



ارائه مدل فازی - عصبی - تطبیقی جهت عیب یابی نابالانسی یک سیستم دوار با استفاده از سنسور پیزوالکتریک

مجتبی حسنلو

آزمایشگاه پایش وضعیت و سلامت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

HasanluMojtaba@gmail.com

چکیده

امروزه برای مدل‌سازی بهتر سیستم‌های مهندسی از روش‌های ترکیب شده به منظور دست‌یابی به دقت بیشتر استفاده‌های فراوانی می‌شود. به همین منظور ترکیب سه رویکرد فازی، شبکه عصبی مصنوعی و علم تطبیقی می‌تواند مدل‌سازی واقعی تری از سیستم را ارائه نماید. این سه روش هر یک بخشی از مدل مساله را طراحی و تحلیل می‌نمایند بطوریکه که مدل ارائه شده از ترکیب فازی-عصبی-تطبیقی می‌تواند یک مدل مقاوم و اطمینان بخشی را جهت تصمیم‌گیری توسط طراح را تحلیل نماید. در این مقاله هدف اصلی عیب‌یابی و پایش تجربی یک سیستم موتور هواپیما در حضور و غیاب نابالانسی را با استفاده از مدل ریاضی فازی-عصبی-تطبیقی تحلیل و تفسیر نماید. ابتدا با استفاده از نرم افزار LabVIEW و سنسورهای پیزوالکتریک داده‌های ارتعاش عرضی در محل قرارگیری سنسورهای پیزوالکتریک (نصب شده بر روی یاتاقان‌ها) ذخیره شده و سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB به مدل‌سازی داده‌های تجربی با استفاده از رویکرد ترکیبی فازی-عصبی-تطبیقی به منظور برازش منحنی پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۸ بهمن ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۹

کلیدواژگان

فازی

عصبی

تطبیقی

عیب‌یابی و پایش وضعیت

سیستم دوار

نابالانسی

Experimental Condition Monitoring of Unbalanced Rotary Shaft Based on ANFIS by Using Piezoelectric Sensor

M.Hasanlu

Health and Condition Monitoring Laboratory, Engineering Faculty, Imam Khomeini International University

HasanluMojtaba@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Received 16 October 2019

Accepted 17 February 2020

Available Online 29 April 2020

Keywords

Fuzzy

Artificial Neural Network

Adaptive

Condition Monitoring

Rotary System

Unbalancing

ABSTRACT

Today, there are using hybrid methods in order to reach high level degree of accuracy and reliability for engineering systems. According to more reality modelling of system, it was mixed three strategies such as fuzzy, artificial neural networks and adaptive method. This mixed methods is presenting and analyzing each of engineering problem. Adaptive-Neural-Fuzzy (ANF) can be showed in which a robustness and reliable model by designer who assess that in order to make decision as well. In this paper, main aim is experimental condition and health monitoring of rotary system is including shaft, bearings, electromotor which are main components of system and using piezoelectric as sensor by ANF method. Firstly, by using LabVIEW software, experimental data of flexural vibration was recorded with piezoelectric sensor where were fixed on top of bearings, and secondly we used MATLAB software for analyzing experimentation for presentation of ANF model in order to curve fitting of data.

Please cite this article using:

M.Hasanlu, Experimental Condition Monitoring of Unbalanced Rotary Shaft Based on ANFIS by Using Piezoelectric Sensor, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 1, pp. 66-75, 2019-2020 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

امروزه از مدل‌سازی هوشمند برای تعریف و بازبینی سیستم‌های مهندسی جهت شناخت هر چه بهتر بهره‌مند می‌شوند. سیستم‌های واقعی و تجربی به مراتب از عدم قطعیت‌های متنوعی برخوردار هستند که در بسیاری از مواقع تعریف آنها از طریق تئوری‌های علمی امکان‌پذیر نیست بنابراین ثبت داده‌های تجربی و بررسی و تحلیل آنها از طریق مدل‌سازی‌های هوشمند نظیر فازی، شبکه عصبی، تطبیقی، مقاوم و پیش‌بین می‌تواند جای خالی بسیاری از پارامترهای عدم قطعیت را بصورت ضمنی فرض و داخل کرد. این نکته می‌تواند بسیاری از خطاها و اشتباهات را بگیرد و همچنین منجر به افزایش صحت و اطمینان پذیری مدل گردد. امیر خوشنام و همکاران [۱] عیب‌یابی الکترو موتور 51B واحد زمزم ۲ فولاد خوزستان را با استفاده از تکنیک آنالیز ارتعاشات مورد مطالعه قرار دادند. آنها در بررسی طیف فرکانسی، رشد دامنه فرکانس یک برابر دور در بیرینگ سرچلو و عقب الکتروموتور و همچنین لرزش الکتروموتور نوسانی و بازرسی میدانی از مجموعه به این نتیجه رسیدند که پایه فلزی زیر الکتروموتور نیاز به تقویت دارد. امیری [۲] با تعریف و اندازه‌گیری نامحوری‌های دینامیکی موجود در یاتاقان‌های هیدرو دینامیکی، پایش و تحلیل عملکرد آنها را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق جهت تحلیل نامحور ها، دو بردار چرخشی در یاتاقان تعریف و از تکنیک‌های HRD^۱ برای عیب‌یابی استفاده شده است. پایش وضعیت و رفع عیب نابالانسی پولی سر موتور و پولی سر بلور و بیان نشانه‌های تشخیص آن‌ها از دیگر عیوب به کمک آنالیز ارتعاشات و تحلیل طیف فرکانسی^۲ توسط محمودی [۳] انجام شده است. در پژوهشی دیگر [۴] به بررسی پایش وضعیت و تشخیص عیوب بیرینگ‌ها سر عقب الکترو موتور بلوئر با استفاده از آنالیز ارتعاشات و تحلیل طیف فرکانسی، آنالیز حرارتی (ترموگرافی)، صداسنجی پرداخته است. عیسی‌وند و غائی [۵] با استفاده از آنالیز ارتعاشات به روش تجزیه حوزه فرکانس بر پایه تجزیه مقادیر تکین توابع چگالی طیفی توان، شناسایی علل ارتعاشات موجود در طبقه همکف ساختمان پژوهشگاه فضایی ایران را مورد مطالعه قرار داده‌اند. انجم شعاع و همکاران [۶] برای تشخیص عیب بیرینگ فن ۳۰۷ واحد کوره فلش از آنالیز اسپکترام ارتعاشی استفاده کرده و به بررسی رابطه بین آنالیز

ارتعاشات و تشخیص عیوب پرداخته‌اند. تشخیص نوع و محل عیوب نابالانسی و عیوب بلبرینگ در ماشین‌های دوار توسط خوشنود سرابی و همکارانش [۷] انجام شده است. آنها با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز عیوب داده‌های ۱۴ حالت مختلف شامل ۱۳ حالت با عیب نابالانسی و عیب بلبرینگ در محل‌های مختلف و یک حالت سالم را توسط ۶ سنسور ثبت کرده‌اند. قاسمی و همکارانش [۸] به کمک آنالیز ارتعاشات عیب‌یابی بیرینگ‌های غلتشی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند، آنها همچنین با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و روش المان محدود، بیرینگ معیوب را شبیه‌سازی کرده و به تحلیل سیگنال ارتعاشی برآمده از آن پرداخته‌اند. حاجب و صدقاتی نسب [۹]، علل بوجود آمدن ناهمراستایی^۳ در تشخیص عیب الکتروموتور^۴ را مورد بررسی قرار داده‌اند. زیدآبادی [۱۰] به کمک آنالیز ارتعاشات، نابالانسی جرمی موجود در پروانه پمپ آب برگشتی کارخانه تغلیظ میدوک را مورد ارزیابی قرار داده است و در پایان با مقایسه وضعیت ارتعاشی تجهیز، قبل از تشخیص عیب و بعد از رفع آن اهمیت پایش وضعیت مشخص گردید. گلپهان و همکاران [۱۱]، ضمن معرفی روش آنالیز کارایی^۵ و قابلیت‌های آن، چند نمونه از کاربردهای آن در نیروگاه برقایی مارون و ترکیب آن با سایر روش‌های پایش وضعیت مورد بررسی قرار گرفته است. کندی و هاشمی [۱۲] تعیین میزان اثربخشی فعالیت‌های تعمیراتی بعنوان حلقه مفقوده برنامه‌های پایش وضعیت را مورد بررسی قرار داده و نمونه‌هایی از بازرسی، قبل و پس از انجام فعالیت‌های تعمیراتی به همراه محاسبات تلفات ناشی از عدم اجرای صحیح برنامه‌ها داده‌اند. فاطمه افشارنیا و همکاران با استفاده از عکسهای فرورگرافی حاصل از نمونه‌های روغن آماده شده دستی نشان دادن که ذرات فرسایشی از سه فلز معمول بخوبی مطابق با رنگ آنها از طریق عکسهای فرورگراف قابل تشخیص هستند. این روش یک تشخیص اولیه با استفاده از توصیف رنگ ذرات فرسایشی بوسیله عکسهای فرورگراف می‌باشد. طهرانی و همکاران [۱۳] ارتعاشی موتور فن بخار ۶ شرکت ذوب و نورد کرمان مورد بررسی قرار داده‌اند که طی بررسی‌های شرایط تجهیز از قبیل دما و ارتعاش متوجه رشد فرسایش در یاتاقان‌های که افزایش ارتعاشات را به نتیجه بر این شد که به واحد بهره CM دنبال داشته است. که پس از

^۳ Misalignment^۴ Submersible (SPD8)^۵ PCM^۶ CCM^۱ Hot - Run-Down^۲ FFT

یک مدل پایه ای برای ارزیابی های دوره ای بعد مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله هدف ارائه یک مدل هوشمند و کاربردی می باشد که در بحث عیب یابی و پایش وضعیت سیستم های مهندسی مکانیک در صنایع مختلف نفت و گاز می تواند استفاده گردد. مدل هوشمند ترکیبی از علوم فازی، عصبی و تطبیقی می باشد که با استفاده از دو نرم افزار LabVIEW و MATLAB و همچنین حسگر پیزوالکتریک بصورت تجربی داده های یک سیستم دوار شفت استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مدلسازی

یک مدل فازی سوگنو درجه یک با دو ورودی x و y و یک خروجی z در نظر بگیرید. قواعد فازی نوعاً می توانند به صورت زیر باشند:

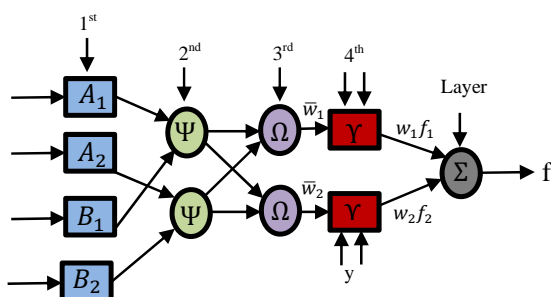
قاعده ۱:

$$\text{اگر } x = A_1 \text{ و } y = B_1 \text{ آنگاه } z = q_1 y + r_1$$

قاعده ۲:

$$\text{اگر } x = A_2 \text{ و } y = B_2 \text{ آنگاه } z = p_2 x + q_2 y + r_2$$

خروجی کل میانگین وزنی خروجی ها می باشد. ساختار انفیس عبارات فوق در شکل ۱ نشان داده شده است:



شکل ۱ ساختار شبکه عصبی انفیس

این ساختار پنج لایه دارد. ملاحظه می شود که لایه های لایه های یکسان، توابع یکسان دارند. گره خروجی I در لایه ۱ با $O_{i,i}$ نامگذاری می شود.

لایه ۱: هر گره در این لایه شامل یک گره تطبیقی با یک تابع گره است و داریم:

که در آن x (یا y) ورودی گره I و A_i (یا B_i) یک مجموعه فازی مربوط به آن گره می باشد. به عبارات دیگر خروجی این لایه مقدار عضویت آن می باشد. توابع عضویت برای A می توانند هر تابع عضویت پارامتری متناسب باشند. هر

تحت نظر گرفتن تجهیز و استفاده از تکنیک های بردار برای تمیز کاری فن و سرویس تجهیز اعلام گردد. حسین طهرانی و همکاران [۱۴] ارتعاشی موتورگیربکس استند یک شرکت ذوب و نورد کرمان را مورد بررسی دادند که طی بررسی های شرایط تجهیز از قبیل دما و ارتعاش متوجه افزایش فرسایش در چرخ دنده ها که خرابی بیرینگ ها و ایجاد ناهنجاری در سطح درگیری دندانه ها را در پی دارد که پس از اعلام به واحد بهره بردار پس از دمونتاژ خرابی گیربکس اثبات شد و گیربکس دمونتاژ و به کارگاه تعمیرات منتقل گردید. داودآبادی [۱۵] با ارائه نتایج آزمایشهای عمر پرشتاب یاتاقانهای غلتشی، روند خرابی و تشخیص زود هنگام عیب با استفاده از خصیصه های ارتعاشات و شاکپالس ارائه داده است. نتایج گزارش شده حاکی از موفقیت خصیصه شاکپالس در تشخیص زود هنگام وقوع خرابی و نوع آن نسبت به ارتعاشات است. مهدوی فر و همکاران [۱۶] تشخیص عیب خرابی یاتاقان در موتور الکتریکی با استفاده از آنالیز مشخصه جریان الکتریکی استاتور را مورد بررسی قرار داده اند. در این روش شناسایی از طریق تبدیل فوریه و تبدیل موجک گسسته توسط نرم افزار متلب انجام شده برای این منظور در یک یاتاقان دو سطح از خرابی ایجاد شده و نتایج برای این خرابی ها مورد بررسی قرار گرفته است. داموغ و همکاران [۱۷] به کمک آنالیز ارتعاشات عیب لقی را مورد بررسی قرار داده است. اقبالی دهکردی و همکاران [۱۸] تاثیر لقی و فرسودگی در گیربکس را با استفاده از طیف فرکانسی مورد بررسی قرار داده اند. سلمانیان و همکاران [۱۹] شناخت و تشخیص لقی خارجی بیرینگ و بررسی اقدام اصلاحی مورد بررسی قرار داده اند و نشان دادند که می توان با روشی مطمئن و مقرون به صرفه از نظر زمان و هزینه، این مشکل را حل کرد. جنیدی پور و اسدی [۲۰] در مقاله خود، پیشبینی عمر باقیمانده بیرینگهای پنیون آسیای تر کارخانه هماتیت به کمک روش شبکه عصبی را مورد بررسی قرار داده اند. و به این نتیجه رسیدند که بررسی نتایج بدست آمده از حل شبکه عصبی نشان میدهد که مقادیر پیشبینی شده همخوانی خوبی با مقادیر واقعی دارند. از سوی دیگر، با توجه به کارایی مطلوب شبکه عصبی میتوان با دقت خوبی از نتایج مذکور در خصوص پیشبینی عمر باقیمانده بیرینگ پنیون آسیاهای مشابه نیز استفاده نمود. در این مقاله با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ازدحام ذرات یک مدل بهینه جهت پیش بینی فرکانس های سیستم در حالتی که عیبی در سیستم رخ دهد ارائه می شود که میتواند بعنوان

۱. انفیس فقط سیستم های سوگنو درجه صفر و درجه یک را پشتیبانی می کند.

$$Q_{1,i} = \mu A_i(x) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$Q_{1,i} = \mu B_{i,2}(x) \quad i = 3, 4$$

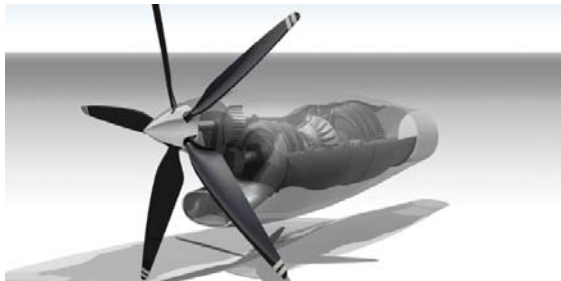
۲. همه توابع عضویت یا ترکیب خطی از هم می باشند و یا ثابتند.

۳. تعداد توابع عضویت باید با تعداد قواعد فازی برابر باشند.

۴. وزن هر قاعده فازی برابر واحد است.

موتور توربوپراپ

توربوپراپ ها نوعی از موتورهای هوایی هستند که معمولاً در هلی کوپترهای کوچک و کم سرعت استفاده می شود. این نوع موتور شبیه به توربوشفت بوده و در آن از گردش محور توربین برای گرداندن ملخ و ایجاد پیشرانش استفاده می شود. توربوپراپها در سرعت های کم، کارایی بهتری نسبت به توربوفن ها و توربوجت ها دارند ولی در سرعت های بیشتر، راندمان آنها کاهش یافته و نویز آنها افزایش می یابد.



شکل ۲ نمونه واقعی یک موتور توربوپراپ [۲۱]

جهت انجام تست آزمایشگاهی به منظور بررسی نابالانسی سیستم دوار یک سیستم براساس شکل ۲ در آزمایشگاه پایش وضعیت و سلامت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، راه اندازی گردید بطوریکه با نصب دیسک های مختلف بر روی شفت این سیستم میتوان معادل یک موتور توربوپراپ در نظر گرفت.



شکل ۳ مدل ساخته شده سیستم دوار

پارامتر در این لایه به عنوان یک پارامتر پیش فرض نام برده می شود.

لایه ۲: هر گره در این لایه با n نامگذاری شده است و خروجی هر گره حاصلضرب همه سیگنالهای ورودی به آن گره می باشد. این گره ها عمل AND فازی را انجام می دهند و داریم:

که در آن خروجی هر گره قدرت آتش^۱ هر قاعده را نشان می دهد.

لایه ۳: هر گره در این لایه با N نامگذاری شده است. گره های این لایه خروجی نرمالیزه شده هر قاعده را محاسبه می کند و داریم:

$$Q_{2,i} = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y) \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

که در آن w_i قدرت آتش آن قاعده می باشد. خروجی این لایه قدرت آتش نرمالیزه شده نامیده می شود.

لایه ۴: هر گره در این لایه وابسته به یک تابع گره می باشد و داریم:

$$Q_{3,i} = \frac{\bar{w}_i}{\sum_i w_i} \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

که در آن w_i ، قدرت آتش نرمالیزه شده از لایه سوم است و $\{p_i, q_i, r_i\}$ مجموعه پارامترهای گره i هستند. پارامترهای

این لایه تحت عنوان « پارامترهای نتیجه شده » نامیده می شوند.

$$Q_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

لایه ۵: تنها گره موجود در این لایه با Σ نامگذاری شده است که مجموع تمام سیگنالهای ورودی به آن را محاسبه کرده و به خروجی می برد. لذا داریم:

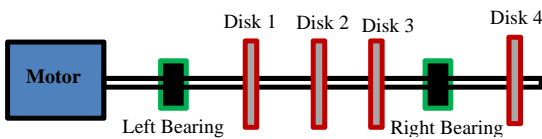
که در آن $O_{5,i}$ خروجی i امین گره در لایه پنجم می باشد.

$$O_{5,i} = \sum_{i=1,2} \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

محدودیت های انفیس

¹ firing strength

استخراج شده در پیشرو نیز براساس همین شماره های دیسک ها ارائه می گردند.



شکل ۷ نمای شماتیک سیستم مورد بررسی

شبیه سازی

فرآیند شبیه سازی در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله اول میزان تغییرات فرکانس ها و برحسب جابجایی محل یاتاقان ها با استفاده از نرم افزار LabVIEW و سنسور ها به تصویر کشیده شده است و در مرحله دوم داده برداری های گرفته شده از سیستم با استفاده از محیط گرافیکی ANFIS در نرم افزار MATLAB فرآیند فازی-عصبی-تطبیقی انجام گرفته شده است. در مرحله دوم ورودی و خروجی های ANFIS بدین صورت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: نام گذاری دیسک های سیستم دوار

تحلیل ارتعاش عرضی	
ورودی ها	خروجی مطلوب
نابالانسی دیسک ۱	بالانسینگ سیستم
نابالانسی دیسک ۲	
نابالانسی دیسک ۳	
نابالانسی دیسک ۴	
نابالانسی همه دیسک ها	

تحلیل فرکانسی- جابجایی یاتاقان ها

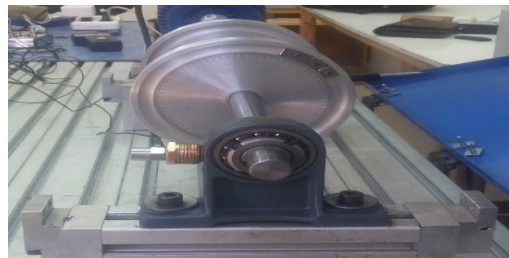
از آنجایی که دو سنسور در محل قرار گیری یاتاقان ها نصب گردیده بود که ارتعاش عرضی شفت را حس نمایند بنابراین اولین یاتاقان (نزدیکترین به موتورالکتریکی) سمت چپ و دومین یاتاقان (دورترین از موتورالکتریکی) سمت راست (مطابق شکل ۴) فرض شد. تحلیل FFT انجام شده در تصاویر ۸ و ۹ برای هردو یاتاقان را میتوان دید. حال نمونه برداری های صورت گرفته را وارد نرم افزار MATLAB می نماییم و فرآیند شبیه سازی با رویکرد ANFIS را شروع می نماییم. ANFIS نیز همانند شبکه عصبی داده را باید به دو بخش آموزش و آزمایش تقسیم نمود. در مرحله بعد ۷۰ درصد داده جهت آموزش به ANFIS معرفی می گردد.

براساس مدل واقعی موتور توربوپراپ در شکل ۲، سعی گردید سیستم دوار مورد بررسی حدالمقدور شبیه و معادل توربوپراپ گردد که در شکل ۴ میتوان به این شباهت پی برد. همانطور که در شکل ۴ دیده می شود محل قرار گیری سنسورهای پیزوالکتریک بصورت عمودی در بالای یاتاقان ها قرار گرفته اند.



شکل ۴ جایگیری دیسک های شفت دوار

همچنین جهت اعمال نابالانسی در هریک از دیسک ها از یک خلاقیتی بکار گرفته شد بدین صورت که با اعمال یک شیار در دور دیسک ها، محلی برای قرارگیری اجرام مختلف را تعبیه نمود که میتوان در شکل ۵ این اعمال را مشاهده کرد.



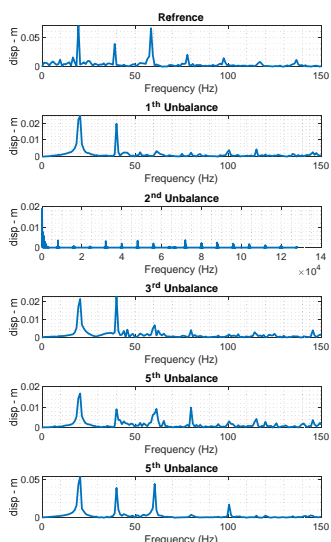
شکل ۵ نحوه نابالانس کردن دیسک های دوار سیستم

از آنجایی که سنسور پیزوالکتریک از حساسیت بسیار بالایی در ثبت و ضبط داده های آزمایشگاهی دارد لازم بر آن شد براساس شکل ۶ از این نوع سنسور پیزوالکتریک جهت داده برداری استفاده کرد.

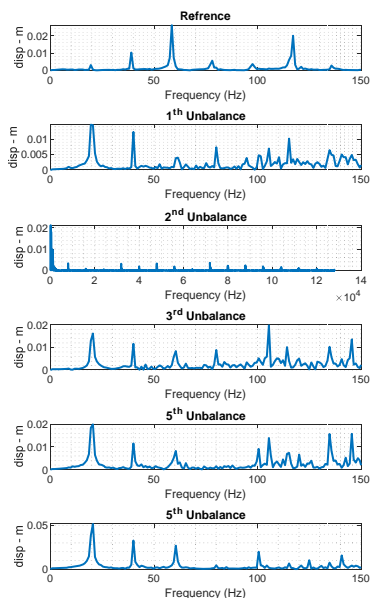


شکل ۶ سنسور پیزوالکتریک مورد استفاده در آزمایش

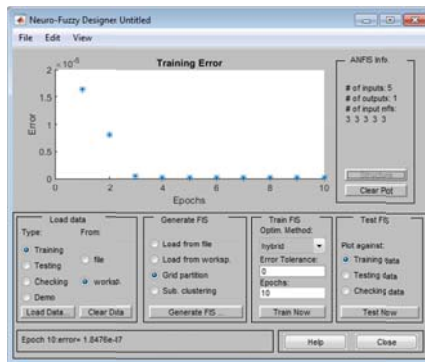
بصورت شماتیک میتوان شکل ۳ را بصورت شکل ۷ معادل نمود. در شکل ۷ که دیسک ۴ (براساس شکل ۲) معادل پراونه موتور توربوپراپ بوده و دیسک های ۱ تا ۳ معادل کمپرسور بلیسک های موتور توربوپراپ مدنظر قرار داد. بنابراین داده های



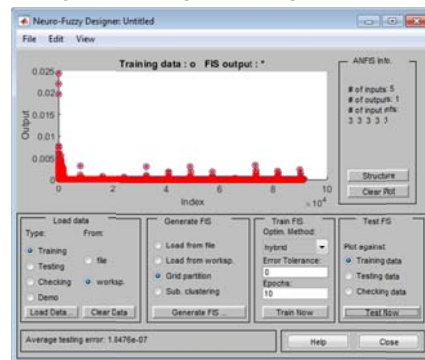
شکل ۸ تحلیل FFT یاناقان سمت چپ برای ۵ حالت نابالانسی



شکل ۹ تحلیل FFT یاناقان سمت راست برای ۵ حالت نابالانسی

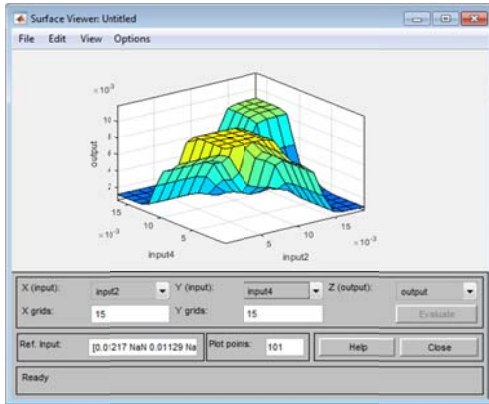


شکل ۱۰ فرایند شبیه سازی خطای انفیس

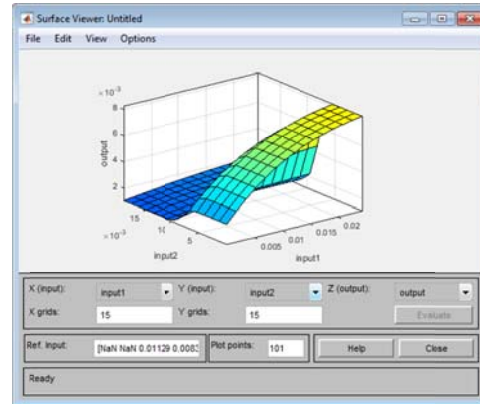


شکل ۱۱ برازش منحنی خروجی داده تجربی آموزش داده

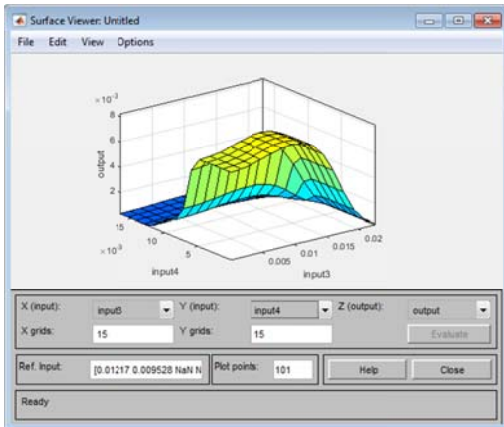
تصاویر ۱۲ تا ۲۰ بیانگر توابع ورودی های مختلف را بصورت سطوح کنترلی ارائه می کنند. بدین صورت که این سطوح ارتباط انواع مختلف ورودی ها با خروجی را بیان می نمایند. میتوان نوآوری این پژوهش را در همین سطوح کنترلی دانست بدین صورت که این سطوح میتوانند بعنوان توابع و بانک اطلاعاتی ذخیره کرد که موتور توربوپراپ را براساس خروجی های گرفته شده از آن از طریق سطوح کنترلی زیر مقایسه نمود و عیب نابالانسی در دیسک های مختلف را از آن شناسایی کرد.



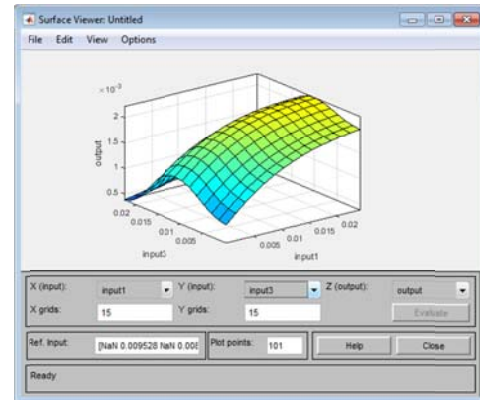
شکل ۱۷ تابع سطح کنترلی ورودی ۲ و ۴ با خروجی



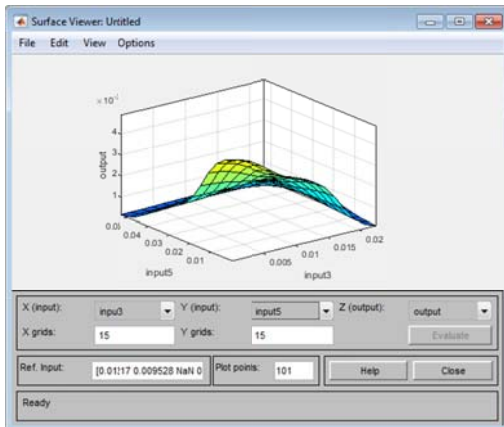
شکل ۱۲ تابع سطح کنترلی ورودی ۱ و ۲ با خروجی



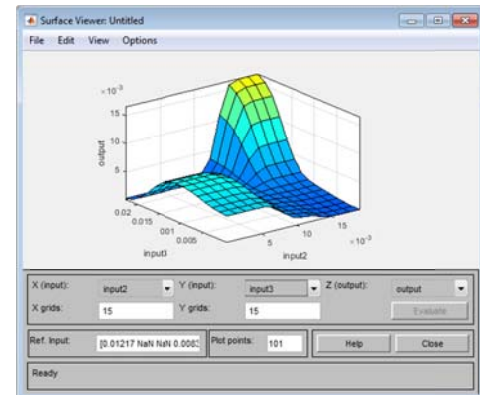
شکل ۱۸ تابع سطح کنترلی ورودی ۳ و ۴ با خروجی



شکل ۱۳ تابع سطح کنترلی ورودی ۱ و ۳ با خروجی

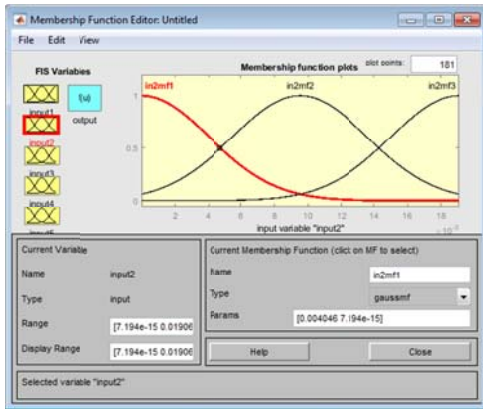


شکل ۱۹ تابع سطح کنترلی ورودی ۳ و ۵ با خروجی

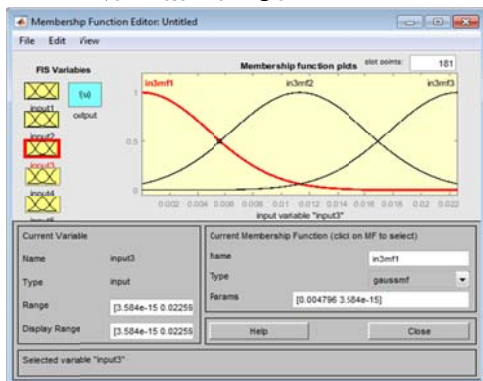


شکل ۱۶ تابع سطح کنترلی ورودی ۲ و ۳ با خروجی

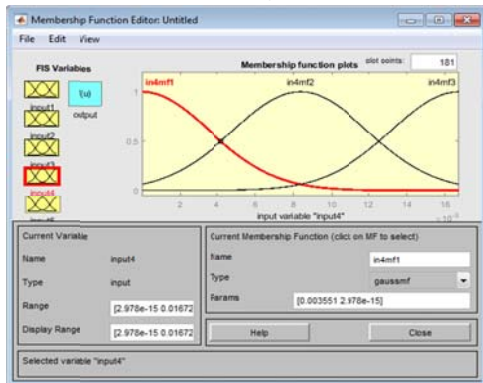
از آنجایی که بخش مهمی از فرآیند ANFIS استفاده از تئوری منطق فازی هست در این بخش میتوان قوانین فازی، توابع عضویت ورودی ها و تغییرات صورت گرفته در حین عملیات فازی سازی را بوضوح مشاهده کرد.



شکل ۲۴ توابع عضویت ورودی دوم



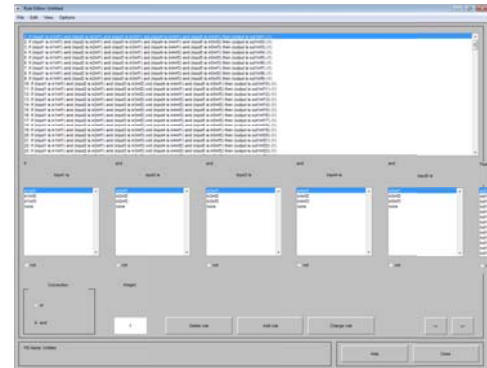
شکل ۲۵ توابع عضویت ورودی سوم



شکل ۲۶ توابع عضویت ورودی چهارم

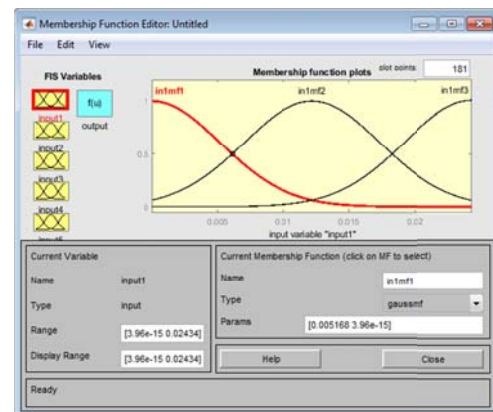


شکل ۲۱ ترکیب توابع عضویت ورودی و خروجی



شکل ۲۲ قوانین فازی مدل انفیس

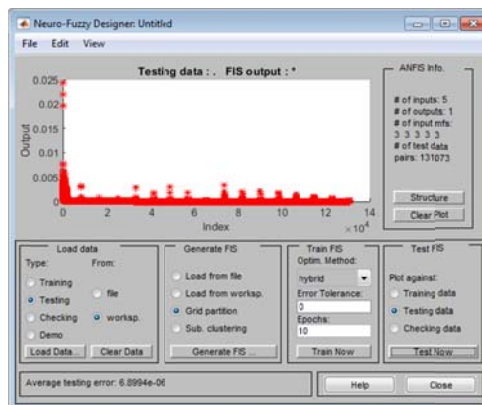
توابع عضویت بکارگرفته شده از نوع توابع گوسی بوده که میتوان برای ۵ ورودی به ANFIS را بصورت زیر مشاهده کرد.



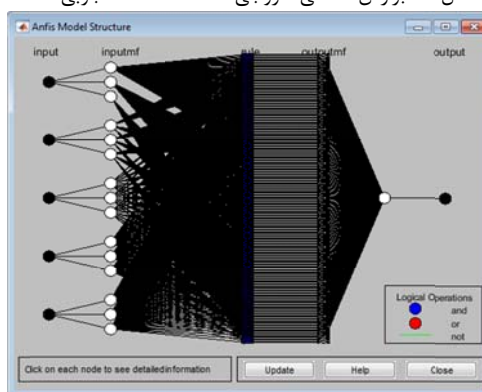
شکل ۲۳ توابع عضویت ورودی اول

در بخش پایانی از فرآیند ANFIS هدف بر آن شد که بار دیگر میزان مقاوم بودن مدل ANFIS مورد ارزیابی قرار بگیرد که در این بخش وارد مرحله آزمایش مدل فازی-عصبی- تطبیقی می شویم که میزان برازش داده های پیشنهاد شده از سوی ANFIS با داده های مطلوب که همان داده های آزمایشگاهی بالانسینگ می باشند را مشاهده کرد. در پایان آرایش نرون های عصبی در فرآیند ANFIS را میتوان بصورت شکل ۲۹ ارائه کرد.

- [۲] امیری، حمیدرضا. "استفاده از بردارهای دینامیکی در اندازه‌گیری، پایش و تحلیل عملکرد یاتاقانهای هیدرودینامیکی"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷
- [۳] محمودی گزیگ، احمد. "پایش وضعیت و رفع عیب نابالانسی بولی ها در صنعت سیمان به کمک آنالیز ارتعاشات"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۴] محمودی گزیگ، احمد. "پایش وضعیت و تشخیص عیوب بیرینگ ها به کمک آنالیز ارتعاشات، صداسنجی و ترموگرافی"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۵] عیسی وند، جواد و غائبی، شهرام. "پایش سلامت سازه با استفاده از آنالیز ارتعاشات به روش تجزیه حوزه فرکانس"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۶] انجم شعاع، صادق، نوری نصب، مهدی، محمودی، سعید، کریمی فر، علی. "تشخیص عیب بیرینگ فن ۳۰۷ واحد کوره فلش کارخانه ذوب خاتون آباد به کمک آنالیز اسپکترام ارتعاشی"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۷] خشنود سراپی، نسترن، امیر خانی، سعید، چایی بخش، علی. "تشخیص نوع و مکان عیوب بلبرینگ و نابالانسی در ماشین های دوار با استفاده از هوش مصنوعی"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۸] قاسمی، سید مصطفی، کدیور، محمد حسن، قاسم زاده، ابراهیم، محمدی، حسن. "شبیه سازی و عیب یابی بیرینگ های غلتشی از طریق آنالیز فرکانسی و روش المان محدود"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۹] حاجب، عماد و صداقتی نسب، حسین. "عیب یابی الکتروموتور submersible (SPD8) و بررسی علل بوجود آمدن Misalignment در آن"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷.
- [۱۰] زیدآبادی، سعید، ۱۳۹۷، تشخیص نابالانسی جرמי در پروانه پمپ سانتریفیوژ با آنالیز ارتعاشات، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۱] گله بان، محمد، رضایی، هادی، درویش پسند، مهدی، بکارگیری آنالیز کارایی (PCM) به عنوان یک روش پایش وضعیت در نیروگاه های برقایی و ترکیب آن با سایر روش های پایش وضعیت، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۲] کندی، احمد، هاشمی، هما، بررسی و تحلیل میزان اثر بخشی فعالیت های تعمیراتی در برنامه های پایش وضعیت ترموگرافی، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۳] طهرانی، حسین، شهبازی، کامران، ابدانی، امین، حاج غنی، میثم، دشمیر، حمیدرضا، نیکوزر، امید، کاظم زاده، میثم، بررسی رفتار ارتعاشی موتور فن بخار CCM شرکت ذوب آهن و نورد کرمان، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۴] طهرانی، حسین، شهبازی، کامران، ابدانی، امین، حاج غنی، میثم، بهرامی، ارسلان، نیکوزر، امید، کاظم زاده، میثم، بررسی رفتار ارتعاشی موتور گیربکس استند ۱ شرکت ذوب آهن و نورد کرمان، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۵] داودآبادی، علی، ارغند، حسام الدین، سماواتیان، محمد، بهزاد، مهدی، مقایسه روش SPM با آنالیز ارتعاشات در تشخیص زودهنگام عیب یاتاقان غلتشی، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۶] مهدوی فر، سعید، بهزاد، مهدی، فیض آبادی، محمدقربان، ورمزیا، محمدرضا، شاهمرادی، ارشد، هنرفر، بابک، مدنیان، رضا، تشخیص عیب خرابی یاتاقان در موتور الکتریکی با استفاده آنالیز مشخصه جریان الکتریکی استاتور و مقایسه آن با ارتعاشات، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۷] داموغ، احمد، تاج پور، محسن، الهی فر، صمد، عیب یابی باکت B2061 واحد گندله سازی شرکت فولاد خوزستان به کمک آنالیز ارتعاشات، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.



شکل ۲۸ برازش منحنی خروجی تست شده داده تجربی



شکل ۲۹ نمای آرایش نرون های عصبی

۳- نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه مدل فازی-عصبی- تطبیقی جهت عیب یابی نابالانسی یک سیستم دوار با استفاده از سنسور پیزوالکتریک پرداخته شد. هدف از انجام این تحقیق ارائه یک مدل ریاضی مرجع بصورت توابع یا همان سطوح کنترلی به منظور بررسی سایر مدل های جدید در صنعت بوده است. جهت کاربردی بودن سیستم دوار سعی گردید که یک مدل کاربردی به نام موتور توربوپراپ را ارائه کرد و سعی کرد تا جای امکان سیستم دوار آزمایشگاهی را به موتور توربوپراپ نزدیک نمود. بدیهی است که موتور توربوپراپ یک موتور پرکاربرد در صنعت هواپیمایی در جهان بوده که اثر نابالانسی میتواند که خطرات جبران ناپذیری را تحمیل نماید.

۴- مراجع

- [۱] خوشنام، امیر، مهربان، محمد جواد و پناه، علی الله. "استفاده از تکنیک آنالیز ارتعاشاتدر عیب یابی الکترو موتور 51B واحد زمزم 2 فولاد خوزستان"، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۷

- [۱۸] اقبالی دهکردی، رضا، حوالاتی، عبدالزهرا، سلمانیان طیبسی، مسعود، تاثیر لقی و فرسودگی در گیربکس بر طیف فرکانسی، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۱۹] سلمانیان، مسعود، حوالاتی، عبدالزهرا، اقبالی دهکردی، رضا، شناخت و تشخیص لقی های بیرینگ و بررسی اقدام اصلاحی، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.
- [۲۰] جنیدی پور، محمد مهدی، اسدی، امیرعباس، پیش بینی عمر باقی مانده بیرینگ های صنعتی به کمک شبکه عصبی (مطالعه موردی: شرکت گل گهر سیرجان)، سیزدهمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷.

[21] <https://www.google.com/url?sa=i&source=imgres&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj12PXo-sboAhXNCwKHTQpBFAQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fgrabcad.com%2Flibrary%2Fturboprop-engine&psig=AOvVaw1VJglZmRTvqMzcl-WgnxuG&ust=1585820966233208>