نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(6) (2022) 255-258
DOI: 10.22060/mej.2022.20592.7267

Pattern Recognition of Unbalanced Rigid Rotor Bearing Forces

M. R. Homaeinezhad*, M. H. Saeidi Mostaghim, F. Arab

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: In industrial rotatory machines, different forces in rotor bearings are generated due to various impaired mechanical sources, namely bearing misalignment and nonhomogeneous mass distribution (unbalance). By precisely analyzing and diagnosing the produced patterns of bearing forces, one can determine the unbalance parameters such as quantities of masses, their distance from the rotational axis, and characteristics of corresponding parallel planes. Consequently, it will be possible to formulate pragmatic protocols according to which the maintenance engineers of rotatory systems will pinpoint properties of problematic imbalance masses and then straightforwardly balance them. In the procedure of conducting this research, several exemplary imbalance masses are deployed on a rotatory mechanical shaft and the equations of motion and forces in perfectly aligned rigid bearings are extracted. Then, by applying a neural network-oriented system the patterns of bearing forces are recognized and the characteristics of the nominal masses including magnitudes, distances from the rotational axis, angles as well as the unbalance type are determined. The accuracy of predicting 8 variables of balancing masses was 41% and after eliminating the redundant overlaps from principal components, the accuracy of predicted 5 variables of balancing masses significantly increased to 95%. Also, by implementing another comprehensive neural network system, it was shown that by exerting two separate balancing masses, the applicability of this method in balancing any faulty systems with dynamic unbalance is possible.

Review History:

Received: Sep. 23, 2021
Revised: Jul. 05, 2022
Accepted: Jul. 07, 2022
Available Online: Jul. 11, 2022

Keywords:

Unbalanced mass
Rigid rotor
Rotor mechanical defects
Force patterns
Artificial intelligence

1- Introduction

Even in the most ideal and perfectly designed mechanical systems, mechanical impairments are inevitable [1]; these faults and deficiencies are generally created due to the production and installation processes [2]. As a result, maintenance engineers have bestowed a demanding job, which the productivity, effectiveness, and vitality of plants' machines and apparatuses make them more requested. Based on recent research up to 60 percent of the total expenses of an industrial machine are related to its reparation and maintenance procedures [3]. Generally speaking, machines' maintenance and health monitoring can be defined in four distinctive branches, namely: reactive, preventive, predictive, and proactive; and the main principles of this research are greatly relied on and the latest field. To explain the proactive method simply, it is a combination of three other disciplines that regulates the monitoring, maintenance, and reparation programs based on current faults and changes their course according to mechanical impairments existing in the industrial facilities. Impairments that ignoring them would lead to countless monetary and nonmonetary losses [1]. Nowadays, one of the major failures that are responsible for about 40 percent of mechanical defects of industrial machines is the non-homogenous distribution of mass particles in rotatory facilities so-called unbalance [3]. Unbalance can be classified into static unbalance, couple unbalances, semi-static unbalance and dynamic unbalance, which is the general form of unbalance and is investigated in normal and overhung rotors in this research. Jian et. al. [4] established a technique to compensate for the electromagnetic forces generated due to unbalance impairment. This algorithm diminished the balancing error to 10 percent. Tiwari and Kumar [5] by using a model based algorithm based on an experimental method presented a method based on which all of the required parameters needed to balance an unbalance rotor with external electromagnetic forces, are determined. This paper provides a general standard based on which maintenance engineers can simply identify the unbalance characteristics and apply them in the reparation process. The aforementioned standard is produced based on patterns of generated forces in journal bearings. The following topics are surveyed in this research:

Introducing a well-designed technique for diagnosing dynamic unbalance properties in different working planes without measuring the position and velocity of bearings and only by means of acceleration for the first time;

Providing a set of extracted force patterns and its analysis,

*Corresponding author's email: mrhomaeinezhad@kntu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

which can be exerted on faulty systems by maintenance engineers;

Appreciably simplifying the installation, diagnosis, and reparation procedures by application of relatively inexpensive accelerometers;

Diminishing the total number of sensors required for the diagnosis of dynamic unbalance to two;

Providing rotational orbits with acceptable quality at high speeds;

Design and application of neural network system automate the diagnosis procedure.

2- Methodology

It is necessary to first establish the dynamic model of a rotor to examine its dynamic unbalance of it. Also by having equations of motion of the exemplary rotor, the system analysis, the extraction of vibrational patterns, and consequently effects of each variable along with their overlaps in output frequency would be possible. To this end, an exemplary rigid rotor with 15 imbalance masses with different magnitudes and radiuses, which are distributed in 3 parallel planes perpendicular to the rotor axis, has been considered (Fig. 1). Accordingly the dynamic equations of the abovementioned rotor have been extracted based on D'Alembert's principle, and the final equations would be as indicated in Eqs. (1) to (5).

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

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

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

$$R_{Bx} = -\frac{\sum_{i=1}^{15}\left[l_i m_i r_i \ddot{\theta}\sin(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \cos(\theta_i)\right]}{l_B} \tag{4}$$

$$R_{Bz} = -\frac{\sum_{i=1}^{15}\left[l_i m_i g - l_i m_i r_i \ddot{\theta}\cos(\theta_i) + l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \sin(\theta_i)\right]}{l_B} + \frac{\sum_{i=1}^{3} \rho_i m_i g}{l_B} \tag{5}$$

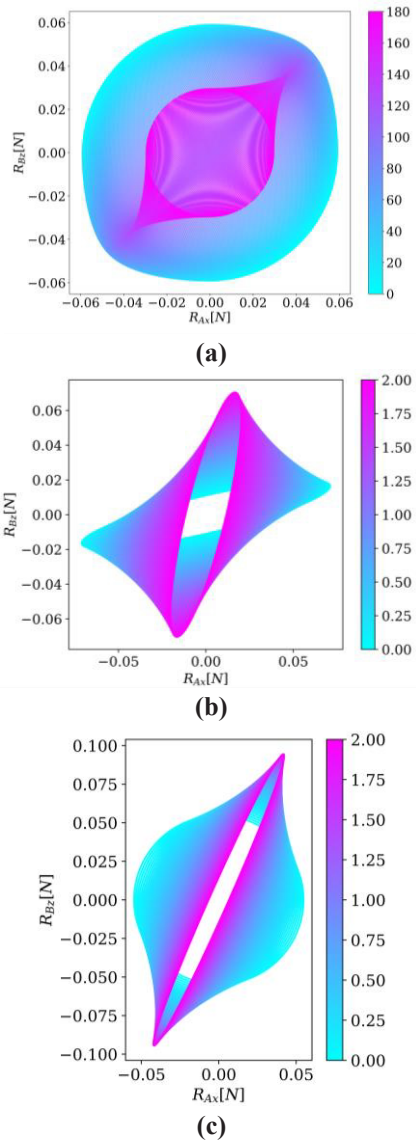


Fig. 1. sample diagrams of force patterns in symmetrical dynamic unbalance for: (a) angular difference of unbalance particles, (b) unbalance distance from bearings, and (c) distance of unbalance center from bearings

In this research the Eqs. (1) to (5) are comprehensively used to extract force patterns of the unbalance rotor, and consequently to feed input datasets of a neural network system.

3- Results and Discussion

By extracting generated forces of each four accelerometers and depicting them against each other the force patterns are created which greatly help maintenance engineers to diagnose dynamic unbalances. By plotting these patterns and changing unbalance variables various diagrams are produced that by choosing and tracking pertinent values a particular unbalance can be diagnosed and then perfectly eliminated. Figs. 1-a, 1-b, and 1-c generally show diagrams of patterns of changing

unbalance parameters, namely unbalance angular difference, unbalance distance from bearings, and distance of unbalance center from bearings, respectively.

To put it further this paper makes use of unbalanced force patterns to develop and train neural network-based systems that can lead to a generalized protocol that automatizes the diagnosing process. To simplify the training procedure the meaningful data points have been extracted from these patterns in the form of particular unique ellipses – a single ellipse shows an unbalance which can be satisfied with various unbalance parameters. Also, by means of a neural network, it's been validified that only two accelerometers would be enough to diagnose and repair an unbalance defect in a rigid rotor – by precisely predicting other ellipses by just one ellipse which can be created by two sensors.

4- Conclusion

In conclusion in this paper validation and identification of force patterns of unbalanced rotors and designing a simplified neural network to automatize balancing procedure have been considered. To this end, a rigid rotor with rigid bearings is modeled and consequent forces in four accelerometers are extracted. By using these equations of motion the rigid rotor dynamic principles are validified, and a set of force patterns are extracted to be used both directly by maintenance engineers and indirectly by neural networks. Maintenance and health monitoring engineers by applying these force patterns can balance an unbalanced rotor with a simplified procedure. By utilizing AI-oriented systems it's been made possible to use only two accelerometers to measure acceleration signals.

References

[1] C. Scheffer, P. Girdhar, Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, Elsevier, 2004.

[2] M.L. Adams, Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting, CRC Press, 2000.

[3] G.A. Correa JC, Mechanical Vibrations and Condition Monitoring, Academic Press, 2020.

[4] Z. Jian, W. Huachun, W. Weiyu, Y. Kezhen, H. Yefa, G. Xinhua, S. Chunsheng, Online unbalance compensation of a maglev rotor with two active magnetic bearings based on the LMS algorithm and the influence coefficient method, Mechanical Systems and Signal Processing, 166 (2022) 108460.

[5] R. Tiwari, P. Kumar, An innovative virtual trial misalignment approach for identification of unbalance, sensor and active magnetic bearing misalignment along with its stiffness parameters in a magnetically levitated flexible rotor system, Mechanical Systems and Signal Processing, 167 (2022) 108540.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. R. Homaeinezhad, M. H. Saeidi Mostaghim, F. Arab, Pattern Recognition of Unbalanced Rigid Rotor Bearing Forces, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 255-258.

DOI: 10.22060/mej.2022.20592.7267

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۲۴۹ تا ۱۲۷۰
DOI: 10.22060/mej.2022.20592.7267

بازشناخت الگوی نیروهای یاتاقانی محور چرخان صلب دارای نامیزانی‌های جرمی

محمدرضا همایی نژاد*، محمدحسین سعیدی مستقیم، فرنود عرب

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

خلاصه: در سیستم‌های چرخان صنعتی به دلایل مختلف مانند ناهمراستایی یاتاقانی و وجود نامیزانی‌های جرمی، نیروهای مختلفی در یاتاقان تولید می‌شود. روش‌های بازشناخت الگوهای نامیزانی‌های جرمی زیان آور تاکنون بر اساس استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری جابجایی و یا سرعت طراحی و تدوین شده‌اند. در کنار بار محاسباتی بالای روش‌های مذکور، پهنای باند نسبتاً کم و قیمت بالای تجهیزات مورد نیاز این نوع روش‌ها، تا کنون فناوری‌های لازم بر اساس تکنیک‌های تحلیل بر مبنای اندازه‌گیری شتاب یاتاقان‌ها توسعه داده نشده است. ابتدا، معادلات حرکت و نیروهای موجود در یاتاقان‌های غیر منعطف صلب و کاملاً همراستا برای روتوری نامیزان با ۱۵ جرم نامیزان موجود در سه صفحه با فواصل متفاوت استخراج شده‌اند. سپس، با حل عددی معادلات، الگوهای نیرویی یاتاقان‌ها حاصل شده و تأثیر هر کدام از متغیرهای دینامیکی روتور برای دو جرم نامیزان مورد تحلیل قرار می‌گیرند. نوآوری‌های مقاله‌ی حاضر به این شرح گزارش می‌گردند: با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی ثابت شد که برای عیب‌یابی سیستم تنها دو سنسور شتاب‌سنج کافی است. در ادامه دو شبکه‌ی عصبی عمیق با ۵ لایه طراحی شد که داده‌های ورودی، سرعت روتور، اندازه‌ی اقطار و میزان اوریب بودن بیضی بوده، و داده‌های خروجی برای شبکه‌ی اول تمامی متغیرهای لازم اجرام نامیزان شامل فاصله صفحه چرخش در روتور، زاویه، جرم و شعاع ذره و در شبکه‌ی دوم اختلاف زاویه‌ی اجرام، فاصله‌ی بین دو صفحه، فاصله‌ی یاتاقان A از وسط دو صفحه، و حاصل‌ضرب جرم و شعاع هر کدام از نامیزانی‌ها بوده که دقت نهایی بدست آمده ۹۵ درصد گزارش شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

کلمات کلیدی:
نامیزانی جرمی
روتور صلب
عیوب دینامیکی روتور
بازشناخت الگوی نیروها
هوش مصنوعی

۱- مقدمه

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، بکارگیری مهندسان تعمیر و نگه‌داری برای افزایش طول عمر دستگاهها، امری الزام آور است. ۱۵ تا ۶۰ درصد هزینه‌های ماشین آلات تا پایان عمر کاری آنها، صرف تعمیر و نگهداری می‌شود. همچنین خسارات ناشی از فرآیند تعمیر و نگهداری ضعیف ماشین سالیانه حدود ۶۰ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود [۳].

به طور 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 پیشبینی کننده و نگهداری به روش پرواکتیو. در این تحقیق از روش پیشبینی کننده 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 به طور مرتب کنترل شده و وقتی که یک روندی مبتنی بر نقص موجود در قطعات مشاهده شود، برای تعمیر و انجام اقدامات لازم برنامه ریزی 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 بی توجهی شود، هر کدام از آنها می‌تواند باعث خسارت‌های بسیاری شود [۱].

یکی از مزیت‌های این روش برنامه ریزی فرآیند نگهداری و تعمیر برای قطعه مورد نظر است، که از تهیه قطعات یدکی بیهوده برای تمامی قطعات، ما را بی نیاز می‌سازد و امکان استفاده از تمام عمر یک قطعه را فراهم ساخته و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با این پیش‌بینی و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mrhomaeinezhad@kntu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

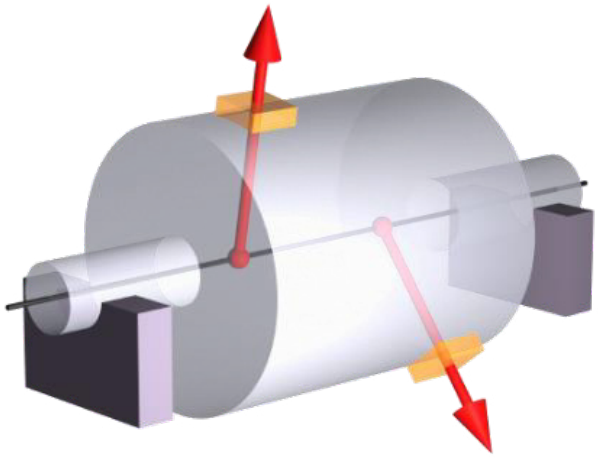
برنامه‌ریزی بهره‌وری تولید را می‌توان افزایش داد [۴]. برای این روش نیاز به ابزارها، سنسورها، وسایل و ماشین‌هایی است تا با کمک نیروهای متخصص و یا پرسنلی که به طور کامل آموزش دیده‌اند روند سلامت دستگاه بررسی شود. بنابراین نسبت به اصول پیشین به فعالیت بیشتری احتیاج بوده و تحلیل ارتعاشات دستگاه بدون شک مهمترین روش برای تشخیص عیب‌های مکانیکی، بخصوص در ماشین‌هایی با اجزای چرخان است [۱].

امروزه نیاز به قابلیت اعتماد بالا به دستگاه‌ها و روتورها نسبت به گذشته بسیار ضروری‌تر است و روز به روز به اهمیت آن افزوده می‌شود. شناسایی، مکان یابی و تحلیل نقص‌های دستگاه نقشی حیاتی در زمینه فعالیت ماشین‌ها دارد. برای اشاره به برخی از عیب‌های رایج ماشین می‌توان به نامیزانی یا نامیزانی جرمی، عیوب روتور اورهانگ، شفت خمیده، خروج از مرکز، ناهمراستایی دو شفت متصل، لقی، مشکلات چرخ دنده، مشکلات یاتاقان، کاویتاسیون، 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 نامیزانی 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 شده که روتور حول آن می‌چرخد؛ اگر توسط یاتاقان‌ها محدود نشده باشد به آن محور اصلی ممان اینرسی نیز نامیده شده و 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 نامیزانی استاتیکی، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر موازی هستند. در نامیزانی کوپل، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر در مرکز جرم تلاقی دارند. در نامیزانی دینامیکی، محور مرکز هندسی جرم و محور چرخش روتور با یکدیگر متنافر هستند و به عبارتی نه یکدیگر را قطع می‌کنند و نه موازی هستند (شکل ۱). در نامیزانی شبه‌استاتیکی، 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



شکل ۱. شماتیک نامیزانی دینامیکی [۴]

Fig. 1. Schematic of Dynamic Unbalance [4]

یاتاقان، جرمی جز شفت وجود نداشته و روتور و جرم اصلی در بیرون این محل قرار دارند. همچنین در روتورهای اورهانگ هر چهار نوع نامیزانی می‌تواند وجود داشته باشد.

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. می و همکاران [۵] 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 نامیزانی دست یابند. در این تحقیق از تبدیل فوریه و شبکه‌های کانولوشنی بهره گرفته شده است. گوهری و کرد [۶] 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 جرم‌هایی با مقادیر مختلف بود. رودریگز و همکاران [۷] با استفاده از 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. یاداو و همکاران [۸] با مدلسازی نامیزانی در روتور سوار بر یاتاقان توپی، 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. چودری و همکاران [۹] به تشخیص مقدار نامیزانی روتور منعطف تحت شرایط نامیزان پرداختند و با دقت قابل قبولی توانایی تشخیص مقادیر نامیزانی را بدست آوردند. کومار و تیواری [۱۰] محوری تحت شرایط نامیزانی و ناهمراستایی پیاده شده بر یاتاقان فعال مغناطیسی را مدلسازی کرده و مورد بررسی دقیق قرار داده‌اند. آدیلتا و همکاران [۱۱] نیز به صورت تئوری دینامیک غیر خطی روتور صلب نامیزان سوار بر یاتاقان ژورنال را مدلسازی کرده و مورد بررسی قرار داده و همچنین مدارهای چرخش مربوطه در انتهای مقاله استخراج شده‌اند. فداک و همکاران [۱۲] نیز بالانس کردن روتور نامیزان با استفاده از نرم افزار متلب تحت شرایط یاتاقان صلب را، مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند. ونگ و همکاران [۱۳] روتوری منعطف را تحت شرایط نامیزان مدلسازی کرده‌اند که در آن مشخصات توابع فرکانسی مربوطه استخراج شده است. سنتیل کومار و همکاران [۱۴] نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی به تشخیص مقادیر نامیزانی در یک سیستم متشکل از روتور نامیزان و یاتاقان‌های صلب پرداخته‌اند. پائودیال [۱۵] با استفاده از پردازش سیگنال، به تحقیقی کلی برای تشخیص و طبقه بندی نوع عیب دستگاه چرخان پرداخته است. کاربرد هوش مصنوعی برای تشخیص و بالانس کردن روتور نامیزان را می‌توان در کار تحقیقاتی سانتوس و همکاران [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 با مقادیر مختلف در روتور منعطف 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 سلیم و همکاران [۱۷] به آن پرداخته شده است. روشی دیگر برای تشخیص جرم نامیزان در نامیزانی دینامیکی روتور چرخان، تحلیل پاکت و بررسی مشخصات الکتریکی سیستم بوده که در کار پژوهشی احمد و همکاران [۱۸] مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. طاهر و همکاران [۱۹] به طبقه بندی عیوب ماشین با استفاده از ماشین بردار پشتیبان در روتور معیوب در چند محور پرداخته‌اند. استفاده از یادگیری عمیق برای تشخیص نوع نقص روتور چرخان در مطالعه جئونگ و همکاران [۲۰] به طور واضح مشهود بوده که با استفاده از استخراج داده به صورت تجربی این امر صورت گرفته است. پناچی و وانیا [۲۱] نیز با مدلسازی روتوری با عیب ناهمراستایی به استخراج و بررسی مدارهای چرخش پرداخته‌اند. باشمید و همکاران [۲۲] نیز با مدلسازی دینامیکی روتور چرخان به استخراج مدارهای چرخش پرداخته و روش‌های تشخیص عیوب ماشین را مورد بررسی قرار داده‌اند. شیبو ژائو و همکاران [۲۳] با ارائه‌ی روشی جدید مبتنی بر مدل بیضی‌گون چند بعدی، سیستمی بر اساس گسسته سازی عدم قطعیت‌های مدل سازی تولید کردند. این روش با دقتی مناسب نامیزانی‌های موجود در روتورهای دوار را تا حدود ۷۲ درصد کاهش داده و به بالانس کردن سیستم کمک می‌کند. فنگ لیو و همکاران [۲۴] با تحقیق و بررسی خروج از مرکز جرمی و زاویه‌ای بر روی موتور سنکرون در راستای بالانس کردن سیستم برای از بین بردن نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از این عیوب مکانیکی گزارشاتی را ارائه داده‌اند. ژو ژیان و همکاران [۲۵] میزان سازی روتور های نامیزان یاتاقان‌های مغناطیسی فعال بر اساس روش جبران سازی برخط را بررسی نموده‌اند. الگوریتم حاصله از این تحقیق دقت میزان سازی روتور را تا حدود ۱۰ درصد افزایش داد. لی ژائو و همکاران [۲۶] مشخصات دینامیکی غیر خطی روتور متشکل از نامیزانی محوری را با استفاده از یک مدل دینامیکی با چهار صفحه نامیزانی مورد بررسی قرار داده‌اند. روش ارائه شده در این تحقیق برای کاوش و میزان سازی روتور های نامیزان با گستره نامیزانی در چند صفحه مختلف به کار رفته‌اند. همچنین روتور نامیزان صلب نصب شده بر روی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال با حضور اختلالات اعمالی به سیستم با استخراج پارامترهای ذاتی نامیزانی در کار تحقیقاتی بودهن و همکاران [۲۷] قابل مشاهده است. لی و همکاران [۲۸] نیز با اعمال یک روش آزمایشی و عددی بر روی یک روتور نامیزان، به استخراج پارامترهای کلی نامیزانی دستگاه با استفاده از روش مدل مقیاس سیستم به صورت یکجا می‌پردازد. این روش امکان این را برای مهندسان تعمیر و نگهداری فراهم می‌کند تا با استفاده از مقیاس‌های کوچکتر سیستم اصلی را تحلیل و عیب یابی نمایند. در همین راستا راجیو و کومار [۲۹] با استفاده از یک الگوریتم تشخیص مبتنی بر مدل که از آزمایش و خطا بدست آمده است تمامی مشخصات مورد نیاز برای رفع عیوب نامیزانی جرمی و ناهمراستایی یک روتور نصب شده بر روی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال را ارائه می‌کند. کار تحقیقاتی الیا و شیفمن [۳۰] نیز با بررسی نامیزانی توزیع جرمی بر روی روتور سوار شده بر روی یاتاقان‌های شیار مارپیچی فعال، روشی را بسط می‌دهد که با بهره گیری از

آن طبق داده‌های آزمایشی حدود ۸۰ درصد عیوب ارتعاشی در روتور های نامیزان بر طرف می‌شود. ژانگ و همکاران [۳۱] با استفاده از روش دالامبر معادلات دینامیکی روتور چرخان را استخراج و به بررسی عیوب مکانیکی گوناگون در سرعت عملکردی بالا پرداخته‌اند. ژنگ و همکاران [۳۲] برای تشخیص پارامترهای نامیزانی محور کاردان با سرعت عملکردی بالا، با اعمال شبیه سازی عددی و سپس پاسخ ارتعاشات محور در شرایط گوناگون مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی خطای تشخیص عیوب نامیزانی به زیر ۱۵ درصد رسیده 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:

- برای نخستین بار، معرفی تکنیک تشخیص نامیزانی‌های جرمی توزیع شده در صفحات مختلف بدون نیاز به اندازه‌گیری فاصله و سرعت یاتاقان و صرفاً با استفاده از شتاب یاتاقان‌ها؛
- ارائه‌ی مجموعه‌ای از الگوهای نیرویی استخراج شده و تحلیل آنها، که قابلیت بهره برداری توسط مهندسان تعمیر و نگهداری را داشته باشد؛
- ساده سازی مراحل نصب، تشخیص و تعمیر تا حد امکان با به کار گیری حسگرهای شتاب سنج ارزان قیمت؛
- کاهش تعداد شتاب سنج‌های مورد نیاز برای فرایند تشخیص نامیزانی جرمی دینامیکی به دو عدد؛
- ارائه‌ی مدارات چرخش با کیفیت مناسب در سرعت‌های بالای چرخش؛
- طراحی و بکارگیری شبکه‌ی عصبی جهت هوشمند سازی فرایند تشخیص.

۲- مدل دینامیکی سیستم با نقص نامیزانی دینامیکی

برای بررسی نامیزانی روتور چرخان، نیاز به مدلسازی دینامیکی این مجموعه می‌باشد. همچنین با داشتن معادلات حرکت روتور نامیزان می‌توان به تحلیل سیستم و استخراج الگوی های ارتعاشاتی و بررسی تأثیر هر کدام از متغیرها و همپوشانی آنها در فرکانس خروجی پرداخت.

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 (شکل ۲-الف)، در نظر گرفته می‌شود. همچنین روتور و یاتاقان‌های صلب به همراه جهات نیروهای عکس‌العملی موجود در یاتاقان‌ها مطابق شکل ۲-ب فرض شده و از اثر میرایی و فنریت در یاتاقان‌ها صرف نظر می‌گردد. با استفاده از اصل دالامبر معادلات دینامیکی سیستم بدست می‌آیند.

$$\sum \underline{F} + \left(-\dot{\underline{G}}\right) = 0 \qquad (۱)$$

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

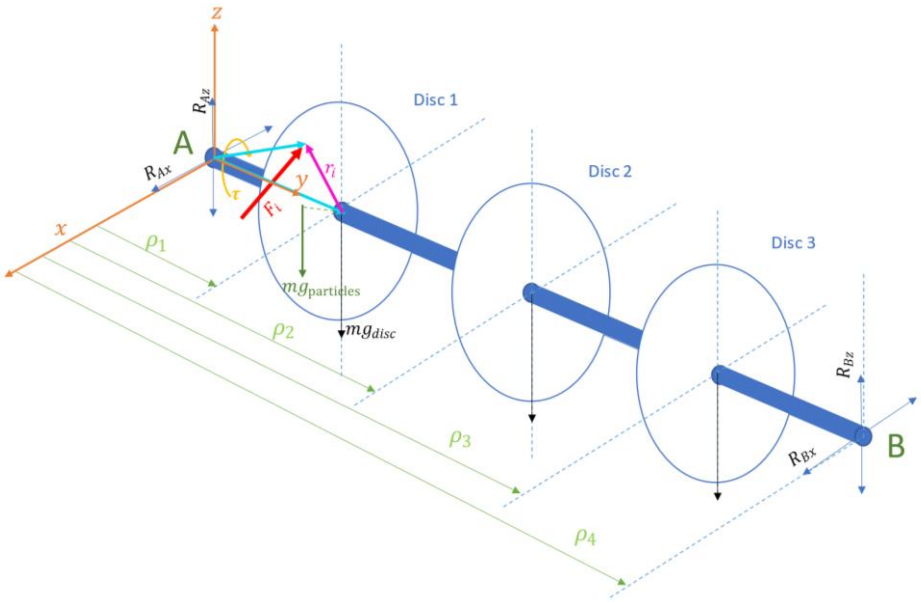
$$\underline{F} = \frac{d}{dt}\left(m\underline{v}\right) = m\frac{d}{dt}\left(\underline{\dot{\theta}} \times \underline{r}\right) \qquad (۳)$$

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

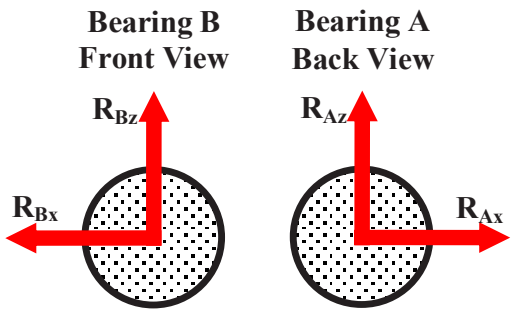
$$\ddot{\theta} = \frac{-\left[\tau + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos\left(\theta_i\right)\right]}{I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} m_i r_i^2} \qquad (۴)$$

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

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



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) شماتیک روتور دوار با ۱۵ جرم نامیزان روی ۳ صفحه موازی با فواصل متفاوت، ب) شماتیک یاتاقان‌های ابتدایی و انتهایی روتور به همراه نیروهای عکس‌العملی موجود در یاتاقان‌ها

Fig. 2. (a) Schematic of unbalance rotor with 15 imbalance particles implanted on 3 parallel planes (b) Schematic of both bearings with corresponding reactive forces

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

$$R_{Bz} = -\frac{\sum_{i=1}^{15}\left[\begin{array}{l} l_i m_i g - l_i m_i r_i \ddot{\theta} \cos(\theta_i) + \\ l_i m_i r_i \dot{\theta}^2 \sin(\theta_i) + \sum_{i=1}^{3} \rho_i m_i g \end{array}\right]}{l_B} \quad (۸)$$

که در آن معادلات (۴) تا (۸):

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

برای استفاده از معادلات (۴) تا (۸) به دلیل غیر خطی بودن معادلات حاکم بر مسئله، نیاز به حل آنها از طریق روش‌های مبتنی بر حل عددی می‌باشد. در این بخش با استفاده از روش سه گامی آدامز–بشفورث [۲۳] به حل آنها پرداخته می‌شود (معادلات (۱۰) تا (۱۵)).

$$\Theta_1 = \theta; \Theta_2 = \dot{\theta} \tag{۱۰}$$

$$\dot{\Theta}_1 = \Theta_2 \tag{۱۱}$$

$$\dot{\Theta}_2 = \ddot{\theta} = \frac{-\left[\tau + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos(\theta_i)\right]}{I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} m_i r_i^2} \tag{۱۲}$$

$$\theta_i = \theta + \theta_{i0} \tag{۱۳}$$

که در معادله‌ی (۱۳) آن θ زاویه چرخش روتور، $\theta_{i.}$ زاویه اولیه هر ذره و θ_i زاویه هر ذره نسبت به محور x می‌باشد.

$$\Theta_1(k) = \Theta_1(k-1) + \frac{23T}{12}\Theta_2(k-1) - \frac{4T}{3}\Theta_2(k-2) + \frac{5T}{12}\Theta_2(k-3) \tag{۱۴}$$

$$\Theta_2(k) = \Theta_2(k-1) + \frac{23T}{12}\left[\frac{-\left[\tau(k-1) + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos[\theta_i(k-1)]\right]}{I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} m_i r_i^2}\right] - \frac{4T}{3}\left[\frac{-\left[\tau(k-2) + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos[\theta_i(k-2)]\right]}{I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} m_i r_i^2}\right] + \frac{5T}{12}\left[\frac{-\left[\tau(k-3) + \sum_{i=1}^{15} -m_i r_i g \cos[\theta_i(k-3)]\right]}{I_{yy} + \sum_{i=1}^{15} m_i r_i^2}\right] \tag{۱۵}$$

در معادله‌ی (۱۴)، T گام زمانی حل عددی آدامز-بشفورث بوده و مقدار آن بایستی به گونه‌ای انتخاب گردد که حداقل نصف مقدار کوچکترین دوره‌ی تناوب دینامیک سیستم باشد [۳۳].

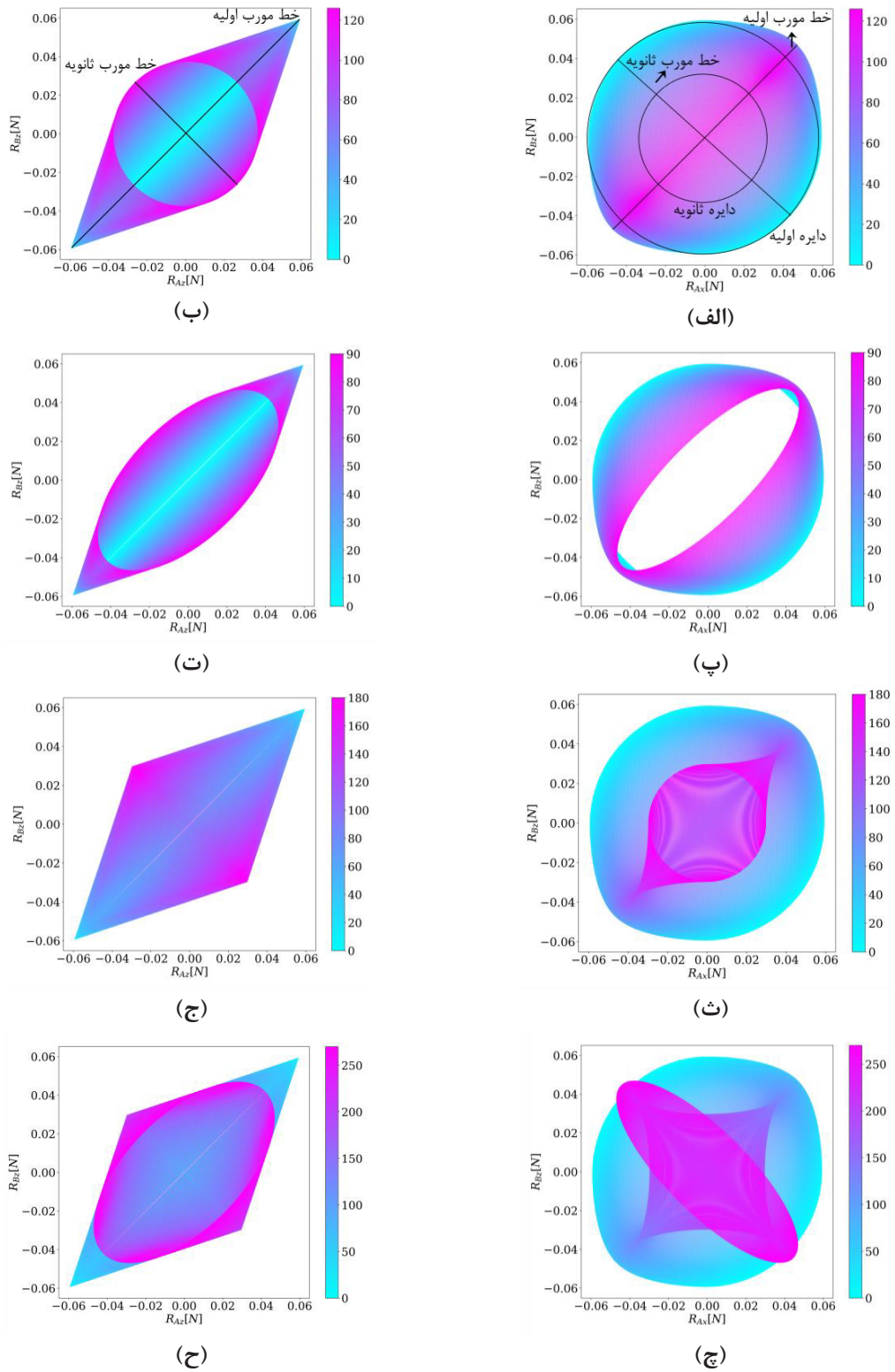
۳- بازشناخت الگوهای نیرویی روتور

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 نامیزانی 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. لازم به ذکر است که در این اشکال، مجموعه بیضی‌ها با تغییر متغیرهای مورد بررسی به سمت اندازه نهایی با شروع تغییر، از رنگ فیروزه‌ای به رنگ ارغوانی میل می‌کند. همچنین شایان ذکر است که در شکل‌هایی که به صورت دو ستونی طراحی شده‌اند، ستون سمت راست بیضی‌های حاصله از سنسورهای نا-همفاز و ستون سمت چپ بیضی‌های مربوط به سنسورهای همفاز دو سر روتور را نمایش می‌دهند.

۳- ۲- بررسی تأثیر تغییر اختلاف زاویه دو جرم متقارن در نامیزانی دینامیکی در الگوی نیروهای یاتاقانی

با بررسی شکل ۳ می‌توان تأثیر تغییر اختلاف زاویه اجرام نامیزان در نامیزانی دینامیکی را مشاهده نمود. ابتدا که نامیزانی، مشابه نامیزانی استاتیکی است، الگوها در شکل ۳-الف دایره (دایره‌ی ابتدایی) و در شکل ۳-ب خطی مورب را تشکیل می‌دهند (خط مورب ابتدایی). این بدان معنی است که نیروهای ثبت شده توسط سنسورهای هم-فاز با هم برابر اند. با افزایش اختلاف زاویه، دایره‌ی اولیه شروع به تغییر شکل کرده و تشکیل بیضی با قطر بزرگ منطبق بر خط مورب اولیه با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به محور R_{Ax} در شکل ۳-الف می‌دهد. همچنین در شکل ۳-ب این خط مورب به یک بیضی تبدیل شده که در همان جهت شروع به رشد کرده ولی از اندازه‌ی قطر بزرگ آن کاسته شده و قطر کوچک آن در جهت خط مورب ثانویه با زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به محور R_{Az} در شکل ۳-ب شروع به رشد کرده تا تشکیل یک دایره (بیضی با اقطار برابر) دهد. در شکل ۳-ت، می‌توان تشکیل تدریجی این بیضی را در اختلاف زاویه ۹۰ درجه‌ی نامیزانی‌ها، بهتر مشاهده کرد. با افزایش این مقدار تا زاویه‌ای 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 کوچک‌تر شدن قطر بزرگ اولیه در جهت خط مورب اولیه می‌باشد. کوچک شدن قطر بزرگ بیضی تا حدی ادامه پیدا می‌کند تا



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

Fig. 3. Force patterns of symmetric dynamic unbalance, regarding changes in angular differences for: 0 to 126 degrees in (a) R_{Ax} and R_{Bz}, (b) R_{Az} and R_{Bz}; 0 to 90 degrees in (c) R_{Ax} and R_{Bz}, (d) R_{Az} and R_{Bz}; 0 to 180 degrees in (e) R_{Ax} and R_{Bz}, (f) R_{Az} and R_{Bz}; 0 t 270 degrees in (g) R_{Ax} and R_{Bz}, (h) R_{Az} and R_{Bz}

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

Table 1. values of utilized parameters in extracting bearing force patterns of dynamic unbalance for investigating the effect of angular difference of particles

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

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 اندازه‌ای برابر اما خلاف جهت یکدیگر را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است کوچک‌تر شدن خط مورب ثانویه نسبت به خط مورب اولیه بیانگر این امر است که در نامیزانی 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 بوده که نشان دهنده‌ی اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای بین سیگنال‌های ورودی است. با افزایش اختلاف فاز، این شماتیک ابتدا خط موربی را تشکیل داده که در ابتدای این تغییر شکل سبب بزرگ‌تر 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 کوچک‌تر 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.

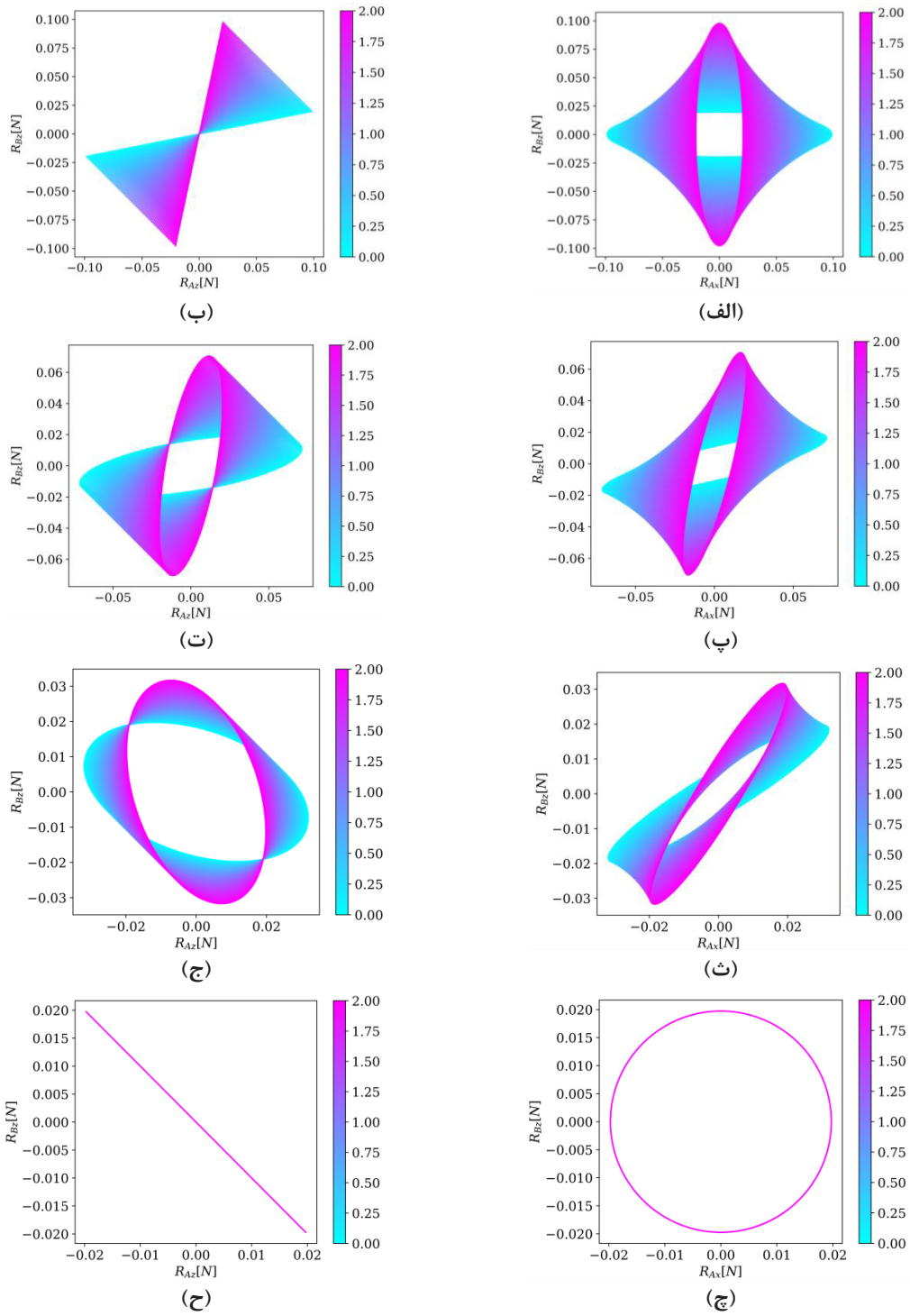
۳– ۳– بررسی تأثیر تغییر فاصله‌ی دو نامیزانی در نامیزانی دینامیکی غیر متقارن بر روی محور چرخان

در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان در نامیزانی 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 تأثیر 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.

۳– ۴– بررسی تأثیر تغییر فاصله‌ی بین دو جرم نامیزان در نامیزانی دینامیکی متقارن بر روی محور چرخان

در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی فاصله‌ی بین دو نامیزانی از یاتاقان در نامیزانی دینامیکی متقارن و در اختلاف زوایای متفاوت بررسی می‌شوند. شکل ۵–الف تا ۵–ح تأثیر فاصله‌ی بین دو جرم نامیزان را در نامیزانی دینامیکی که یکی از پارامترهای دیگر مورد نیاز برای بالانس کردن یک روتور نامیزان است را در اختلاف زوایای گوناگون بررسی می‌کنند.



شکل ۴. الگوی نیروهای یاتاقانی نامیزانی 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_{Bz} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۹۰ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bz} و ت) R_{Az} و R_{Bz} ،۱۵۰ درجه برای ث) R_{Ax} و R_{Bz} و ج) R_{Az} و R_{Bz} ، ۱۸۰ درجه برای چ) R_{Ax} و R_{Bz} و ح) R_{Az} و R_{Bz}

Fig. 4. Force patterns of asymmetric dynamic unbalance, regarding changes in distance of center of unbalance from bearings, from 0 to 2 meters with angular differences of: 0 degrees for (a) R_{Ax} and R_{Bz}, (b) R_{Az} and R_{Bz}; 90 degrees for (c) R_{Ax} and R_{Bz}, (d) R_{Az} and R_{Bz}; 150 degrees for (e) R_{Ax} and R_{Bz}, (f) R_{Az} and R_{Bz}; 180 degrees for (g) R_{Ax} and R_{Bz}, (h) R_{Az} and R_{Bz}

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

Table 2. values of utilized parameters in extracting bearing force patterns of unsymmetrical dynamic unbalance in order to investigate the effect of distance of unbalance particles center

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

جدول ۳. اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی در نامیزانی‌های دینامیکی متقارن برای بررسی تأثیر فاصله‌ی بین اجرام نامیزان

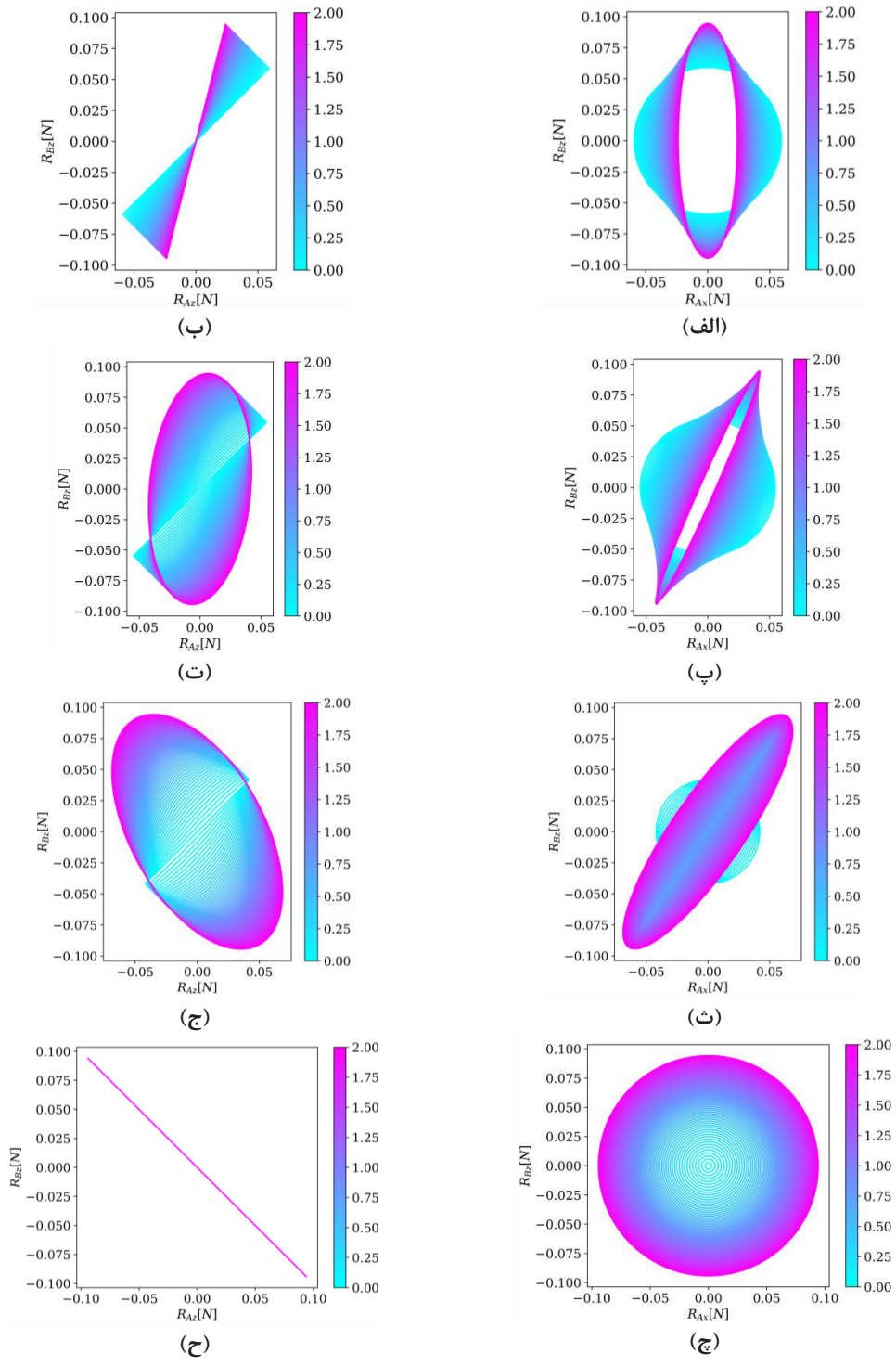
Table 3. Values of utilized parameters in extracting bearing force patterns of symmetrical dynamic unbalance in order to investigate the effect of unbalance particles distances from bearings

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

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 بزرگ‌تر 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.

۳- ۵- بررسی تأثیر فاصله‌ی بین دو جرم نامیزان در نامیزانی دینامیکی روتور اوورهانگ

در این قسمت الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی تأثیر فاصله در نامیزانی 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 شکل‌های ۶-ب و ۶-ت در حالت ابتدایی یک خطی مورب مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف فاصله بین دو جرم نامیزان و ثابت ماندن فاصله‌ی مرکز نامیزانی‌ها از یاتاقان، این خط مورب



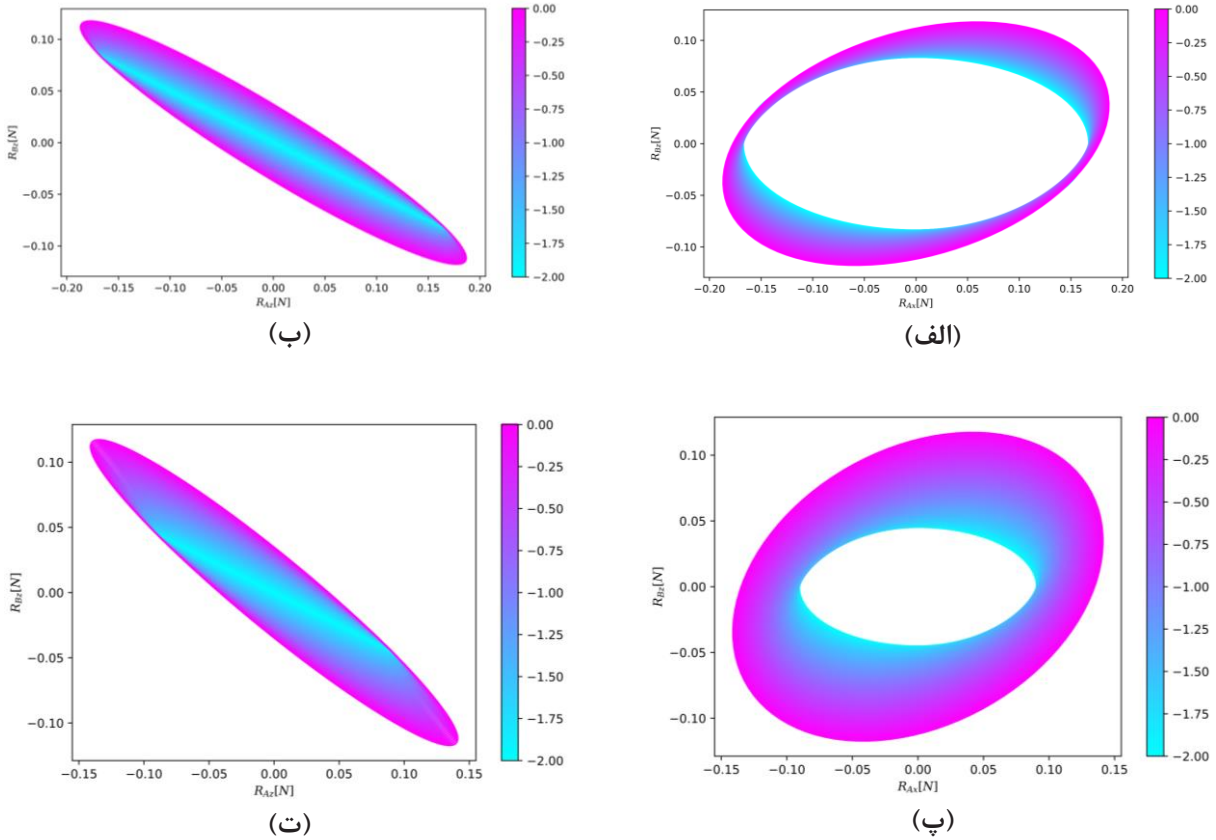
شکل ۵. الگوی نیروهای یاتاقانی نامیزانی دینامیکی متقارن، با بررسی تغییر فاصله‌ی نامیزانی‌ها از یاتاقان‌ها بر حسب متر با تغییر از مرکز شفت تا روی یاتاقان‌ها به اندازه ۰ تا ۲ متر با اختلاف زاویه‌ی، ۰ درجه برای الف) R_{Ax} و R_{Bz} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۴۵ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bz} و ت) R_{Az} و R_{Bz}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

Fig. 5. Force patterns of symmetric dynamic unbalance, regarding changes in distance between particles from 0 to 2 meters, starting form center of the shaft, with angular differences of: 0 degrees for (a) R_{Ax} and R_{Bz}, (b) R_{Az} and R_{Bz}; 45 degrees for (c) R_{Ax} and R_{Bz}, (d) R_{Az} and R_{Bz}; 90 degrees for (e) R_{Ax} and R_{Bz}, (f) R_{Az} and R_{Bz}; 180 degrees for (g) R_{Ax} and R_{Bz}, (h) R_{Az} and R_{Bz}

جدول ۴. اندازه‌ی پارامترهای مورد استفاده در استخراج الگوهای یاتاقانی در نامیزانی‌های دینامیکی برای بررسی تأثیر فاصله‌ی اجرام نامیزان از یکدیگر در روتور اورهانگ

Table 4. Values of utilized parameters in extracting bearing force patterns of dynamic unbalance of overhung rotor in order to investigate the effect of unbalance particles distances from each other

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



شکل ۶. الگوی نیروهای یاتاقانی نامیزانی 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 نامیزانی 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) R_{Ax} و R_{Bz} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۱۳۵ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bz} و ت) R_{Az} و R_{Bz}.

Fig. 6. Force patterns of symmetric dynamic unbalance on overhung rotor, regarding changes in distance between particles from 0 to 2 meters, and finally placing one of them on the outer bearing, with angular differences of: 90 degrees for (a) R_{Ax} and R_{Bz}, (b) R_{Az} and R_{Bz}; 135 degrees for (c) R_{Ax} and R_{Bz}, (d) R_{Az} and 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

Table 5. Values of utilized parameters in extracting bearing force patterns of dynamic unbalance of overhung rotor in order to investigate the effect of unbalance particles central distances from bearings

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

به یک بیضی تبدیل شده و چرخش محسوسی نیز در آن مشاهده می‌شود. همچنین در سنسورهای ناهم‌فاز (شکل‌های ۶-الف و ۶-پ) 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.

۳- ۶- بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز دو جرم نامیزان در نامیزانی دینامیکی روتور اوورهانگ

در این قسمت، الگوهای نیروهای یاتاقانی برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز نامیزانی دینامیکی روتور اورهانگ تحلیل شده و شکل ۷ برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرکز نامیزانی دینامیکی از یاتاقان در روتور اورهانگ در زوایای مختلف بررسی شده است که براساس مقادیر موجود در جدول ۵ بدست آمده‌اند. در شکل‌های۷-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 نامیزانی 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 ادامه‌ی 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 همفاز به دایره تبدیل می‌شوند. شکل‌های ۷-پ و ۷-ت همین روند را برای اختلاف زاویه ۹۰ درجه نشان می‌دهند.

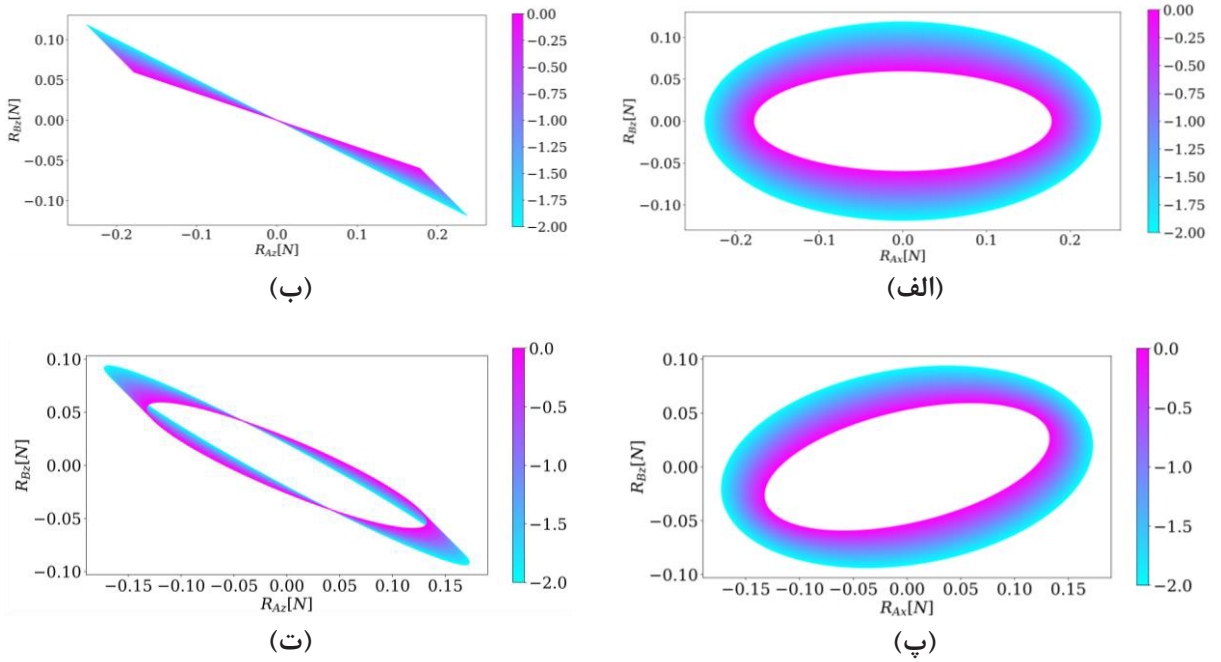
۳- ۷- بررسی نسبت تغییر فاز دو سیگنال $\mathbf{R}_{Ax}$ و $\mathbf{R}_{Bx}$ به اختلاف زاویه‌ی دو جرم آنبالانس در حالت دینامیکی متقارن

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن حالتی از نامیزانی دینامیکی که تنها دو جرم نامیزانی متقارن روی شفت قرار دارد، با تغییر دادن زاویه نامیزانی از صفر تا ۱۸۰ درجه مشخص می‌شود که اختلاف سیگنال‌های ارتعاشاتی نیز بیشتر می‌شود. اما نکته قابل توجه رابطه‌ی این تغییرات است که به صورت خطی نبوده و به صورت غیرخطی ظاهر می‌شود.

۴- بالانس کردن روتور نامیزان

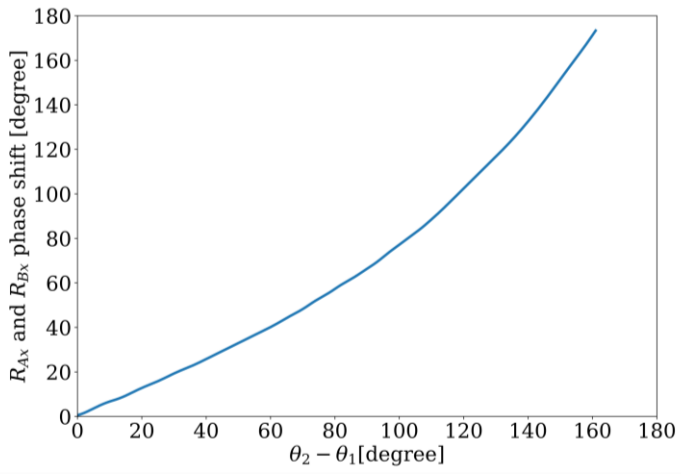
۴- ۱- روش حل دستگاه جبری-غیرخطی بالانس کردن به کمک شبکه عصبی

می‌توان تمام نیروهای ایجاد شده توسط جرم‌های آنبالانس بر روی روتور را معادل یک کوپل و نیرو بر روی مرکز شفت در نظر گرفت که باهم اختلاف زاویه‌ای دارند، این اختلاف زاویه به صورت رابطه‌ی (۱۶) بدست می‌آید.



شکل ۷. الگوی نیروهای یاتاقانی نامیزانی 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 نامیزانی 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_{Bz} و ب) R_{Az} و R_{Bz} ، ۹۰ درجه برای پ) R_{Ax} و R_{Bz} و ت) R_{Az} و R_{Bz}.

Fig. 7. Force patterns of symmetric dynamic unbalance on overhung rotor, regarding changes in center of particles with constant distance to each other and finally placing one of them on the outer bearing, with angular differences of: 0 degrees for (a) R_{Ax} and R_{Bz}, (b) R_{Az} and R_{Bz}; 90 degrees for (c) R_{Ax} and R_{Bz}, (d) R_{Az} and R_{Bz}



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

Fig. 8. Phase difference diagram between R_{Ax} and R_{Bx} signals regarding angular differences between unbalance particles in dynamic unbalance

$$\theta_d = \theta_F - \theta_M = \tan^{-1}\frac{\dfrac{m_1 r_1 w^2 \sin\theta_1 + m_2 r_2 w^2 \sin\theta_2}{m_1 r_1 w^2 \cos\theta_1 + m_2 r_2 w^2 \cos\theta_2} + \dfrac{m_1 r_1 w^2 \cos\theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2}\right) + m_2 r_2 w^2 \cos\theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2}\right)}{m_1 r_1 w^2 \sin\theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2}\right) + m_2 r_2 w^2 \sin\theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2}\right)}}{1 + \left(\dfrac{m_1 r_1 w^2 \sin\theta_1 + m_2 r_2 w^2 \sin\theta_2}{m_1 r_1 w^2 \cos\theta_1 + m_2 r_2 w^2 \cos\theta_2}\right) \times \dfrac{m_1 r_1 w^2 \cos\theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2}\right) + m_2 r_2 w^2 \cos\theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2}\right)}{m_1 r_1 w^2 \sin\theta_1 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} - \frac{l_{dd}}{2}\right) + m_2 r_2 w^2 \sin\theta_2 \left(\frac{l_{shaft}}{2} - l_{bd} + \frac{l_{dd}}{2}\right)}} \quad (۱۶)$$

در معادله‌ی (۱۶)، θ_F زاویه‌ی نیروی معادل، θ_M زاویه‌ی کوپل معادل و θ_d اختلاف زاویه نیروی معادل و کوپل معادل در روتور می‌باشند. به دلیل غیر خطی بودن معادله‌ی (۱۶) و همچنین عدم قابلیت استفاده از حل عددی، از شبکه عصبی استفاده شده است.

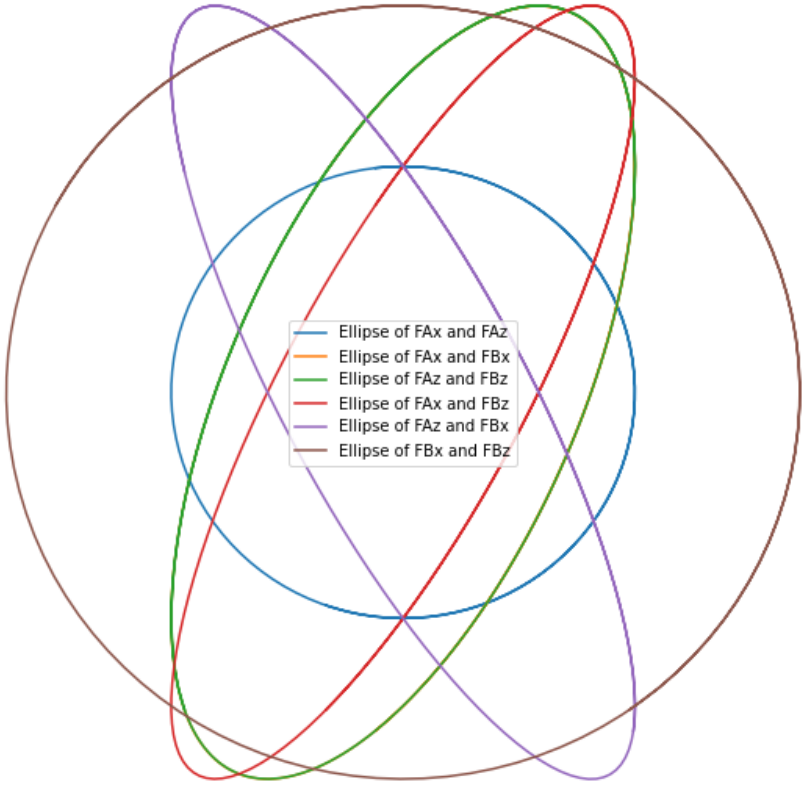
۴- ۲- تولید پایگاه داده برای آموزش شبکه عصبی

طبق یکی از اصل‌های تحلیل دینامیک روتور، برای یک روتور صلب با شرایط نامیزانی، تمامی حالات نامیزانی دینامیکی که کلی‌ترین نوع نامیزانی است را می‌توان با دو جرم نامیزان شبیه‌سازی کرد. بنابراین با در نظر گرفتن دو جرم نامیزان و فرض اندازه‌گیری سرعت روتور با سنسور تاکومتر، تعداد پارامترهای مورد نیاز به ۸ پارامتر رسیده که شامل جرم، شعاع، زاویه و فاصله از یاتاقان‌ها، برای هر دو جرم می‌باشند. واضح است تعداد پارامترهای مورد نیاز از تعداد معلومات مسأله که با نصب چهار عدد سنسور شتاب‌سنج بدست می‌آیند، بیشتر بوده، که این خود عدم امکان حل مسأله به صورت دقیق به همراه محاسبات دینامیکی را تأیید می‌کند. هدف در این قسمت از تحقیق، استفاده از شبکه‌های عصبی برای تخمین پارامترهای نامیزانی می‌باشد.

بنابراین، نوع داده‌های خروجی مسأله از نوع عددی بوده، و همچنین، ابعاد داده‌ی ورودی چهار بوده که ترکیبی از داده‌های خروجی از چهار سنسور بر حسب زمان است. و همچنین ابعاد داده‌ی خروجی برابر ۸ می‌باشد. این داده‌ها توسط الگوریتم طراحی شده استخراج و مورد استفاده قرار خواهند گرفت. همانطور که اشاره شد داده‌های خروجی برای یک نمونه از نامیزانی دینامیکی، ۸ پارامتر را در بر می‌گیرد. اما نکته‌ای که در این مقطع باید مورد توجه قرار بگیرد، اطلاعات ذخیره شده و صراحتاً تعداد معلومات نهفته در داده‌های ورودی است. طبیعتاً با افزایش تعداد سنسورها 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 شبکه عصبی تشکیل داده شده پردازش‌های بسیار سنگین‌تری 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 مشکل آفرین بوده و باید پارامترهای معنی دار و مؤثر را از داخل آنها استخراج نمود.

با فرض داشتن چهار سنسور نصب شده روی روتور، داده‌های خروجی سنسورها شامل چهار 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 نامیزانی است، نسبت به یکدیگر در شکل ۹ رسم می‌شود.

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 افق 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



شکل ۹. شماتیک بیضی‌های استخراج شده از چهار سنسور شتاب‌سنج

Fig. 9. Schematic of extracted ellipses from four corresponding accelerometers

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 مؤثر 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 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 گونه‌ای است که ما را از داشتن اطلاعات دیگر بیضی‌ها بی‌نیاز می‌کند. همانطور که ذکر شد، یک بیضی از داده‌های دو سنسور شتاب‌سنج تشکیل شده است. یعنی طبق برآورد فوق الذکر، اطلاعات و متغیرهای ذخیر شده در داده‌های دو سنسور، تمامی اطلاعات موجود در هر چهار سنسور را پوشش می‌دهد و درنتیجه 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 می‌شود.

شبکه‌های عصبی می‌توانند دستگاه غیر خطی معادلاتی را حل نماید که حل دستگاه در شرایط عادی، تقریباً غیرممکن است. احتمال تقلیل تعداد

سنسورها در کار پژوهشی ابن شمسا [۳۴] با استفاده از پردازش سیگنال و ریاضیات پیشرفته داده شده بود. اما با استفاده از شبکه‌های عصبی ثابت شد که اطلاعات نهفته در سایر بیضی‌ها 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 نتیجه‌ی کار تاثیری نخواهد داشت.

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

پس از جمع آوری داده‌ها و استخراج پارامترهای یکی از بیضی‌ها (بیضی ترسیم شده از R_{Ax} و R_{Bz}) برای استفاده از شبکه باید داده‌ها بی‌بعد شوند. پس از بی‌بعد شدن بایستی معماری شبکه مناسب انتخاب شود. تعداد لایه‌های پنهان و نورون‌های 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 نتیجه‌ی نهایی انتخاب خواهد شد. پس از آزمون و خطاهای متوالی، شبکه‌ای که در مقایسه با سایر شبکه‌ها عملکرد بهتری داشت، دارای ۳ لایه پنهان که هرکدام شامل ۴۰۰ نورون بوده، و در حالت اتصال کامل است، حاصل گردید. تابع خطا جذر متوسط مربع، تابع فعالسازی برای لایه‌های پنهان به صورت واحد یکسو شده‌ی خطی و برای لایه خروجی به صورت خطی در نظر گرفته شد.

ابعاد داده‌های ورودی ۴ بوده که شامل ۳ متغیر بیضی و یک متغیر نیز سرعت روتور است، در حالیکه داده‌های خروجی شامل ۸ پارامتر می‌باشد. به طور کلی در یادگیری عمیق هرچه تعداد مجهولات کمتر باشد تخمین دقیق‌تری حاصل می‌شود. در این حالت تعداد خواسته‌ها دو برابر تعداد داده‌های سیستم بوده و بنابراین دقت خروجی با حدود ۵۰۰۰۰ داده‌ی تولید شده توسط الگوریتم دینامیک برابر با ۰/۴۱ به صورت میانگین برای تمام متغیرها می‌باشد. دستیابی چنین نتیجه‌ای دور از ذهن نیست و دلیل آن، همپوشانی خروجی‌های مسأله با یکدیگر است.

۴- ۵- بهبود شبکه عصبی و بررسی همپوشانی‌ها

با توجه به اینکه برای تولید داده‌های مسئله از شتاب زاویه‌ای صرف نظر شد، نقش جرم و شعاع نامیزانی‌ها با هم برابر است. به عبارت دیگر، تنها افزایش یا کاهش ضرب این دو متغیر در جواب نهایی مسئله تأثیر می‌گذارد. همچنین برای بالانس کردن یک روتور نامیزان تأثیر افزایش جرم با تأثیر افزایش شعاع قرارگیری جرم یکسان خواهد بود. در مکتوبات علمی [۱]، پارامتری تحت عنوان مقدار نامیزانی تعریف شده است (رابطه‌ی (۱۷)).

$$U = M.e \qquad (۱۷)$$

در معادله (۱۷)، U مقدار نامیزانی، M جرم نامیزانی و e شعاع نامیزانی می‌باشد. بنابراین برای کاهش تعداد متغیرهای خروجی، حاصل ضرب جرم و شعاع نامیزانی‌ها مد نظر قرار داده می‌شود. همچنین برای بالانس کردن یک روتور نامیزان، اختلاف زاویه محل قرارگیری جرم‌ها مورد نیاز است. بنابراین به جای استفاده از زاویه دو جرم نامیزان، از اختلاف زاویه بین آن دو بهره برده می‌شود. تا این مرحله، تعداد پارامترهای خروجی تا ۵ کاهش یافت در صورتی که باید توجه شود تعداد ورودی‌های مسئله ۴ است. متغیرهای اصلاح نشده، فواصل جرم‌ها از یاتاقان‌ها بوده، که چون فرمولی مشخص برای رابطه‌ی آنها با متغیرهای ورودی در دسترس نیست، از ساده سازی بیشتر صرف نظر می‌شود. در نتیجه با استفاده از یک معماری مشابه با شبکه‌ی پیشین و تغییر تعداد نورون‌های خروجی به ۵، شبکه آموزش داده می‌شود.

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 پاسخ‌ها، به خصوص در پارامترهای فاصله نامیزانی‌ها از یاتاقان‌ها است. لازم به ذکر است که کاربرد شبکه‌های عصبی در محاسبه و تخمین داده‌های خروجی به کمک داده‌های ورودی است، که در این فعالیت داده‌های ورودی ماهیتی نیرویی دارند، که خود توسط الگوریتم دینامیک با مقداردهی پارامترهای نامیزانی بدست آمده‌اند. بنابراین برای بررسی بهتر، دقیق‌تر و منطقی‌تر عملکرد شبکه، به جای مقایسه خروجی‌ها با پاسخهای محدود که با هم همپوشانی دارند، و توجه به این اصل که یک بیضی خود بینهایت پاسخ را در بر می‌گیرد، بهتر است که برای ارزیابی خروجی شبکه، معادل نیرویی آنها مد نظر قرار داده شود.

۴- ۶- بررسی صحت عملکرد شبکه در تشخیص پارامترها و مقایسه کیفی عملکرد الگوریتم ارائه شده با سایر الگوریتم‌های موجود

برای بررسی دقیق‌تر 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 نامیزانی بدست آمده‌اند، به عنوان داده‌های اولیه به الگوریتم دینامیکی معرفی شده و در نهایت پارامترهای

جدول ۶. مقادیر خطاهای جذر متوسط مربع شبکه‌ی عصبی مورد استفاده در بالانس کردن نامیزانی‌ها

Table 6. Values of RMS errors of applied neural network in balancing procedure

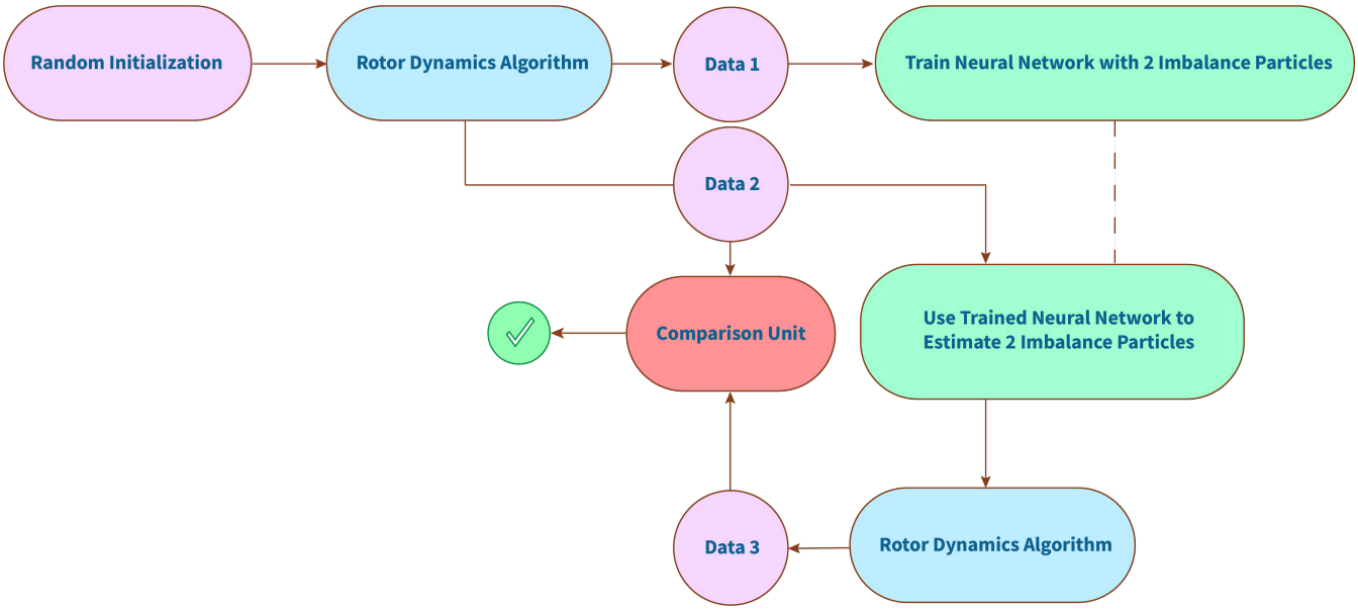
پارامتر	خطای تشخیص قطر بزرگ بیضی (نیوتن)	خطای تشخیص قطر کوچک بیضی (نیوتن)	زاویه (درجه)
جذر متوسط مربع خطا	۰/۵۷	۱/۴۷	۵/۵۶

جدول ۷. مقایسه‌ی مشخصات عملکردی تحقیق حاضر با سایر تحقیقات ارائه شده در سال‌های اخیر

Table 7. A general comparison of performance of this paper's method against other research conducted in recent years

نام روش	مشخصه‌های عملکردی				
	تعیین مدار چرخش روتور در سرعت‌های پایین	تعیین مدار چرخش روتور در سرعت‌های بالا	کارآمدی الگوهای نامیزانی در ایجاد سیستم هوش مصنوعی با دقت قابل قبول جهت بالانس کردن مستقیم	تعیین فضای حرکتی نقاط انتهایی روتور	قیمت ابزارهای مکانیکی و تجهیزات پردازشی
روش تشخیص نامیزانی جرمی دینامیکی با استفاده از سنسورهای موقعیت و به کمک روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، [۱۵ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۹]	امکانپذیر	کیفیت پایین (به علت کاهش دامنه نوسانات)	کم	امکانپذیر	گران قیمت
روش تشخیص نامیزانی جرمی دینامیکی با استفاده از سنسورهای سرعت و به کمک روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، [۱۶ و ۳۲]	نسبتاً امکانپذیر	کیفیت نسبتاً پایین (به علت کاهش دامنه سرعت)	متوسط	نسبتاً امکانپذیر	نسبتاً گران
مقاله حاضر روش تشخیص نامیزانی جرمی دینامیکی با استفاده از سنسورهای سرعت و به کمک روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی	کیفیت پایین (به علت کاهش دامنه شتاب)	امکانپذیر	بالا	همراه با نویز شدید	ارزان قیمت

نیرویی و بیضی جدید بدست می‌آیند. با مقایسه این پارامترها با پارامترهای اولیه وارد شده به شبکه، دقت شبکه در تحلیل متغیرهای مورد نیاز برای بالانس کردن روتور محاسبه می‌شوند. در این حالت خطای شبکه برای ارائه‌ی متغیرهای نامیزانی به ۱/۲ درصد می‌رسد که به طور قابل توجهی بیانگر عملکرد صحیح شبکه در تخمین پارامترهای نامیزانی و کمک به بالانس کردن روتور نامیزان توسط شبکه است. در جدول ۶ مقادیر خطاهای جذر متوسط مربع شبکه را برای داده‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد. این مقادیر صحت عملکرد شبکه در تشخیص پارامترهای نامیزانی را نشان می‌دهند. شکل ۱۰ نمایانگر اصول عملکرد شبکه برای تشخیص متغیرها می‌باشد. در جدول ۷، پس از جمع بندی نتایج بدست آمده از بخش‌های ۴-۱ تا ۴-۶ و همچنین با مقایسه‌ی نوع سنسورهای بکار رفته در تحقیقات اخیر، مقایسه‌ی کیفی بین عملکرد تحقیق ارائه شده در این مقاله و سایر کارهای ارائه شده در سال‌های اخیر نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۰. شماتیک اصول عملکرد شبکه عصبی عمیق برای بالانس روتور و نحوه‌ی صحت سنجی داده‌ها

Fig. 10. Schematic of fundamental principles of deep neural network system in balancing procedure and the feeding data validation approach

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به صحه‌گذاری و بازشناخت 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 صحه‌گذاری اصول دینامیکی روتور صلب، استخراج مجموعه‌ای از الگوهای نیرویی یاتاقانی و داده‌های نیرویی برای شبکه‌ی عصبی پرداخته شد. مهندسان تعمیر و نگهداری، با استفاده از بازشناخت الگوهای نیرویی یاتاقانی و در نظر گرفتن همپوشانی متغیرهای دینامیکی روتور، می‌توانند به بالانس کردن روتور نامیزان بپردازند. همچنین با بهره گیری از شبکه‌ی عصبی، استفاده از تنها دو سنسور شتاب‌سنج در دو انتهای روتور ممکن شد. به طور خلاصه نوآوری‌های ارائه شده در این تحقیق به شرح زیر قابل ارائه می‌باشد:

- معرفی الگوریتم تشخیص نامیزانی‌های جرمی بدون نیاز به اندازه‌گیری فاصله و سرعت یاتاقان و صرفاً با استفاده از شتاب یاتاقان‌ها، برای نخستین بار؛
- ارائه‌ی الگوهای استاندارد نیرویی با قابلیت بهره برداری توسط مهندسان تعمیر و نگهداری؛
- ارائه‌ی ساختار سنسوری و پردازشی ارزان قیمت نسبت به سایر روش‌های موجود؛
- کاهش بعد داده‌های مورد نیاز به دو عدد، برای انجام فرایند تشخیص نامیزانی جرمی دینامیکی؛
- ارائه‌ی مدارات به دست آمده از شتاب جهت انجام فرآیند تشخیص نامیزانی‌های جرمی؛
- معماری و تعیین سامانه‌ی هوش مصنوعی مناسب، با دقت قابل قبول و همچنین دارای قابلیت تعمیم به سایر ساختارهای روتور های نامیزان جهت تعیین نامیزانی‌های جرمی دینامیکی.

۶- فهرست علائم

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 نامیزانی به محور دوران
$\underline{G}$	تکانه خطی هر ذره نامیزانی
m_i	جرم هر ذره نامیزانی
$\underline{\dot{\theta}}$	سرعت زاویه‌ای هر ذره نامیزان
$\underline{v}$	سرعت هر ذره نامیزان
$\underline{r_i}$	شعاع هر ذره نامیزان
θ	زاویه روتور نسبت به محور X
θ_i	زاویه هر ذره نسبت به محور X
$\theta_{i.}$	زاویه اولیه هر ذره نسبت به محور X
$\underline{\tau}$	گشتاور ورودی موتور
$\underline{d_i}$	فاصله هر ذره تا یاتاقان A
m_i	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
$\underline{l_B}$	فاصله دو سر محور
θ_F	زاویه‌ی نیروی معادل
θ_M	زاویه‌ی کوپل معادل
θ_d	اختلاف زاویه‌ی نیروی معادل و کوپل معادل

منابع

[1] C. Scheffer, P. Girdhar, Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, Elsevier, 2004.

[2] M.L. Adams, Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting, CRC Press, 2000.

[3] G.A. Correa JC, Mechanical Vibrations and Condition Monitoring, Academic Press, 2020.

[4] R.B. Randall, Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications, John Wiley & Sons, 2021.

[5] O. Mey, W. Neudeck, A. Schneider, O. Enge-Rosenblatt, 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), IEEE, 2020, pp. 1610-1617.

[6] M. Gohari, A. Kord, Unbalance rotor parameters detection based on artificial neural network, Int J Acoust Vib, 24(1) (2019) 113-118.

[7] C.E. Rodrigues, C.L.N. Júnior, D.A. Rade, Machine learning techniques for fault diagnosis of rotating machines using spectrum image of vibration orbits, in: Congresso Brasileiro de Automática-CBA, 2020.

[8] H. Yadav, S.H. Upadhyay, S.P. Harsha, Study of effect of unbalanced forces for high speed rotor, Procedia Engineering, 64 (2013) 593-602.

[9] T. Choudhury, R. Viitala, E. Kurvinen, R. Viitala, J. Sopanen, Unbalance estimation for a large flexible rotor using force and displacement minimization, Machines, 8(3) (2020) 39.

[10] P. Kumar, R. Tiwari, 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, 10(1) (2021) 58-82.

[11] G. Adiletta, A. Guido, C. Rossi, Nonlinear dynamics of a rigid unbalanced rotor in journal bearings. Part I: theoretical analysis, Nonlinear Dynamics, 14(1) (1997) 57-87.

identification of a coupling misalignment, Shock and Vibration, 12(4) (2005) 293-308.

[22] N. Bachschmid, P. Pennacchi, A. Vania, Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 26 (2004) 200-208.

[23] S. Zhao, X. Ren, Q. Zheng, K. Lu, C. Fu, Y. Yang, Transient dynamic balancing of the rotor system with uncertainty, Mechanical Systems and Signal Processing, 171 (2022) 108894.

[24] F. Liu, C. Xiang, H. Liu, X. Chen, F. Feng, H. Cong, K. Yu, Model and experimental verification of a four degrees-of-freedom rotor considering combined eccentricity and electromagnetic effects, Mechanical Systems and Signal Processing, 169 (2022) 108740.

[25] Z. Jian, W. Huachun, W. Weiyu, Y. Kezhen, H. Yefa, G. Xinhua, S. Chunsheng, Online unbalance compensation of a maglev rotor with two active magnetic bearings based on the LMS algorithm and the influence coefficient method, Mechanical Systems and Signal Processing, 166 (2022) 108460.

[26] L. Zhao, H. Zhang, P. Shen, Y. Liu, Nonlinear Dynamic Characteristics of Rod Fastening Rotor with Preload Relaxation, Energies, 15(3) (2022) 1052.

[27] B. Nayek, A. Das, J. Dutt, Model based estimation of inertial parameters of a rigid rotor having dynamic unbalance on Active Magnetic Bearings in presence of noise, Applied Mathematical Modelling, 97 (2021) 701-720.

[28] L. Li, Z. Luo, F. He, K. Sun, X. Yan, Experimental and numerical investigations on an unbalance identification method for full-size rotor system based on scaled model, Journal of Sound and Vibration, 527 (2022) 116868.

[29] R. Tiwari, P. Kumar, An innovative virtual trial misalignment approach for identification of unbalance, sensor and active magnetic bearing misalignment along with its stiffness parameters in a magnetically levitated flexible rotor system, Mechanical Systems and Signal Processing, 167 (2022) 108540.

[12] V. Fedák, P. Záskalický, Z. Gelvanič, Analysis of balancing of unbalanced rotors and long shafts using GUI MATLAB, in: MATLAB Applications for the Practical Engineer, IntechOpen, 2014.

[13] S.-h. Wang, W. Guo, X.-y. Xu, Y.-f. Liu, W.-y. Li, Modeling unbalanced rotor system with continuous viscoelastic shaft by frequency-dependent shape function, Journal of Central South University, 20(12) (2013) 3421-3430.

[14] S. Sendhilkumar, N. Mohanasundaram, M. Senthilkumar, S. Sivanandam, Elman neural network for diagnosis of unbalance in a rotor-bearing system, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 10(3) (2016) 613-617.

[15] S. Paudyal, Classification of Rotating Machinery Fault Using Vibration Signal, The University of North Dakota, 2019.

[16] F.L. Santos, M.L.M. Duarte, M.T.C. de Faria, A.C. Eduardo, Balancing of a rigid rotor using artificial neural network to predict the correction masses, Acta Scientiarum. Technology, 31(2) (2009) 151-157.

[17] M.A. Saleem, G. Diwakar, M. Satyanarayana, Detection of unbalance in rotating machines using shaft deflection measurement during its operation, IOSR J. Mech. Civ. Eng, 3(3) (2012) 08-20.

[18] S. Ahamed, M. Mitra, S. Sengupta, A. Sarkar, 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, 5(1) (2012).

[19] M.M. Tahir, A. Hussain, S. Badshah, A.Q. Khan, N. Iqbal, Classification of unbalance and misalignment faults in rotor using multi-axis time domain features, in: 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET), IEEE, 2016, pp. 1-4.

[20] H. Jeong, S. Park, S. Woo, S. Lee, Rotating machinery diagnostics using deep learning on orbit plot images, Procedia Manufacturing, 5 (2016) 1107-1118.

[21] P. Pennacchi, A. Vania, Diagnosis and model based

[30] E. Iseli, J. Schiffmann, Experimental and numerical investigation of the unbalance behavior of rigid rotors supported by spiral-grooved gas journal bearings, Mechanical Systems and Signal Processing, 174 (2022) 109080.

[31] Y. Zhang, W. Wang, D. Wei, G. Wang, J. Xu, K. Liu, Dynamic stability of unbalance-induced vibration in a turbocharger rotor-bearing system with the nonlinear effect of thermal turbulent lubricating fluid film, Journal of Sound and Vibration, 528 (2022) 116909.

[32] Z. Zheng, J. Lin, Y. Hu, Q. Zhou, C. Yi, Dynamic unbalance identification and quantitative diagnosis of cardan shaft in high-speed train based on improved TQWT-RBFNN-NSGA-II method, Engineering Failure Analysis, 136 (2022) 106226.

[33] K.F. Riley, M.P. Hobson, S.J. Bence, Mathematical methods for physics and engineering, in, American Association of Physics Teachers, 1999.

[34] S.M. Ibn Shamsah, J.K. Sinha, Rotor unbalance estimation with reduced number of sensors, Machines, 4(4) (2016) 19.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Homaeinezhad, M. H. Saeidi Mostaghim, F. Arab, Pattern Recognition of Unbalanced Rigid Rotor Bearing Forces, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 1249-1270.

DOI: 10.22060/mej.2022.20592.7267