



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

مهرداد نوری خاجوی^{1*}، محمد رضا باویر²، ابراهیم فرخی²

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 چندمقیاسی استخراج 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

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

محور دوار یکی از مهم‌ترین اجزای موتورهای، 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 ...

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده کردند.

بار دیگر آقای راکینگ 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 تا به حال تحقیقی با پیش‌پردازش سیگنال به روش آنتروپی صورت نگرفته است. در این پژوهش پیش‌پردازش داده‌ها به وسیله آنتروپی چند مقیاسی جایگشتی انجام می‌شود.

2- دستگاه و روش اجرا آزمایش

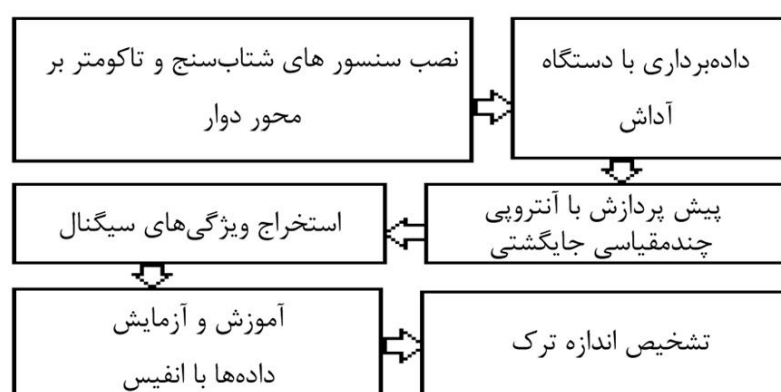
2-1- مراحل کار

در این پژوهش پس از ساخت دستگاه آزمایشگاهی محور دوار با بارگذاری خمش خالص به وسیله سنسورهای ارتعاشی، سیگنال شتاب در دو جهت قائم و افقی از روی تکیه‌گاه‌ها جمع‌آوری شد. تعداد دور نیز با سنسور تاکومتر محاسبه شد؛ در نهایت 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 جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌ها از دستگاه آنالیزور آداش¹² 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 به خوبی ارتعاشات را دریافت کرده و 90 گرم وزن دارد. سنسور جهت دریافت ارتعاشات در نقطه موردنظر (یاتاقان) پیچ شده است. خصوصیات محور مورد استفاده در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1 خصوصیات محور مورد آزمون	
مشخصه	مقدار
جنس محور	(استیل CK45(SAE1045
قطر محور	12mm
مدول الاستیسیته	204000 MPa
تنش تسلیم	382 MPa



شکل 1 مراحل کار در تحقیق

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

از دهه 1970 مطالعات زیادی بر روی محوره‌های دارای ترک انجام شده است. در سال 1976، دیویس و مایس، دینامیک محوره‌های دارای ترک را با ارائه مدلی بررسی کردند [1]. در همین سال هنری و گسج [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] کوپلینگ 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 6x6 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 3x3 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 کوپلینگ 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 کرد 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 [9] بلبرینگ معیوب را به روش آنتروپی نمونه چند مقیاسی⁶ عیب‌یابی کردند. آن‌ها با استفاده از ویژگی‌های برداشته شده از آنتروپی چند مقیاسی به دست آمده و استفاده از شبکه انفیس⁷، 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 جایگشت⁸ بُعد سیگنال نسبت دادند این آنتروپی را آنتروپی جایگشتی⁹ نامیدند. آن‌ها از این روش برای طبقه‌بندی الکتروانسفالوگرام‌های قلبی¹⁰ نامیدند.

- 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

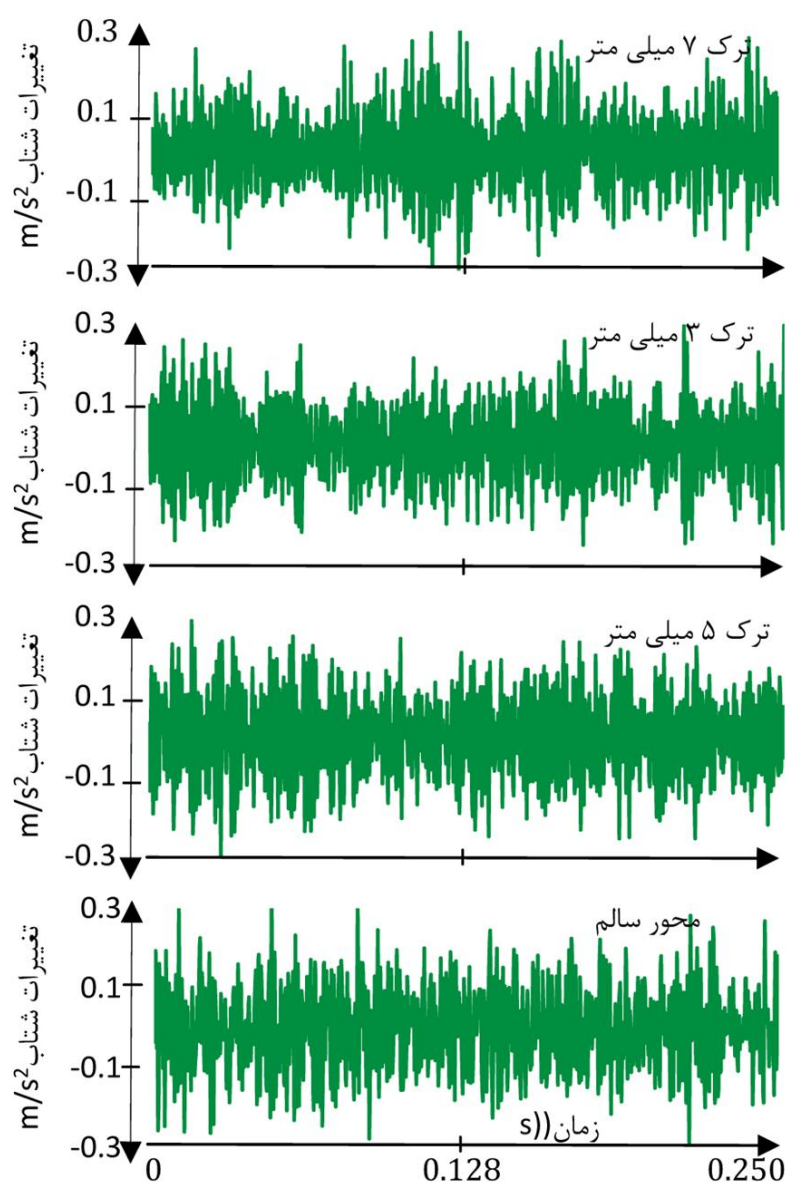
3-2- شرح آزمایش

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.

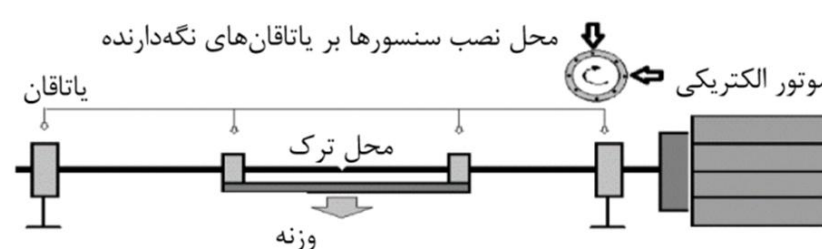
پس از گذر از حالت شروع به کار و پایدار شدن، به وسیله سنسورهای شتاب سنج نصب شده روی تکیه گاه ها، سیگنال شتاب قائم و افقی جمع آوری گردید. داده های جمع آوری شده به صورت سیگنالی با 4096 نمونه و با فرکانس نمونه برداری 16384 هرتز، با دور موتور 30 دور بر ثانیه، دریافت شدند.

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

محل ترک	
مشخصات	مقدار
فاصله دیسک تا تکیه گاه	384
وزن وزنه	4
طول محور	950
عرض هر ترک	0/29
عمق ترک ها	7 ، 5 ، 3
فاصله ترک تا دیسک ها	36



شکل 2 نمونه سیگنال های محور دوار در یک چهارم ثانیه با 1024 نمونه



شکل 3 میز کار آزمایش

4-2- ایجاد عیب ترک در محور دوار

برای ایجاد ترک در محور دوار، به وسیله ی دستگاه وایرکات¹، شیاری به عرض 0/29 میلی متر ایجاد شد. در دستگاه های صنعتی و حالت واقعی کنترلی بر عمق و عرض ترک نیست از این رو برای بررسی ترک های مختلف از دستگاه وایرکات استفاده شد. عمق ترک ایجاد شده در نمونه های مختلف برابر 3، 5 و 7 میلی متر بود؛ که با توجه به قطر 12 میلی متری محور، نسبت عمق به قطر به ترتیب برابر 0/25، 41/67 و 58/33 درصد می باشد.

3- مدل سازی ریاضی

توصیف ریاضی رفتار در انواع سیستم های دینامیکی 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 می تواند با یک معادله دینامیکی با بُعد محدود با رابطه (1) مدل می شود [12]:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (1)$$

در $t \in \infty$ زمان و $x \in R^n$ بردار حالت در فضای فاز می باشد. پاسخ معادله (1) را می توان به صورت $\varphi_t(x_0)$ نشان داد که با داشتن حالت اولیه x_0 حالت در لحظه t تعیین می شود. این پاسخ یک مسیر را در فضای حالت تشکیل می دهد. یک روش برای توصیف رفتار سیستم های دینامیکی، تبدیل دینامیک های پیوسته به دینامیک های گسسته سمبلی می باشد [13,12]. ایده کلی دینامیک های سمبلی² ساده می باشد، به جای در نظر گرفتن حالت دقیق یک سیستم در یک زمان، توصیف نادقیقی از آن در نظر گرفته می شود. در این روش، دینامیک های سیستم به یک دنباله از سمبل ها تبدیل می شوند. 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 زیرمجموعه افراز کرد که این زیرمجموعه ها دو به دو جدا از هم می باشند و اجتماع آن ها کل فضای در نظر گرفته شده را تشکیل خواهد داد.

هر یک از این زیر مجموعه ها 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 دینامیک های پیوسته به یک دنباله نادقیق از سمبل ها تبدیل می گردند. شکل 4 مفهوم افراز فضای فاز و تبدیل مسیر حالت به یک دنباله از سمبل ها را نشان می دهد [14].

طبق رابطه (2)، هر شرط اولیه x_0 با یک نگاشت از فضای فاز به مجموعه سمبل ها، دنباله ای از سمبل ها را تولید می کند

$$x_0 \rightarrow \dots \varphi \alpha \beta \gamma \chi \zeta \quad (2)$$

نگاشت (2)، دینامیک سمبلی نامیده می شود چرا که به دینامیک های سیستم که از یک شرط اولیه x_0 شروع می شود یک دنباله سمبلی مجاز $\dots \varphi \alpha \beta \gamma \chi \zeta$ نسبت می دهد. دینامیک های سمبلی را می توان 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، ویژگی های اصلی دینامیک ها محفوظ می ماند [15].

1- Electrical Discharge Machining (EDM)

2- Symbolic Dynamical Systems

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

$$x_1, x_2 = -1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8 = -6, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$$

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

$$\begin{aligned} i &\rightarrow X_1 \\ i &\rightarrow X_2 \quad - \quad - \\ i &\rightarrow X_3 \quad 2 \\ i &\rightarrow X_4 \quad 4 \quad , -6 \\ i &\rightarrow X_5 \\ i &\rightarrow X_6 \quad - \end{aligned} \quad (7)$$

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.

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

مؤلفه‌های این بردار با رابطه (9) مرتب می‌شوند:

$$x_{3+3t} \quad x_3 \quad x_{3+t} \quad x_{3+2t} \quad (9)$$

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

سایر بردارهای تأخیر در رابطه (10) دیده می‌شود.

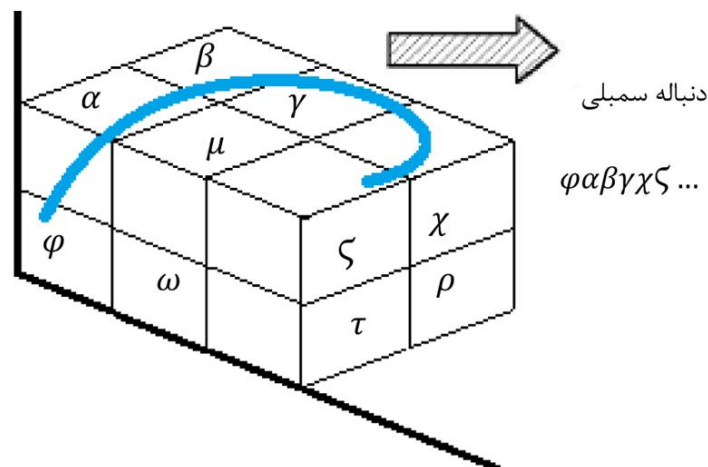
$$\begin{aligned} i &\rightarrow X_1 \quad \rightarrow \\ i &\rightarrow X_2 \quad \rightarrow \\ i &\rightarrow X_3 \quad 2 \quad \rightarrow (2 \\ i &\rightarrow X_4 \quad 0 \quad \rightarrow \\ i &\rightarrow X_5 \quad \rightarrow \\ i &\rightarrow X_6 \quad \rightarrow \end{aligned} \quad (10)$$

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 1 و 2 و... 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 الگوی 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 به دست 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 $x_6 \rightarrow x_5 \rightarrow x_4 \rightarrow x_3$ می‌گردد. بدست آمده بود، به دنباله‌ای از اعداد سمبل‌ها به صورت زیر تبدیل می‌گردد.

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$$



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 $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ 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 می‌گردد. در این روش از الگوهای ترتیبی² 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 طولانی مدت 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 به صورت $A = \{x_i\}_{i=1}^N$ داده شده است. طبق قضیه تیکنز برای بازسازی فضای فاز، را می‌توان تأخیر زمانی³ t و بُعد⁴ d می‌توان بردارهای تأخیر را به صورت (3) تشکیل داد:

$$\forall i \rightarrow X_i \quad x_{i+0t} \quad x_{i+1t} \quad x_{i+2t} \quad \dots \quad x_{i+(d-1)t} \quad (3)$$

به هر زمان i یک بردار با بُعد d شامل مقادیر سری A در زمان‌های i تا $i + (d-1)t$ نسبت داده می‌شود. با این روش سری زمانی به $(d-1)t + 1$ بردار تأخیر که مؤلفه‌هایش با هم همپوشانی دارند تبدیل می‌گردد. منظور از الگوی ترتیبی، جایگشت $r_0, r_1, \dots, r_{i-1}$ از d می‌باشد که r_i ها اعدادی مابین صفر تا $(d-1)$ هستند. مؤلفه‌های بردار تأخیر X_i را به صورت رابطه (4) مرتب می‌شوند

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

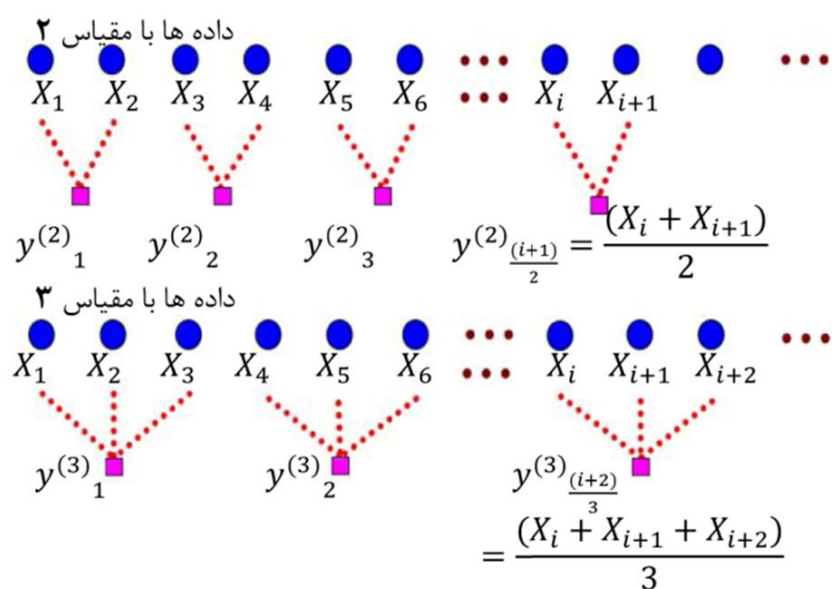
اگر دو مؤلفه در بردار تأخیر دارای مقدار یکسانی باشند، مانند حالت رابطه (5)، به منظور حصول یک الگوی ترتیبی یکتا، رابطه (6) به کار برده می‌شود.

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

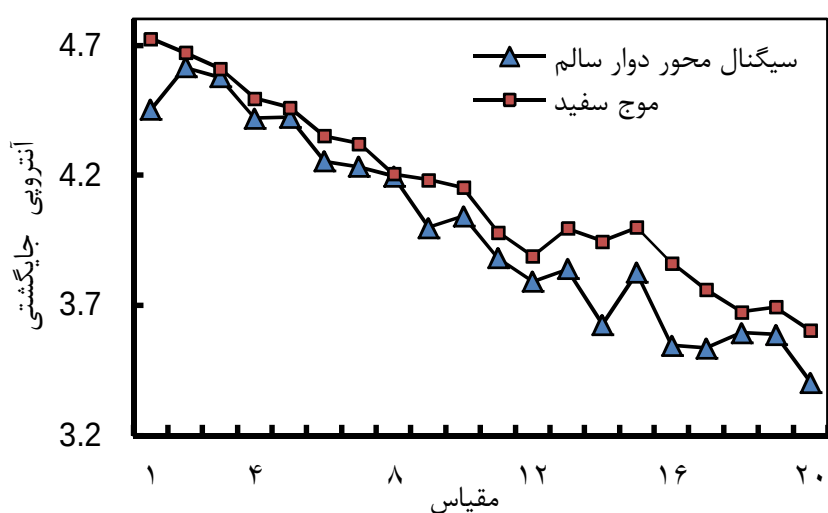
$$r_y \quad r_{y-1} \quad (6)$$

مثال 1) فرض کنید یک سری زمانی A در 12 نقطه به صورت زیر در اختیار داشته باشیم:

1- Takenz
2- Sequential pattern
3- Delay time vector
4- Dimension



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 داده‌های 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- 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 ممدانی⁴ و سوگنو⁵ ایجاد می‌شود. اگر قوانین شرطی سازنده شبکه فازی در مقدم و تالی به صورت جملات فازی بیان شده باشند؛ شبکه فازی ممدانی ایجاد می‌شود. اگر جملات قوانین شرطی در مقدم، بیان فازی و در تالی به صورت 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 به صورت 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

همان‌طور که ذکر شد، گام نخست در دینامیک‌های 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:

$$p_j = \frac{X \text{ جایگشت } j \text{ را دارد } t}{N - d - t} \quad (11)$$

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

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.

$$d \leq H(d, t) \leq d \quad (13)$$

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 $\frac{1}{d}$ باشد. بر این اساس و برای راحتی می‌توان آنتروپی جایگشتی را به واحد کرد¹ (14).

$$\frac{H(d, t)}{d} \leq PE \leq \frac{H(d, t)}{d} \quad (14)$$

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].

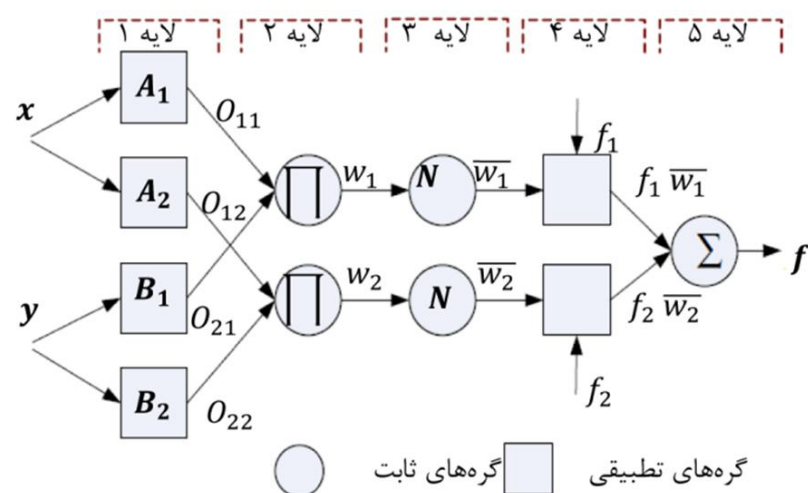
3-2- آنتروپی جایگشتی چند مقیاسی

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).

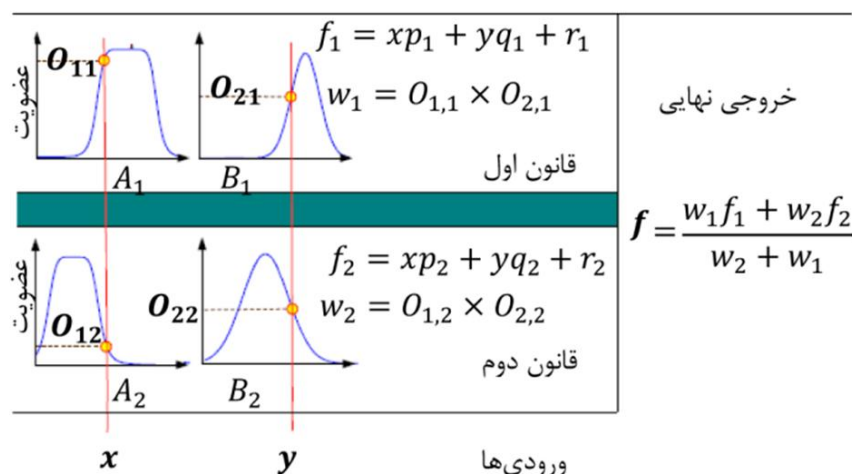
$$y_j^{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=j-\tau+1}^j x_i \quad (15)$$

1- Nomalize

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



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



در رابطه (21) پارامترهای p_i, q_i, r_i و s_2 پارامترهای متعاقب⁴ نامیده می‌شوند، این‌ها پارامترهایی هستند که باید برای یک خروجی بهینه بدست بیایند و x و y 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.

$$\text{خروجی} \rightarrow \sum_i \bar{w}_i f_i \quad (22)$$

که در آن $\bar{w}_i f_i$ 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 می‌گیرد. در گام اول که تا لایه چهارم پیش می‌رود و گام رو به جلو نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای s_1 ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s_2 با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات خطا⁵ محاسبه می‌شود.

در گام دوم که گام رو به عقب نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای s_2 ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای s_1 با استفاده از الگوریتم شیب کاهشی⁶ 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 می‌بیند. در پایان میزان خطای مدل حاصل با هم مقایسه می‌شود و تابعی که کمترین میزان خطا را در کمترین زمان آموزش حاصل کند، به

را پشتیبانی می‌کند. در شکل 7 ساختار یک شبکه انفیس آورده شده و شکل 8 عملکرد انفیس را نشان می‌دهد. این شبکه با دو قانون 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 $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$
قانون 2) اگر x عضویتی از A_2 داشته و y عضویتی از B_2 داشته باشد آنگاه $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$
در قوانین بالا A_i و B_i مجموعه‌های فازی و $\{p_i, q_i, r_i\}$ پارامترهایی هستند که بعداً 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].

$$\text{خروجی} \begin{cases} \mu_{A_i} x, & i \\ \mu_{B_i} x, & i \end{cases} \quad (16)$$

$O_{1,i}$ خروجی تابع عضویت تعریف شده در لایه اول می‌باشد. یک تابع عضویت است و باید تابعی حقیقی و پیوسته باشد و برای نمایش عضویت 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 معمولاً از تابع گوسی¹ (17) یا زنگوله‌ای² (18) استفاده می‌شود.

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

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

در توابع (4-4) و (5-4) پارامترهای a, b, c را s_1 پارامترهای تطبیقی³ و x_i ورودی و $\bar{x}$ میانگین ورودی‌ها است.

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 می‌شود (19).

$$\text{خروجی} \rightarrow w_i \quad \mu_{A_i} x \quad \mu_{B_i} y \quad i \quad (19)$$

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 مقدار خروجی لایه دوم است.

$$\text{خروجی} \rightarrow \bar{w}_i = \frac{w_i}{w} \quad (20)$$

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).

$$\text{خروجی} \rightarrow \bar{w}_i f_i \quad \bar{w}_i p_i x \quad q_i y \quad r_i \quad (21)$$

4- Following parameters

5- (LSE)

6- Reduced gradient algorithm

1- Gaussian function

2- Bell function

3- Adaptive Parameters

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 این 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 16384 هرتز برداشت شده است. در این جا 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 3- میانگین حسابی 4- میانگین هندسی 5- انرژی 7- ریشه میانگین مربعات 8- عدم تقارن 9- کشیدگی⁶. 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 ذکر شده برای آنتروپی‌های به دست آمده محاسبه شد. در نهایت مقداری از داده‌ها به صورت داده‌های آزمایشی (7 سیگنال از 20 سیگنال هر عیب طبق جدول 5) و مابقی به صورت داده‌های آزمایشی به شبکه انفیس داده شد.

جدول 4 روابط ویژگی‌های سیگنال

ردیف	ویژگی	رابطه ویژگی
1	میانگین هندسی	$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}$
2	بیشینه	$\max(x_i)$
3	کمینه	$\min(x_i)$
4	میانگین حسابی	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
5	انحراف از معیار	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$
6	کشیدگی نمودار	$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^4 - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2)^2}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3 - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^3)^2}$
7	عدم تقارن	$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3 - 3(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2) + 2(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^3}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2)^{3/2}}$
8	ریشه میانگین مربعات	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$
9	انرژی	$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$

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 کدنویسی، 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 مشاهده می‌شود. آموزش شبکه باعث تغییر پارامترهای تشکیل دهنده توابع عضویت و در نهایت تغییر شکل این توابع می‌شود.

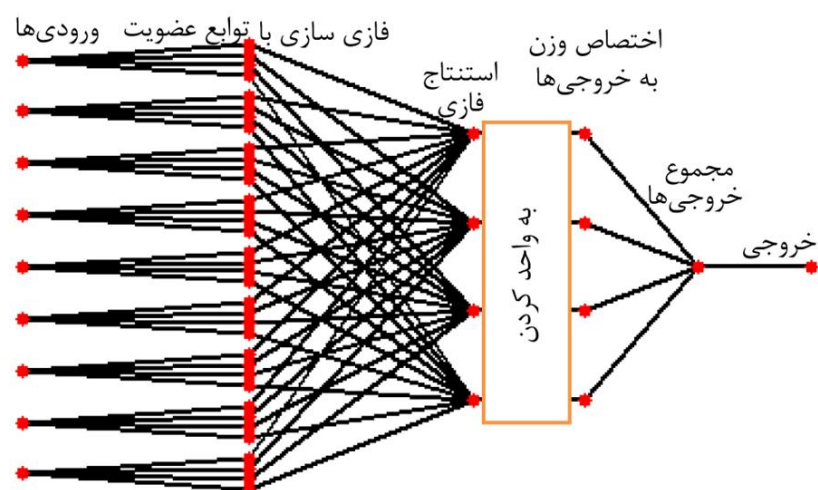
مقدار خطا شبکه فازی با جذر میانگین مربعات خطا¹⁰ مشخص شد که از طریق جمع مجذور مربعات خطای هر نرون در لایه خروجی، تقسیم بر تعداد نرونهای لایه خروجی، به دست می‌آید. رابطه (23) نحوه محاسبه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد [20].

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

a_i و b_i به ترتیب خروجیهای واقعی و هدف برای اُلمین 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 ورودی-ها 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.

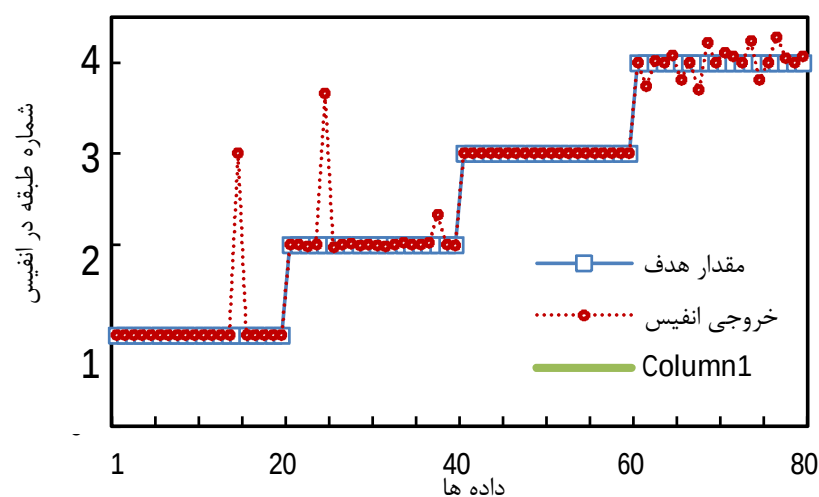
5-3- ارزیابی نتایج انفیس

برای ارزیابی شبکه انفیس به کار رفته از ماتریس اغتشاش¹¹ که در جدول 6 دیده می‌شود استفاده می‌کنیم است. اگر داده‌ها 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.

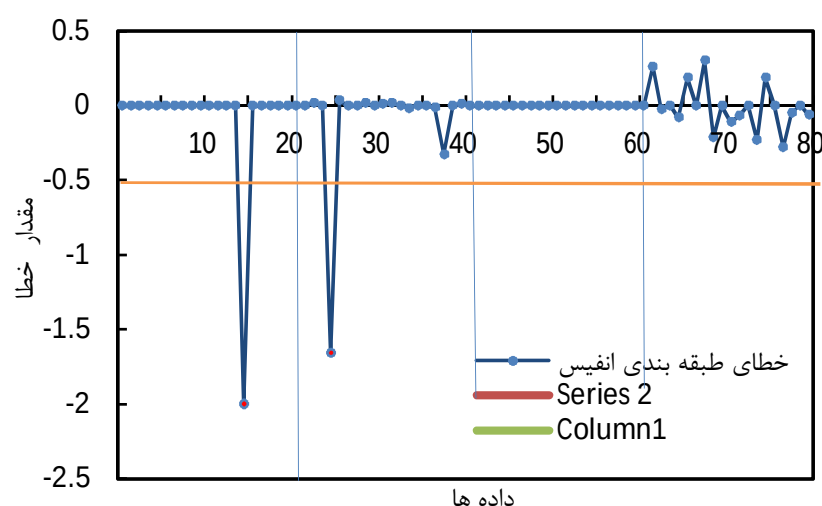


شکل 9 ساختار انفیس بکار رفته در این تحقیق

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



شکل 11 نتیجه طبقه‌بندی داده‌های آزمایش انفیس



شکل 12 خطای طبقه بندی داده‌های آزمایش

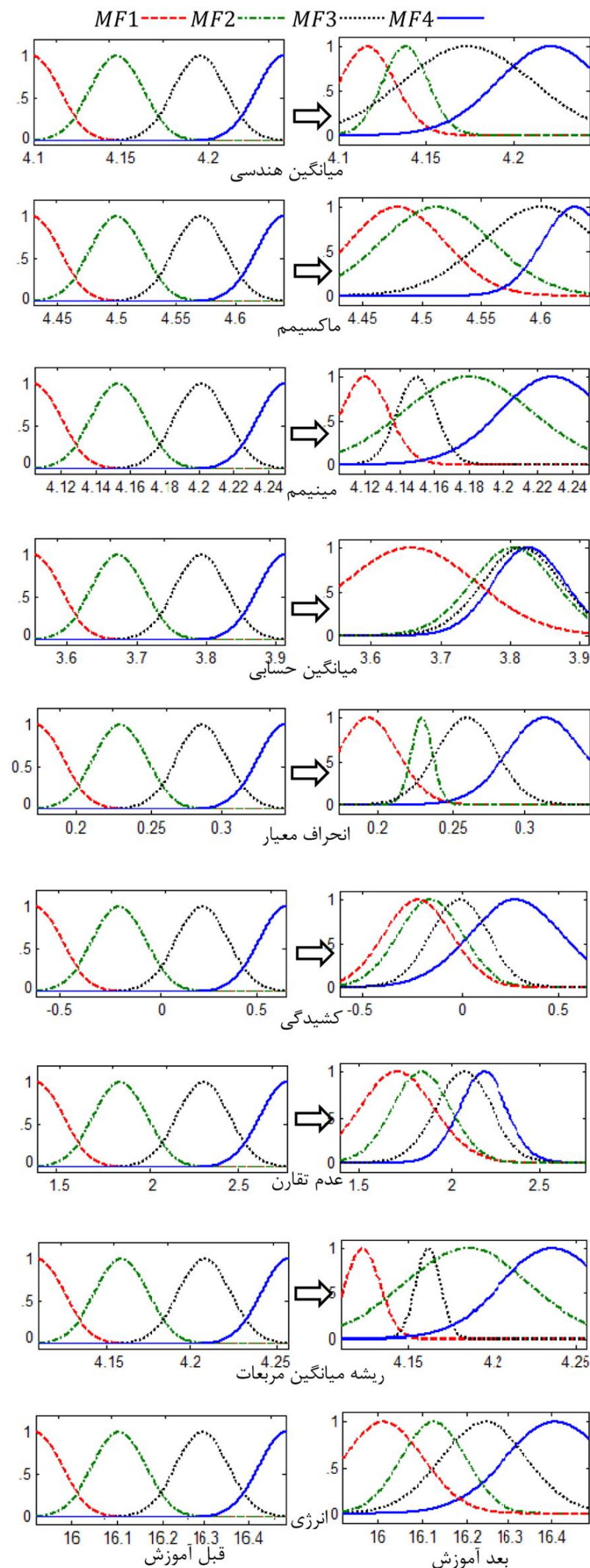
- 1- حساسیت: تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های مثبت ممکن
- 2- اختصاصی بودن: تعداد تصمیم‌های منفی صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های منفی ممکن.
- 3- دقت طبقه‌بندی کلی: تعداد تصمیم‌های صحیح تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های ممکن.

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- نتیجه گیری

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 نرم⁴ منطق فازی استفاده می‌کند در صورتی که شبکه‌های عصبی بر مبنای منطق کلاسیک بوده و با محاسبات سخت⁵ 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 خمشی خالص بوده و محورهای ترک‌دار با محور سالم مورد مقایسه قرار گرفتند.

عناصر روی قطر اصلی ماتریس اغتشاش تعداد نمونه‌های طبقه‌بندی 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 می‌شوند [22,21].



شکل 10 توابع عضویت قبل و بعد از آموزش

4- Soft computing
5- Hard computing

1- Specificity
2- Precision
3- Sensitivity

- [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](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

اطلاعات	محور سالم	ترک 3 میلی متر	ترک 5 میلی متر	ترک 7 میلی متر
محور سالم	12	0	0	1
ترک 3 میلی متر	0	12	0	1
ترک 5 میلی متر	0	0	13	0
ترک 7 میلی متر	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	
ترک 3 میلی متر	%92/31	%97/22	%96/15
ترک 5 میلی متر	%100	%100	
ترک 7 میلی متر	%100	%100	

پیش پردازش سیگنال ها با استفاده از آنتروپی چندمقیاسی جایگشتی انجام گرفت و ویژگی های آنتروپی به دست آمده ورودی شبکه فازی انفیس را تشکیل دادند. نتایج حاصل از انفیس نشان داد طبقه بندی سیگنال های محور دوار با عیب های 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 Engnees 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