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی در نامیزانی‌های

دینامیکی برای بررسی تاثیر فاصله‌ی اجرام نامیزان از یکدیگر در روتور اورهانگ

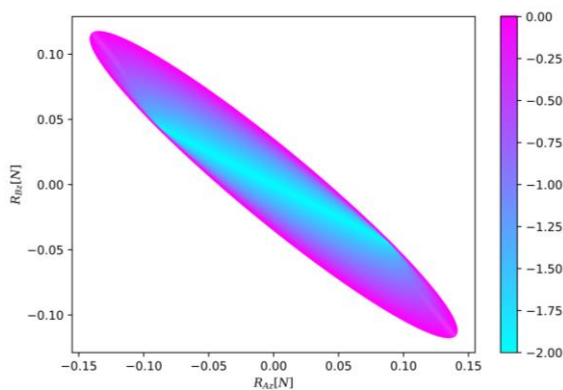
مقدار	مشخصات آنبالانسی
۰,۰۰۰۱	جرم (کیلوگرم)
۰,۱۵	شعاع (متر)
۱۰	فرکانس (هرتز)
۲ متر	اندازه‌ی محور روتور
۰ تا ۲ متر	بازه‌ی تغییرات فاصله‌ی دو جرم



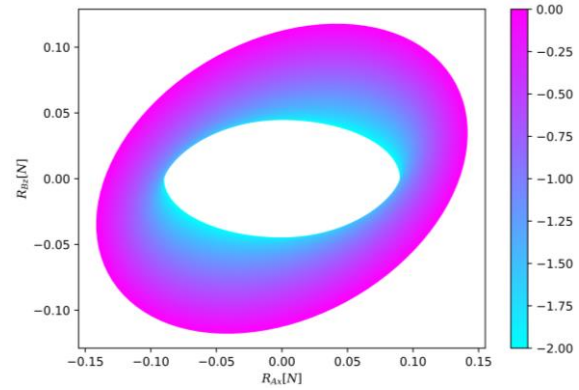
(ب)



(الف)



(ت)



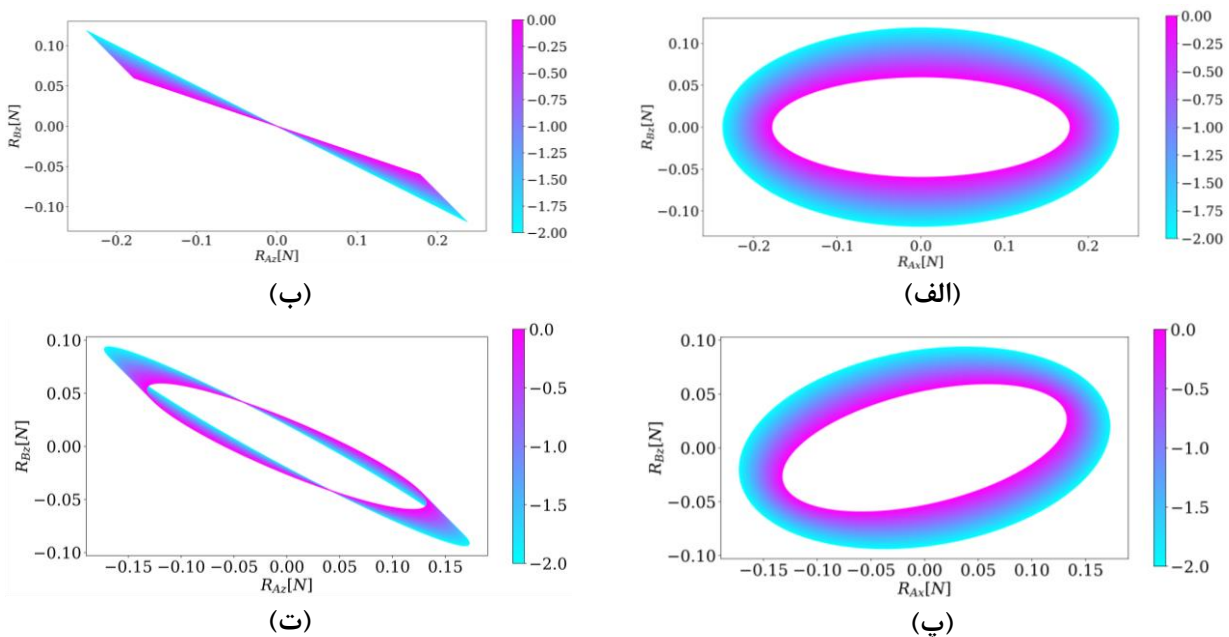
(پ)

شکل ۶ الگوی نیروهای یاتاقانی آنبالانسی دینامیکی متقارن بر روی روتور اورهانگ با اختلاف زاویه‌ی ۹۰ و ۱۳۵ درجه، با بررسی تغییر فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان‌ها بر حسب متر با تغییر مرکز آنبالانسی از خارج شفت تا قرار گیری یک نامیزانی روی یاتاقان و فاصله گرفتن نامیزانی دیگر از یاتاقان. میزان جابجایی هر نامیزانی: ۰ تا ۲ متر، ۹۰ درجه در الف) و R_{Ax} و R_{Bx} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۱۳۵ درجه در پ) و R_{Ax} و R_{Bx} و ت)

$$R_{Az} \text{ و } R_{Bz}$$

۳-۶- بررسی تاثیر فاصله ی مرکز دو جرم نامیزان در آنبالانسی دینامیکی روتور اورهانگ

در این قسمت، الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز آنبالانسی دینامیکی روتور اورهانگ تحلیل شده و شکل ۷ برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز آنبالانسی دینامیکی از یاتاقان در روتور اورهانگ در زوایای مختلف بررسی شده است که توسط مقادیر موجود در جدول ۵ بدست آمده اند. در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب که این تغییرات را در اختلاف زاویه‌ی ۰ درجه نشان می‌دهد، در حالت سنسورهای هم‌فاز ابتدا خطی مورب مشاهده شده که با نزدیک شدن مرکز آنبالانسی به یاتاقان در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت حرکت کرده و همچنین اندازه خط نیز کاهش می‌یابد. همچنین در حالت سنسورهای غیر هم-فاز در حالت ابتدایی بیضی در حالت افقی شکل گرفته، که در ادامه روند از قطر و اندازه آن کاسته می‌شود. با افزایش اختلاف فاز بین دو جرم در حالت سنسورهای نصب شده در حالت هم-فاز، خط مورب اولیه به بیضی با نسبت قطر بالا تبدیل می‌شود. همچنین در حالت سنسورهای نصب شده در حالت غیر هم-فاز، تغییر محسوس در چرخش بیضی‌ها مشاهده می‌شود. این تغییرات تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت شکل پایانی سنسورهای هم‌فاز به خط مورب و سنسورهای غیر هم-فاز به دایره تبدیل می‌شوند.



شکل ۷ الگوی نیروهای یاتاقانی آنبالانسی دینامیکی متقارن بر روی روتور اورهانگ با اختلاف زاویه‌ی ۰ و ۹۰ درجه، با بررسی تغییر فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان‌ها بر حسب متر با تغییر مرکز آنبالانسی از خارج شفت تا قرار گیری یک نامیزانی روی یاتاقان و در عین حال نزدیک شدن نامیزانی دیگر به یاتاقان با حفظ فاصله بین دو نامیزانی. میزان جابجایی هر نامیزانی: ۰ تا ۲ متر، ۰ درجه در الف) R_{Ax} و R_{Bx} و ب)

R_{Az} و R_{Bz} ، ۹۰ درجه در پ) R_{Ax} و R_{Bx} و ت) R_{Az} و R_{Bz}

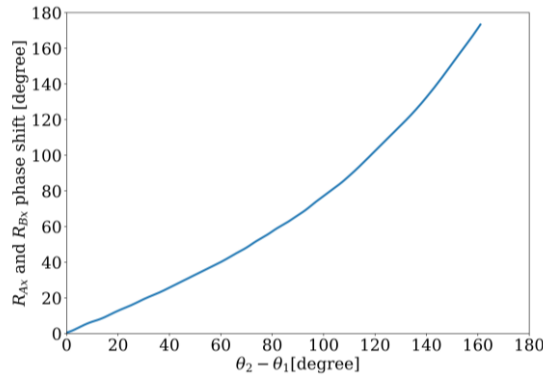
جدول ۵- اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی در نامیزانی‌های

دینامیکی برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز اجرام نامیزان در روتور اورهانگ

مقدار	مشخصات آنبالانسی
۰,۰۰۰۱	جرم (کیلوگرم)
۰,۱۵	شعاع (متر)
۱۰	فرکانس (هرتز)
۲ متر	اندازه‌ی محور روتور
۰ تا ۲ متر	بازه‌ی تغییرات فاصله‌ی دو جرم

۳-۷- بررسی نسبت تغییر فاز دو سیگنال R_{Ax} و R_{Bx} به اختلاف زاویه ی دو جرم آنبالانس در حالت دینامیکی متقارن

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، با در نظر گرفتن حالتی از آنبالانسی دینامیکی که تنها دو جرم آنبالانسی متقارن روی شفت قرار دارد، با تغییر دادن زاویه آنبالانسی از صفر تا ۱۸۰ مشخص می شود که اختلاف سیگنال های ارتعاشاتی نیز بیشتر می شود. اما نکته قابل توجه رابطه ی این تغییرات است که به صورت خطی نمی باشد، و رابطه ای به صورت غیر خطی را تشکیل می دهد.



شکل ۸ نمودار اختلاف فاز دو سیگنال R_{Ax} و R_{Bx} بر حسب اختلاف زاویه نامیزانی ها در آنبالانسی دینامیکی

۴-۲- بالانس کردن روتور نامیزان

۴-۱- روش حل

می توان تمام نیروهای ایجاد شده توسط جرم های آنبالانس بر روی روتور را معادل یک کوپل و نیرو بر روی مرکز شفت در نظر گرفت که باهم اختلاف زاویه ای دارند، این اختلاف زاویه به صورت رابطه ی (۱۰) بدست می آید.

$$\theta_d = \theta_F - \theta_M = \frac{\left(\frac{m_1 r_1 w^2 \sin \theta_1 + m_2 r_2 w^2 \sin \theta_2}{m_1 r_1 w^2 \cos \theta_1 + m_2 r_2 w^2 \cos \theta_2} \right) - \left(- \frac{m_1 r_1 w^2 \cos \theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2} \right) + m_2 r_2 w^2 \cos \theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2} \right)}{m_1 r_1 w^2 \sin \theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2} \right) + m_2 r_2 w^2 \sin \theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2} \right)} \right)}{1 + \left(\frac{m_1 r_1 w^2 \sin \theta_1 + m_2 r_2 w^2 \sin \theta_2}{m_1 r_1 w^2 \cos \theta_1 + m_2 r_2 w^2 \cos \theta_2} \right) \left(- \frac{m_1 r_1 w^2 \cos \theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2} \right) + m_2 r_2 w^2 \cos \theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2} \right)}{m_1 r_1 w^2 \sin \theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2} \right) + m_2 r_2 w^2 \sin \theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2} \right)} \right)} \quad (10)$$

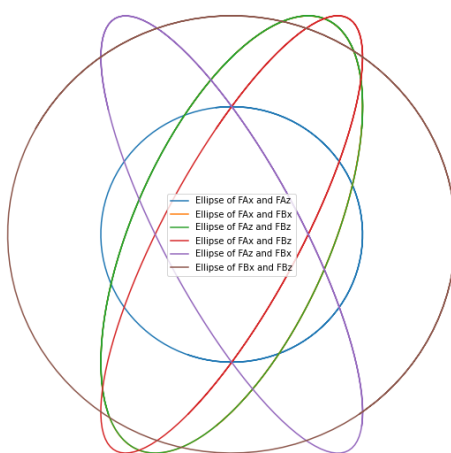
که در آن θ_F زاویه ی نیروی معادل، θ_M زاویه ی کوپل معادل و θ_d اختلاف زاویه نیروی معادل و کوپل معادل در روتور می باشد. به دلیل غیر خطی بودن مجهول بالا و همچنین عدم قابلیت استفاده از حل عددی، از شبکه عصبی استفاده شد.

۴-۲- داده ها برای آموزش شبکه عصبی

طبق یکی از اصل های تحلیل دینامیک روتور، برای یک روتور صلب با شرایط آنبالانسی، تمامی حالات آنبالانسی دینامیکی که کلی ترین نوع آنبالانسی است را می توان با دو جرم نامیزان شبیه سازی کرد. بنابراین با در نظر گرفتن دو جرم نامیزان و فرض اندازه گیری سرعت روتور با سنسور تاکومتر، تعداد پارامتر های مورد نیاز به ۸ پارامتر رسیده که شامل جرم، شعاع، زاویه و فاصله از یاتاقان ها، برای هر دو جرم می باشند. واضح است تعداد پارامتر های مورد نیاز از تعداد معلومات مسأله که با نصب چهار عدد سنسور نشان دهنده ی شتاب محل نصب بدست می آیند، بیشتر بوده، که این خود عدم امکان حل مسأله به صورت دقیق و محاسبات دینامیکی را تأیید می کند. هدف در این قسمت از پروژه، استفاده از شبکه های عصبی برای تخمین پارامتر های آنبالانسی می باشد. بنابراین، نوع داده های خروجی مسأله از نوع عددی می باشد. همچنین، ابعاد داده ی ورودی چهار و ترکیبی از داده های خروجی از چهار سنسور و بر حسب زمان بوده و ابعاد داده ی خروجی برابر با ۸ می باشد. این داده ها توسط الگوریتم طراحی شده استخراج و مورد استفاده قرار خواهند گرفت. همانطور که اشاره شد داده های خروجی برای یک نمونه از آنبالانسی دینامیکی، ۸ پارامتر را در بر می گیرد. اما نکته ای که در

این مقطع باید مورد توجه بگیرد، اطلاعات ذخیره شده و صراحتاً تعداد معلومات نهفته در داده‌های ورودی است. طبیعتاً با افزایش تعداد سنسور ها از ۴ به ۶ تعداد معلومات در زمان ثابت به ۶ افزایش پیدا نخواهد کرد. نکته‌ای دیگر در ابعاد داده‌های ورودی، بعد زمانی آن است. چگونگی گنجاندن حجم عظیمی از داده‌های ورودی در لایه‌ی ورودی شبکه معضلی دیگر است؛ یکی از آن جهت که تعداد داده‌های ورودی متناسب با سرعت چرخش روتور و مدت زمان نمونه‌برداری متفاوت است و دیگری بزرگ بودن بیش از حد تعداد داده‌های ورودی بوده که سبب می‌شود شبکه‌عصبی تشکیل داده شده پردازش‌های بسیار سنگین تری را هنگام یادگیری انجام دهد. از طرفی دیگر، بزرگتر بودن ابعاد داده‌های ورودی مدت زمان همگرا شدن پارامترهای شبکه را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر قطعاً، این حجم از داده عملاً مشکل‌آفرین بوده و باید پارامترهای معنی دار و موثر را از داخل آنها استخراج نمود.

با فرض داشتن چهار سنسور نصب شده روی روتور داده‌های خروجی سنسور ها شامل سری F_{Ax} ، F_{Az} ، F_{Bx} و F_{Bz} است. در ادامه نمونه‌ای از این داده‌ها با فرض ناچیز بودن شتاب زاویه‌ای روتور که فرضی منطقی نسبت به نمونه‌های واقعی آنبالانسی است، نسبت به یکدیگر در شکل ۹ رسم می‌شود.



شکل ۹ شماتیک بیضی‌های استخراج شده از چهار سنسور شتابسنج

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، شماتیک این داده‌ها نشان می‌دهد که ساختار اصلی این نمودارها بیضی می‌باشد. لذا استخراج متغیرهای بیضی از سیگنال‌های ورودی بر حسب یکدیگر ایده‌ای مناسب به نظر می‌رسد. این شکل نشان می‌دهد هر بیضی از سه پارامتر تشکیل شده که **فواصل مرکز از انتهای محور بزرگ و کوچک** و همچنین **زاویه‌ی بیضی با محور افقی** از جمله متغیرهای بیضی هستند که با داشتن آنها شرط یکتا بودن بیضی ارضاء می‌شود. در نتیجه با تشکیل هر بیضی سه پارامتر استخراج می‌گردد. استخراج این پارامترها توسط الگوریتمی از طریق نمودارهای رسم شده بیضی صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که با وجود اینکه هر بیضی که سه پارامتر را از خود نشان می‌دهد از داده‌های خروجی دو سنسور شتابسنج تشکیل شده است، اما باید در نظر گرفت که بیضی‌ها از داده‌هایی که به صورت سری‌های زمانی است تشکیل شده‌اند و بُعد زمان را نباید نادیده گرفت. نکته‌ای دیگر که باید مورد توجه قرار بگیرد تعداد متغیرها و داده‌های مفهومی و موثر ذاتی پارامترهای بیضی است. از چهار سنسور نصب شده روی روتور می‌توان ۶ بیضی یکتا رسم کرد، که به عبارتی ۱۸ پارامتر متفاوت در آنها نهفته است.

۴-۳- پردازش داده‌ها و کاهش تعداد سنسورها

برای بررسی اطلاعات موجود در متغیرهای هر بیضی در مقایسه با سایر بیضی‌ها راهکارهای متفاوتی وجود دارد. یکی از این راهکارها مقایسه اطلاعات موجود در یک بیضی با سایر بیضی‌های قابل تشکیل بوده، که از راه‌های مختلفی امکان پذیر است. به این منظور، از یک شبکه عصبی سطحی (Shallow Neural Network) بهره برده شده است. منطق عملکرد به صورتی است که اطلاعات بدست آمده از یک بیضی را به عنوان ورودی به شبکه تغذیه کرده و از طرفی دیگر هدف، تخمین اطلاعات بیضی‌های دیگر است. بنابراین شبکه‌ای با ۲ لایه‌ی پنهان هرکدام در ابعاد ۳۰۰ نورون و ابعاد لایه‌ی ورودی ۳ و لایه‌ی خروجی ۱۵ مورد استفاده قرار گرفت.

این شبکه با اطلاعات یک بیضی پیشبینی متغیرهای هر ۵ بیضی دیگر را ممکن کرد. و یا به عبارت دیگر اطلاعات موجود در یک بیضی به گونه ای است که ما را از داشتن اطلاعات دیگر بیضی ها بی نیاز میکند. همانطور که ذکر شد، یک بیضی از داده های دو سنسور شتابسنج تشکیل شده است. یعنی طبق برآورد فوق الذکر، اطلاعات و متغیرهای ذخیره شده در داده های دو سنسور، تمامی اطلاعات موجود در هر چهار سنسور را پوشش می دهد و در نتیجه به جای استفاده از چهار سنسور در یک سیستم چرخان با روتور صلب، با کاهش تعداد سنسورهای نصب شده از چهار به دو، در وقت و هزینه صرفه جویی خواهد شد و از پیچیدگی فرایند تعمیر و نگهداری کاسته می شود.

شبکه های عصبی می توانند دستگاه معادلاتی را حل نمایند که حل دستگاه در شرایط عادی، تقریباً غیرممکن است. احتمال تقلیل تعداد سنسورها در یکی از کارهای پژوهشی [۲۳] با استفاده از پردازش سیگنال و ریاضیات پیشرفته داده شده بود. اما با استفاده از شبکه های عصبی ثابت شد که اطلاعات نهفته در سایر بیضی ها در یک بیضی وجود دارد و به عبارت دیگر با استفاده از ۶ بیضی به جای ۱ بیضی تنها بار محاسباتی شبکه بیشتر خواهد شد و در نتیجه کار تأثیری نخواهد داشت.

۴-۴- بهره گیری از شبکه عصبی برای تشخیص پارامترهای نامیزانی

پس از جمع آوری داده ها و استخراج پارامترهای یکی از بیضی ها (بیضی ترسیم شده از A_x و B_z) برای استفاده از شبکه باید داده ها نرمالیزه شوند. پس از نرمالیزه شدن بایستی معماری شبکه مناسب انتخاب شود. تعداد لایه های پنهان و نورون های موجود در هر لایه از جمله متغیرهای شبکه هستند که باید تعیین شوند. برای این کار چندین شبکه را اجرا کرده و در نهایت بهترین آنها از لحاظ سرعت عملکرد و نتیجه ی نهایی انتخاب خواهد شد. پس از آزمون و خطاهای متوالی، شبکه ای که در مقایسه با سایر شبکه ها عملکرد بهتری داشت، دارای ۳ لایه پنهان که هر کدام شامل ۴۰۰ نورون بوده، و در حالت اتصال کامل (Fully Connected) است. تابع خطا جذر متوسط مربع (RMS)، تابع فعالسازی برای لایه های پنهان به صورت واحد یکسو شده ی خطی (ReLU) و برای لایه خروجی به صورت خطی (Linear) در نظر گرفته شد.

ابعاد داده های ورودی ۴ بوده که شامل ۳ متغیر بیضی و یک متغیر نیز سرعت روتور است در حالیکه داده های خروجی شامل ۸ پارامتر است. به طور کلی در یادگیری عمیق هرچه تعداد مجهولات کمتر باشد تخمین دقیق تری حاصل می شود. در این حالت تعداد خواسته ها دو برابر تعداد داده های سیستم بوده بنابراین این دقت خروجی با حدود ۵۰۰۰۰ داده ی تولید شده توسط الگوریتم دینامیک برابر با ۰,۴۱ به صورت میانگین برای تمام متغیرها می باشد. دستیابی چنین نتیجه ای دور از ذهن نیست و دلیل آن، همپوشانی خروجی های مسئله با یکدیگر است.

۴-۵- بهبود شبکه عصبی و بررسی همپوشانی ها

با توجه به اینکه برای تولید داده های مسئله از شتاب زاویه ای صرف نظر شد، نقش جرم و شعاع نامیزانی ها با هم برابر است. به عبارت دیگر، تنها افزایش یا کاهش ضرب این دو متغیر در جواب نهایی مسئله تأثیر می گذارد. همچنین برای بالانس کردن یک روتور نامیزان تأثیر افزایش جرم با تأثیر افزایش شعاع قرارگیری جرم یکسان خواهد بود. در مکتوبات علمی، پارامتری تحت عنوان مقدار نامیزانی تعریف شده است (رابطه ی ۱۱).

$$U \triangleq M \cdot e \quad (11)$$

که در معادله ۱۱، U مقدار نامیزانی، M جرم نامیزانی و e شعاع نامیزانی می باشد. بنابراین برای کاهش تعداد متغیرهای خروجی، حاصل ضرب جرم و شعاع نامیزانی ها مد نظر قرار داده می شود. همچنین برای بالانس کردن یک روتور نامیزان، اختلاف زاویه محل قرارگیری جرم ها مورد نیاز است. بنابراین به جای استفاده از زاویه دو جرم نامیزان، از اختلاف زاویه بین آن دو بهره برده می شود. تا این مرحله، تعداد پارامترهای خروجی تا ۵ کاهش یافت در صورتی که باید توجه شود تعداد ورودی های مسئله ۴ است. متغیرهای اصلاح نشده، فواصل جرمها از یاتاقانها بوده، که چون فرمولی مشخص برای رابطه ی آنها با متغیرهای ورودی در دسترس نیست، از

ساده سازی بیشتر صرف نظر می شود. در نتیجه با استفاده از یک معماری مشابه با شبکه ی پیشین و تغییر تعداد نورون های خروجی به ۵، شبکه آموزش داده می شود.

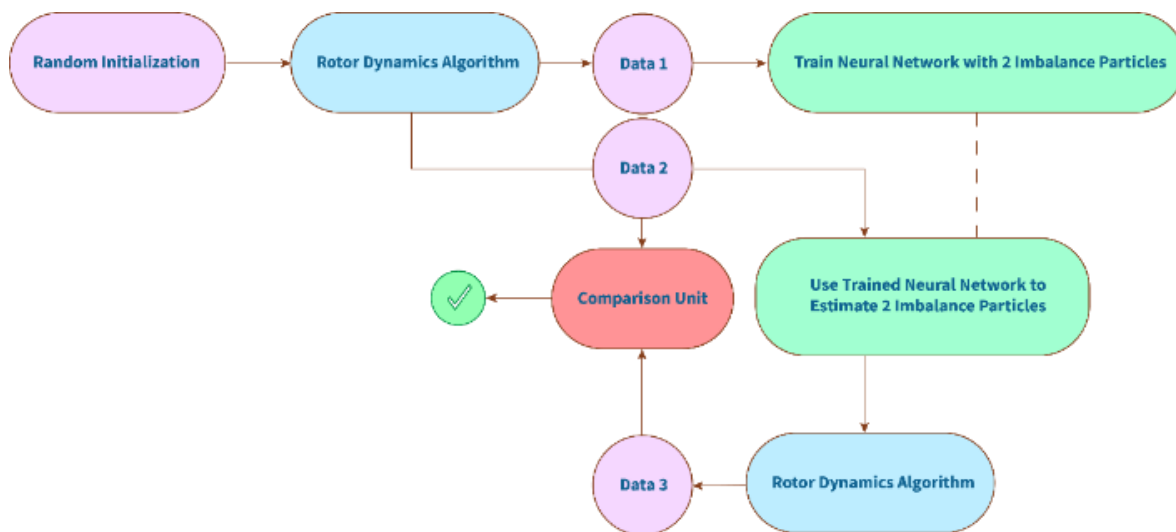
بعد از اعمال تغییرات، دقت نهایی شبکه تا حد قابل قبولی بالا رفت (جذر میانگین مربعات به طور میانگین برای متغیرها به ۰,۲۱ رسید). شبکه طراحی شده با دقت مهندسی مناسبی قادر به تخمین متغیرهای نامیزانی است. دلیل اصلی خطای موجود در نتیجه نهایی شبکه نیز همانطور که در پیش ذکر شد، ماهیت همپوشانی پاسخ ها، به خصوص در پارامترهای فاصله نامیزانی ها از یاتاقان هاست. لازم به ذکر است که کاربرد شبکه های عصبی در محاسبه و تخمین داده های خروجی به کمک داده های ورودی است، که در این فعالیت داده های ورودی ماهیتی نیرویی دارند، که خود توسط الگوریتم دینامیک با مقداردهی پارامترهای نامیزانی بدست آمده اند. بنابراین برای بررسی بهتر، دقیق تر و منطقی تر عملکرد شبکه، به جای مقایسه خروجی ها با پاسخ های محدود که با هم همپوشانی دارند، و توجه به این اصل که یک بیضی خود بینهایت پاسخ را در بر می گیرد، بهتر است که برای ارزیابی خروجی شبکه، معادل نیرویی آنها مد نظر قرار داده شود.

۴-۶- بررسی صحت عملکرد شبکه در تشخیص پارامترها

برای بررسی دقیق تر با توجه به چند جوابی بودن و همپوشانی متغیرهای نامیزانی، باید خروجی شبکه را مورد تحلیل قرار داد. به این منظور خروجی شبکه اول که در آن تمامی متغیرهای آنبالانسی بدست آمده اند، به عنوان داده های اولیه به الگوریتم دینامیکی معرفی کرده و در نهایت پارامترهای نیرویی و بیضی جدید بدست می آیند. با مقایسه این پارامترها با پارامترهای اولیه وارد شده به شبکه، دقت شبکه در تحلیل متغیرهای مورد نیاز برای بالانس کردن روتور محاسبه می شوند. در این حالت خطای شبکه برای ارائه ی متغیرهای نامیزانی به ۱,۲ درصد می رسد که به طور قابل توجهی بیانگر عملکرد صحیح شبکه در تخمین پارامترهای نامیزانی و کمک به بالانس کردن شبکه است. در جدول ۶ مقادیر خطاهای جذر متوسط مربع شبکه را برای داده های مختلف می توان مشاهده کرد. این مقادیر صحت عملکرد شبکه در تشخیص پارامترهای نامیزانی را نشان می دهند. شکل ۱۰ نمایان گر اصول عملکرد شبکه برای تشخیص متغیرها می باشد.

جدول ۶- مقادیر خطاهای جذر متوسط مربع شبکه ی عصبی مورد استفاده در بالانس کردن نامیزانی ها

Parameters	Angle (degree)	b [N]	a [N]
RMSE	5.56	1.47	0.57



شکل ۱۰ شماتیک اصول عملکرد شبکه عصبی عمیق برای بالانس روتور و نحوه ی صحت سنجی داده ها

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به صحنه‌گذاری و بازساخت الگوهای نیرویی روتورها، و طراحی شبکه‌ی عصبی جهت تشخیص مشخصات جرم‌ها و کمک به بالانس کردن روتور پرداخته شد. برای این منظور، مفروضات روتور صلب به همراه یاتاقان‌های صلب مدل‌سازی شد و نیروهای یاتاقانی در چهار سنسور استخراج گردید. با بهره‌گیری از این معادلات، به صحنه‌گذاری اصول دینامیکی روتور صلب، استخراج مجموعه-ای از الگوهای نیرویی یاتاقانی و داده‌های نیرویی برای شبکه‌ی عصبی پرداخته شد. مهندسان تعمیر و نگهداری، با استفاده از بازساخت الگوهای نیرویی یاتاقانی و در نظر گرفتن همپوشانی متغیرهای دینامیکی روتور، می‌توانند به بالانس کردن روتور نامیزان بپردازند. همچنین با بهره‌گیری از شبکه‌ی عصبی، استفاده از تنها دو سنسور شتابسنج در دو انتهای روتور ممکن شد. همچنین شبکه-ی عصبی امکان بالانس کردن روتور را با مشخصات مورد نظر با استفاده از دو جرم و همچنین شخصی سازی اطلاعات مورد نیاز برای بالانس کردن روتور را فراهم ساخت.

۶- فهرست علائم و نشانه‌ها

ρ_n	فاصله یاتاقان A تا دیسک شماره n
l_B	فاصله دو یاتاقان روتور از هم
\underline{F}_i	نیروی وارده توسط هر ذره آنیالانسی به محور دوران
\underline{G}	تکانه خطی هر ذره آنیالانسی
m_i	جرم هر ذره آنیالانسی
$\underline{\theta}$	سرعت زاویه‌ای هر ذره نامیزان
\underline{V}	سرعت هر ذره نامیزان
r_j	شعاع هر ذره نامیزان
θ	زاویه روتور نسبت به محور X
θ_i	زاویه هر ذره نسبت به محور X
θ_{i0}	زاویه اولیه هر ذره نسبت به محور X
$\underline{\tau}$	گشتاور ورودی موتور
\underline{d}_i	فاصله هر ذره تا یاتاقان A
m_j	جرم هر دیسک
\underline{g}	شتاب گرانشی
\underline{R}_A	نیروی وارد شده به یاتاقان A
\underline{R}_B	نیروی وارد شده به یاتاقان B
l_B	فاصله دو سر محور
θ_F	زاویه‌ی نیروی معادل
θ_M	زاویه‌ی کوپل معادل
θ_d	اختلاف زاویه‌ی نیروی معادل و کوپل معادل

مراجع

- [1] Scheffer C, Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier; 2004 Jul 16.
- [2] Adams ML. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting. CRC Press; 2000 Oct 24.
- [3] Correa JC, Guzman AA. Mechanical Vibrations and Condition Monitoring. Academic Press; 2020 Mar 1.
- [4] Randall RB. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications John Wiley & Sons [Google Scholar].

- [5] Mey O, Neudeck W, Schneider A, Enge-Rosenblatt O. Machine learning-based unbalance detection of a rotating shaft using vibration data. In 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2020 Sep 8 (Vol. 1, pp. 1610-1617). IEEE.
- [6] Gohari M, Kord A. Unbalance rotor parameters detection based on artificial neural network. *Int J Acoust Vib*. 2019 Mar 1;24(1):113-8.
- [7] Rodrigues CE, Júnior CL, Rade DA. Machine Learning Techniques for Fault Diagnosis of Rotating Machines Using Spectrum Image of Vibration Orbits. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA 2020 Dec 8 (Vol. 2, No. 1)*.
- [8] Yadav HK, Upadhyay SH, Harsha SP. Study of effect of unbalanced forces for high speed rotor. *Procedia Engineering*. 2013 Jan 1;64:593-602.
- [9] Choudhury T, Viitala R, Kurvinen E, Viitala R, Sopanen J. Unbalance Estimation for a Large Flexible Rotor Using Force and Displacement Minimization. *Machines*. 2020 Sep;8(3):39.
- [10] Kumar P, Tiwari R. Dynamic analysis and identification of unbalance and misalignment in a rigid rotor with two offset discs levitated by active magnetic bearings: a novel trial misalignment approach. *Propulsion and Power Research*. 2021 Mar 1;10(1):58-82.
- [11] Adiletta G, Guido AR, Rossi C. Nonlinear dynamics of a rigid unbalanced rotor in journal bearings. Part I: theoretical analysis. *Nonlinear Dynamics*. 1997 Sep;14(1):57-87.
- [12] Fedák V, Záskalický P, Gelvanič Z. Analysis of balancing of unbalanced rotors and long shafts using GUI MATLAB. In *MATLAB Applications for the Practical Engineer 2014 Sep 8*. IntechOpen.
- [13] Wang SH, Guo W, Xu XY, Liu YF, Li WY. Modeling unbalanced rotor system with continuous viscoelastic shaft by frequency-dependent shape function. *Journal of Central South University*. 2013 Dec 1;20(12):3421-30.
- [14] Sendhilkumar S, Mohanasundaram N, Senthilkumar M, Sivanandam SN. Elman neural network for diagnosis of unbalance in a rotor-bearing system. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2016 Apr 1;10(3):613-7.
- [15] Paudyal S. Classification of Rotating Machinery Fault Using Vibration Signal (Doctoral dissertation, The University of North Dakota).
- [16] Santos FL, Duarte ML, de Faria MT, Eduardo AC. Balancing of a rigid rotor using artificial neural network to predict the correction masses. *Acta Scientiarum. Technology*. 2009;31(2):151-7.
- [17] Saleem MA, Diwakar G, Satyanarayana MR. Detection of unbalance in rotating machines using shaft deflection measurement during its operation. *IOSR J. Mech. Civ. Eng*. 2012;3(3):08-20.
- [18] Ahamed SK, Mitra M, Sengupta S, Sarkar A. Identification of Mass-Unbalance in Rotor of an Induction Motor Through Envelope Analysis of Motor Starting Current at no Load. *Journal of Engineering Science & Technology Review*. 2012 Jan 1;5(1).
- [19] Tahir MM, Hussain A, Badshah S, Khan AQ, Iqbal N. Classification of unbalance and misalignment faults in rotor using multi-axis time domain features. In *2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET) 2016 Oct 18 (pp. 1-4)*. IEEE.
- [20] Jeong H, Park S, Woo S, Lee S. Rotating machinery diagnostics using deep learning on orbit plot images. *Procedia Manufacturing*. 2016 Jan 1;5:1107-18.
- [21] Pennacchi P, Vania A. Diagnosis and model based identification of a coupling

misalignment. *Shock and Vibration*. 2005 Jan 1;12(4):293-308.

- [22] Bachschmid N, Pennacchi P, Vania A. Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2004;26:200-8.
- [23] Ibn Shamsah SM, Sinha JK. Rotor unbalance estimation with reduced number of sensors. *Machines*. 2016 Dec;4(4):19.

Pattern Recognition of Unbalanced Rotary Rigid Rotor Bearing Forces

Mohammad Reza Homaeinezhad^{1*}, Mohammad Hosein Saeidi Mostaghim², Farnood Arab³

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* No. 17, Pardis Street, Mollasadra Ave., Vanak Square, Tehran, Iran. **P.O Box:** 19395-1999, **Postal Code:** 19991-43344. **Tel:** (+98 21) 84063284, **Mobile:** (-98) 9121899445, **Fax:** (+98 21) 88677274, mrhomaeinezhad@kntu.ac.ir

ABSTRACT

In industrial rotating systems, different forces are produced in the bearings for various reasons, such as bearing misalignment and the presence of unbalance. By analyzing and recognizing the pattern of bearing forces, one can judge the magnitude of unbalance, their distance from the axis of rotation, and the presence of unbalance in different parallel planes. Using the results obtained from the analysis and recognition of the bearing force pattern, it is possible to formulate standards according to which the maintenance engineers of rotary machines can make necessary actions to recognize harmful unbalanced masses and balance rotors. To conduct this research, multiple unbalanced masses with different angles on various planes, in several working conditions, including diverse speeds or positions, are placed on a rotating axis, and then the equations of motion and forces in rigid and perfectly aligned rigid bearings are obtained. Then, by using artificial intelligence and neural networks, the patterns of bearing forces are recognized and the characteristics of the nominal masses, including the amount, distance from the rotating axis and angle, as well as the type of unbalance are determined. The accuracy of predicting 8 variables of balancing masses was 41% and after reducing the overlaps, the accuracy of predicted 5 variables of balancing masses was 95%. Also, by implementing the neural network, the required number of sensors was reduced to two instead of four, and then, by using the deep neural network, the possibility of balancing any dynamic unbalance, using only two masses was examined.

KEYWORDS

Unbalanced Mass, Rigid Rotor, Rotor Mechanical Defects, Force Patterns, Artificial Intelligence