مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7، ص‌ص 31-39

ماهنامه علمی پژوهشی

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اسفند 1393

پذیرش: 29 فروردین 1394

ارائه در سایت: 28 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

آنتروپی جایگشتی

سیگنال زمانی

انفیس

ترک عرضی

محور دوار

چکیده

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 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 سیگنال‌های ارتعاشی به‌عنوان بردارهای خصوصیت به یک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) داده شد. تعداد 9 خصوصیت 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 به‌عنوان روشی جدید و بدیع جهت عیب‌یابی سیستم‌های مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد.

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 capable of classifying different shaft states with an overall precision of 96%.

1- مقدمه

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

با توجه به استفاده وسیع محورهای دوار در صنعت، نگهداری این سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا عدم تشخیص به‌موقع عیب این قطعات ممکن است به خسارات جبران‌ناپذیری منجر شود. یکی از عیوب

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

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 انعطاف‌پذیری 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 پدیده‌ی 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 آنتروپی[1] انجام می‌شود. پایه اکثر الگوریتم‌های آنتروپی، آنتروپی شانون[2] 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 تقریبی[3] 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 بُعد[4]، بردار تأخیر زمانی[5]، ضریب انحراف معیار سیگنال و طول سری زمانی را در الگوریتم آنتروپی تقریبی محاسبه کردند. در سال 2010 آقای لانگ زانگ و همکارانش [9] بلبرینگ معیوب را به روش آنتروپی نمونه چند مقیاسی[6] عیب‌یابی کردند. آن‌ها با استفاده از ویژگی‌های برداشته شده از آنتروپی چند مقیاسی به‌دست آمده و استفاده از شبکه انفیس[7]، عیب‌یابی را با دقت 100% انجام دادند.

در سال 2002 بندت و پامپ [10] روشی دیگر برای محاسبه آنتروپی در سری‌های زمانی معرفی کردند و از آن‌جا که قطعات سیگنال را با جایگشت[8] بُعد سیگنال نسبت دادند این آنتروپی را آنتروپی جایگشتی[9] نامیدند. آن‌ها از این روش برای طبقه‌بندی الکتروانسفالوگرام‌های[10] قلبی استفاده کردند.

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 تابه‌حال تحقیقی با پیش‌پردازش سیگنال به روش آنتروپی صورت نگرفته است. در این پژوهش پیش‌پردازش داده‌ها به‌وسیله آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی انجام می‌شود.

2- دستگاه و روش اجرا آزمایش

2-1- مراحل کار

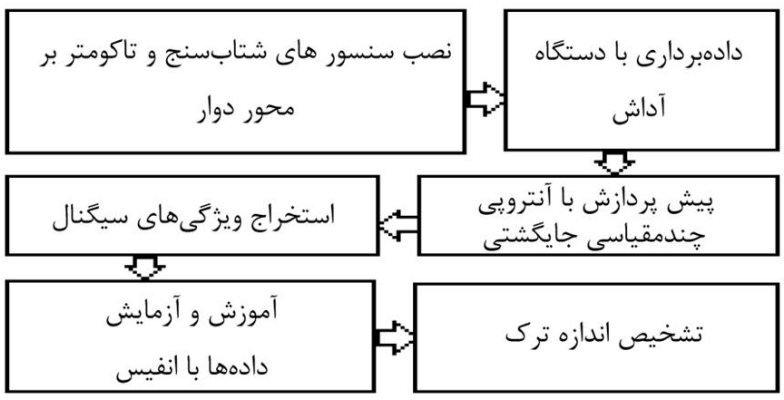
در این پژوهش پس از ساخت دستگاه آزمایشگاهی محور دوار با بارگذاری خمش خالص به‌وسیله سنسورهای ارتعاشی، سیگنال شتاب در دو جهت قائم و افقی از روی تکیه‌گاه‌ها جمع‌آوری شد. تعداد دور نیز با سنسور تاکومتر محاسبه شد؛ درنهایت ویژگی‌های سیگنال با کمک آنتروپی جایگشتی چندمقیاسی[11] استخراج گردید و با کمک شبکه انفیس برای تشخیص و پیش‌بینی به کار گرفته شد. (شکل 1)

2-2- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌ها از دستگاه آنالیزور آداش[12] 4400 استفاده شد. این دستگاه اندازه‌گیری ساخت کشور چک می‌باشد. این دستگاه دارای 4 کانال AC، 4 کانال DC و کانال ورودی تاکومتر می‌باشد. همچنین دارای قابلیت‌های نمایش شکل موج و طیف ارتعاشات در حالت‌ها و نمونه‌های 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 استفاده شده از نوع شتاب‌سنج بوده و محصول کشور سوئد است که در محدوده دمایی 50- تا 121+ می‌تواند به‌خوبی ارتعاشات را دریافت کرده و 90 گرم وزن دارد. سنسور جهت دریافت ارتعاشات در نقطه موردنظر (یاتاقان) پیچ شده است. خصوصیات محور مورداستفاده در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1 خصوصیات محور مورد آزمون

مشخصه	مقدار
جنس محور	CK45(SAE1045 استیل)
قطر محور	12mm
مدول الاستیسیته	204000 MPa
تنش تسلیم	382 MPa



شکل 1 مراحل کار در تحقیق

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

11- Multi scale Permutation Entropy
12- Adash 4400

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

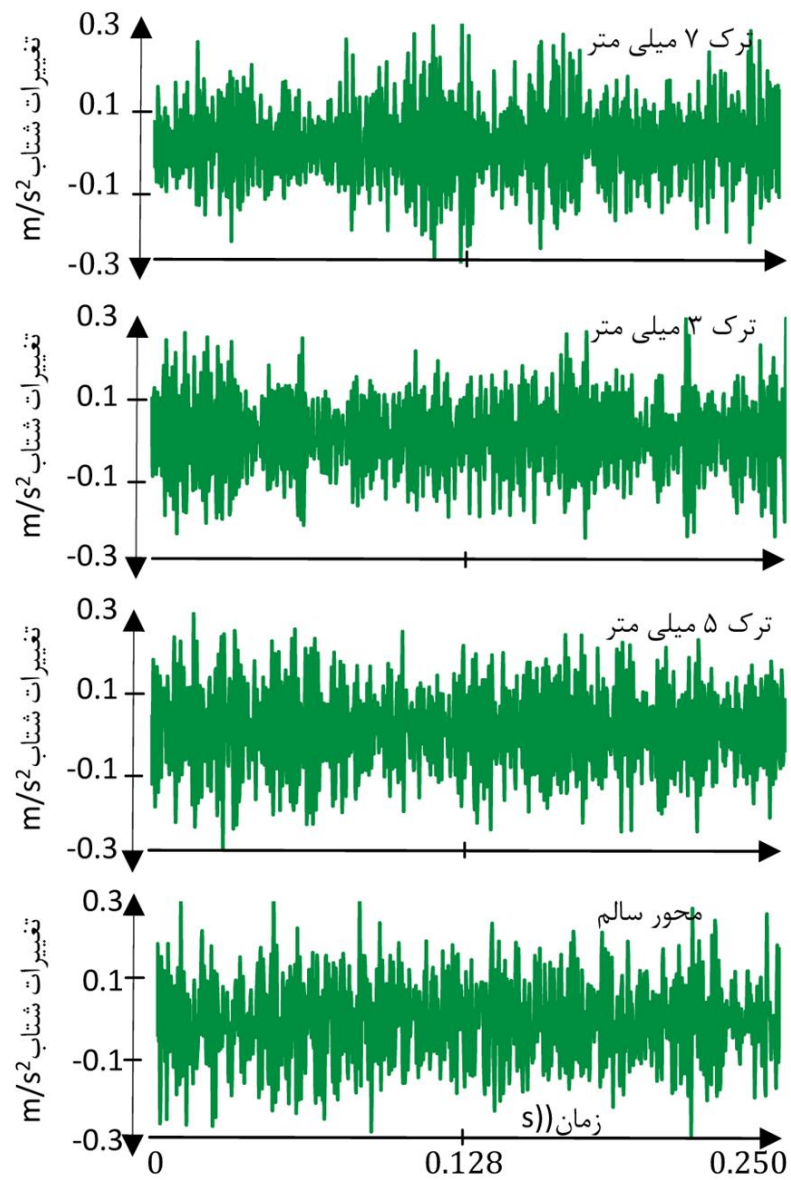
2-3- شرح آزمایش

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.

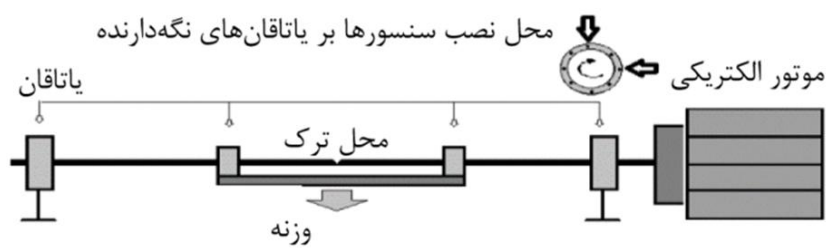
پس از گذر از حالت شروع به کار و پایدار شدن، به‌وسیله سنسورهای شتاب سنج نصب شده روی تکیه‌گاه‌ها، سیگنال شتاب قائم و افقی جمع‌آوری گردید. داده‌های جمع‌آوری شده به صورت سیگنالی با 4096 نمونه و با فرکانس نمونه‌برداری 16384 هرتز، با دور موتور 30 دور بر ثانیه، دریافت شدند.

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

مشخصات	مقدار
فاصله دیسک تا تکیه‌گاه	384mm
وزن وزنه	4kg
طول محور	950mm
عرض هر ترک	0/29mm
عمق ترک‌ها	7 ، 5 ، 3mm
فاصله ترک تا دیسک‌ها	36mm



شکل 2 نمونه سیگنال‌های محور دوار در یک‌چهارم ثانیه با 1024 نمونه



شکل3 میز کار آزمایش

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

2-4- ایجاد عیب ترک در محور دوار

برای ایجاد ترک در محور دوار، به‌وسیله‌ی دستگاه وایرکات[1]، شیاری به عرض 0/29 میلی‌متر ایجاد شد. در دستگاه‌های صنعتی و حالت واقعی کنترلی بر عمق و عرض ترک نیست ازاین‌رو 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 ترتیب برابر 0/25، 41/67 و 58/33 درصد می‌باشد.

3- مدل‌سازی ریاضی

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

$$dx(t)/d(t) = f(x(t),t)\,,x(0) = x_0 \qquad (1)$$

$t \in [0,\infty)$ زمان و $x \in R^n$ بردار حالت در فضای فاز می‌باشد. پاسخ معادله (1) را می‌توان به‌صورت $\varphi_t(x_0)$ نشان داد که با داشتن حالت اولیه x_0 حالت در لحظه t تعیین می‌شود. 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 سمبلی[2] ساده می‌باشد، به جای درنظر گرفتن حالت دقیق یک سیستم در یک زمان، توصیف نادقیقی از آن در نظر گرفته می‌شود. در این روش، دینامیک‌های سیستم به یک دنباله از سمبل‌ها تبدیل می‌شوند.

برای این کار بخشی از فضای فاز سیستم دینامیکی را در نظر می‌گیریم؛ که مسیرهای حالت را (به ازای یک تحریک خاص) در بر می‌گیرد. این بخش از فضا را می‌توان به m زیرمجموعه افراز کرد که این زیرمجموعه‌ها 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 می‌شوند را می‌توان با یک سمبل نشان داد مسیر حالت سیستم با حرکت در فضای فاز از بین این سلول ها عبور می‌کند. تمام حالاتی که در یک سلول قرار دارند یکسان در نظر گرفته می‌شوند. به این طریق دینامیک‌های پیوسته به یک دنباله نادقیق از سمبل‌ها تبدیل می‌گردند. شکل 4 مفهوم افراز فضای فاز و تبدیل مسیر حالت به یک دنباله ازسمبل‌ها را نشان می‌دهد [14].

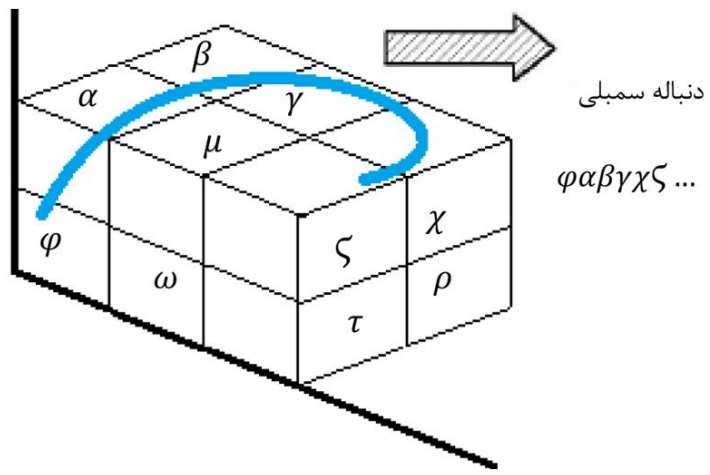
طبق رابطه (2)، هر شرط اولیه x_0 با یک نگاشت از فضای فاز به مجموعه سمبل‌ها، دنباله‌ای از سمبل‌ها را تولید می کند

$$x_0 \rightarrow \cdots \varphi\alpha\beta\gamma\chi\varsigma \ldots \qquad (2)$$

نگاشت (2)، دینامیک سمبلی نامیده می‌شود چرا که به دینامیک‌های سیستم که از یک شرط اولیه x_0شروع می‌شود یک دنباله سمبلی مجاز $\ldots \varphi\alpha\beta\gamma\chi\varsigma \ldots$ 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 می‌گردد، ولی با افراز مناسب فضای فاز، ویژگی‌های اصلی دینامیک‌ها محفوظ می‌ماند [15].

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]



شکل 4 دنباله سمبلی از یک فضای فاز

در بسیاری از سیستم‌ها عمدتاً مدلی از سیستم به طور صریح در دسترس نیست و تنها یک سری زمانی یک بُعدی$x(t)$ شامل مقادیر اسکالر به عنوان خروجی سیستم به صورت $\{x_0, x_1, \ldots, x_n\}$ 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 تیکنز[1] [16] می‌باشد. در ادامه روشی جدید برای افراز فضای فاز و تبدیل دینامیک‌های پیوسته به دینامیک‌های سمبلی ارائه می‌گردد. در این روش از الگوهای ترتیبی[2] استفاده می‌شود. مفهوم الگوهای ترتیبی برای اولین بار در سال 2002 توسط بندت و پامپ مطرح گردید [10]

3-1- افراز فضای فاز و آنتروپی جایگشتی

روش‌های مختلفی برای افراز فضای فاز و تبدیل دینامیک‌های پیوسته به دینامیک‌های سمبلی می‌توان ارائه داد. مهم آن است که دنباله سمبلی حاصل حاوی اطلاعات کافی از سری زمانی اصلی باشد. همچنین تعیین سمبل‌ها به‌ویژه در داده‌های طولانی‌مدت نظیر داده‌های فیزیولوژیکی و ارتعاشات روزانه ماشین‌آلات بایستی از لحاظ محاسباتی ساده و سریع باشد. در این‌جا روشی جدید برای افراز فضای فاز با استفاده از الگوهای ترتیبی معرفی می‌شود.

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

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

به هر زمان i یک بردار با بُعدd شامل مقادیر سری A در زمان‌های i تا $i-(d-1)t$ نسبت داده می‌شود. با این روش سری زمانی به $N-(d-1)t$ بردار تأخیر که مؤلفه‌هایش با هم همپوشانی دارند تبدیل می‌گردد. منظور از الگوی ترتیبی، جایگشت $(r_0, r_1, \ldots, r_{i-1})$ از $(0,1,2,\ldots,d-1)$ می‌باشد که r_iها اعدادی مابین صفر تا $(d-1)$ هستند. مؤلفه های بردار تأخیر X_i را به‌صورت رابطه (4) مرتب می‌شوند

$$x_{s+tr_{(d-1)}} < x_{s+tr_{(d-2)}} < x_{s+tr_{(d-3)}} < \ldots \\ \ldots < x_{s+tr_1} < x_{s+tr_0}. \quad (4)$$

اگر دو مؤلفه در بردار تأخیر دارای مقدار یکسانی باشند، مانند حالت رابطه (5)، به منظور حصول یک الگوی ترتیبی یکتا، رابطه (6) به‌کار برده می‌شود.

$$x_{s+tr_{(y)}} = x_{s+tr_{(y-1)}} \quad (5)$$

$$r_y < r_{y-1} \quad (6)$$

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

جدول 3 اختصاص کد به جایگشت ها

شماره داده شده به الگو ترتیبی (j)		حالت جایگشت	شماره داده شده به الگو ترتیبی (j)		حالت جایگشت
1	→	(3 2 1 0)	13	→	(1 2 3 0)
2	→	(3 2 0 1)	14	→	(1 2 0 3)
3	→	(3 1 2 0)	15	→	(1 3 2 0)
4	→	(3 1 0 2)	16	→	(1 3 0 2)
5	→	(3 0 1 2)	17	→	(1 0 3 2)
6	→	(3 0 2 1)	18	→	(1 0 2 3)
7	→	(2 3 1 0)	19	→	(0 2 1 3)
8	→	(2 3 0 1)	20	→	(0 2 3 1)
9	→	(2 1 3 0)	21	→	(0 1 2 3)
10	→	(2 1 0 3)	22	→	(0 1 3 2)
11	→	(2 0 1 3)	23	→	(0 3 1 2)
12	→	(2 0 3 1)	24	→	(0 3 2 1)

$x_1 = 0, x_2 = -1, x_3 = 2, x_4 = 4, x_5 = 5, x_6 = 10$
$x_7 = 8, x_8 = -6, x_9 = 1, x_{10} = 3, x_{11} = 2.5, x_{12} = 4$

با بازسازی فضای فاز با تأخیر t=2 و بعد d=4 شش بردار تأخیر به صورت روابط (7) به دست میآید:

$$\begin{aligned} i = 1 &\rightarrow X_1 = (0, 2, 5, 8) \\ i = 2 &\rightarrow X_2 = (-1, 4, 10, -6) \\ i = 3 &\rightarrow X_3 = (2, 5, 8, 1) \\ i = 4 &\rightarrow X_4 = (4, 10, -6, 3) \\ i = 5 &\rightarrow X_5 = (5, 8, 1, 2.5) \\ i = 6 &\rightarrow X_6 = (10, -6, 3, 4) \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$i = 3 \rightarrow X_3 = (x_3, x_{3+t}, x_{3+2t}, x_{3+3t}) \quad (8)$$

مؤلفه‌های این بردار با رابطه (9) مرتب می‌شوند:

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

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

سایر بردارهای تأخیر در رابطه (10) دیده می‌شود.

$$\begin{aligned} i = 1 &\rightarrow X_1 = (0, 2, 5, 8) \rightarrow (3, 2, 1, 0) \\ i = 2 &\rightarrow X_2 = (1, 4, 10, 6) \rightarrow (2, 1, 0, 3) \\ i = 3 &\rightarrow X_3 = (2, 5, 8, 1) \rightarrow (2, 1, 0, 3) \\ i = 4 &\rightarrow X_4 = (4, 10, 6, 3) \rightarrow (1, 0, 3, 2) \\ i = 5 &\rightarrow X_5 = (5, 8, 1, 2.5) \rightarrow (1, 0, 3, 2) \\ i = 6 &\rightarrow X_6 = (10, 6, 3, 4) \rightarrow (0, 3, 2, 1) \end{aligned} \quad (10)$$

از آن‌جا که بردارهای تأخیر d بُعدی هستند پس$d!$جایگشت مختلف ممکن خواهد بود؛ پس $d!$الگوی ترتیبی وجود خواهد داشت. بنابراین می‌توان به هریک از الگوهای ترتیبی دقیقاً یکی از اعداد 1و2و.. تا $d!$ را نسبت داد. نهایتاً با این روش مسیر بازسازی شده در فضای فاز به یک دنباله از اعداد (سمبل‌ها) 1 تا $d!$تبدیل می‌شود.

در مثال 1 بُعد برابر 4 انتخاب شد و لذا 24 اُلگوی ترتیبی مختلف ممکن خواهد بود. به هریک از این 24 الگوی ترتیبی می‌توان یکی از اعداد 1 تا 24 را به جدول 3 نسبت داد. براساس این جدول می‌توان 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 دنباله از نقاط در فضای چهار بُعدی و به صورت$x_6 \rightarrow x_5 \rightarrow x_4 \rightarrow x_3 \rightarrow$ $x_2 \rightarrow x_1$ بدست آمده بود، به دنباله‌ای از اعداد سمبل‌ها به صورت زیر تبدیل می‌گردد.

24 → 17 → 17 → 10 → 10 → 1

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

همان‌طور 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 می‌شود.

به این ترتیب فضای فاز به $d!$ 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^d را توصیف می‌کند (قسمتی از فضا که نقاط آن دارای الگوی ترتیبی مشابهی هستند) و اجتماع تمام این قسمت‌ها، فضای حالت R^d می‌باشد. لازم به توضیح است که الگوهای ترتیبی بسیار سریع قابل محاسبه هستند که یکی از دلایل این طرز خاص از تقسیم‌بندی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد الگوهای ترتیبی، فضا را به $d!$، زیرمجموعه تقسیم می‌کنند و هر یک از بردارهای تأخیر فقط در یکی از این زیرمجموعه‌ها قرار می‌گیرند. با این کار در حقیقت مسیر حالت به یک دنباله از سمبل‌ها تبدیل می‌شود. بندت و پامپ براساس الگوهای ترتیبی، معیاری را تحت عنوان آنتروپی جایگشتی تعریف کردند. این دو بدون در نظر گرفتن بحث بازسازی فضای فاز، آنتروپی جایگشتی را به صورت توزیع الگوهای ترتیبی در یک سری زمانی تعریف کردند [10]. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان آنتروپی جایگشتی را به صورت روابط (11) و (12) توسعه داد:

$$p(j) = \frac{\#\{1 \le i \le N-(d-1)t \text{ جایگشت } X \text{ را دارد } j\}}{N-(d-1)t}$$

$$j = 1,2,3,\dots,n = d! \tag{11}$$

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

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

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

واضح است کران پایین وقتی حاصل می‌شود که دنباله سمبلی صعودی یا نزولی باشد و کران بالا وقتی بدست می‌آید که سمبل‌ها به طور یکنواخت توزیع شوند. به عبارت دیگر توزیع احتمال تمام سمبل‌ها $p(j) = \frac{1}{d!}$ باشد. بر این اساس و برای راحتی می‌توان آنتروپی جایگشت را به واحد کرد[1](14).

$$0 \le (PE = \frac{H(d,t)}{\log d!}) \le 1 \tag{14}$$

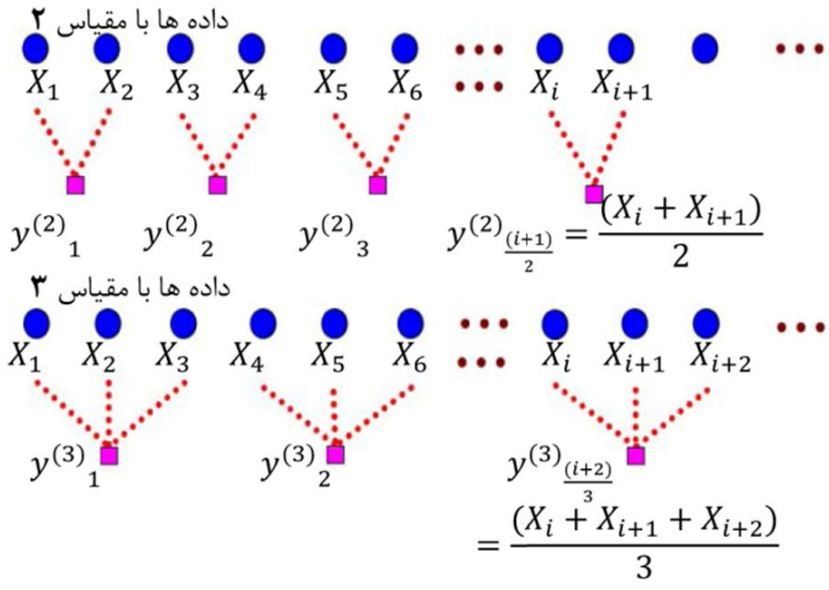
مسأله مهم دیگر این است که چون آنتروپی جایگشتی براساس الگوهای ترتیبی محاسبه می‌شود و الگوهای ترتیبی تنها براساس بزرگی و کوچکی داده‌ها نسبت به هم تعریف می‌شوند لذا اندازه داده‌ها تأثیری در مقدار آنتروپی جایگشت ندارد، پس اگر $y_t = f(x_t)$ یک تابع حقیقی اکیداً صعودی یا نزولی باشد آنگاه آنتروپی جایگشتی برای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

3-2- آنتروپی جایگشتی چند مقیاسی

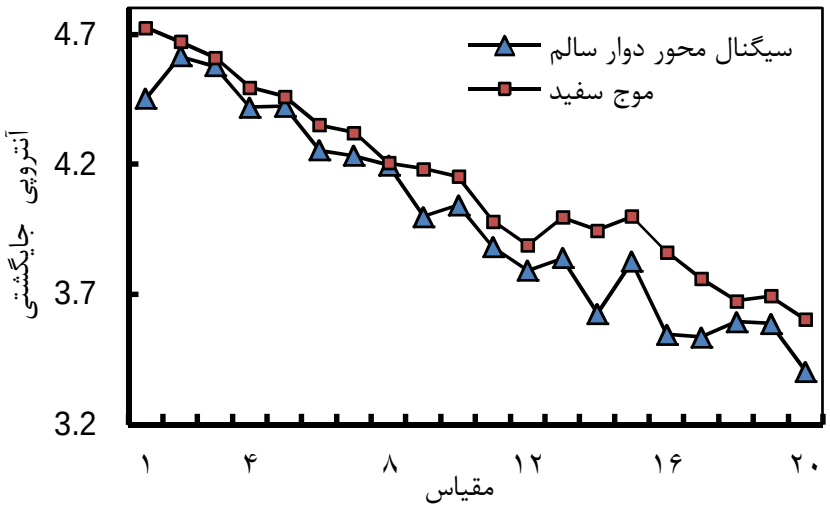
آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی نوعی از آنتروپی است که نتایج بهتری نسبت به آنتروپی جایگشتی دارد [17]. برای محاسبه این تابع ابتدا باید نقاط سیگنال را به صورت میانگین حسابی به دست آورد. داده‌های متوسط از رابطه (15) به دست می‌آید (شکل 5).

$$y_j^{\tau} = \frac{1}{\tau}\sum_{i=(j-1)\tau+1} x_i \tag{15}$$

1- Nomalize



شکل 5 روش چندمقیاسی کردن داده‌ها



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 شکل‌گیری داده های متوسط y_j^{τ}[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 سفید[3] 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- شبکه انفیس

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

ساختار شبکه‌های فازی در دو حالت ممدانی[4] و سوگنو[5] ایجاد میشود. اگر قوانین شرطی سازنده شبکه فازی در مقدم و تالی به‌صورت جملات فازی 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 n از ورودی‌ها باشد شبکه سوگنو را درجه n می‌نامیم. انفیس نوعی از شبکه‌های فازی سوگنو است که ساختارهای سوگنوی درجه صفر و درجه یک

2- Coarse grained
3- White wave
4- Mamdani
5- Sugeno

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

را پشتیبانی می‌کند. 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 A_1 داشته و y عضویتی از B_1 داشته باشد آنگاه

$f1 = p1\,x + q1\,y + r1$

قانون 2) اگر x عضویتی از A_2 داشته و y عضویتی از B_2 داشته باشد آنگاه

$f2 = p2\,x + q2\,y + r2$

در قوانین بالا A_i و B_i مجموعه‌های فازی و $\{p_i\,, q_i\,, r_i\}$ 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 می‌شود. بدین ترتیب از روی ویژگی‌ها، مجموعه‌ها فازی برای مراحل بعد ساخته می‌شود. در این‌جا باید پارامترهای توابع عضویت تعیین شوند [18].

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

$O_{1,i}$ خروجی تابع عضویت تعریف شده در لایه اول می‌باشد. μ یک تابع عضویت است و باید تابعی حقیقی و پیوسته باشد و برای نمایشِ عضویتِ یک مجموعه به کار برده می‌شود. 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 می‌گیرند. این توابع معمولاً پیوسته بوده و برد آن‌ها صفر تا یک می‌باشد. دامنه‌ی توابع عضویت باید به گونه‌ای باشد که مجموعه ورودی‌ها زیر مجموعه‌ای از آن باشد. توابع زیادی با این شرایط ایجاد شده‌اند ولی معمولا از تابع گوسی[1] (17) یا زنگوله‌ای[2](18) استفاده می‌شود.

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\frac{1}{n}\sum_n^1 (x_i - \bar{x})^2}\right) \quad \text{تابع گوسی} \tag{17}$$

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

در توابع (4-4) و (4-5) پارامترهای $s_1 = \{a, b, c\}$ را پارامترهای تطبیقی[3] و x_i ورودی و $\bar{x}$ میانگین ورودی‌ها است.

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

$$\text{خروجی}(2) \rightarrow w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y)\ i = 1,2 \tag{19}$$

μ_{A_i} و μ_{B_i} خروجی توابع عضویت لایه قبل است که در هم ضرب شده و خروجی این لایه را می‌سازد. در این رابطه $\mu_{A_i}(x)$ درجه عضویت x و $\mu_{B_i}(y)$ درجه عضویت y است.

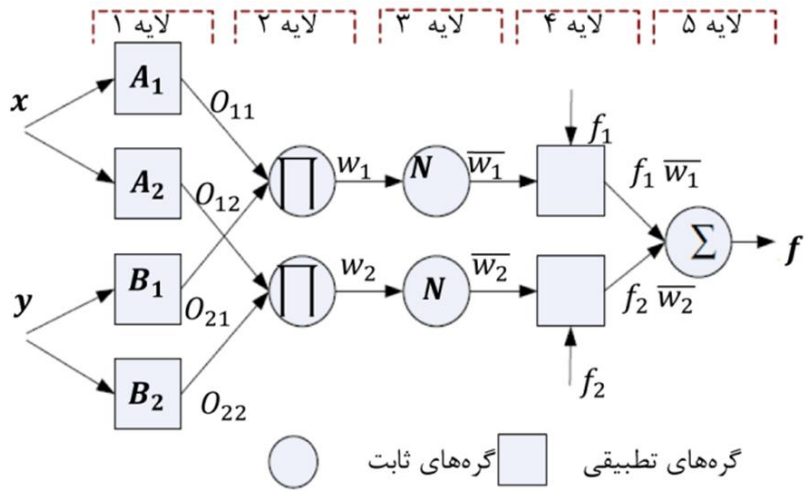
لایه سوم: در رابطه (20) مقادیر بدست آمده از مرحله لایه دوم به واحد می‌شود (هریک از وزن‌ها تقسیم بر مجموع وزن‌ها)؛ در آن w_i مقدار خروجی لایه دوم است.

$$\text{خروجی}(3) \rightarrow \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \tag{20}$$

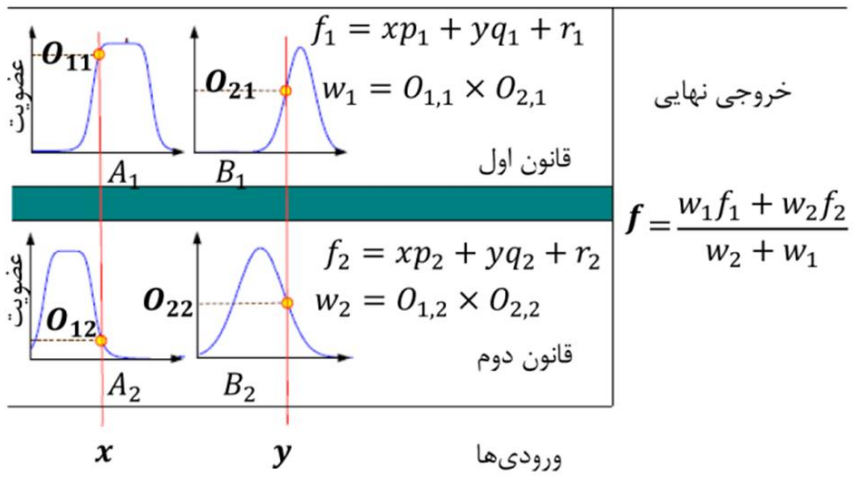
لایه چهارم (اختصاص وزن به خروجی‌ها): در این لایه، یک ترکیب خطی بین ورودی‌ها و وزن‌های بدست آمده محاسبه شده و به خروجی می‌رود. پارامترهای این ترکیب خطی باید پیدا شوند (21).

$$\text{خروجی}(4) \rightarrow \overline{w_i} f_i = \overline{w_i}(p_i x + q_i y + r_i) \tag{21}$$

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



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



شکل 8 عملکرد انفیس

در رابطه (21) پارامترهای $s_2 = \{p_i\,, q_i\,, r_i\}$ پارامتر های متعاقب[4] نامیده 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.

لایه پنجم: در این لایه جمع خروجی‌های لایه چهارم از رابطه (22) بدست میآید و خروجی نهایی ساخته می‌شود.

$$\text{خروجی}(5) \rightarrow \sum_i \overline{w_i} f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \tag{22}$$

که در آن $\overline{w_i} f_i$ همان خروجی لایه چهارم است که با جمع مقادیرشان خروجی نهایی بدست می‌آید.

در مدل انفیس زمانی عمل طبقه بندی به درستی انجام می‌شود 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 پارامترهای s_1 ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s_2 با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات خطا[5] محاسبه می‌شود.

در گام دوم که گام رو به عقب نامیده می شود، مجموعه پارامترهای s_2 ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s_1 با استفاده از الگوریتم شیب کاهشی[6] به دست می‌آیند.

انتخاب تابع عضویت براساس آزمایش انواع مختلف توابع عضویت صورت می‌گیرد. به این معنی که توابع عضویت، هر کدام جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند 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

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

عنوان تابع عضویت برگزیده خواهد شد [19].

5- روش انجام تحقیق

5-1- وارد کردن داده‌ها

بعد از محاسبه آنتروپی سیگنال‌های گرفته شده، ویژگی‌های آن سیگنال‌ها را محاسبه می‌کنیم. 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 این‌که 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 می‌کنند عبارت‌اند از: 1-بیشینه 2-کمینه[1] 3- میانگین حسابی[2] 4- میانگین هندسی[3] 5-انرژی 7-ریشه میانگین مربعات[4] 8- عدم تقارن[5] 9- کشیدگی[6]. روابط این توابع در جدول 4 دیده می‌شود. 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 به‌صورت داده‌های آزمایشی (7 سیگنال از 20 سیگنال هر عیب طبق جدول 5) و مابقی به‌صورت داده‌های آزمایشی به شبکه انفیس داده شد.

جدول 4 روابط ویژگی‌های سیگنال

ردیف	ویژگی	رابطه ویژگی
1	میانگین هندسی	$T_1 = \sqrt[n]{\prod_{n}^{1}(x_i)}$
2	بیشینه	$T_2 = \max(x_i)$
3	کمینه	$T_2 = \min(x_i)$
4	میانگین حسابی	$T_4 = \frac{\sum_1^n(x_i)}{n}$
5	انحراف از معیار	$T_5 = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_1^n(x_i - T_4)^2}$
6	کشیدگی نمودار	$T_6 = \frac{\frac{1}{n}\sum_1^n(x_i - T_4)^4}{{T_5}^4}$
7	عدم تقارن	$T_7 = \frac{\frac{1}{n}\sum_1^n(x_i - T_4)^3}{{T_5}^3}$
8	ریشه میانگین مربعات	$T_8 = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_1^n(x_i)^2}$
9	انرژی	$T_9 = \sqrt{\sum_1^n(x_i)^2}$

جدول 5 تعداد داده‌های ورودی به انفیس

اطلاعات	داده‌های آموزشی	داده‌های آزمایشی	شماره گروه طبقه‌بندی شده
محور سالم	7	13	1
ترک 3 میلی‌متر	7	13	2
ترک 5 میلی‌متر	7	13	3
ترک 7 میلی‌متر	7	13	4

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

5-2- طبقه‌بندی عیب با انفیس

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.

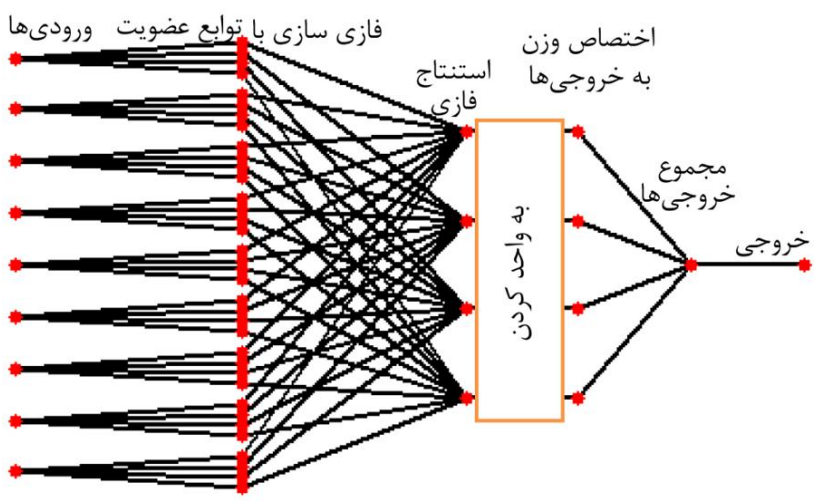
مقدار خطا شبکه فازی با جذر میانگین مربعات خطا[10] مشخص شد که از طریق جمعِ مجذور مربعات خطای هر نرون در لایه خروجی، تقسیم بر تعداد نرونهای لایه خروجی، به دست می‌آید. رابطه (23) نحوهٔ محاسبهٔ میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد [20].

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

a_i و b_i به ترتیب خروجیهای واقعی و هدف برای iاُمین 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 نگرفته‌اند، نمودارهای سمت راست نمای پایانی توابع عضویت را بعد از آموزش شبکه نشان می‌دهد. $MF(i)$ ها نشانگر 4 تابع عضویتی هستند که بر ورودی‌ها اعمال می‌شوند. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود محور افقی مقادیر ویژگی‌های سیگنال و محور عمودی مقدار عضویت هر داده در ویژگی مربوطه را نشان می‌دهد.

5-3- ارزیابی نتایج انفیس

برای ارزیابی شبکه انفیس به کار رفته از ماتریس اغتشاش[11] که در جدول 6 دیده می‌شود استفاده می‌کنیم است. اگر داده ها در M دسته گرفته باشند، یک ماتریس اغتشاش جدولی با اندازه $M \times M$ است .حالت ایده‌آل این است که بیشتر اندازه داده‌های مرتبط به مشاهدات روی قطر اصلی ماتریس قرار گرفته و مابقی صفر یا نزدیک به صفر باشند.

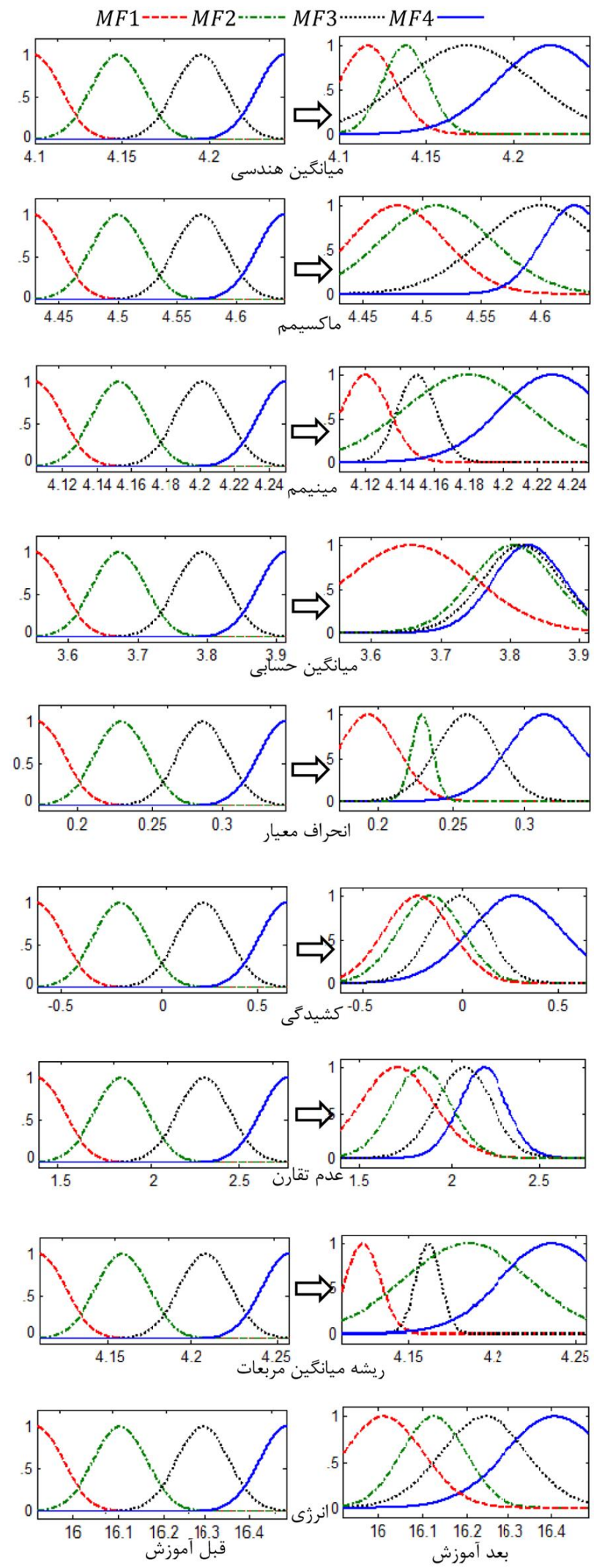


شکل 9 ساختار انفیس بکار رفته در این تحقیق

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

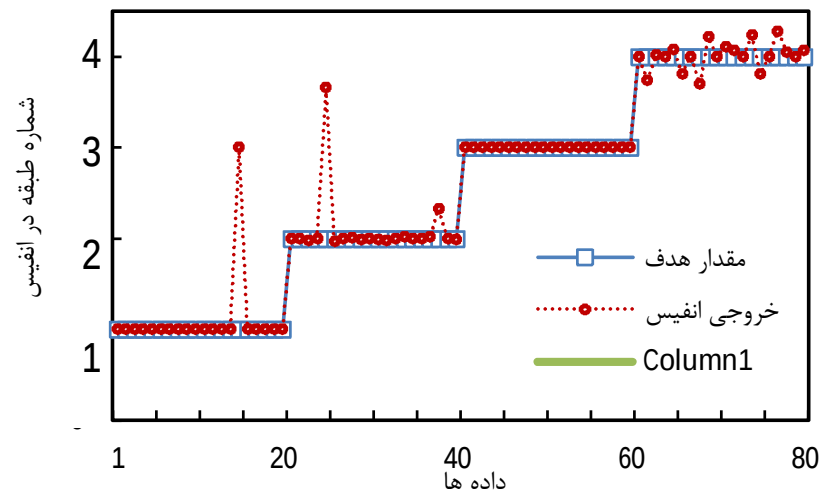
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

عناصر روی قطر اصلی ماتریس اغتشاش تعداد نمونه های طبقه‌بندی شده صحیح را نشان می‌دهد. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی صحت روش‌های دسته‌بندی وجود دارد که می‌توان حساسیت[1] دقت طبقه‌بندی کلی[2] و خصوصی بودن[3] را نام برد. این معیارها را با توجه به مقادیر ماتریس اغتشاش محاسبه می‌شوند [22،21].

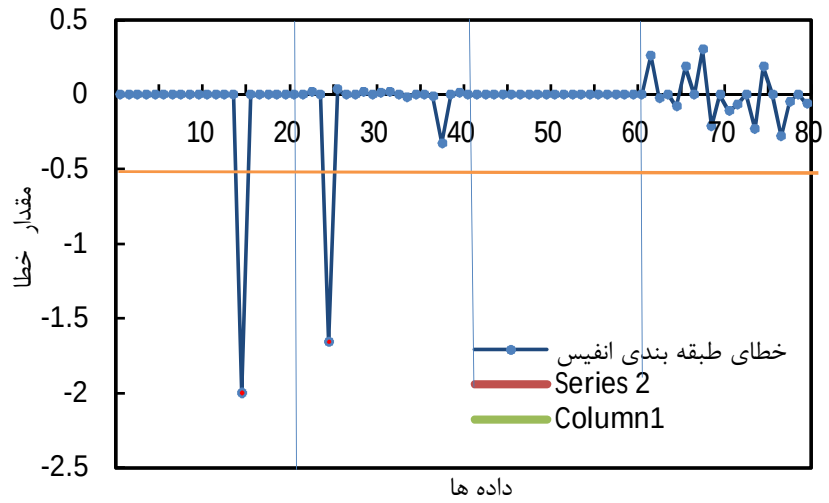


شکل 10 توابع عضویت قبل و بعد از آموزش

1- Specificity
2- Precision
3- Sensitivity



شکل 11 نتیجه طبقه‌بندی داده‌های آزمایش انفیس



شکل 12 خطای طبقه بندی داده‌های آزمایش

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 تصمیم‌های ممکن.

برای محاسبه این شاخص‌ها از مقادیر ماتریس اغتشاش استفاده می‌شود 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 مقیاسی الگوریتمی کارا و قابل اطمینان در طبقه‌بندی عیوب محور دوار است.

6- نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان می‌دهد عیب‌یابی محور دوار با استفاده از سیگنال‌های زمانی حاصله از سنسورهای شتاب‌سنج امکان‌پذیر است. پردازش داده‌ها با شبکه انفیس انجام شده که از محاسبات نرم[4] منطق فازی استفاده می‌کند 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 نسبی دارد. در این مقاله از آنتروپی سیگنال زمانی برای تفکیک سیگنال‌ها استفاده شده زیرا روشی سریع، کم هزینه و بدیع می‌باشد. عیب‌های محور دوار به صورت ترک عرضی به عمق 3، 5 و 7 میلی‌متر با محل ثابت و تحت بارگذاری خمش خالص بوده و محورهای ترک‌دار با محور سالم مورد مقایسه قرار گرفتند.

4- Soft computing
5- Hard computing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]

جدول 6 ماتریس اغتشاش

اطلاعات	محور سالم	ترک 3 میلی‌متر	ترک 5 میلی‌متر	ترک 7 میلی‌متر
محور سالم	12	0	0	1
ترک 3 میلی‌متر	0.	12	0	1
ترک 5 میلی‌متر	0	0	13	0
ترک 7 میلی‌متر	0	0	0	13

جدول 7 ارزیابی نتایج انفیس با نتایج ماتریس اغتشاش

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

پیش‌پردازش سیگنال‌ها با استفاده از آنتروپی چندمقیاسی جایگشتی انجام گرفت و ویژگی‌های آنتروپی به‌دست‌آمده ورودی شبکه فازی انفیس را تشکیل دادند. نتایج حاصل از انفیس نشان داد طبقه‌بندی 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

[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 weighted-permutation 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.10.8]