

شناسایی ترک با تحلیل فرکانسهای طبیعی سازه با استفاده از شبکه‌های عصبی نوع GMDH و سیستم عصبی - فازی ANFIS

منصور دروېزه^۱ نادر نریمانزاده^۲ علی ملیحی دیزگاه^۳ مهدی جوادزاده^۴ رضا انصاری^{۵*}

* نویسنده مسئول: r_ansari@guilan.ac.ir

چکیده

وجود ترک در سازه، موجب نرمی محلی و تغییر در خواص سختی و رفتار دینامیکی سازه می‌شود. رفتار دینامیکی سازه دارای ترک، به عمق و مکان ترک بستگی دارد؛ از این رو می‌توان برای شناسایی عمق و مکان ترک از تغییرات رفتار دینامیکی سازه ناشی از ترک، استفاده نمود. در این مقاله ابتدا سه فرکانس طبیعی اول یک تیر یکسر در گیر که یک ترک سطحی باز برای ده عمق ترک مختلف و برای سی مکان مختلف در آن ایجاد شده است، با استفاده از تحلیل المان محدود محاسبه می‌شوند. سپس نتایج حاصل از تحلیل المان محدود به عنوان ورودی شبکه عصبی نوع GMDH و همچنین سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی ANFIS برای مدلسازی و پیش بینی عمق و مکان ترک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روشها برای یک تیر ایزوتروپیک یکسر گیردار مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که نتایج حاصل، توانایی مطلوب روشهای ارائه شده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فرکانس طبیعی، شبکه‌های عصبی نوع GMDH، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی، فازی ANFIS - الگوریتم ژنتیک، تجزیه مقادیر منفرد.

۱- استاد گروه مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان.

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان.

۴- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان.

۵- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان.

۱- مقدمه

دسته مهمی از روش‌های مؤثر شناسایی ترک و آسیب‌های پنهان در یک سازه، بر پایه ارزیابی رفتار دینامیکی و ارتعاشی ایجاد شده‌اند. ایده اصلی روشهای بر پایه رفتار دینامیکی این است که کمیت‌های مربوط به رفتار دینامیکی مانند فرکانس طبیعی، دامنه ارتعاش، شکل مود ارتعاشی و میرایی طبیعی، توابعی از مشخصات مکانیکی سازه هستند و تغییر در این مشخصات موجب تغییرات محسوس در رفتار دینامیکی می‌شود. آغاز توسعه این روش‌ها را می‌توان اواسط دهه هفتاد میلادی و در نتیجه نیاز مهندسان صنعت حفاری به روشهای سریع، کم هزینه و مطمئن دانست [۱].

وجود ترک باعث ایجاد نرمی محلی و تغییر در سختی کل سازه می‌شود. این تغییر بطور کلی تابعی از محل و عمق ترک است. در این زمینه پژوهش‌های قابل توجهی انجام پذیرفته است؛ گوناریس، المان تیر ترک داری با ماتریس سختی غیر خطی، در نظر گرفت و رفتار دینامیکی آن را مدل کرد [۲]. ایناگای روشی برای شناسایی عمق ترک با اندازه‌گیری تجربی فرکانس طبیعی سازه ارائه کرد [۳]. لیونگ روشی برای مدل‌سازی تیر ترک دار تحت خمش ارائه کرد [۴]. شیم و سو روشی بر پایه شبکه عصبی و تحلیل معکوس فرکانسهای طبیعی برای شناسایی ترک ارائه کردند [۵].

منطق فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک، توانایی زیادی در حل سیستم‌های غیر خطی و مدل کردن و تشخیص مدل ریاضی فرایندهای پیچیده با استفاده از داده‌های ورودی - خروجی دارند. اخیراً تلاشهای بسیاری برای بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی صورت گرفته است [۶]. همچنین با استفاده از مجموعه‌های فازی می‌توان داده‌های مبهم و نامعلوم را به امور حقیقی و پیچیده مرتبط نمود [۷]. علاوه بر این، منطق فازی توانایی بالایی در مدل‌سازی سامانه‌های تقریبی و استدلالی غیر دقیق، که عموماً در حوزه مسائل انسانی هستند، دارند [۸]. استفاده از روشهای تکامل تدریجی

در طراحی شبکه‌های عصبی نوع GMDH^۱ و نیز سیستمهای فازی باعث بهبود عملکرد آنها می‌شود [۹]. همچنین از تجزیه مقادیر منفرد^۲ (SVD) در ترکیبی با الگوریتم ژنتیک جهت طراحی بهینه سیستم فازی و نیز شبکه‌های عصبی نوع GMDH برای مقاصد مدل سازی استفاده شده است [۱۰]. در این مقاله که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی شبکه عصبی GMDH و پیدا کردن توابع عضویت شبکه ANFIS و همچنین از روش SVD برای یافتن ضرایب بهینه شبکه GMDH و ضرایب چند جمله‌ایهای شبکه ANFIS استفاده شده است.

در این مقاله ابتدا با استفاده از تحلیل المان محدود، سه فرکانس طبیعی اول یک تیر یکسر درگیر با یک ترک سطحی باز برای ده عمق ترک مختلف در سی مکان مختلف محاسبه می‌گردد. سید داده ورودی - خروجی بدست آمده از تحلیل المان محدود به عنوان داده‌های ورودی شبکه عصبی نوع GMDH و شبکه ANFIS به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی مکان ترک، سه فرکانس طبیعی اول سازه به عنوان ورودی شبکه عصبی نوع GMDH و شبکه ANFIS^۳ در نظر گرفته می‌شوند و نیز برای مدل‌سازی عمق ترک علاوه بر سه فرکانس اول، مکان ترک نیز به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- تحلیل دینامیکی تیر دارای ترک عرضی در سطح، تحت بار مرکب

جسم دارای ترک ممکن است در محل ترک، در سه مود تحت تنش قرار گیرد. دور شدن دو سطح ترک نسبت به هم تحت تنش‌های قائم که عمود بر صفحه ترک وارد می‌شود، به عنوان مود اول شناخته می‌شود و در بررسی مکانیک جسم از اهمیت بیشتری برخوردار است. مودهای دیگر مربوط به تنشهای برشی است که تغییر مکان دو سطح ترک در این حالت‌ها به شکل‌های لغزش و پارگی نمود

1- Group Method of Data Hnondling

2- Singular Value Decomposition

3- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

که در آن b ضخامت تیر است. نرخ انرژی کرنشی با فرض کرنش صفحه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J = \frac{(1-\nu^2)(K_{Ix} + K_{Iy})^2}{E} \quad (۶)$$

K_{Ix} و K_{Iy} ضرایب شدت تنش برای مورد اول شکست هستند و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$K_{Ix} = \sigma_x \sqrt{\pi a} F_{Ix} \left(\frac{a}{h} \right) \quad (۷)$$

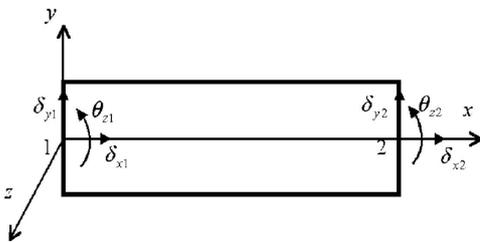
$$K_{Iy} = \sigma_y \sqrt{\pi a} F_{Iy} \left(\frac{a}{h} \right) \quad (۸)$$

$$(۹)$$

$$F_{Ix} \left(\frac{a}{h} \right) = \sqrt{\frac{\tan \lambda}{\lambda} \left(\frac{0.752 + 2.02 \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) + 0.37(1 - \sin \lambda)^2}{\cos \lambda} \right)}$$

$$F_{Iy} \left(\frac{a}{h} \right) = \sqrt{\frac{\tan \lambda}{\lambda} \left(\frac{0.923 + 0.199(1 - \sin \lambda)^4}{\cos \lambda} \right)} \quad (۱۰)$$

λ از رابطه $\lambda = \frac{\pi a}{2h}$ بدست می‌آید؛ a عمق ترک، h پهنای تیر، σ_x تنش قائم ناشی از کشش و σ_y تنش قائم ناشی از خمش است.

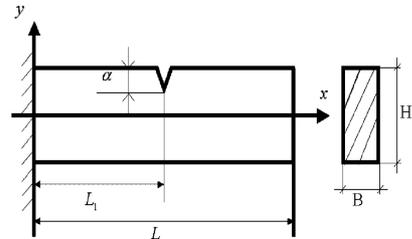


شکل (۲) المان تیر با سه درجه آزادی در هر گره

۳- مدل المان محدود بولد

در مدل المان محدود تیر دارای ترک، تغییرات رفتار سازه در اثر ترک را می‌توان با وارد کردن ماتریس انتقال ترک تحلیل کرد و با استفاده از آن ماتریس سختی المان ترک را به دست آورد. برای مدل اجزا محدود تیر شکل (۱) از المانهای تیر یک بعدی که در هر گره سه درجه آزادی دارد، نشان داده شده در شکل (۲)، استفاده شده است.

می‌یابد. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی تیر دارای ترک نشان داده شده در شکل (۱)، به روش رهایی انرژی کرنشی با در نظر داشتن حالت یک شکست ترک، انجام پذیرفته است. شکل (۱) نشان می‌دهد که ترک در اثر نیروهای محوری وارد بر تیر گسترش می‌یابد.



شکل (۱) تیر یک سر گیردار دارای ترک عرضی در سطح

وجود یک ترک عرضی به عمق a در سطح تیر باعث ایجاد نرمی محلی در تیر می‌شود. تیر نشان داده شده در شکل (۱) تحت بار کششی P_1 ، بار برشی P_2 و لنگر خمشی P_3 قرار گرفته است.

تغییر مکان اضافی ناشی از ترک u_i در راستای بار P_i از رابطه کاستیگلیانو چنین به دست می‌آید:

$$u_i = \frac{\partial U}{\partial P_i} \quad (۱)$$

انرژی کرنشی اضافی (U) را می‌توان با استفاده از نرخ رهایی انرژی کرنشی برای ترک محاسبه نمود:

$$J(\alpha) = \frac{\partial U}{\partial \alpha} \quad (۲)$$

$$U = \int_0^a J(\alpha) d\alpha \quad (۳)$$

که در این روابط J نرخ رهایی انرژی و α عمق ترک است. بدین ترتیب تغییر مکان اضافی از رابطه پاریس بدست می‌آید [۵]:

$$u_i = \frac{\partial}{\partial P_i} \int_0^a J(\alpha) d\alpha \quad (۴)$$

با استفاده از رابطه پاریس نرمی محلی برای تیر با سه درجه آزادی مطابق شکل (۲) چنین بدست می‌آید [۵]:

$$c_{ij} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \int_{-b}^b \int_0^a J(\alpha) d\alpha dz \quad (۵)$$

و از آنجا ماتریس سختی المان ترک شکل (۳) به دست می آید.

$$[K_e^C] = \begin{bmatrix} -[A_r]^{-1}[A_s] & [A_r]^{-1} \\ [A_r] - [A_s][A_r]^{-1}[A_s] & [A_s][A_r]^{-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

معادله حرکت در فرم ماتریسی بصورت زیر است:

$$(-\omega^2[M] + [K])\{x\} = \{o\} \quad (15)$$

که در آن ω فرکانس ویژه و x بردار تغییر مکان هستند. مقادیر ω را می توان با محاسبه مقادیر ویژه ماتریس $M^{-1}K$ به دست آورد.

۴- مدل کردن با استفاده از شبکه های عصبی نوع GMDH

شبکه GMDH با ترکیب چند جمله ایهای حاصل از تمامی نرونها، تابع تقریبی \hat{f} را با خروجی \hat{y} ، برای یک مجموعه از ورودیها $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ با کمترین خطا در مقایسه با خروجی واقعی y ، توصیف می کند. شبکه عصبی نوع GMDH مورد نظر ما باید بتواند مربع خطای بین مقادیر حقیقی و مقادیر پیش بینی شده را کمینه کند، یعنی عبارت زیر حداقل شود:

$$\sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (16)$$

شکل عمومی اتصال بین متغیرهای ورودی و خروجی را می توان با استفاده از تابع چند جمله ای پیچیده به شکل زیر بیان کرد.

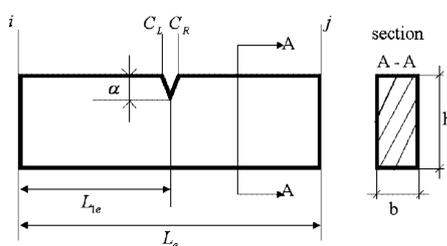
$$y = a + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (17)$$

که چند جمله ای ایواخنکو^۱ نامیده می شود [۱۳]. در بسیاری از موارد کاربردی از شکل درجه دوم و دو متغیره این چند جمله ای به شکل زیر استفاده می شود:

از تئوری اولر-برنولی، ماتریس انتقال متغیرهای حالت (تغییر مکان و بار)، برای المان شکل (۲) به صورت زیر به دست آمده است:

$$[T_e] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{L}{AE} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & L & 0 & \frac{L^3}{6EI} & -\frac{L^3}{6EI} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{L^2}{2EI} & \frac{L}{EI} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

برای محاسبه ماتریس انتقال المان ترک، المانی شامل ترک، نشان داده شده در شکل (۳)، در نظر گرفته شده است.



شکل (۳) المان تیر دارای ترک

ماتریس $[T_C]$ ماتریس انتقال ترک است که به صورت زیر به دست آمده است:

$$[T_C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_{31} & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

درایه های ماتریس $[T_C]$ از رابطه (۵) (رابطه نرمی) به دست می آیند. مقادیر c_{31} و c_{13} ناشی از اثر کوپله شدن کشش و خمش در حالت یک شکست ترک هستند و در اینجا از آنها صرف نظر شده است.

با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) ماتریس انتقال المان ترک چنین به دست می آید:

$$[T_e^C] = [T_r][T_C][T_l] = \begin{bmatrix} A_1 & A_r \\ A_s & A_f \end{bmatrix} \quad (13)$$

از مقادیر بردارهای ورودی و شکل تابع به راحتی قابل مشاهده است که:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 & x_{1p}x_{1q} \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 & x_{2p}x_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 & x_{Mp}x_{Mq} \end{bmatrix} \quad (24)$$

روش کمترین مربعات از آنالیز^۱، حل معادلات را به شکل زیر به دست می دهد.

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (25)$$

این معادله ضرایب معادله (۱۸) را برای تمام M مجموعه سه تایی می دهد. در این روش (حل مستقیم SNE) احتمال بروز خطای ناشی از گرد کردن خطاها و مهمتر اینکه احتمال تکینگی در معادلات وجود دارد.

۵- کاربرد تجزیه مقادیر منفرد در طراحی شبکه های

نوع GMDH

تجزیه مقادیر منفرد روشی برای حل مسایل کمترین مربعاتی است، که در آنها احتمال بروز تکینگی وجود دارد. SVD یک ماتریس مانند $A \in R^{M \times 6}$ ، شامل ضرب سه ماتریس است؛ ماتریس متعامد ستونی $U \in R^{M \times 6}$ ، ماتریس قطری $W \in R^{6 \times 6}$ با عضوهای غیر منفی (مقادیر منفرد)، و ماتریس متعامد $V \in R^{6 \times 6}$ ، که آنها را به شکل زیر می توان نوشت.

$$A = U W V^T \quad (26)$$

روشهای حل مسایل کمترین مربعات با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد توسط گلوب و راینیش بررسی شده است [۱۲]. برای به دست آوردن ضرایب بهینه برای معادله (۱۹)، ابتدا ماتریس معکوس اصلاح شده، ماتریس قطری W را محاسبه می کنیم، در محاسبه معکوس اصلاح شده مقادیر صفر یا نزدیک صفر را برابر صفر قرار می دهیم.

$$a = V[diag(1/w_j)]U^T Y \quad (27)$$

$$\hat{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j \quad (18)$$

ضرایب مجهول a_i در معادله (۱۸) با تکنیک های برازش چنان به دست می آیند که اختلاف بین خروجی واقعی، y ، و مقادیر محاسبه شده، \hat{y} ، برای هر جفت متغیر ورودی x_i و x_j ، کمینه شود. مجموعه ای از چند جمله ای ها با استفاده از معادله (۱۸) ساخته می شوند که ضرایب مجهول کلیه آنها، با استفاده از روش مربعات کمینه به دست می آیند. برای هر تابع G_i (هر نرون ساخته شده)، ضرایب برای کمینه کردن خطای کل نرون به منظور انطباق بهینه ورودیها بر تمام جفت مجموعه های ورودی - خروجی، به دست می آیند.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i(x_i))^2}{M} \rightarrow \min \quad (19)$$

در روشهای پایه ای الگوریتم GMDH، تمامی ترکیبات دوتایی (نرونها) از n متغیر ورودی ساخته می شوند و ضرایب مجهول کلیه نرونها با استفاده از روش مربعات کمینه به دست می آیند. بنابراین $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ نرون در لایه دوم ساخته می شوند که آن را می توان به شکل مجموعه زیر نمایش داد:

$$\{(y_i, x_{ip}, x_{iq}) \mid (i = 1, 2, \dots, M) \\ p, q \in (1, 2, \dots, M)\} \quad (20)$$

از شکل درجه دوم تابع بیان شده در معادله (۱۸) برای هر M ردیف سه تایی استفاده می کنیم، این معادلات را می توان به شکل ماتریسی زیر بیان کرد:

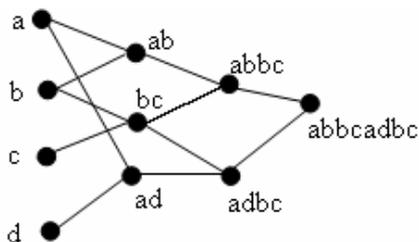
$$Aa = Y \quad (21)$$

که در آن A بردار ضرایب مجهول معادله درجه دو نشان داده شده در معادله (۱۸) است یعنی؛

$$a = \{a_0, a_1, \dots, a_5\} \quad (22)$$

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_M\}^T \quad (23)$$

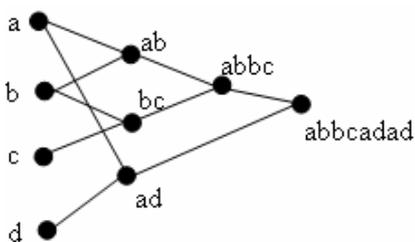
فردی است که دارای چهار ورودی است. به طور کلی طول نرون طبق رابطه 2^{HL+1} محاسبه می شود که HL نشان دهنده تعداد لایه های مخفی است.



شکل (۴) ساختمان کروموزوم شبکه نوع CS

برای شبکه فوق کلیه نرونها با طول دو (2^1) متعلق به لایه اول ($ab | bc | ad | bc$)، و کلیه نرونها با طول چهار (2^2)، متعلق به لایه دو ($abbc | acbc$) و ... از این خاصیت استفاده می کنیم تا ژنومی را برای شبکه عصبی نوع GS تشکیل دهیم. نرون با طول کوچکتر باید از چند لایه مخفی جهش کند و با نرون با طول بزرگتر ترکیب شود (شکل (۵) نرون ad) برای حل این مشکل نام نرونهایی را که از لایه ها جهش می کنند، تکرار می کنیم. در شکل (۵) مشاهده می شود که نرون ad در لایه مخفی اول با جهش از لایه مخفی دوم با نرون $abbc$ (با طول بزرگتر) ترکیب شده و نرون $abbcadad$ را تشکیل داده است، در حقیقت نرون مجازی با نام $adad$ در لایه مشابه نرون $abbc$ ساخته شده و با آن ترکیب می گردد.

تعداد تکرار نرون با طول کوچکتر برابر 2^n است، که در آن n نشان دهنده تعداد لایه هایی است که نرون از آنها جهش کرده است (ورودی d شکل (۶)). به راحتی می توان کروموزومهایی نظیر $acacadad$ را به صورت $acad$ نمایش داد. بنابراین شبکه CS زیر مجموعه ای از شبکه GS است.



از این روش برای محاسبه بهینه بردار ضرایب چند جمله ای درجه دوم، A ، استفاده می شود.

۶- کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی ساختار شبکه های عصبی نوع GMDH

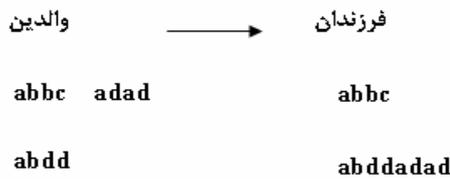
روشهای تکاملی^۱ مانند الگوریتم ژنتیک به خاطر قابلیت های منحصر به فرد خود در پیدا کردن مقادیر بهینه و امکان جستجو در فضاهای غیر قابل پیش بینی، کاربرد وسیعی در مراحل مختلف طراحی شبکه های عصبی دارند [۱۳]. در تحقیق حاضر، برای طراحی شکل شبکه عصبی و تعیین ضرایب آن، به ترتیب از الگوریتم ژنتیک و SVD استفاده می شود. استفاده از SVD در تعیین ضرایب مجهول، فضای جستجو را به شدت کاهش می دهد زیرا برای هر نرون باید شش ضریب محاسبه گردد. در شبکه های عصبی نوع GMDH رایج نرونها در هر لایه فقط امکان اتصال به نرونهای لایه قبل را دارند [۱۱]. برای این نوع شبکه، یک روش ساده برای کد گذاری جمعیت ها در فضای جستجو توسط مولفین در مرجع [۶] پیشنهاد شده است. ما آن را شبکه عصبی^۲ می نامیم.

برای عمومیت بخشیدن به شبکه های عصبی GMDH برای ساخت لایه جدید می توان از تمام لایه های قبلی (لایه ورودی را شامل می شود) استفاده کرد. ما این شبکه را شبکه^۳ می نامیم.

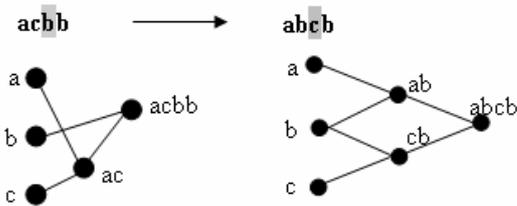
۷- نمایش ژنوم شبکه های عصبی نوع GS-GMDH

برای یک شبکه با N ورودی $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ، یک کروموزوم به صورت یک رشته و ترکیبی از $\alpha_i \in \{a, b, c, d, \dots\}$ به شکل $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_i \dots$ شکل می گیرد، که در آن a, b, c, \dots به ترتیب جایگزین ورودیهای x_1, x_2, x_3, \dots می شوند. یک کروموزوم مثل $abbcadbc$ نشان دهنده مطابق شکل (۴) ساختار شبکه عصبی منحصر به

- 1- Evolutionary
- 2- Conventional structure CS
- 3- General Structure GS



شکل (۷) نحوه اعمال عملگر crossover بر روی یک شبکه از نوع GS (تبدیل ژنوم abbcadad از نوع GS، به ژنوم abbc از نوع CS)



شکل (۸) عملگر mutation و نحوه تبدیل دو نوع شبکه GS و CS به همدیگر

۹- مدل سازی با استفاده از ANFIS

از یک ساختار ANFIS که در واقع مجموعه ای از قواعد IF-THEN فازی نوع TSK است، می توان برای مدل سازی و نگاشت داده های ورودی-خروجی استفاده کرد.

در این روش یک مجموعه قواعد IF-THEN فازی از نوع TSK جهت تقریب تابع f با \hat{f} با استفاده از m بردار شامل n ورودی و تک خروجی $(i = 1, 2, \dots, m)$ ، (x_i, y_i) طراحی می شود. قواعد فازی تشکیل شده در مدل های ANFIS را می توان به صورت زیر بیان نمود:

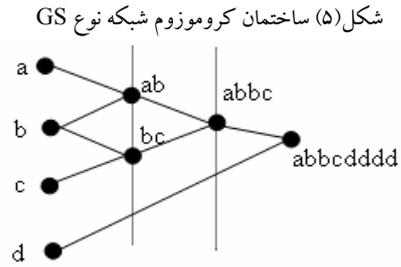
(۲۹)

$$Rule_l : IF \quad x_1 \text{ is } A_1^{(j_1)} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2^{(j_2)} \text{ AND}, \dots, x_n \text{ is } A_n^{(j_n)} \text{ THEN } y = \sum_{i=1}^n w_i^l x_i + w_o^l$$

که در آن $W^l = \{w_1^l, w_2^l, \dots, w_n^l, w_o^l\}$ و $j_i \in \{1, 2, \dots, r\}$

مجموعه پارامترهای بخش تالی هر قاعده می باشد. تمامی مجموعه های فازی در فضای x_i به صورت زیر است:

$$A^{(i)} = \{A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(r)}\} \quad (30)$$



شکل (۶) نحوه اتصال و جهش نرونها از لایه های مخفی در شبکه نوع GS (ورودی d از دو لایه مخفی جهش کرده است)

۸- عملگرهای GA برای تولید مثل شبکه های GS-GMDH

نحوه عمل عملگرهای الگوریتم ژنتیک بر روی شبکه عصبی در [۶] بررسی شده است. عملگر^۱، ژنوم متعلق به دو والد را از یک نقطه تصادفی برش زده و انتهای دو کروموزوم را با همدیگر تعویض می کند، شکل (۷) را ببینید. از روش انتخابی چرخ رولت^۲ برای انتخاب دو والد استفاده می شود.

از شکل (۷) مشخص است که عملگر crossover می تواند دو نوع شبکه GS و CS را به همدیگر تبدیل کند. عملگر جهش با تغییر یک یا چند بایت اطلاعاتی از یک کروموزوم، کروموزومی با خواص جدید تولید می کند، برای مثال، abbcadad (شبکه نوع GS) را به abbcadad (شبکه نوع CS) تبدیل می کند (شکل ۸). برای طراحی شبکه های عصبی با الگوریتم ژنتیک، ابتدا تمامی شبکه ها به صورت رشته های ساخته شده از حروف الفبا در نظر گرفته می شوند. برازندگی^۳ هر کدام از این رشته ها به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\phi = 1/E \quad (28)$$

که در آن E میانگین مربعات خطاست که با استفاده از معادله (۱۹) محاسبه می شود، در فرایند بهینه سازی با ماکزیمم شدن ϕ ، خطا مینیمم می گردد. سپس با به کارگیری عملگرهای شبکه عصبی و معیار انتخابی چرخ رولت، تمام جمعیت های رشته ای اولیه به تدریج بهینه می شوند.

- 1- Crossover
- 2- Roulette wheel
- 3- Fitness

و همچنین در این روابط $\mu_{A_l^{(j_i)}}(x_i)$ بیانگر مرتبه عضویت از ورودی x_i مربوطه به مقدار زبانی قاعده فازی l ام، $A_l^{(j_i)}$ است. با استفاده از فازی ساز سینگلتون^۲ موتور استنتاج ضرب، اجتماع سهم های مربوطه به هر قاعده، سیستم فازی با مجموعه شامل N قاعده فازی به صورت زیر بیان می شود:

$$f(X) = \frac{\sum_{l=1}^N y_l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_l^{(j_i)}}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_l^{(j_i)}}(x_i) \right)} \quad (34)$$

رابطه (۳۴) را می توان به صورت خطی و به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$f(X) = \sum_{l=1}^N p_l(X) y_l + D \quad (35)$$

به طوری که D تفاوت بین $f(X)$ و خروجی های واقعی مربوطه y ، است. و داریم:

$$p_l(X) = \frac{\left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_l^{(j_i)}}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_l^{(j_i)}}(x_i) \right)} \quad (36)$$

معادله (۳۵) را می توان به صورت ماتریسی برای داده هایی که از M ورودی و خروجی تشکیل شده است (X_i, y_i) ، که $(i = 1, 2, \dots, m)$ ، به صورت زیر بیان کرد:

$$Y = PW + D \quad (37)$$

که در آن:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_S]^T \in \mathfrak{R}^S, S = N(n+1)$$

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_S]^T \in \mathfrak{R}^{m \times S} \quad \text{و}$$

مجموعه های فازی به صورت توابع عضویت گوسی در بازه $[-\alpha_i, +\beta_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) در نظر گرفته می شود. در این حالت دامنه ها طوری تعیین می گردند که به ازای هر $x_i \in [-\alpha_i, +\beta_i]$ در رابطه (۳۰) وجود داشته باشد که درجه تابع عضویت غیر صفر داشته باشد، $\mu_{A_l^{(j)}}(x_i) \neq 0$ هر مجموعه فازی $A^{(j)}$ که در آن $j \in \{1, 2, \dots, r\}$ به صورت توابع عضویت گوسی طبق رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

$$\mu_{A^{(j)}}(x_i) = \text{Gaussian}(x_i, c_j, \sigma_j) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_j}{\sigma_j} \right)^2 \right]$$

که در آن c_j و σ_j بترتیب مراکز و واریانسهای قابل تنظیم می باشند. واضح است که تعداد پارامترهای بخش مقدم مدل ANFIS به صورت nr محاسبه می شود که n اندازه بردار ورودی و r بیانگر تعداد مجموعه های فازی در بخش مقدم می باشد قواعد فازی بیان شده در رابطه (۲۹) یک رابطه فازی در $U \times \mathfrak{R}$ می باشد که $A^{(i)}$ مجموعه های فازی در U_i هستند. بنابراین:

$$U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$$

$$\text{Rule} = A^{(j_1)} \times A^{(j_2)} \times \dots \times A^{(j_n)} \rightarrow y$$

با در نظر گرفتن رابطه استلزام به صورت ضرب جبری ممدانی^۱، مرتبه یک قاعده IF-THEN فازی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\mu_{\text{Rule}_l} = \mu_U(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (32)$$

که در آن $U = A_l^{(j_1)} \times A_l^{(j_2)} \times \dots \times A_l^{(j_n)}$ است و نیز داریم:

$$\mu_U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \mu_{A_l^{(i)}}(x_i) \quad (33)$$

استفاده قرار گرفته است. برای حل معادله (۳۷)، ابتدا معکوس اصلاح شده W محاسبه می شود و سپس مقادیر بهینه W_{Rule} از رابطه زیر به دست می آید:

$$W_{Rule} = V [diag(1/w_j)] U^T Y \quad (40)$$

که در آن U یک ماتریس متعامد ستونی و V^T ترانهاده یک ماتریس متعامد است.

۱۲- تحلیل المان محدود

مسئله‌ی شناسایی ترک، برای تیر یکسرگیردار شکل (۱) مورد بررسی قرار گرفته است. طول تیر m ۳ و مقطع عرضی مربعی به ضخامت و پهنای m ۰/۲ در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی زیر برای تیر فرض شده اند:

$$\begin{aligned} E &= 2/07 \times 10^{11} N.m^{-2} \\ \nu &= 0/3 \\ \rho &= 7700 \text{ kg.m}^{-3} \end{aligned} \quad (41)$$

در تحلیل المان محدود تیر، سی المان به طول m ۰/۱ و سه درجه آزادی در هر گره فرض شده است. تحلیل محل ترک برای سی مکان و برای ده عمق ترک انجام شده است بدین ترتیب سیصد مورد عمق و مکان مورد ارزیابی قرار گرفته است:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0/01, 0/02, 0/03, \dots, 0/1 \text{ m} \\ L &= 0/05, 0/15, 0/25, \dots, 2/95 \text{ m} \end{aligned} \quad (42)$$

مقادیر فرکانسهای طبیعی بدست آمده برای تیر ترک دار با نداشت به بازه‌ی (۰/۱۰/۹) در نمودارهای شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) آمده است. با توجه به این شکلها می توان دریافت که هرچه مکان ترک در فاصله دورتری نسبت به انتهای گیردار تیر قرار داشته باشد، هر سه فرکانس با شدت کمتری نسبت به افزایش عمق ترک، کاهش پیدا می کند. مقادیر فرکانسهای طبیعی اول تا سوم برای تیر بدون ترک به ترتیب برابر 117 (rad/s) ، 733 (rad/s) و 2053 (rad/s) است.

می باشد. لازم به ذکر است که هر بردار w_i مربوط به بخش تالی قانون فازی نوع TSK شامل $(n+1)$ عضو است. بنابراین ماتریس 1 با پیکربندی فضای وردیها توسط مجموعه قوانین فازی تشکیل می شود.

بدین ترتیب معادله حاکم به صورت زیر تبدیل می گردد:

$$W = (P^T P)^{-1} P^T Y \quad (38)$$

۱۰- کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی ANFIS

با توجه به معادله (۳۱)، برای مشخص کردن هر تابع عضویت دو پارامتر σ , c باید مشخص شوند. الگوریتم ژنتیک با تولید $N(n+1)$ مقدار واقعی برای دو پارامتر فوق که به صورت تصادفی تولید می شود شروع به کار می کند. برازندگی هر جمعیت، Φ ، با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\Phi = 1/E \quad (39)$$

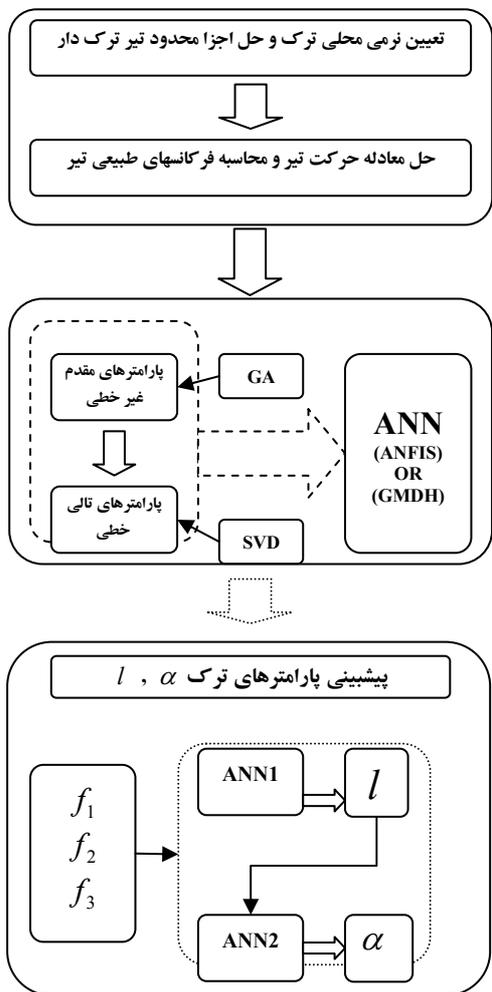
که در آن E خطای ساختار ANFIS در مدلسازی داده ها می باشد و از معادله (۲۸) محاسبه می شود. از معادله (۳۹) مشخص است که با ماکزیم شدن مقدار Φ ، خطای شبکه، E ، مینیمم می شود. به این ترتیب الگوریتم ژنتیک با مینیمم کردن خطای ANFIS نسبت به پارامترهای توابع عضویت، مدل را بهبود می بخشد.

۱۱- کاربرد روش تجزیه مقادیر منفرد در

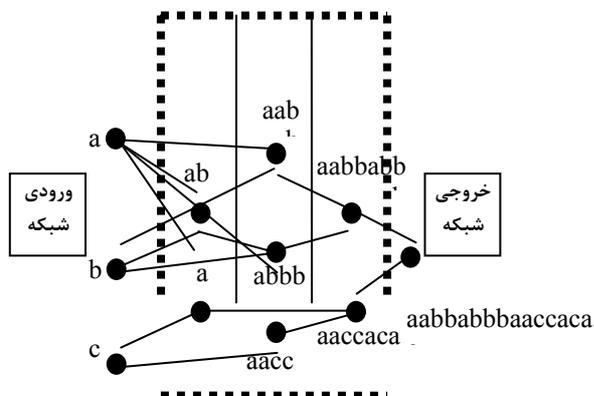
طراحی ANFIS

رایج ترین مشکل در حل دستگاه معادلات منفرد بودن، یا نزدیک به منفرد بودن ماتریس ضرایب و یا برابر نبودن تعداد مجهولات با تعداد معادلات است. در این حالت دترمینان ماتریس ضرایب صفر است. برای حل مشکل تکنیکی احتمالی در حل معادله حاکم (تعیین بهینه ضرایب خطی موجود در بخش تالی قواعد فازی)، روش SVD مورد

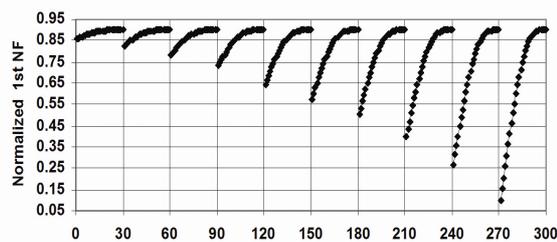
ساختار شبکه عصبی با سه لایه مخفی برای مدل سازی مکان ترک نشان داده شده است.



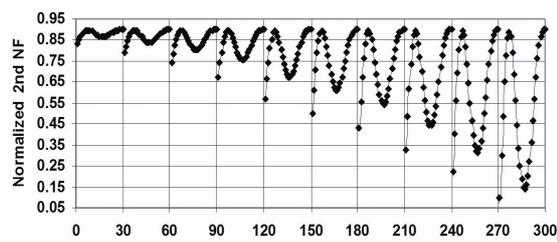
شکل (۱۲) فرایند عملیاتی شناسایی ترک رابطه شبکه عصبی (ANN) و الگوریتم ژنتیک (GA) و روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD)



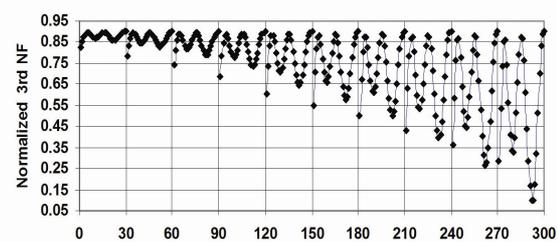
شکل (۱۳) ساختار شبکه عصبی نوع GMDH با سه لایه مخفی برای مدل سازی مکان ترک.



شکل (۹) مقادیر فرکانس طبیعی اول تیر ترک دار در ۳۰ مکان، بازی ۱۰ عمق.



شکل (۱۰) مقادیر فرکانس طبیعی دوم تیر ترک دار در ۳۰ مکان، بازی ۱۰ عمق.



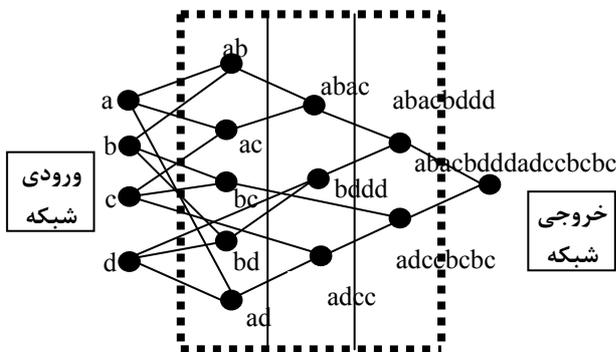
شکل (۱۱) مقادیر فرکانس طبیعی سوم تیر ترک دار در ۳۰ مکان، بازی ۱۰ عمق.

۱۳- مدل سازی عمق و مکان ترک با استفاده از شبکه های عصبی نوع GMDH و ANFIS

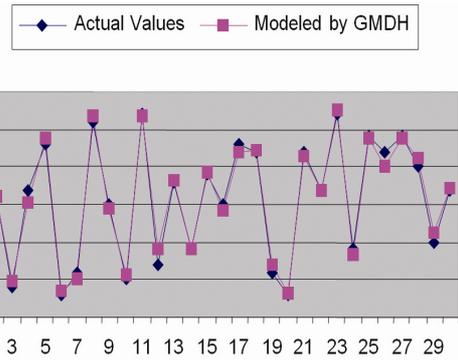
برای مدل سازی مکان و عمق ترک از دسته فرکانسهای به دست آمده از تحلیل المان محدود سازه استفاده شده است. برای مدل سازی مکان ترک، سه فرکانس طبیعی اول به عنوان ورودی شبکه نوع GMDH و نیز برای شبکه ANFIS در نظر گرفته شده اند. فرایند کلی برای پیش بینی مکان و عمق ترک بر پایه فرکانسهای طبیعی در شکل (۱۲) دیده می شود.

در طراحی شبکه های عصبی نوع GMDH جمعیتی از ۱۰۰ فرد و احتمال فرآیندهای پیوند و جهش به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۰۷ برای ۳۵۰ نسل استفاده شده است. در شکل (۱۳)

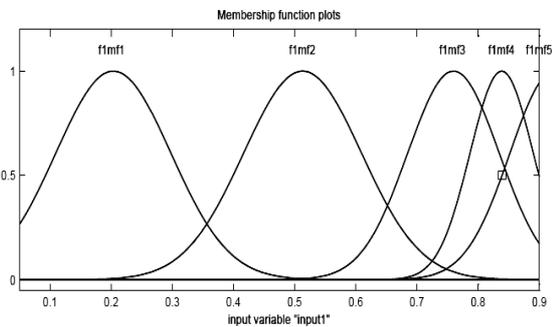
مدل با دقت بسیار زیادی بر مقادیر واقعی منطبق شده اند. خطای میانگین برای این داده‌ها برابر ۴/۵٪ و خطای ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱۸ به دست آمده است. در مدلسازی مکان ترک توسط ANFIS نیز سه فرکانس اول به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته می‌شوند؛ برای هر ورودی پنج تابع عضویت گوسی در نظر گرفته می‌شود. این توابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند. دویست و هفتاد داده ورودی-خروجی برای آموزش شبکه و سی داده تصادفی برای بررسی قدرت پیش بینی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای نمونه در شکل (۱۵) توابع عضویت بهینه برای فرکانس اول نشان داده شده است. شکل (۱۶) مقایسه نتایج واقعی و نتایج حاصل از مدل را برای سی دسته فرکانس که به صورت تصادفی انتخاب شده اند، نشان می‌دهد. خطای میانگین (ME) برای این داده‌ها برابر ۲/۱٪ و خطای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۱۶ به دست آمده است. برای مدلسازی عمق ترک علاوه بر فرکانسهای طبیعی اول از مکان ترک هم به عنوان ورودی شبکه‌های عصبی استفاده شده است. در شکل (۱۷) ساختار شبکه سه لایه برای مدلسازی عمق ترک نشان داده شده است. برای مدلسازی عمق ترک توسط ANFIS برای هر ورودی سه تابع عضویت گوسی در نظر گرفته می‌شود. این توابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند. برای نمونه در شکل (۱۸) توابع عضویت برای ورودی فرکانس سوم نشان داده شده است.



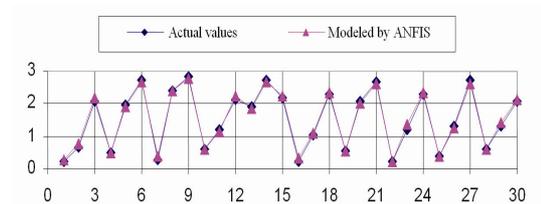
شکل (۱۷) ساختار شبکه عصبی نوع GMDH با سه لایه مخفی برای مدلسازی عمق ترک



شکل (۱۴) مقایسه مقادیر مرجع و مقادیر حاصل از پیش بینی مدل GMDH1 برای مکان ترک.



شکل (۱۵) توابع عضویت بهینه، در مدل مکان



محور افقی: شماره نمونه های آزمایش / محور عمودی: مکان ترک (mm)

شکل (۱۶) مقایسه مقادیر مرجع و مقادیر حاصل از مدل ANFIS1 برای مکان ترک

به منظور بررسی توانایی پیش بینی شبکه عصبی، تعداد ۲۷۰ دسته داده ورودی-خروجی جهت آموزش شبکه عصبی نوع GMDH و تعداد ۳۰ دسته داده که به صورت تصادفی انتخاب شده اند برای پیش بینی شبکه مورد استفاده قرار گرفته و در شکل (۱۴) نتایج مطلوب با مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر بدست آمده از مدل شبکه عصبی نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که مقادیر حاصل از پیش‌بینی

شبکه ANFIS خطای میانگین (ME) برابر ۷/۳٪ و خطای ریشه میانگین مجذور خطاها (RMSE) برابر ۰/۲۲ بدست آمده است.

با توجه به یک به یک بودن توابع مکان و عمق نسبت به دسته متغیرهای ورودی (f_1, f_2, f_3)، با دانستن مقادیر سه فرکانس اولیه تیر ترک دار، می توان مکان و عمق ترک را پیش بینی کرد. در جداول (۱) و (۲) برای دو مورد a و b پیش بینی مکان و عمق ترک آمده و نتایج به دست آمده از مدل های GMDH و ANFIS نشان داده شده اند.

جدول (۱) مقایسه خطای پیش بینی مدل مکان ترک برای شبکه عصبی نوع GMDH و سیستم ANFIS.

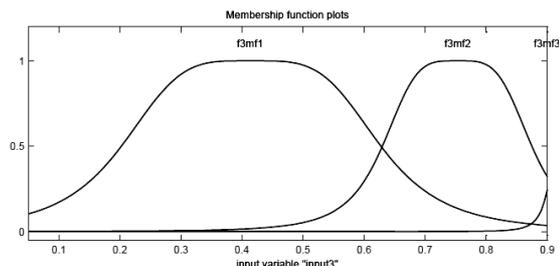
	Case (a)	Case (b)			
		Result val. (m)	Real val. (m)	Err (m)	%RE (%)
	$f_1=113/1$ $f_2=713/7$ $f_3=1966/9$				
(a)	GMDH	۰/۳۱۴	۰/۳	۰/۰۱۴	۴/۷
	ANFIS	۰/۳۰۹	۰/۳	۰/۰۹	۳/۰
(b)	GMDH	۰/۷۵۱	۰/۷۲۵	۰/۰۲۶	۳/۶
	ANFIS	۰/۷۳۷	۰/۷۲۵	۰/۰۱۲	۱/۶

جدول (۲) مقایسه خطای پیش بینی مدل عمق ترک برای شبکه عصبی نوع GMDH و سیستم ANFIS.

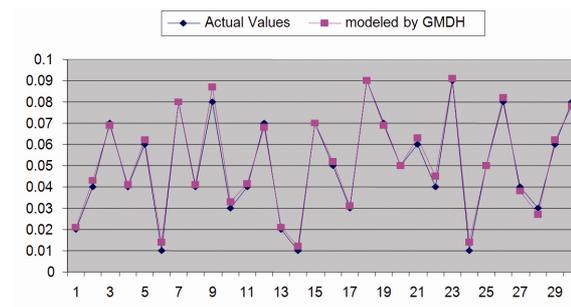
	Case (a)	Case (b)			
		Result val. (m)	Real val. (m)	Err (m)	%RE (%)
	$f_1=110/8$ $f_2=732/2$ $f_3=2011/7$				
(a)	GMDH	۰/۰۳۳	۰/۰۳۵	-	۵/۷
	ANFIS	۰/۰۳۷	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۴/۴
(b)	GMDH	۰/۰۷۹	۰/۰۷۵	۰/۰۰۴	۵/۳
	ANFIS	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۰۲	۳/۱

۱۳- بحث و نتیجه گیری

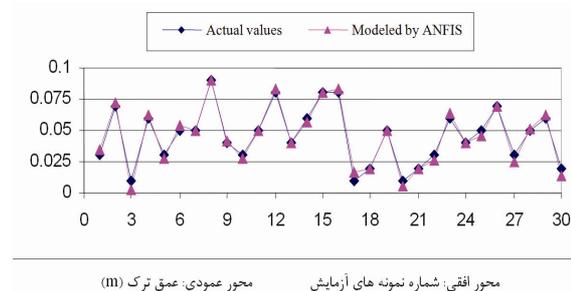
در این مقاله مدلی بر پایه شبکه های عصبی نوع GMDH و شبکه های ANFIS برای شناسایی عمق و مکان ترک در یک تیر یکسردرگیر با استفاده از فرکانسهای طبیعی آن، ارائه شد. فرکانسهای طبیعی تیر ترک دار به روش اجزا محدود بر پایه تحلیل نرمی محلی و استفاده از روش نرخ رهایی انرژی



شکل (۱۸) توابع عضویت بهینه، در مدل عمق ترک



شکل (۱۹) مقایسه مقادیر مرجع و مقادیر حاصل از پیش بینی مدل GMDH2 برای عمق ترک



شکل (۲۰) مقایسه مقادیر مرجع و مقادیر حاصل از مدل ANFIS2 برای عمق ترک.

مانند قسمت قبل سی داده تصادفی به منظور بررسی قدرت پیش بینی مدل برای هر دو شبکه جدا می شوند. شکل های (۱۹) و (۲۰) مقایسه نتایج واقعی و نتایج حاصل از مدل را برای این داده ها را به ترتیب برای شبکه های GMDH و ANFIS نشان می دهند. شکلها نشان می دهند که مقادیر حاصل از پیش بینی مدل با دقت بسیار زیادی بر مقادیر واقعی منطبق شده اند. خطای میانگین (ME) برای این داده ها برای شبکه های عصبی نوع GMDH برابر ۳/۶٪ و خطای ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱۹ به دست آمده است. و برای

- [3] Inagaki V., Kanki T., Transverse vibrations of a general cracked rotor bearing system, *Mechanical Design (ASME)*, 1981, Vol. 104, pp. 1-11.
- [4] Leung P., *The effects of a transverse Crack on the dynamics of a circular shaft*, *Rotordynamics'92 International Conference on Rotating Machine Dynamics*, 1992.
- [5] Shim M. B., Suh M. W., Crack identification of a planar frame structure based on a synthetic artificial intelligence technique, *Int. J. for numerical methods in engineering*, Vol.57, 2003, pp. 57-82,
- [6] Ariman-Zadeh A., Darvizeh A., Ahmad-Zadeh V., Hybrid genetic design of GMDH-type neural networks using singular value decomposition for modeling and prediction of the explosive cutting process, *J. of Engineering manufacture Proceedings of the I MECH E Part B*, Vol. 217, 2003, pp. 779 -790.
- [7] Lee C., Fuzzy Logic in Control Systems. Fuzzy Logic Controller, *IEEE Transacation on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.22(5), pp. 1033-1046, 1990.
- [8] Kosko B., Fuzzy Systems as universal approximator, *IEEE Transaction on Computer*, Vol43(11), 1994, pp.1327-1333.
- [9] Porter B., Nariman-Zadeh N., *Genetic Design of Computed Torque Controllers for Robotic Manipulators*, Proc. IEEE.Int. Symp. Intelligent Control, 1995.
- [۱۰] براتی م.، طراحی سیستمهای فازی جهت مدلسازی رفتار ارتعاشی پوسته های چند لایه مرکب با استفاده از ترکیبی از روش تجزیه مقادیر منفرد و تندترین شیب، دانشگاه گیلان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۱.
- [11] Golub G.H., Reinesh C., Singular value decomposition and least squares solutions, *Numer. Math.*, Vol. 14(5), 1970, pp. 403-420.
- [12] Nariman-zadeh N., Darvizeh, A., Darvizeh M., Gharababaei H., Modelling of explosive cutting process of plates using GMDH-type neural network and singular value decomposition. *J. Materials Processing Technology*, Vol. 128, No. 1-3, 2002, pp. 80-87.
- [13] Ivakhnenko A.G., Polynomial theory of complex system, *IEEE Trans. Syst. Man & Cybern, SMC-1*, 364-378, 1971.

برای ترک محاسبه شدند. در نهایت برای پیش بینی مکان و عمق ترک از مدلسازی پارامترهای ترک توسط شبکه های عصبی نوع GMDH و سیستم تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) استفاده شد. برای بهینه سازی توابع عضویت و ضرایب چند جمله ای های ساختار شبکه های عصبی نوع GMDH و سیستم ANFIS به ترتیب از الگوریتم ژنتیک و روش تجزیه مقادیر منفرد استفاده شد. مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر خروجی مدل، نشان دهنده خطای قابل قبول مدلها است و قدرت مطلوب مدل های ارائه شده برای پیش بینی عمق و مکان ترک را نشان می دهد. در بحث شناسایی مکان و عمق ترک با توجه به اینکه مدل مکان نتایج قابل قبول از خود نشان داد می توان بطور منطقی راه حل دیگری برای پیش بینی عمق ترک برگزید و آن وارد ساختن ورودی چهارم یعنی مکان ترک است. به این ترتیب الگوریتم شناسایی ترک به این شکل کامل می شود که ابتدا با داشتن فرکانس طبیعی، مکان ترک پیش بینی می شود و سپس با اضافه کردن مکان محاسبه شده به معلومات مساله با مدلسازی عمق وسیله چهار پارامتر فرکانسها و مکان، پیش بینی عمق انجام شود. در این حالت نتایج فوق العاده مطلوبی به دست آمد. به این ترتیب که با ساختار ساده تر از مدل مکان ما به خطای کمتر از ۱۰٪ رسیدیم. البته پیش بینی عمق با استفاده از سه فرکانس طبیعی بطور موضعی در نقاطی از سازه که بسیار نزدیک به سر آزاد آن بود، خطای غیر قابل قبولی به وجود می آورد. همچنین در مقایسه با روش آنالیز معکوس فرکانسها با استفاده از شبکه عصبی ارائه شده توسط شیم و سو [۵] می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از روش معکوس نسبت به روش مستقیم از برتری اندکی برخوردار است.

مراجع

- [1] Vandiver J., *Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response*, Proc. of the 7th Annual Offshore Tech. Conf, 1975, pp. 243-252.
- [2] Gounaris G., Dimarogonas A., A Finite element of a cracked prismatic beam in structural analysis *Computers and Structures*, 1988, Vol.28, pp. 309-313.