

ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس



mme.modares.ac.ir

روشی نو درتعیین عمق ترک محور دوار با استفاده از آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی و شبکه انفیس

مهرداد نوری خاجوی $^{1^*}$ ، محمد رضا باویر 2 ، ابراهیم فرخی 2

1- استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1678815811، mnouri@srttu.edu

چکیدہ	اطلاعات مقاله
آنتروپی در آمار، معیاری در جهت اندازهگیری بینظمی در سریهای زمانی میباشد. از آنتروپی جهت بررسی سیگنالهای زمانی فیزیولوژیک استفاده میشود. به کمک این تحلیل میتوان به عملکرد سالم یا ناسالم ارگانهای بدن مانند قلب، مغز و … پی بُرد. از این روش برای تشخیص بیماری صرع استفاده شده است. در این مقاله برای اولین بار از نوع خاصی از آنتروپی به نام آنتروپی جایگشتی جهت تعیین سلامت سیستمهای	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 18 اسفند 1393 پذیرش: 29 فروردین 1394
مکانیکی استفاده شده است. دستگاهی شامل موتور که به یک محور تحت گشتاور خمشی متصل شده جهت انجام آزمایشات طراحی و ساخته شد. ارتعاشات ناشی از این محور دوار در حالتهای سالم و با ترکهای 3، 5 و 7 میلیمتر توسط دستگاه دادهبرداری بر روی یاتاقانهای نگهدارنده محور، ثبت شد. این سیگنالها توسط الگوریتم آنتروپی جایگشتی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این پیشپردازش	ارائه در سایت: 28 اردیبهشت 1394 <i>کلید واژگان:</i> آنتروپی جایگشتی سیگنال زمانی
سیخنالهای ارتعاشی به عنوان بردارهای حصوصیت به یک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیفی (انفیس) داده شد. تعداد 9 حصوصیت از سیگنال آنتروپی چندمقایسی اسخراج شد که بعنوان ورودیهای سیستم انفیس مورد استفاده قرار گرفت. سیستم انفیس طراحی شده توانست با تحلیل سیگنالهای پیشپردازش شده حالات مختلف چهارگانه را با دقت بیش از 96% تشخیص دهد. نتایج بهدست آمده از این تحقیق میتواند به عنوان روشی جدید و بدیع جهت عیبیابی سیستمهای مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد.	انفیس ترک عرضی محور دوار

A new method in determining rotor crack depth by using multi-scale permutation Entropy and ANFIS network

Mehrdad Nouri Khajavi*, Mohamad Reza Bavir, Ebrahim Farrokhi

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran * P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, mnouri@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 09 March 2015 Accepted 18 April 2015 Available Online 18 May 2015

Keywords: Permutation Entropy Time Series ANFIS Transverse Crack Rotating Shaft

Abstract

In statistics, Entropy is a measure of time series disorder. Entropy is used in physiologic signal analysis. In physiologic science, Entropy is used for performance analysis of body organs such as heart and brain. Epileptic patients have been diagnosed with this technique. In this paper for the first time, Entropy is used to determine the health condition of mechanical systems. A special kind of Entropy, namely Permutation Entropy is used for this purpose. To perform the experiment an apparatus consisting of a motor coupled with a shaft has been designed and manufactured. Vibration signals from support bearing of this system in different shaft states, namely healthy shaft, and shafts with 3, 5 and 7 mm crack were gathered with a vibration data analyzer. The vibrations were taken from sensors mounted on bearing supports of the shaft. Shaft was subjected to a constant bending moment. The vibration signals were preprocessed by permutation Entropy method. Nine different features were extracted from the Entropy signals which are fed to an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). The designed ANFIS was

باشد. هر یک از این معایب باعث بالا رفتن دامنه ارتعاش شده و نیروهای	1- مقدمه
وارده به یاتاقانها و کوپلینگها را افزایش داده و باعث کاهش عمر آنها	محور دوار یکی از مهمترین اجزای موتورها، پمپها، توربینها و … بوده که
میشود؛ بنابراین بهمنظور جلوگیری از خرابی یاتاقانها و اجزای مرتبط، باید	وظیفه انتقال قدرت را به عهده دارد. با توجه به نیروها و گشتاورهای وارده به
با شناسایی سریع عیب مربوطه به رفع آن اقدام کرد.	محور دوار که بعضاً بهصورت ناگهانی و نوسانی اعمال میشوند و همچنین
با توجه به استفاده وسیع محورهای دوار در صنعت، نگهداری این	تغییر دمای ناگهانی آن، همواره پس از مدتی کارکرد، امکان تغییر شکل و
سیستمها از اهمیت ویژهای برخوردار است، زیرا عدم تشخیص بهموقع عیب	اعوجاج محور دوار وجود دارد. محور دوار یک توربین یا موتور ممکن است
این قطعات ممکن است به خسارات جبرانناپذیری منجر شود. یکی از عیوب	دارای مشکلات متعددی از قبیل نامیزانی، عدم هممحوری، ترک عرضی و

Please cite this article using: M. Nouri Khajavi, M.R. Bavir, E. Farrokhi, A new method in determining rotor crack depth by using multi-scale permutation Entropy and ANFIS network, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 31-39, 2015 (In Persian)

متداول محورها، ترکهای عرضی است که ناشی از خستگی محور در اثر اعمال گشتاور خمشی است.

از دهه 1970 مطالعات زیادی بر روی محورهای دارای ترک انجام شده است. در سال 1976، دیویس و مایس، دینامیک محورهای دارای ترک را با ارائه مدلی بررسی کردند [1]. در همین سال هنری و گسچ [2]. همچنین اکا آوا [3] کارهای مشابهی در این زمینه انجام دادند، در حالی که نلسون و ناتاراج [4]، این مسئله را با مدل المان محدود بررسی کردند.

دیمارگانوس و پاپادوپولیس در سال **1987 [5]** کوپلینک ارتعاشات پیچشی را در محور دوار ترکدار دارای ترک عرضی سطحی بررسی کردند. آنها ترک را به صورت باز در نظر گرفتند و انعطاف پذیری محلی ناشی از ترک را با ماتریس 6×6 برای 6 درجه آزادی المان ترکدار محور دوار نمایش دادند. و با صرفنظر از اثر برش و در نظر گرفتن خمش در دو جهت اصلی و کشش به ماتریس سختی 3×3 شامل جملاتی که بیانگر کوپلینگ بود، دست یافتند و پدیده ی حرکت کوپل شده عرضی و محوری را مورد مطالعه قرار دادند.

در همان سال دیمارگانوس و پاپادوپولیس [6] در مقالهای دیگر کوپلینک ارتعاشات خمشی و پیچشی را برای محور دوار ترکدار تیموشنکو بررسی کردند. آنها همچنین به بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری و تأثیر ترک روی رفتار ارتعاشی محور دوار پرداختند و ارتباط بین مقادیر ویژه سیستم، عمق ترک و نسبت باریکی محور دوار را به دست آوردند.

در سالهای اخیر کمی کردن پیچیدگی سریهای زمانی مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. یکی از تحلیلهای سری زمانی بررسی شباهت یا بینظمی بین دو سیگنال است. این کار با استفاده از الگوریتمهای آنتروپی¹ انجام میشود. پایه اکثر الگوریتمهای آنتروپی، آنتروپی شانون² میباشد. آنتروپی سری زمانی بیانکننده میزان تصادفی بودن آن است و محاسبه انواع آنتروپی با الگوریتمهای مختلف امکانپذیر است.

در سال 1990- استین ام پینکاس [7] روش جدیدی را برای محاسبه آنتروپی از یک سری زمانی به دست آورد. این کمیت را آنتروپی تقریبی³ نامگذاری کردد که تابعی چهار متغیره میباشد. وی پی بردند طول سری زمانی در الگوریتم آنتروپی تقریبی باید حداقل 1000 داده باشد. در سال 2006 آقای روکیانگ یان و همکارانش [8] با استفاده از الگوریتم آنتروپی تقریبی و گرفتن سری زمانی کارکرد یک بلبرینگ معیوب توانستند عیوب مختلف را تشخیص داده و آنها را طبقهبندی کنند. در ضمن آنها تأثیر متغیرهای بُعد⁴, بردار تأخیر زمانی⁵, ضریب انحراف معیار سیگنال و طول سری زمانی را در الگوریتم آنتروپی تقریبی محاسبه کردند. در سال 2010 آقای لانگ زانگ و همکارانش آنها با استفاده از ویژگیهای برداشته شده از آنتروپی چند مقیاسی⁶ عیبیابی کردند. آنها با استفاده از ویژگیهای برداشته شده از آنتروپی چند مقیاسی معاسی بهدست

در سال 2002 بندت و پامپ [10] روشی دیگر برای محاسبه آنتروپی

استفاده كردند.

بار دیگر آقای راکیانگ یان در سال 2012 [11] این بار با استفاده از الگوریتم آنتروپی جایگشتی توانست یک بلبرینگ معیوب را مورد عیبیابی قرار دهد. همچنین وی الگوریتمهای آنتروپی تقریبی و آنتروپی جایگشتی را مورد مقایسه قرار داد.

عیبیابی یک محور دوار به روشهای گوناگونی انجام شده است ولی تابه حال تحقیقی با پیش پردازش سیگنال به روش آنتروپی صورت نگرفته است. در این پژوهش پیش پردازش دادهها به وسیله آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی انجام می شود.

2- دستگاه و روش اجرا آزمایش 2-1- مراحل کار

در این پژوهش پس از ساخت دستگاه آزمایشگاهی محور دوار با بارگذاری خمش خالص بهوسیله سنسورهای ارتعاشی، سیگنال شتاب در دو جهت قائم و افقی از روی تکیهگاهها جمعآوری شد. تعداد دور نیز با سنسور تاکومتر محاسبه شد؛ درنهایت ویژگیهای سیگنال با کمک آنتروپی جایگشتی چندمقیاسی¹¹ استخراج گردید و با کمک شبکه انفیس برای تشخیص و پیشبینی به کار گرفته شد. (شکل 1)

2-2- نحوهی انجام آزمایشها و جمع آوری دادهها

برای جمع آوری داده ها از دستگاه آنالیزور آداش ¹² 4400 استفاده شد. این دستگاه اندازه گیری ساخت کشور چک می باشد. این دستگاه دارای 4 کانال دستگاه اندازه گیری ساخت کشور چک می باشد. همچنین دارای قابلیت های AC, 4 کانال DC و کانال ورودی تاکومتر می باشد. همچنین دارای قابلیت های نمایش شکل موج و طیف ارتعاشات در حالت ها و نمونه های مختلف، آنالیز پیشرفته ارتعاشات، بالانس و ذخیره اطلاعات در حافظه داخلی است. در این تحقیق از چهار سنسور تک جهت پیزوالکتریک CTC استفاده شد. سنسور محدوده دمایی 50 کشور سوئد است که در پیچ محدوده دمایی 90 گرم وزن دارد. سنسور جهت دریافت ارتعاشات در نقطه موردنظر (یاتاقان) محدوده دمایی 90 گرم وزن دارد. سنسور جهت دریافت ارتعاشات در نقطه موردنظر (یاتاقان) محدوده داست. خصوصیات محور مورداستفاده در جدول 1 نشان داده شده است.

مقدار	مشخصه
(استیل SAE1045(SAE1045)	جنس محور
12 mm	قطر محور
204000 MPa	مدول الاستيسيته
382 MPa	تنش تسليم



11- Multi scale Permutation Entropy 12- Adash 4400

در سری های زمانی معرفی کردند و از آن جا که قطعات سیگنال را با جایگشت⁸ بُعد سیگنال نسبت دادند این آنتروپی را آنتروپی جایگشتی نامیدند. آنها از این روش برای طبقهبندی الکتروانسفالوگرامهای¹⁰ قلبی

- 1- Entropy's Algorithm
- 2- Shannon Entropy
- 3- Approximate Entropy
- 4- Dimension
- 5- Time delay Vector
- 6- Multi Scale Sample Entropy
- 7- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
- 8- Permutation
- 9- Permutation Entropy
- 10- EEG

2-3- شرح آزمایش

آزمایش روی محور دوار تحت خمش خالص انجام شد. اگر عضوی تحت اثر کوپل مساوی (متقابل) موثر بر صفحه طولی خود قرار گیرد، در وضعیت خمش خالص قرار گرفته است. در ناحیه ی خمش خالص، برش صفر بوده و برآیند نیروهای داخلی در هر مقطعی معادل با یک کوپل است. مشخصات محور و شماتیک دستگاه در جدول 2 و شکل 3 نشان داده شده است.

پس از گذر از حالت شروع به کار و پایدار شدن، بهوسیله سنسورهای شتاب سنج نصب شده روی تکیه گاهها، سیگنال شتاب قائم و افقی جمع آوری گردید. دادههای جمع آوری شده به صورت سیگنالی با 4096 نمونه و با فرکانس نمونهبرداری 16384 هرتز، با دور موتور 30 دور بر ثانیه، دریافت شدند.

جدول 2 مشخصات دستگاه آزمایش محور دوار ترک دار با اعمال بار خمش خالص در



سیگنالهای آنالیز شده با استفاده از نرمافزار DDS2010 به رایانه شخصی انتقال داده شده و برای پیش پردازش توسط آنتروپی چندمقیاسی جایگشتی آماده شدند.

2-4- ایجاد عیب ترک در محور دوار

برای ایجاد ترک در محور دوار، بهوسیلهی دستگاه وایرکات، شیاری به عرض 0/29 میلیمتر ایجاد شد. در دستگاههای صنعتی و حالت واقعی کنترلی بر عمق و عرض ترک نیست ازاین و برای بررسی ترکهای مختلف از دستگاه وایرکات استفاده شد. عمق ترک ایجاد شده در نمونههای مختلف برابر 3، 5 و 7 میلیمتر بود؛ که با توجه به قطر 12 میلیمتری محور، نسبت عمق به قطر به ترتيب برابر 0/25، 41/67 و 58/33 درصد مي باشد.

3- مدلسازی ریاضی

توصيف رياضي رفتار در انواع سيستمهاي ديناميكي از دو مؤلفه حالت سیستم و قانون دینامیکی که نحوه تغییر متغیرهای حالت را تعیین می کند تشکیل شده است. یک سیستم فیزیکی با تغییرات پیوسته عمدتاً میتواند با یک معادله دینامیکی با بُعد محدود با رابطه (1) مدل میشود [12]:

(1) $dx(t)/d(t) = f(x(t),t), x(0) = x_0$ زمان و $x \in R^n$ بردار حالت در فضای فاز میباشد. پاسخ معادله $t \in [0,\infty)$ را می توان به صورت $\varphi_t(x_0)$ نشان داد که با داشتن حالت اولیه π_0 حالت (1)در لحظه t تعیین می شود. این پاسخ یک مسیر را در فضای حالت تشکیل میدهد. یک روش برای توصیف رفتار سیستمهای دینامیکی، تبدیل دینامیکهای پیوسته به دینامیکهای گسسته سمبلی میباشد [13,12]. ایده کلی دینامیکهای سمبلی² ساده میباشد، به جای درنظر گرفتن حالت دقیق یک سیستم در یک زمان، توصیف نادقیقی از آن در نظر گرفته می شود. در این روش، دینامیکهای سیستم به یک دنباله از سمبلها تبدیل میشوند.

برای این کار بخشی از فضای فاز سیستم دینامیکی را در نظر می گیریم؛ که مسیرهای حالت را (به ازای یک تحریک خاص) در بر می گیرد. این بخش از فضا را می توان به m زیر مجموعه افراز کرد که این زیر مجموعه ها دو به دو جدا از هم میباشند و اجتماع آنها کل فضای در نظر گرفته شده را تشکیل خواهد داد.

هر یک از این زیر مجموعهها که سلول نامیده می شوند را می توان با یک سمبل نشان داد مسیر حالت سیستم با حرکت در فضای فاز از بین این سلول ها عبور می کند. تمام حالاتی که در یک سلول قرار دارند یکسان در نظر گرفته می شوند. به این طریق دینامیکهای پیوسته به یک دنباله نادقیق از سمبلها تبديل مي گردند. شكل 4 مفهوم افراز فضاي فاز و تبديل مسير حالت به یک دنباله ازسمبلها را نشان میدهد [14].

طبق رابطه **(2)،** هر شرط اولیه x₀ با یک نگاشت از فضای فاز به مجموعه الهاردن العاميان سميا هايا تمايده 1:5

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

سمبلها، ديبالهاي از سمبلها را توليد مي كند
$x_0 \to \cdots \varphi \alpha \beta \gamma \chi \varsigma \dots $ (2)
نگاشت (2)، دینامیک سمبلی نامیده میشود چرا که به دینامیکهای سیستم
که از یک شرط اولیه x_0 شروع میشود یک دنباله سمبلی مجاز $\varphi \alpha eta \gamma \chi \varsigma$
نسبت میدهد. دینامیکهای سمبلی را میتوان به عنوان نادقیق سازی فضای
فاز در نظر گرفت. هر چند که این نادقیق سازی باعث از دست رفتن بخشی از
اطلاعات می گردد، ولی با افراز مناسب فضای فاز، ویژگیهای اصلی
ديناميکها محفوظ مىماند [15].

1- Electrical Discharge Machining (EDM) 2- Symbolic Synamical Systems

33



در بسیاری از سیستمها عمدتاً مدلی از سیستم به طور صریح در دسترس نیست و تنها یک سری زمانی یک بُعدیx(t) شامل مقادیر اسکالر به عنوان خروجی سیستم به صورت $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ در دسترس میباشد. در این شرایط اولین گام برای تعریف دینامیکهای سمبلی، بازسازی فضای فاز با استفاده از سری زمانی میباشد. روش مرسوم برای بازسازی فضای فاز استفاده از روش بازسازی تیکنز¹ **[16]** میباشد. در ادامه روشی جدید برای افراز فضای فاز و تبدیل دینامیکهای پیوسته به دینامیکهای سمبلی ارائه می گردد. در این روش از الگوهای ترتیبی² استفاده می شود. مفهوم الگوهای ترتيبی برای اولين بار در سال 2002 توسط بندت و يامپ مطرح گرديد [10]

3-1- افراز فضای فاز و آنتروپی جایگشتی

روشهای مختلفی برای افراز فضای فاز و تبدیل دینامیکهای پیوسته به دینامیکهای سمبلی می توان ارائه داد. مهم آن است که دنباله سمبلی حاصل حاوى اطلاعات كافي از سرى زماني اصلى باشد. همچنين تعيين سمبلها بهویژه در دادههای طولانیمدت نظیر دادههای فیزیولوژیکی و ارتعاشات روزانه ماشین آلات بایستی از لحاظ محاسباتی ساده و سریع باشد. در این جا روشی جدید برای افراز فضای فاز با استفاده از الگوهای ترتیبی معرفی میشود.

فرض می کنیم که یک سری زمانی به صورت $A = \{x_i\}_{i=1}^N$ داده شده است. ⁴ طبق قضیه تیکنز برای بازسازی فضای فاز، را میتوان تأخیر زمانی $(t)^3$ و بُعد d > 1
می توان بردارهای تأخیر را به صورت (3) تشکیل داد:

 $\forall i \rightarrow X_i = \{x_{i+(0)t}, x_{i+(1)t}, x_{i+(2)t}, \dots$ (3) ..., $x_{i+(d-1)t}$, i = 1: N - t(d-1)

 $i - (d - i \, i \, z)$ به هر زمان i یک بردار با بُعد d شامل مقادیر سری A در زمانهای i تا **1)** t نسبت داده می شود. با این روش سری زمانی به N – (d – **1)** t بردار تأخیر ا که مؤلفههایش با هم همپوشانی دارند تبدیل می گردد. منظور از الگوی ترتیبی، جایگشت (r_0 , r_1 , ..., r_{i-1}) از (r_0 , r_1 , ..., r_{i-1}) میباشد که r_i ها اعدادی (4) مابین صفر تا (d-1) هستند. مؤلفه های بردار تأخیر X_i را بهصورت رابطه مرتب می شوند

$$x_{s+tr_{(d-1)}} < x_{s+tr_{(d-2)}} < x_{s+tr_{(d-3)}} < \dots$$

$$x_{s+tr_{(d-1)}} < x_{s+tr_{(d-2)}} < x_{s+tr_{(d-3)}} < \dots$$
(4)

جدول 3 اختصاص كد به جايگشت ها

حالت		شماره داده شده به	حالت		شماره داده شده به
جايگشت		الگو ترتيبی (<i>أ</i>)	جایگشت		الگو ترتيبي (/)
(1 2 3 0)	\rightarrow	13	(3 2 1 0)	\rightarrow	1
(1 2 0 3)	\rightarrow	14	(3 2 0 1)	\rightarrow	2
(1 3 2 0)	\rightarrow	15	(3 1 2 0)	\rightarrow	3
(1 3 0 2)	\rightarrow	16	(3 1 0 2)	\rightarrow	4
(1 0 3 2)	\rightarrow	17	(3 0 1 2)	\rightarrow	5
(1 0 2 3)	\rightarrow	18	(3 0 2 1)	\rightarrow	6
(0 2 1 3)	\rightarrow	19	(2310)	\rightarrow	7
(0 2 3 1)	\rightarrow	20	(2301)	\rightarrow	8
(0 1 2 3)	\rightarrow	21	(2 1 3 0)	\rightarrow	9
(0 1 3 2)	\rightarrow	22	(2103)	\rightarrow	10
(0 3 1 2)	\rightarrow	23	(2013)	\rightarrow	11
(0321)	\rightarrow	24	(2 0 3 1)	\rightarrow	12

 $x_1 = \mathbf{0}$, $x_2 = -1$, $x_3 = \mathbf{2}$, $x_4 = \mathbf{4}$, $x_5 = \mathbf{5}$, $x_6 = \mathbf{10}$ $x_7 = \mathbf{8}$, $x_8 = -6$, $x_9 = \mathbf{1}$, $x_{10} = \mathbf{3}$, $x_{11} = \mathbf{2.5}$, $x_{12} = \mathbf{4}$ با بازسازی فضای فاز با تأخیر t=2 و بعد d=4 شش بردار تأخیر به صورت روابط (7) به دست ميآيد:

$$i = 1 \rightarrow X_{1} = (0, 2, 5, 8)$$

$$i = 2 \rightarrow X_{2} = (-1, 4, 10, -6)$$

$$i = 3 \rightarrow X_{3} = (2, 5, 8, 1)$$

$$i = 4 \rightarrow X_{4} = (4, 10, -6, 3)$$

$$i = 5 \rightarrow X_{5} = (5, 8, 1, 2.5)$$

$$i = 6 \rightarrow X_{6} = (10, -6, 3, 4)$$
(7)

همانطور که گفته شد به هریک از بردارهای تأخیر می توان یک الگوی ترتیبی نسبت داد. مثلاً بردار تأخیر سوم را می توان به صورت رابطه(8) نوشت. (8)

$$i = 3 \rightarrow X_3 = (x_3, x_{3+t}, x_{3+2t}, x_{3+3t})$$

مؤلفههای این بردار با رابطه (9) مرتب میشوند:

$$x_{3+3t} (= 1) < x_3 (= 2) < x_{3+t} (= 5) < x_{3+2t} (= 8)$$
(9)

با توجه به آنچه گفته شد، به این بردار تأخیر می توان(2, 1, 0, 3) را نسبت داد که درحقیقت جایگشتی از گامهای زمانی (3و 2و 1و 0) میباشند.

$$i = \mathbf{1} \rightarrow X_1 = (\mathbf{0}, \mathbf{2}, \mathbf{5}, \mathbf{8}) \rightarrow (\mathbf{3}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{0})$$

$$i = \mathbf{2} \rightarrow X_2 = (\mathbf{1}, \mathbf{4}, \mathbf{10}, \mathbf{6}) \rightarrow (\mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{3})$$

$$i = \mathbf{3} \rightarrow X_3 = (\mathbf{2}, \mathbf{5}, \mathbf{8}, \mathbf{1}) \rightarrow (\mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{3})$$

$$i = \mathbf{4} \rightarrow X_4 = (\mathbf{4}, \mathbf{10}, \mathbf{6}, \mathbf{3}) \rightarrow (\mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{3}, \mathbf{2})$$

$$i = \mathbf{5} \rightarrow X_5 = (\mathbf{5}, \mathbf{8}, \mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{5}) \rightarrow (\mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{3}, \mathbf{2})$$

$$i = \mathbf{5} \to X_5 = (\mathbf{5}, \mathbf{5}, \mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{5}) \to (\mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{3}, \mathbf{2})$$

$$i = \mathbf{6} \to X_6 = (\mathbf{10}, \mathbf{6}, \mathbf{3}, \mathbf{4}) \to (\mathbf{0}, \mathbf{3}, \mathbf{2}, \mathbf{1})$$
(10)

از آنجا که بردارهای تأخیر d بُعدی هستند پس**!**d جایگشت مختلف ممکن خواهد بود؛ پس الله الگوى ترتيبى وجود خواهد داشت. بنابراين مىتوان به هریک از الگوهای ترتیبی دقیقاً یکی از اعداد 1و2و.. تا ال را نسبت داد. نهایتاً با این روش مسیر بازسازی شده در فضای فاز به یک دنباله از اعداد

(سمبلها) 1 تا ا*ل*تبديل مىشود. در مثال 1 بُعد برابر 4 انتخاب شد و لذا 24 ألكوى ترتيبي مختلف ممكن خواهد بود. به هريک از اين 24 الگوي ترتيبي مي توان يکي از اعداد 1 تا 24 را به جدول 3 نسبت داد. براساس این جدول می توان هریک از الگوهای ترتیبی بهدست آمده در مثال 1 را با یک عدد نشان داد. با این کار، مسیر حالت در فضای بازسازی شده فاز که به صورت یک $x_6
ightarrow x_5
ightarrow x_4
ightarrow x_3
ightarrow$ و به صورت $x_6
ightarrow x_5
ightarrow x_4
ightarrow x_3
ightarrow$ دنباله از نقاط در فضای چهار بُعدی و به صورت بدست آمدہ بود، به دنبالهای از اعداد سمبل ها به صورت زیر تبدیل $x_2
ightarrow x_1$ می گردد. 24 \rightarrow 17 \rightarrow 17 \rightarrow 10 \rightarrow 10 \rightarrow 1

- $\sim s + tr_0$ اگر دو مؤلفه در بردار تأخیر دارای مقدار یکسانی باشند، مانند حالت رابطه (5) ، به منظور حصول یک الگوی ترتیبی یکتا، رابطه (6) به کار برده میشود. (5) $x_{s+tr(y)} = x_{s+tr(y-1)}$ (6) $r_v < r_{v-1}$ مثال 1) فرض کنید یک سری زمانی A در 12 نقطه بهصورت زیر در اختیار داشته باشیم:
 - 1- Takenz
 - 2- Sequential pattern
- 3- Delay time vector
- 4-Dimension

همان طور که ذکر شد، گام نخست در دینامیک های سمبلی افراز فضای حالت میباشد. واضح است که هر نقطه در فضای *d* بُعدی بازسازی شده به یکی از **d** جایگشت ممکن نگاشته می شود.

به این ترتیب فضای فاز به I زیر مجموعه تقسیم میشود. نقاط در هر یک از این زیرمجموعهها دارای الگوی ترتیبی مشابهی هستند. توجه شود که در اینجا فضا به طور صریح افراز نمیشود. هر الگوی ترتیبی یک قسمت از فضای R را توصیف می کند (قسمتی از فضا که نقاط آن دارای الگوی ترتیبی مشابهی هستند) و اجتماع تمام این قسمتها، فضای حالت R میباشد. لازم به توضیح است که الگوهای ترتیبی بسیار سریع قابل محاسبه هستند که یکی از دلایل این طرز خاص از تقسیم بندی میباشد. همان طور که گفته شد بردارهای تأخیر فقط در یکی از این زیرمجموعه تقسیم میکنند و هر یک از پامپ براساس الگوهای ترتیبی، معیاری را تحت عنوان آنتروپی جایگشتی پامپ براساس الگوهای ترتیبی، معیاری را تحت عنوان آنتروپی جایگشتی تعریف کردند. این دو بدون در نظر گرفتن بحث بازسازی فضای فاز، آنتروپی مویت روابط (11) و (12) توسعه داد: صورت روابط (11) و (12) توسعه داد:

$$p(j) = \frac{\#\{1 \le i \le N - (d - 1)t \ \forall i < N\}}{N - (d - 1)t}$$

$$j = 1,2,3,..., n = d!$$
(11)

$$H(d, t) = -\sum_{j=1}^{d!} p(j) \log p(j)$$
(12)

صورت کسر نشان دهنده تعداد بردارهای تأخیر که ویژگی *ز*را دارند و مخرج کسر عبارتست از تعداد کل بردارهای تأخیر؛ پس (*p(*احتمال حضور مسیر حالت در سلول *ز*است. رابطه (13) حدود آنتروپی جایگشتی را مشخص می-کند.

$$0 \le H(d,t) \le \log d! \le 1 \tag{13}$$

واضح است کران پایین وقتی حاصل می شود که دنباله سمبلی صعودی یا نزولی باشد و کران بالا وقتی بدست می آید که سمبل ها به طور یکنواخت توزیع شوند. به عبارت دیگر توزیع احتمال تمام سمبل ها $\frac{1}{a!} = (p(j) + p(j))$ باشد. بر این اساس و برای راحتی می توان آنتروپی جایگشت را به واحد کرد (14).

$$\mathbf{D} \leq (PE = \frac{H(d, t)}{\log d!}) \leq 1 \tag{14}$$

مسأله مهم دیگر این است که چون آنتروپی جایگشتی براساس الگوهای ترتیبی محاسبه میشود و الگوهای ترتیبی تنها براساس بزرگی و کوچکی دادهها نسبت به هم تعریف میشوند لذا اندازه دادهها تأثیری در مقدار آنتروپی جایگشت ندارد، پس اگر $y_t = f(x_t)$ یک تابع حقیقی اکیداً صعودی یا نزولی باشد آنگاه آنتروپی جایگشتی برای x_t و y_t مساوی خواهد بود [14].



شکل 6 مقایسه آنتروپی چندمقیاسی جایگشتی سیگنال محور سالم با موج سفید که پارامتر مقیاس τ است که نماینده تعداد نقاط اولیه x_i میباشد. این نقاط اولیه خود باعث شکل گیری داده های متوسط $y_j^{\tau^2}$ میشود. ادامه کار مانند محاسبه آنتروپی جایگشتی است.

جواب آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی رشتهای از اطلاعات است که تعدادی برابر مقیاس داده شده دارد به گونهای که الگوریتم مربوطه مقدار آنتروپی جایگشتی را از مقیاس 1 تا مقیاس داده شده را محاسبه میکند. برای مثال در شکل 6 آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی را برای یک موج سفید³ و یک سیگنال از ارتعاشات سالم یک محور گردان با 1024 داده؛ دیده میشود. چنانچه در شکل دیده میشود مقدار بینظمی در موج سفید بیش از سیگنال ارتعاشی محور دوار است [11.9].

4- شبكه انفيس

شبکه انفیس یک مدل استنتاج فازی، در چهارچوب شبکههای فازی چند لایه است که توسط یانگ توسعه یافت.

ساختار شبکههای فازی در دو حالت ممدانی⁴ و سوگنو⁴ ایجاد میشود. اگر قوانین شرطی سازنده شبکه فازی در مقدم و تالی بهصورت جملات فازی

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

، در کورلیل شرطی شارطه شبخه کاری کار ملکام و کالی به طورف جنگرف کاری
بیان شده باشند؛ شبکه فازی ممدانی ایجاد میشود. اگر جملات قوانین
شرطی در مقدم، بیان فازی و در تالی بهصورت تابعی از ورودیها یا تابعی
ثابت باشد؛ شبکه فازی سوگنو تشکیل میشود. در صورتی که تالیهای شبکه
سوگنو، تابع ثابت باشند سوگنوی درجه صفر و اگر تالی بهصورت تابعی درجه
از ورودیها باشد شبکه سوگنو را درجه n مینامیم. انفیس نوعی از n
شبکههای فازی سوگنو است که ساختارهای سوگنوی درجه صفر و درجه یک

1- Nomalize

را یشتیبانی می کند. در شکل 7 ساختار یک شبکه انفیس آورده شده و شکل 8 عملکرد انفیس را نشان میدهد. این شبکه با دوقانون و دو ورودی *x، y و* یک خروجی f دارای ساختار پنج لایه است. قانون 1) اگر x عضویتی از A₁ داشته و y عضویتی از B₁ داشته باشد آنگاه f1 = p1 x + q1 y + r1قانون 2) اگر x عضویتی از A₂ داشته و y عضویتی از B₂ داشته باشد آنگاه f2 = p2x + q2y + r2

در قوانین بالا Ai از Ai و Bi مجموعههای فازی و pi , qi , ri} پارامترهایی هستند که بعدا در مورد آنها بحث میشود.

لایه اول (فازیسازی ورودیها): ورودیها (ویژگیها) به این لایه وارد میشوند. این لایه دارای توابع عضویتی است که مقدار عضویت هر ویژگی به آن تابع، طبق رابطه (16) محاسبه می شود. بدین ترتیب از روی ویژگیها، مجموعهها فازی برای مراحل بعد ساخته می شود. در این جا باید پارامترهای توابع عضويت تعيين شوند [18].

$$\begin{cases} O_{\mathbf{1},i} = \mu_{A_i}(\mathbf{x}) , i = \mathbf{1}, \mathbf{2} \\ O_{\mathbf{2},i} = \mu_{B_i}(\mathbf{x}) , i = \mathbf{1}, \mathbf{2} \end{cases}$$
(16)

خروجی تابع عضویت تعریف شده در لایه اول میباشد. μ یک تابع $O_{1,i}$ عضویت است و باید تابعی حقیقی و پیوسته باشد و برای نمایش عضویت یک مجموعه به کار برده می شود. این توابع به جای عبارات عضو بودن یا نبودن دادهها در یک مجموعه، عددی بین صفر تا یک را به عنوان درجه عضویت برای آن دادهها در نظر می گیرند. این توابع معمولاً پیوسته بوده و برد آنها صفر تا یک می باشد. دامنه ی توابع عضویت باید به گونه ای باشد که مجموعه ورودیها زیر مجموعهای از آن باشد. توابع زیادی با این شرایط ایجاد شدهاند ولی معمولا از تابع گوسی¹ (17) یا زنگولهای²(18) استفاده میشود.

 $\mu = \frac{1}{\left| \underline{(x-c)} \right|^{2b}}$ تابع زنگولهای (18)

در توابع (4-4) و (5-4) پارامترهای $s_1 = \{a, b, c\}$ پارامترهای تطبیقی s_2 و درودی و \overline{x} میانگین ورودیها است. x_i

لایه دوم (استنتاج فازی): در این لایه با توجه به عملگر «عطف» مابین جملات مقدم قوانین، ارزش مقدم هر رابطه با ضرب مقدار عضویت مجموعهها، محاسبه می شود (19).

خروجى
$$w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2$$
 (19)

و μ_{B_i} فروجی توابع عضویت لایه قبل است که در هم ضرب شده و μ_{A_i} $\mu_{B_i}(\mathbf{y})$ و x این لایه را می سازد. در این رابطه $\mu_{A_i}(\mathbf{x})$ درجه عضویت x c_{c} درجه عضویت y است.

لايه سوم: در رابطه (20) مقادير بدست آمده از مرحله لايه دوم به واحد می شود (هریک از وزن ها تقسیم بر مجموع وزن ها)؛ در آن w_i مقدار خروجی لايه دوم است. (3) $\rightarrow \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}$ (20)لایه چهارم (اختصاص وزن به خروجیها): در این لایه، یک ترکیب خطی بین ورودیها و وزنهای بدست آمده محاسبه شده و به خروجی میرود. پارامترهای این ترکیب خطی باید پیدا شوند (21). خروجی (**4**) $\rightarrow \overline{w_i} f_i = \overline{w_i} (p_i x + q_i y + r_i)$ (21)

36



شکل 7 ساختار انفیس با دو قانون و دو تابع عضویت برای هر ورودی

		$f_1 = w_1$	$xp_1 + yq_1 + r_1$ = $O_{1,1} \times O_{2,1}$ قانون اول	ا خروجی نہایی
				$f_{-}w_{1}f_{1} + w_{2}f_{3}$
		f ₂ = w ₂ =	$xp_2 + yq_2 + m$ = $O_{1,2} \times O_{2,2}$ قانون دوم	r_2 $w_2 + w_1$
x	у		ورودىها	
		انفىس	شکا ، 8 عملک د	

در رابطه (21) پارامترهای $s_2 = \{p_i, q_i, r_i\}$ نامیده (21) در رابطه (میشوند. اینها پارامترهایی هستند که باید برای یک خروجی بهینه بدست بیآیند و y و x نیز همان مقادیر ورودی است که مجدداً در اینجا استفاده شدهاند.

لايه پنجم: در اين لايه جمع خروجي هاي لايه چهارم از رابطه (22) بدست میآید و خروجی نهایی ساخته میشود.

(22)
$$\rightarrow \sum_{i} \overline{w_{i}} f_{i} = \frac{\sum_{i} w_{i} f_{i}}{\sum_{i} w_{i}}$$

که در آن $\overline{w}_i f_i$ همان خروجی لایه چهارم است که با جمع مقادیرشان خروجي نهايي بدست ميآيد.

در مدل انفیس زمانی عمل طبقه بندی به درستی انجام می شود که مجموعه پارامترهای تطبیقی s_1 و مجموعه پارامترهای متعاقب s_2 طوری تخمین زده شوند که مقدار تابع خطای مدل در بخش آموزش به حداقل برسد. به دست آوردن مقدار این پارامترها معمولاً در دو گام صورت می گیرد .در گام اول که تا لایه چهارم پیش می رود و گام رو به جلو نامیده می شود، مجموعه یارامترهای s_1 ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s_2 با استفاده از الگوريتم حداقل مربعات خطا⁵ محاسبه مي شود.

 s_2 در گام دوم که گام رو به عقب نامیده می شود، مجموعه پارامترهای ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s₁ با استفاده از الگوریتم شیب کاهشی به دست مي آيند. انتخاب تابع عضويت براساس آزمايش انواع مختلف توابع عضويت صورت می گیرد. به این معنی که توابع عضویت، هر کدام جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند و مدل انفیس برای هر کدام از این توابع عضویت به صورت جداگانه آموزش می بیند. در پایان میزان خطای مدل های حاصل با هم مقایسه می شود و تابعی که کمترین میزان خطا را در کمترین زمان آموزش حاصل کند، به

[Downloaded from mme.mod

1- Gaussian function 2- Bell function 3- Adaptive Parameters

4- Following parameters 5- (LSE) 6- Reduced gradient algorithm

عنوان تابع عضویت بر گزیده خواهد شد [19].

5- روش انجام تحقيق

5-1- وارد کردن دادهها

بعد از محاسبه آنتروپی سیگنالهای گرفته شده، ویژگیهای آن سیگنالها را محاسبه می کنیم. در این تحقیق 3 نوع عیب و حالت سالم محور دوار مورد بررسی قرار گرفته (در مجموع 4 حالت آزمایش) و از هر حالت 20 سیگنال گرفته شد. با توجه به این که که مقدار آنتروپی سیگنال در این تحقیق مهم است، پس میتوان طول هر سیگنال را بیش از 1000 نقطه در نظر گرفت [8]. از اینرو، در هر سیگنال زمانی؛ 1024 داده با فرکانس 16384هرتز برداشت شده است. در اینجا 9 ویژگی آماری سیگنال در نظر گرفته شده است. توابعی که در این تحقیق ویژگیهای سیگنال را استخراج می کنند عبارت اند از: 1-بیشینه 2-کمینه¹ 3- میانگین حسابی² 4-میانگین هندسی 5 5-انرژی 7-ریشه میانگین مربعات 4 8- عدم تقارن 5 9-كشيدگي6. روابط اين توابع در جدول 4 ديده مي شود. بعد از محاسبات انتخاب ویژگی هر 9 خصوصیت آماری سیگنال مفید ارزیابی شدند. ابتدا مقدار آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی را برای تمامی دادهها محاسبه شد. این محاسبات با مقدار تأخیر زمانی 1؛ بُعد 5 و مقیاس 15 انجام شد. سپس 9 خاصیت آماری ذکرشده برای آنتروپیهای به دست آمده محاسبه شد. درنهایت مقداری از دادهها به صورت دادههای آزمایشی (7 سیگنال از 20 سیگنال هر عیب طبق جدول 5) و مابقی بهصورت دادههای آزمایشی به شبکه انفیس داده شد.

یهای سیگنال	جدول 4 روابط ویژگ	
رابطه ویژگی	ویژگی	رديف
$\mathbf{T}_{1} = \sqrt[n]{\prod_{n=1}^{1} (\mathbf{x}_{i})}$	میانگین هندسی	1
$T_2 = max(x_i)$	بيشينه	2
$T_2 = min(x_i)$	کمینه	3
$\mathbf{T}_4 = \frac{\sum_{1}^{n} (\mathbf{x}_i)}{\mathbf{n}}$	میانگین حسابی	4
$\mathbf{T}_5 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\mathbf{x}_i - \mathbf{T}_4)^2}$	انحراف از معيار	5
$\mathbf{T}_{6} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{1}^{n} (\mathbf{x}_{i} - \mathbf{T}_{4})^{4}}{\mathbf{T}_{5}^{4}}$	کشیدگی نمودار	6
$\mathbf{T}_{7} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{1}^{n} (\mathbf{x}_{i} - \mathbf{T}_{4})^{3}}{\mathbf{T}_{5}^{3}}$	عدم تقارن	7
$\mathbf{T}_8 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\mathbf{x}_i)^2}$	ريشه ميانگين مربعات	8
$\mathbf{T}_9 = \sum_{i=1}^{n} (\mathbf{x}_i)^2$	انرژى	9

 $\frac{1}{2}$

5-2- طبقەبندى عيب با انفيس

شبکه انفیس به کار رفته در این تحقیق به روش کُدنویسی، در برنامه متلب ایجاد شده و از نوع سوگنوی درجه صفر است . در این شبکه ایجاد قوانین از روش «خوشهبندی فازی»⁷ توسط تابع «سازنده سیستم استنتاج فازی 3»⁸ انجام شده و با کمک از تابع «انفیس»⁹، شبکهای با 4 مجموعه فازی ایجاد شده است. تعداد مجموعهها، قوانین شبکه را مشخص میکند پس در این انفیس 4 قانون وجود دارد. توابع عضویت فازی از نوع گوسین میباشند. ساختار این شبکه که از شبکههای سوگنو است. در شکل 9 ملاحظه میشود. آموزش شبکه باعث تغییر پارامترهای تشکیل دهنده توابع عضویت و در نهایت تغییر شکل این توابع میشود.

مقدار خطا شبکه فازی با جذر میانگین مربعات خطا¹⁰ مشخص شد که از طریق جمع مجذور مربعات خطای هر نرون در لایه خروجی، تقسیم بر تعداد نرونهای لایه خروجی، به دست میآید. رابطه (23) نحوهٔ محاسبهٔ میانگین مربعات خطا را نشان میدهد [20].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (e_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (a_i - b_i)^2}$$
(23)

 a_i و b_i به ترتیب خروجیهای واقعی و هدف برای *i*أمین نتیجه طبقهبندی دادههای آزمایشی انفیس و مقدار خطای طبقه بندی در شکلهای 10 و 11 دیده میشوند با توجه به مقادیر به دست آمده ریشه میانگین مربعات خطا برابر 0/3094 است. در شکل 12 نمودارهای توابع عضویت قابل مشاهده است. در این شکلها نمودارهای سمت چپ توابع عضویت را قبل از آموزش شبکه و در حالتی که پارامترهای s_1 هنوز تحت تاثیر پارامترهای s_2 قرار شبکه و در حالتی که پارامترهای ایه موابع عضویت را بعد از آموزش شبکه نشان میدهد. (*i*) *M* ها نشانگر 4 تابع عضویتی هستند که بر ورودی-ها اعمال میشوند. همان طور که در شکل ملاحظه می شود محور افقی مقادیر ویژگیهای سیگنال و محور عمودی مقدار عضویت هر داده در ویژگی مربوطه را نشان میدهد.

5-3- ارزيابي نتايج انفيس

6 برای ارزیابی شبکه انفیس به کار رفته از ماتریس اغتشاش¹¹ که در جدول دیده می شود استفاده می کنیم است. اگر داده ها در M دسته گرفته باشند، یک ماتریس اغتشاش جدولی با اندازه $M \times M$ است .حالت ایده آل این است که بیشتر اندازه داده های مرتبط به مشاهدات روی قطر اصلی ماتریس قرار گرفته و مابقی صفر یا نزدیک به صفر باشند.





شکل 9 ساختار انفیس بکار رفته در این تحقیق

7- Fuzzy C-means clustering
8- Generate fuzzy nference system (genfis 3)
9- Anfis
10- Root mean square error (RMSE)
11- Confusion Matrix

_	_
2	7
J	1

نفیس	اد دادههای ورودی به ا	جدول 5 تعد	
ماره گروه طبقهبندی شده	ی دادههای آزمایشی ش	دادەھاى آموزشے	اطلاعات
1	13	7	محور سالم
2	13	7	ترک 3 میلیمتر
3	13	7	ترک 5 میلیمتر
4	13	7	ت ک 7 میلے مت

- 1- Minimum
- 2- Mean
- 3- Geomean
- 4- Root mean square (RMS)
- 5-Skewness
- 6- Kurtosis

عناصر روى قطر اصلى ماتريس اغتشاش تعداد نمونه هاى طبقهبندى شده صحیح را نشان میدهد. شاخصهای مختلفی برای ارزیابی صحت روشهای دستهبندی وجود دارد که میتوان حساسیت¹ دقت طبقهبندی کلی² و خصوصی بودن³ را نام برد. این معیارها را با توجه به مقادیر ماتریس اغتشاش محاسبه می شوند [22،21].





1- حساسیت: تعداد تصمیمهای مثبت صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیمهای مثبت ممکن

2-. اختصاصی بودن: تعداد تصمیم های منفی صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم های منفی ممکن.

3- دقت طبقهبندی کلی: تعداد تصمیمهای صحیح تقسیمبر تعداد کل تصميمهای ممکن.

برای محاسبه این شاخصها از مقادیر ماتریس اغتشاش استفاده می شود که تعیین کننده عملکرد طبقه بندی انجام شده، میباشد.

نتایج و مقادیر این معیارها در جدول 7 قابل مشاهده است. دقت طبقهبندی کلی 96/15 بوده که توانسته است تمامی عیبها و حالت سالم را به خوبی از هم تفکیک کند و نشان میدهد که آنتروپی جایگشتی چند مقياسي الگوريتمي كارا و قابل اطمينان در طبقهبندي عيوب محور دوار است.

6- نتيجه گيري

این تحقیق نشان میدهد عیبیابی محور دوار با استفاده از سیگنالهای زمانی حاصله از سنسورهای شتابسنج امکان پذیر است. پردازش دادهها با شبکه انفیس انجام شده که از محاسبات نرم⁴ منطق فازی استفاده می کند در

صورتی که شبکههای عصبی برمبنای منطق کلاسیک بوده و با محاسبات
سخت ⁵ پشتیبانی میشود؛ از این رو انفیس نسبت به شبکههای عصبی برتری
سبی دارد. در این مقاله از آنتروپی سیگنال زمانی برای تفکیک سیگنالها
ستفاده شده زیرا روشی سریع، کم هزینه و بدیع میباشد. عیبهای محور
وار به صورت ترک عرضی به عمق 3، 5 و 7 میلیمتر با محل ثابت و تحت
ار گذاری خمش خالص بوده و محورهای ترکدار با محور سالم مورد مقایسه
لرار گرفتند.

0 ____ ريشه ميانگين مربعات 4.25 4.15 4.2 4.15 4.2 16.1 16.2 16.3 16.4 قبل آموزش 16 16.1 16.2 16.3 16.4 16 بعد آموزش شکل 10 توابع عضویت قبل و بعد از آموزش

- 1-Specificity
- 2- Precision
- 3-Sensitivity

4-Soft computing 5- Hard computing

مهرداد نوری خاجوی و همکاران

- روشی نو در تعیین عمق ترک محور دوار با استفاده از آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی و شبکه انفیس
- [8] R. Yan, R. X. Gao, Approximate Entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing 21*, pp. 824– 839, (2007)
- [9] L. Zhang, G. Xiong, H. Liu, H. Zou, W. Guo, Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference, Expert Systems with Applications 37, pp. 6077-6058, 2010, http://www.elsevier.com/ locate/eswa
- [10] C. Bandt, B. Pompe, Permutation entropy natural complexity measure for time series, *Institute of Mathematics and Institute of Physics, DOI:* 10.1103/PhysRevlett.88.174102, 29 April 2002.
- [11] R. Yan, Y. Liu, R.X. Gao, Permutation entropy: a nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines, *Mechanical Systems and Signal Processing 29*, pp. 474–484, 2012
- [12] V. Rajagopalan, A. Ray, R. Samsi, J. Mayer, Pattern identification in dynamical systems via symbolic time series analysis. *Pattern Recognition, Volume 40 Issue 11*, pp. 2897-2907, November 2007
- [13] R. Asok. Symbolic dynamic analysis of complex systems for anomaly detection. *Signal Processing 84*, pp.1115–11130, 2004
- [14] I. Veisi, V. Pariz, A. Karimpour, Fast and Robust Detection of Epilepsy in Noisy EEG Signals Using Permutation Entropy, *IEEE*, pp. 200-203, 14-17 Oct. 2007
- [15] R. Badii, A. Politi, Complexity Hierarchical Structures and Scaling in Physics, Cambridge Nonlinear Science Series, vol. 6, Cambridge University Press, 1997
- [16] F. Takens, Detecting strange attractors in turbulence, In D.A. Rand and L.-S. Young, Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics, vol. 898, Springer-Verlag. pp. 366–381, 1981
- [17] X. Chen, N. Jin, A. Zhao, Z.K. Gao, L.S. Zhai, B. Sun, The experimental signals analysis for bubbly oil-in-water flow using multi-scale weightedpermutation entropy, *Statistical Mechanics and its Applications*, pp. 230-244, 2015, www. sciencedirect. com /science/ article/ pii/ S0378437114008267
- [18] J.S.R Jang, ANFIS: Adaptive-network-based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, pp. 665–685, 1993
- [19] E. Dogan, Reference evapotranspiration estimation using adaptive neuro-fuzzy inference system, *Journal of Irrigation and Drainage*, volume 58, pp. 617-628,2008, *http://onlinelibrary .wiley.com/ journal* /10.1002/(ISSN) 1531-0361
- [20] M. Rostaghi, M.N. Khajavi, Detection of size and location of crack in pipes under fluid pressure by neural networks, *mme.modares 14*, pp. 35-42, 13 July 2014
- [21] R. Safdari, G. saeedi, Comparing performance of decision tree and neural network in predicting myocardial infarction , *Mashhad Journal of Rehabilitation Medicine 3*, autumn & winter 2014 (In Persian)
- [22] E. Ebrahimi, k. Mollazade, Intelligent Fault Classification of a Tractor Starter Motor using Vibration Monitoring and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 52(10)*, pp. 561-566, 2010

جدول 6 ماتریس اغتشاش				
ترک 7	ترک 5	ترک 3	11	
ميلىمتر	ميلىمتر	ميلىمتر	محور سائم	اطلاعات
1	0	0	12	محور سالم
1	0	12	0.	ترک 3 میلیمتر
0	13	0	0	ترک 5 میلیمتر
13	0	0	0	ترک 7 میلیمتر

جدول 7 ارزیابی نتایج انفیس با نتایج ماتریس اغتشاش

دقت طبقه بندی کلی	درصد اختصاصي بودن	درصد حساسيت	اطلاعات
%96/15	%97/22	%92/31	محور سالم
	%97/22	%92/31	ترک 3 میلیمتر
	%100	%100	ترک 5 میلیمتر
	%100	%100	ترک 7 میلیمتر

پیش پردازش سیگنالها با استفاده از آنتروپی چندمقیاسی جایگشتی انجام گرفت و ویژگیهای آنتروپی بهدست آمده ورودی شبکه فازی انفیس را تشکیل دادند. نتایج حاصل از انفیس نشان داد طبقه بندی سیگنالهای محور دوار با عیبهای مختلف با دقت 96/15% انجام شده است.

7- منابع

- [1] W. Mayes, W.G.R. Davies, the Vibrational behaviour of a rotating shaf system containing a transverse crack, *Institution of mechanical Engineers Conference Publication, Vibration in Rotating Macninery*, PP. 168-176, 1976.
- [2] R. Gasch, Dynamic behaviour of a simple rotor ,*Institution of mechanical Engineers Conference Publication, Vibration in Rotating Machinery*, pp. 176-178, 1979.
- [3] T. A. Henry, B. E. Okah-Avae ,Vibration in cracked shaft, Institution of mechanical Engineers conference Publication, Vibration in Rotating Machinery, pp. 162-176, 1976.
- [4] H. D. Nelson, C. Natraraj ,The dynamics of a rotor system with a cracked shaft, *American Society of Mechanical Enginees Jornal of Vibration*, *Acoustics, Stress, and Reliability in Design 108*, pp.189-196, 1986.
- [5] L.A. Papadopoulos, A.D. Dimarogonas, Coupled Longitudinal and bending vibrations of a rotating shaft with an open crack, *Journal of Sound and Vibration*, pp.81-93, 1987
- [6] L.A. Papadopoulos, A.D. Dimarogonas, Coupling of bending and torsional vibration of a cracked Timoshenko shaft, *IngenieurArchiv*,pp.257-266, 1987
- [7] S.M. Pincus , Approximate entropy as a measure of system complexity , *Proc Natl Acad Sci USA* 88, pp. 2297-2301, March 1991

39