



شناسایی ترک خستگی در سازه‌های تیری شکل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع گربه

رضا حسن‌نژاد قدیم^{1*}، شاهین تسوجیان²، محمدرضا علی‌پور²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166614766، hassannejad@tabrizu.ac.ir

چکیده

تشخیص به موقع وجود ترک در سازه‌ها، از رخ دادن خسارت جلوگیری می‌کند، لذا امروزه چالشی در ارائه روش‌های کارآمد در زمینه پایش سلامتی سازه‌ها وجود دارد. در مدل‌های مورد استفاده در ادبیات فن که بر پایه الگوریتم‌های هوشمند، به شناسایی ترک در سازه‌ها می‌پردازد، از اثر بسته شدن ترک حین ارتعاش عرضی سازه صرف‌نظر شده است که این امر سبب به‌وجود آمدن خطای قابل توجهی در شناسایی ترک می‌گردد. بنابراین این تحقیق به عنوان یک مزیت، از مدلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی استفاده می‌کند که در قالب یک الگوریتم فرا اکتشافی کاراً بتواند رفتار باز و بسته شدن ترک خستگی در سازه‌های تیری شکل را مدل کند و آن را به‌طور صحیح تشخیص دهد. لذا در این تحقیق مسأله شناسایی پارامترهای ترک (مکان و عمق ترک) به صورت یک مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که در آن هدف کمینه کردن اختلاف فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط مدل و فرکانس‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد، که این کار با انتخاب یک الگوریتم فرا اکتشافی مناسب بنام الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع گربه صورت می‌گیرد. به نحوی که، ترک خستگی تنها با استفاده از دو فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده سازه شناخته شود که نوآوری دیگر این تحقیق می‌باشد. علاوه بر این به منظور صحت‌گذاری، نتایج بدست آمده به ازای پارامترهای مختلف ترک با نتایج حاصل از تست‌های تجربی انجام شده، مورد مقایسه قرار گرفته است که حاکی از دقت خوب روش پیشنهادی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 تیر 1394
پذیرش: 18 شهریور 1394
ارائه در سایت: 20 آبان 1394

کلید واژگان:

شناسایی ترک

ترک خستگی

الگوریتم اجتماع گربه

Breathing crack identification in beam-type structures using cat swarm optimization algorithm

Reza Hassannejad ghadim*, Shahin Tasoujian, Mohammadreza Alipour

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, hassannejad@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 July 2015
Accepted 09 September 2015
Available Online 11 November 2015

Keywords:

Crack detection
breathing crack
CSO algorithm

ABSTRACT

Early crack detection in structures prevents the occurrence of damage. Therefore, a challenge exists in the literature to provide efficient methods in the field of structural health monitoring. Many of the researches that have been done on the crack identification in structures are based on the models that ignore crack closure effects that make a significant error in the crack identification. Since it is more difficult to identify breathing crack than other damages, the purpose of this research is providing an efficient algorithm to identify breathing crack in beam-type structures which are important elements in various types of structures. Because it's an important and significant issue to present a perfect model that is able to accurately explain behavior of damaged structure, in this paper a cracked beam has been modeled by "breathing crack" model which explains beam responses more accurately than other common models. In order to calculate natural frequencies of the beam accurately, in this research the fatigue crack model is used, which considers crack as breathing one with opening and closing behaviour. Then the problem of identifying crack parameters (location and depth of the crack) is defined as an optimization problem with the aim of minimizing the differences between natural frequencies calculated by the model and measured natural frequencies. In order to choose an appropriate algorithm to identify breathing crack, algorithms among various meta-heuristic algorithms are selected, which are able to identify the crack using only two natural frequencies. This ability is more valuable when it is desired not to damage structure during health monitoring procedure based on using frequency response of structure. Regarding the surveys conducted, the optimization problem is solved using cat swarm optimization (CSO) algorithm. Moreover, for validation the results obtained for different crack parameters have been compared with those of experimental tests. The results indicate that the proposed method has good accuracy.

Please cite this article using:

R. Hassannejad ghadim, Sh. Tasoujian, M. R. Alipour, Breathing crack identification in beam-type structures using cat swarm optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 17-24, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

یکی از مسائل مهم در سازه‌ها، ایجاد ترک و در نتیجه شکست ناگهانی آن‌ها بر اثر بارهای دینامیکی وارده می‌باشد. از این‌رو، مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌های معیوب و ارائه روش‌های کارآمد با هدف شناسایی عیوب آن مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است [1-3]. از آن‌جا که عیوب سازه‌ای، مشخصه‌های ارتعاشی سازه نظیر فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها، میرایی و پاسخ دینامیکی آن را دست‌خوش تغییر می‌کند، لذا محققان از این تغییرات در جهت شناسایی عیوب استفاده می‌کنند. در این میان، شناسایی عیوب براساس تغییر در فرکانس‌های طبیعی آسان‌تر و سریع‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد [4-6].

در ادبیات فن، محققان زیادی برای نشان دادن کاهش سفتی تیرهای معیوب که یکی از المان‌های مهم انواع سازه‌ها می‌باشد، از یک فنر پیچشی بدون جرم در محل عیب استفاده کرده‌اند. این ایده برای اولین بار توسط ایروین به منظور ارتباط بین بار و تمرکز انرژی کرنشی در حوالی نوک ترک در مقیاس میکروسکوپییک ارائه شد [7]. در بسیاری از تحقیقات جهت سادگی کار، عمدتاً از این مدل، برای شناسایی عیوب مختلف نظیر شیار و ترک در تیرهای تحت ارتعاش عرضی استفاده شده است [8]. در صورتی که عیب از نوع شیار باشد، کاهش فرکانسی ایجاد شده توسط شیار در مقایسه با ترک با همان عمق بیشتر است [9]. علاوه بر این اگر عیب ایجاد شده ترک باشد، به علت باز و بسته شدن ترک، سفتی تیر در محل ترک در مدت ارتعاش تیر تغییر می‌کند. بنابراین این باز و بسته شدن ترک سبب تغییر مشخصه‌های ارتعاشی تیر نسبت به حالتی می‌شود که دهانه ترک در مدت ارتعاش تیر همیشه به صورت باز باقی می‌ماند. لذا استفاده از چنین مدلی، بدون در نظر گرفتن اثرات بسته شدن دهانه ترک، فرکانس‌های طبیعی تیر را کمتر از مقدار واقعی خود نشان می‌دهد [10، 11]. در تحقیقی چنگ و همکارانش اثرات بسته شدن ترک بر روی مشخصه‌های ارتعاشی تیر ترک‌دار را بررسی کردند و اظهار داشتند آشکارسازی ترک براساس پاسخ فرکانسی آن با استفاده از مدل‌هایی که دهانه ترک را در مدت ارتعاش تیر باز فرض می‌کند، شدت ترک را کمتر از حد واقعی آن نشان می‌دهد. این امر سبب دست‌کم گرفته شدن شدت ترک می‌شود و موجب تشخیص دیر هنگام آن شده و می‌تواند باعث بروز صدمه گردد [12]. مهرجو و حاجی در تحقیق خود با باز فرض کردن دهانه ترک در مدت ارتعاش عرضی تیر، از تغییرات فرکانس‌های طبیعی و شکل مد برای شناسایی آن استفاده کردند [13]. در تحقیق دیگری کارتیکیان و همکارانش از یک مدل المان محدود با فرض باز بودن دهانه ترک برای شناسایی ترک در ارتعاشات آزاد و اجباری تیرها استفاده کرده‌اند [14]. همچنین با روشی مشابه مازن اغلو و سابونکوف به تشخیص مکان و عمق ترک در تیر دارای دو ترک باز بر مبنای کاهش فرکانس‌های طبیعی پرداختند [15]. در تحقیقی دیگر، لی برای شناسایی ترک‌های باز چندگانه از ترکیب روش المان محدود و روش نیوتن- رابسون استفاده کرده است [16]. علاوه بر این، در تحقیقات دیگری محققان با صرف نظر کردن از اثرات بسته شدن ترک در ارتعاشات عرضی تیرها، الگوریتم‌های فرا اکتشافی را برای شناسایی ترک به کار برده‌اند [17-19]. در سال‌های اخیر با گسترش امکانات کامپیوتری، الگوریتم‌های فرا اکتشافی در پایش سلامتی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا برخی از محققان از الگوریتم ژنتیکی برای شناسایی عیوب سازه‌ای استفاده کردند [20-22]. همچنین وکیل باغمیشه و همکارانش از افت چهار فرکانس طبیعی اول تیر در اثر ترک برای شناسایی

آن استفاده نموده‌اند. [23]. در تحقیق دیگری مرادی و همکارانش از الگوریتم زنبورعسل برای شناسایی ترک در تیر استفاده کردند [24]. الگوریتم مورد نظر جهت شناسایی ترک به سه فرکانس طبیعی اول تیر ترک‌دار نیاز داشت. در تحقیقات [23، 24] برای مدل‌سازی عیب در سازه، مدل ریاضی ترک باز به کار رفته است، در حالی که در تست‌های تجربی از شیار به جای ترک واقعی استفاده شده بود.

هدف از این تحقیق ارائه روشی جدید جهت شناسایی ترک خستگی در تیرها به کمک الگوریتم‌های فرا اکتشافی براساس افت فرکانس‌های طبیعی آن می‌باشد. از آن‌جایی که افت فرکانسی در تیر در اثر وجود ترک خستگی نسبت به سایر عیوب نظیر ترک باز یا شیار کمتر است، لذا شناسایی آن بر مبنای روش‌های موجود در ادبیات فن منجر به نتایج غلط خواهد شد. از این‌رو در این تحقیق از مدلی استفاده می‌شود که در آن ترک به صورت ترک خستگی و با رفتار باز و بسته شونده مدل شده است. همچنین براساس بررسی‌های انجام گرفته، الگوریتم اجتماع گربه که دارای سرعت و دقت بالایی است، برای شناسایی ترک خستگی معرفی می‌شود. مزیت عمده الگوریتم اجتماع گربه این است که، در مینیمم‌های نسبی گیر نمی‌کند و می‌تواند تنها با دو فرکانس طبیعی اول تیر ترک را شناسایی کند. در حالی که الگوریتم‌های معرفی شده در ادبیات فن به تعداد بیشتری از فرکانس‌های طبیعی برای شناسایی ترک نیاز دارند. استفاده از حداقل فرکانس طبیعی جهت شناسایی ترک، در کاربردهای عملی که فرکانس‌های بالای سازه تحریک نمی‌شود، اهمیت بسزائی دارد.

2- مدل ارتعاشی تیر ترک دار با یک ترک خستگی

تیر دارای ترک خستگی نشان داده شده در شکل 1 در نظر گرفته می‌شود، که در آن ترک با یک فنر پیچشی مدل شده است. در ادبیات فن جهت منظور کردن اثرات بسته شدن ترک در فرکانس ارتعاش تیر از فرکانس دو خطی زیر استفاده می‌شود [11، 25].

$$\omega_b = \frac{2\omega_o\omega_c}{\omega_o + \omega_c} \quad (1)$$

که در آن ω_o فرکانس تیر در حالتی است که دهانه ترک در مدت ارتعاش تیر کاملاً باز باقی می‌ماند و ω_c فرکانس طبیعی تیر سالم می‌باشد [10].

برای محاسبه فرکانس طبیعی تیر با ترک خستگی باید ω_o و ω_c محاسبه شود. برای محاسبه ω_o باید معادله فرکانسی تیر ترک دار را به دست آورد. در این حالت معادلات ارتعاشی حاکم بر سیستم به صورت زیر است:

$$EI \frac{\partial^4 u_1(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u_1(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq L_0 \quad (2)$$

$$EI \frac{\partial^4 u_2(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u_2(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad L_0 \leq x \leq L \quad (3)$$

در معادلات (2) و (3)، EI صلبیت خمشی، m جرم واحد طول تیر و $u_1(x, t)$ و $u_2(x, t)$ جابجایی عرضی تیر در طرفین ترک می‌باشند. با حل معادلات (1) و (2) با استفاده از روش جداسازی متغیرها، شکل مود هر بخش از تیر به صورت زیر خواهد بود:

$$u_i(x, t) = Y_i(x)F(t) \quad , \quad i = 1, 2 \quad (4-الف)$$

$$Y_1(x) = A_1 \cosh(\lambda x) + A_2 \sinh(\lambda x) + A_3 \cos(\lambda x) + A_4 \sin(\lambda x) \quad (4-ب)$$

$$Y_2(x) = A_5 \cosh(\lambda x) + A_6 \sinh(\lambda x) + A_7 \cos(\lambda x) + A_8 \sin(\lambda x) \quad (4-پ)$$

در معادلات اخیر $\lambda^4 = \frac{m\omega_o^2}{EI}$ می‌باشد.

$$k_t = \frac{EI}{6(1-\nu^2)h} \times \frac{1}{J} \quad (10)$$

که در آن ν ضریب پواسون و h ارتفاع تیر است و J از رابطه (11) بدست می‌آید [26]:

$$J = 1.8624 \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3.95 \left(\frac{a}{h}\right)^3 + 16.375 \left(\frac{a}{h}\right)^4 - 37.226 \left(\frac{a}{h}\right)^5 + 76.81 \left(\frac{a}{h}\right)^6 - 126.9 \left(\frac{a}{h}\right)^7 + 172 \left(\frac{a}{h}\right)^8 - 143.97 \left(\frac{a}{h}\right)^9 + 66.56 \left(\frac{a}{h}\right)^{10} \quad (11)$$

که در رابطه (11) عمق ترک را نشان می‌دهد. با اعمال شرایط مرزی و بین‌مرزی روابط (10-5) در معادلات (الف-4) و (ب-4) معادله (12) بدست می‌آید.

$$[C]_{8 \times 8} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

که در آن ماتریس مربعی C در زیر (الف-12) نشان داده شده است. برای داشتن جواب غیربدیهی برای ضرایب A_1 تا A_8 باید دترمینان ماتریس مربعی C صفر باشد. با حل معادله مشخصه حاصل از دترمینان فوق، مقدار ویژه λ به ازای شکل مودهای مختلف و در نتیجه فرکانس‌های طبیعی تیر در حالتی که دهانه ترک کاملاً باز است، بدست می‌آید.

$$C = \begin{bmatrix} C(1,1) & C(1,2) \\ C(2,1) & C(2,2) \end{bmatrix} \quad C(1,1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C(2,1) = \begin{bmatrix} \cosh \lambda L_0 & \sinh \lambda L_0 & \cos \lambda L_0 & 0 \\ \cosh \lambda L_0 & \sinh \lambda L_0 & -\cos \lambda L_0 & 0 \\ \sinh \lambda L_0 & \cosh \lambda L_0 & \sin \lambda L_0 & 0 \\ \lambda \cosh \lambda L_0 + \frac{k_t}{EI} \sinh \lambda L_0 & \lambda \sinh \lambda L_0 + \frac{k_t}{EI} \cosh \lambda L_0 & -\lambda \cos \lambda L_0 + \frac{k_t}{EI} \sin \lambda L_0 & -\lambda \sin \lambda L_0 + \frac{k_t}{EI} \cos \lambda L_0 \end{bmatrix}$$

$$C(2,2) = \begin{bmatrix} -\cosh \lambda L_0 & -\sinh \lambda L_0 & -\cos \lambda L_0 & -\sin \lambda L_0 \\ -\cosh \lambda L_0 & -\sinh \lambda L_0 & \cos \lambda L_0 & \sin \lambda L_0 \\ -\sinh \lambda L_0 & -\cosh \lambda L_0 & -\sin \lambda L_0 & \cos \lambda L_0 \\ \frac{k_t}{EI} \sinh \lambda L_0 & \frac{k_t}{EI} \cosh \lambda L_0 & \frac{k_t}{EI} \sin \lambda L_0 & \frac{k_t}{EI} \cos \lambda L_0 \end{bmatrix}$$

(الف-12)

$$L = 200 \text{ mm} , \quad w = 3.9 \text{ mm} , \quad h = 6.4 \text{ mm} , \quad \rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

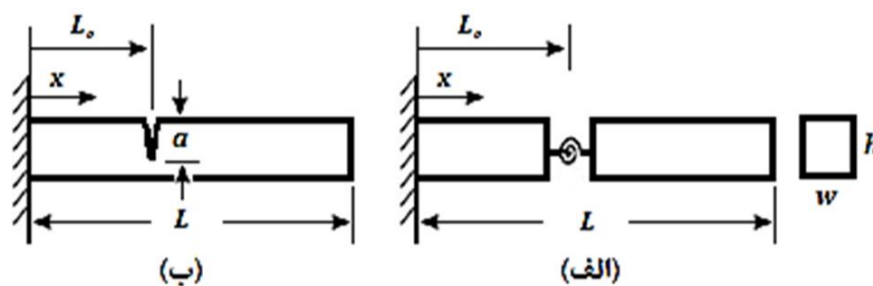
$$E = 198 \text{ GPa} , \quad \nu = 0.3$$

در شکل 2 رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که شناسائی ترک براساس مدل ترک باز، باعث می‌شود شدت ترک بسیار کمتر از آنچه وجود دارد، تخمین زده شود، که این می‌تواند سبب بروز صدماتی گردد.

در جدول 1 مقادیر سه فرکانس طبیعی اول برای تیر یکسر گیردار مورد نظر محاسبه شده است.

3- تعریف مساله شناسائی ترک به صورت یک مساله بهینه‌سازی

برای تعریف مساله شناسائی ترک، به صورت یک مساله بهینه‌سازی، تابع هدفی به صورت اختلاف فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده از طریق مدل ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آزمایش تجربی به صورت رابطه (14) تعریف می‌شود:



شکل 1 الف) مدل ریاضی تیر ترک‌دار (ب) تیر یکسرگیردار ترک‌دار

شرایط مرزی در دو انتهای تیر نیز به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود:

$$u_1(0, t) = \frac{\partial u_1(0, t)}{\partial t} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial^2 u_2(L, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 u_2(L, t)}{\partial t^3} = 0 \quad (5)$$

همچنین مقدار جابجایی، نیرو و گشتاور در دو طرف ترک به دلیل پیوستگی یکسان می‌باشد:

$$u_1(L_0, t) = u_2(L_0, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 u_1(L_0, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u_2(L_0, t)}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^3 u_1(L_0, t)}{\partial t^3} = \frac{\partial^3 u_2(L_0, t)}{\partial t^3} \quad (8)$$

$$EI \frac{\partial^2 u_1(L_0, t)}{\partial t^2} = k_t \left(\frac{\partial u_2(L_0, t)}{\partial t} - \frac{\partial u_1(L_0, t)}{\partial t} \right) \quad (9)$$

که در رابطه (9) متناظر با سفتی موضعی تیر در محل ترک در حالت ترک کاملاً باز است، که مقدار آن براساس تئوری مکانیک شکست از رابطه (10) قابل محاسبه است [26]:

$$C(1,2) = \begin{bmatrix} 00000 & 00000 & 000000 & 000000 \\ 00000 & 00000 & 000000 & 000000 \\ \cosh \lambda L_0 & \sinh \lambda L_0 & -\cos \lambda L_0 & -\sin \lambda L_0 \\ \sinh \lambda L_0 & \cosh \lambda L_0 & \sin \lambda L_0 & -\cos \lambda L_0 \end{bmatrix}$$

مقدار ω_c که فرکانس طبیعی ارتعاش تیر سالم می‌باشد نیز از رابطه (13) قابل محاسبه است [27]:

$$\omega_c = \left(\frac{\gamma_n}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (13)$$

که n نشان دهنده شماره شکل مود ارتعاشی ($n = 1, 2, \dots$) و γ_n عددی ثابت مربوط به فرکانس مود n تیر می‌باشد که مقادیر آن برای سه مود اول به صورت زیر است:

$$\gamma_1 = 1.875 , \quad \gamma_2 = 4.694 , \quad \gamma_3 = 7.855$$

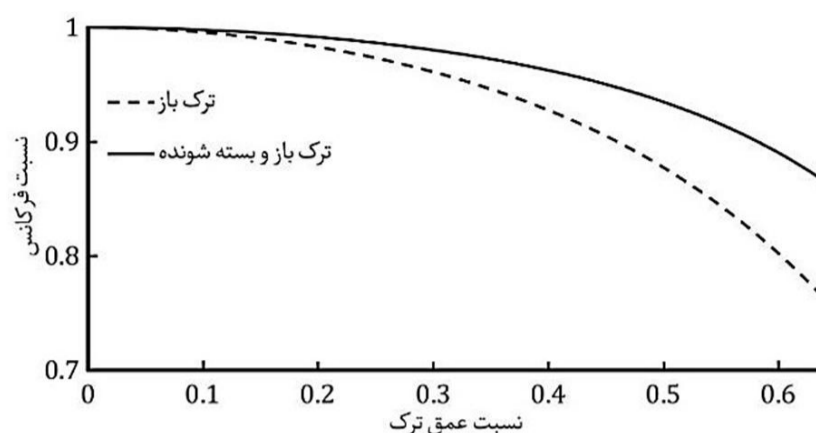
کاهش فرکانس طبیعی در تیر دارای ترک خستگی کمتر از تیر با ترک کاملاً باز می‌باشد. برای نشان دادن این موضوع تغییرات نسبت فرکانسی در برابر شدت ترک به ازاء یک موقعیت نسبی معین در تیر ترک‌دار در حالتی که دهانه ترک در مدت ارتعاش تیر باز و بسته می‌شود و همچنین در حالتی که دهانه ترک کاملاً باز است، برای تیر یکسر گیردار با مشخصات مکانیکی زیر:

در شکل‌های 3 تا 5 مقدار تغییرات تابع هدف در برابر موقعیت نسبی و عمق نسبی ترک رسم شده است. این شکل‌ها تابع هدف برای ترک با موقعیت نسبی $L_0/L = 0/53$ و عمق نسبی $a/h = 0/44$ به ترتیب با استفاده از یک، دو و سه فرکانس رسم شده است. هدف از بهینه‌سازی در این بخش صفر کردن تابع هدف می‌باشد. همان‌طور که از این نمودارها برداشت می‌شود، هرچه تابع هدف با استفاده از فرکانس‌های بیشتری بیان شود مینیمم‌های نسبی آن کمتر می‌شود (نقاط تیره کمتر می‌شود) و در نتیجه امکان گیر کردن الگوریتم در مینیمم‌های نسبی کمتر شده و پیدا کردن موقعیت و عمقی که به ازای آن تابع هزینه صفر شود، آسان تر می‌شود.

از طرفی چون در الگوریتم‌های اکتشافی مانند الگوریتم ژنتیکی روند بهینه‌سازی تنها براساس نقطه هدف صورت می‌گیرد، لذا احتمال گیرافتادن در مینیمم‌های نسبی بسیار بیشتر می‌شود، بنابراین برای بهینه‌سازی و یافتن بهترین موقعیت با استفاده از این الگوریتم‌ها باید از تعداد بیشتری از فرکانس‌های طبیعی استفاده کرد. این در حالیست که در الگوریتم بهینه‌سازی گربه روند بهینه‌سازی به‌نحویست که علاوه بر توجه به گربه هدف (برتر)، مقدار تابع هزینه در اطراف سایر گربه‌ها نیز بررسی می‌شود. از این رو دارای خاصیت جستجوی محلی بالاتری است و این موضوع موجب کارایی بهتر این الگوریتم در بهینه‌سازی با استفاده از تعداد فرکانس‌های کمتر می‌شود.

3-2- کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع گربه در شناسایی ترک

الگوریتم‌های مبتنی بر هوش اجتماعی به دلایلی نظیر دقت و سرعت همگرایی بالا کاربرد گسترده‌ای در حل مسأله‌های بهینه‌سازی دارند. الگوریتم اجتماع گربه یکی از آخرین الگوریتم‌های مبتنی بر هوش اجتماعی می‌باشد. این الگوریتم الهام گرفته شده از رفتار گربه در طبیعت برای یافتن شکار و غذا است. از آنجایی که توانایی گربه برای شکار نسبت به حیوانات وحشی کم است، این موجود جهت بقای نسل باید از حواس بالایی برای یافتن غذا در اطراف خود برخوردار باشد تا کوچکترین شانس‌ها را نیز از دست ندهد. از



شکل 2 تغییرات نسبت فرکانسی در برابر شدت ترک برای تیر یکسرگیردار به ازای موقعیت نسبی $L_0/L = 0/1$ با در نظر گرفتن دو حالت ترک باز و ترک باز و بسته شونده

$$\text{cost}(x_1, x_2) = \sum_{i=0}^3 \text{abs}(\omega_i - \omega_i^*) \quad (14)$$

که در آن ω_i^* فرکانس‌های اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش و ω_i همان فرکانس‌های محاسبه شده از تئوری (رابطه 1) است. از آنجا که فرکانس‌های منحصر به فردی برای هر موقعیت و عمق ترک وجود دارند، لذا با تغییر موقعیت و عمق ترک در تیر، فرکانس‌های طبیعی نیز دستخوش تغییر می‌شوند.

با در نظر گرفتن مکان و عمق ترک به‌عنوان دو متغیر طراحی، الگوریتم مورد استفاده، مکان و عمق ترک را به نحوی محاسبه خواهد کرد که مقدار تابع هدف صفر گردد.

3-1- الگوریتم بهینه‌سازی

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، الگوریتم اجتماع گربه به علت دقت و سرعت بالا در حل مسأله انتخاب شده است. الگوریتم اجتماع گربه در حالت تئوری قادر به شناسائی ترک تنها با دو فرکانس طبیعی است. این الگوریتم دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیکی می‌باشد.

جدول 1 مقادیر تئوری فرکانس‌های طبیعی تیر با ترک خستگی

نقطه آزمایش	محل ترک (mm)	عمق ترک (mm)	فرکانس طبیعی اول (Hz)	فرکانس طبیعی دوم (Hz)	فرکانس طبیعی سوم (Hz)
1	23	0/8	129/38564	812/79738	2277/99039
2	23	1/8	127/65890	809/81856	2277/40879
3	23	2/8	124/02750	804/18251	2276/32329
4	23	3/8	165/53511	794/74746	2274/54803
5	72	0/8	129/65603	812/63265	2274/36461
6	72	1/8	129/00022	808/85623	2259/64127
7	72	2/8	127/54751	800/91201	2230/86018
8	72	3/8	124/21678	784/69294	2180/05698
9	105	0/8	129/75708	811/59519	2277/87744
10	105	1/8	129/51313	803/66790	2276/82884
11	105	2/8	128/96069	786/96870	2274/70648
12	105	3/8	127/62922	752/64172	2270/68929
13	134	0/8	129/79996	812/27005	2272/52994
14	134	1/8	129/73302	806/92759	2250/57038
15	134	2/8	129/58017	795/08865	2207/29161
16	134	3/8	129/20446	768/13366	2130/08997

در این الگوریتم ابتدا تعداد n گربه تولید می‌شود، که در مسئله‌ی شناسایی ترک هر گربه به‌وسیله‌ی دو بعد مکان ترک و عمق ترک شناخته می‌شود. سپس در هر حلقه تکرار، این n گربه با نسبت مشخصی، به دو دسته تقسیم می‌شوند، که یکی از این دو دسته در حالت جستجو و دیگری در حالت حرکت قرار می‌گیرند. به گربه‌هایی که در حالت جستجو قرار دارند اصطلاحاً گربه‌های علامت‌دار گفته می‌شود [28]. در هر کدام از این حالت‌های جستجو و حرکت بصورت زیر عمل می‌شود.

- حالت جستجو

گام اول: ابتدا هر گربه که در این حالت قرار دارد (علامت‌دار است)، تعداد z گربه با فاصله‌ی مشخصی در اطراف خود کپی می‌کند. با توجه به اینکه هر گربه نماینگر موقعیت و عمق مشخصی از ترک می‌باشد، این کار با تغییر مکان و عمق ترک در اطراف گربه‌ی مورد نظر انجام می‌شود.

گام دوم: در این مرحله مقدار تابع هدف برای گربه‌های کپی شده با استفاده از رابطه (14) محاسبه می‌شود.

گام سوم: اگر مقدار تابع هدف برای همه‌ی گربه‌های کپی شده یکسان نباشد، با استفاده از رابطه (15) میزان احتمال آن که گربه به موقعیت i ام (از میان موقعیت‌های z گربه کپی شده) منتقل شود، محاسبه می‌گردد، در غیر این صورت به همه احتمال مساوی اختصاص داده می‌شود.

$$P_i = \frac{|FS_i - FS_b|}{FS_{\max} - FS_{\min}} \quad 0 < i < j \quad (15)$$

در رابطه (15)، FS_i و $FS_b = FS_{\max}$ مقدار تابع هدف برای گربه i ام است. FS_{\max} و FS_{\min} نیز به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه‌ی تابع هدف در بین z گربه‌ی کپی شده می‌باشند.

گام چهارم: انتخاب تصادفی از بین z گربه‌ی کپی شده با در نظر داشتن احتمال هر گربه.

- حالت حرکت

در این حالت هر گربه که در این مود قرار گرفته همانند سایر الگوریتم‌های مبتنی بر هوش اجتماعی مانند PSO¹ عمل می‌کند. به عبارت دیگر به سمت گربه با موقعیت برتر حرکت می‌کند. به این منظور برای گربه‌هایی که در این حالت قرار گرفته‌اند باید گام‌های زیر طی شود:

گام اول: ابتدا بردار سرعت هر گربه را با توجه به موقعیت گربه‌ی برتر و سرعت قبلی همان گربه، براساس رابطه (16) تغییر می‌یابد:

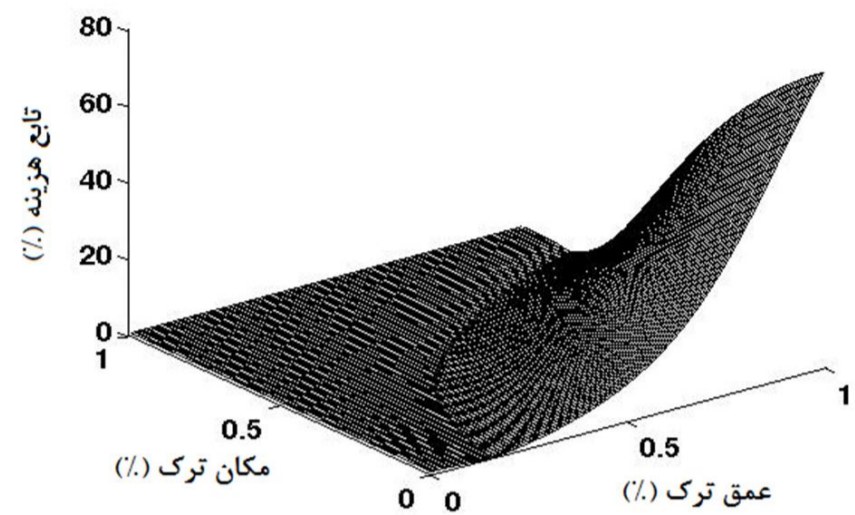
$$v_{k,d} = v_{k,d} + r_1 \times c_1 \times (x_{\text{best},d} - x_1) \quad d = 1,2 \quad (16)$$

که $d = 1$ مکان ترک و $d = 2$ عمق ترک می‌باشند و $x_{\text{best},d}$ موقعیت بهترین گربه می‌باشد و r_1 عددی تصادفی در بازه‌ی $[0,1]$ و c_1 یک عدد ثابت است.

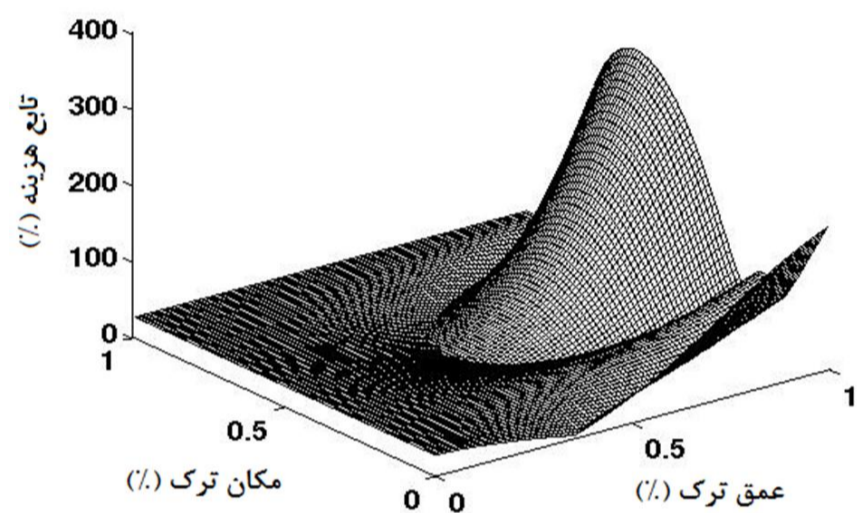
گام دوم: این مرحله موقعیت هر گربه براساس رابطه‌ی (17) تغییر می‌یابد:

$$x_{k,d} = x_{k,d} + v_{k,d} \quad d = 1,2 \quad (17)$$

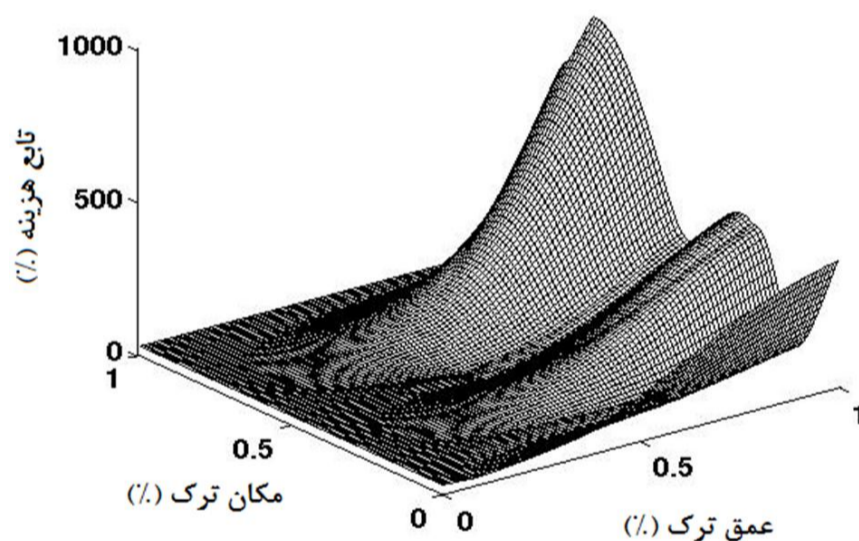
فلوچارت کامل الگوریتم شناسایی ترک با استفاده از الگوریتم اجتماع گربه در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 3 تابع هزینه برای ترک با عمق 44% و مکان 53% با استفاده از یک فرکانس



شکل 4 تابع هزینه برای ترک با عمق 44% و مکان 53% با استفاده از دو فرکانس



شکل 5 تابع هزینه برای ترک با عمق 44% و مکان 53% با استفاده از سه فرکانس

این‌رو گربه برخلاف اکثر موجودات، جهت رسیدن به غذا حتی در حالتی که یک‌جا ثابت ایستاده به اطراف خود توجه زیادی دارد. بنابراین علاوه بر این‌که، مانند بسیاری از جانداران، برای رسیدن به غذا به سمت هدفی حرکت می‌کند، در حالی که ایستاده نیز به دنبال رسیدن به بهترین موقعیت برای غذا است. از این‌رو رفتار گربه را به دو دسته: حالت جستجو و حالت حرکت تقسیم می‌نمایند [28]. بنابراین در الگوریتمی که بر مبنای رفتار گربه است، برخلاف سایر الگوریتم‌های مبتنی بر هوش اجتماعی که در آن‌ها همه‌ی اعضا رفتار یکسان در رسیدن به هدف انجام می‌دهند، در این الگوریتم اعضا در دو حالت قرار می‌گیرند: حالت جستجو و حالت حرکت، که این امر موجب افزایش سرعت همگرایی و کاهش احتمال گیر افتادن در اکسترم‌های نسبی می‌گردد.

1- Particle Swarm Optimization

4- تست تجربی و بررسی نتایج

برخی شبیه‌سازها و آزمایشات تجربی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فرا اکتشافی معرفی شده جهت شناسائی ترک، انجام گرفته است.

4-1- نتایج شبیه‌سازی

جهت نشان دادن قابلیت الگوریتم‌های فرا اکتشافی در شناسائی ترک خستگی، دو فرکانس طبیعی اول محاسبه شده در جدول 1 به الگوریتم‌ها داده می‌شود. نتایج حاصل از خروجی این الگوریتم‌ها جهت تعیین موقعیت و عمق ترک در جدول 2 نشان داده شده است. نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیکی به علت خطای محاسباتی زیاد در جدول 2 آورده نشده است. البته در صورتی که سه فرکانس طبیعی اول محاسبه شده در جدول 1 به الگوریتم ژنتیکی داده شود، این الگوریتم می‌تواند ترک را با خطای قابل قبول ولی بیش تر از دو الگوریتم دیگر شناسائی کند.

جهت توضیح علت این امر در تئوری باید به دو نکته توجه داشت: اولاً تغییرات ناشی از تعداد فرکانس‌های استفاده شده روی تابع هزینه و ثانیاً نحوه عملکرد این دو الگوریتم در فرآیند شناسایی ترک. همان‌طور که در بخش 3-1 توضیح داده شده است، کاهش فرکانس‌های مورد استفاده در تابع هزینه از سه فرکانس به دو فرکانس موجب افزایش قابل توجه مینیمم‌های نسبی می‌شود. بنابراین الگوریتمی در شناسایی با استفاده از تنها دو فرکانس موفق است که در مینیمم‌های نسبی گیر نیفتد و گیر کردن در مینیمم‌های نسبی جزء نقاط ضعف برای الگوریتم ژنتیکی در مسائل با تابع هزینه با مینیمم‌های

جدول 2 مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم با استفاده از فرکانس‌های تئوری

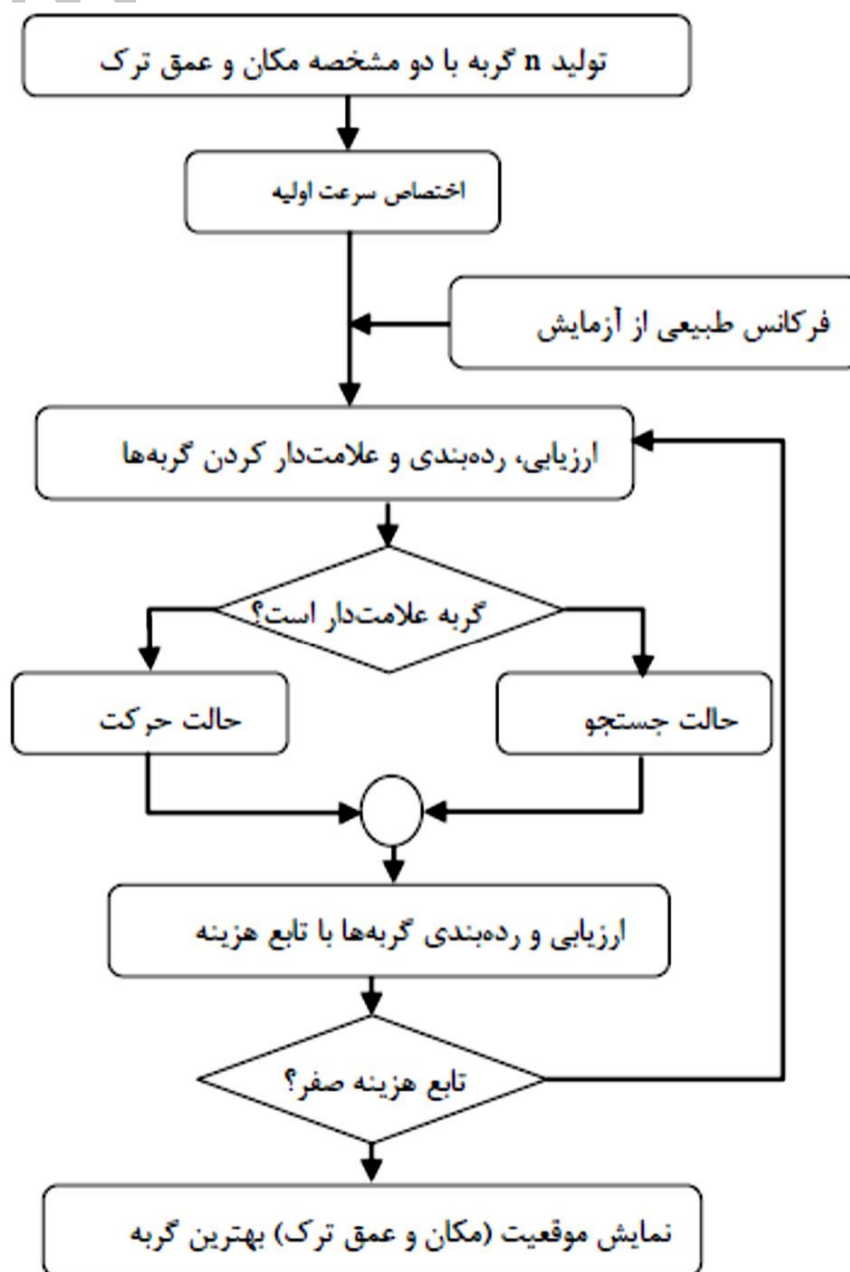
نقطه آزمایش	مقادیر دقیق		مقادیر شبیه‌سازی (تخمین زده شده توسط الگوریتم)	
	مکان ترک (mm)	عمق ترک (mm)	مکان ترک (mm)	عمق ترک (mm)
1	23	0/8	22/9983	0/7999
2	23	1/8	22/9966	1/7997
3	23	2/8	23/0010	2/8002
4	23	3/8	22/9776	3/7996
5	72	0/8	72/0000	0/8000
6	72	1/8	72/0032	1/7999
7	72	2/8	71/9940	2/8002
8	72	3/8	72/0019	3/7999
9	105	0/8	108/5737	0/8013
10	105	1/8	107/5227	1/8000
11	105	2/8	105/0212	2/7999
12	105	3/8	105/0057	3/8000
13	134	0/8	134/0496	0/7995
14	134	1/8	133/9879	1/8014
15	134	2/8	134/4154	2/8024
16	134	3/8	133/3166	3/8080

نسبی زیاد است. از طرفی همان‌طور که در بخش 3-2 اشاره شد در الگوریتم اجتماع گربه چون گربه‌ها با قرار گرفتن در دو حالت حرکت و جستجو، علاوه بر حرکت به سمت گربه برتر به اطراف خود نیز توجه دارند (مانند رفتار گربه در طبیعت که موجب می‌شود کمترین شانس‌ها را نیز برای یافتن غذا از دست ندهد) امکان گیر کردن در مینیمم‌های نسبی بصورت قابل توجهی کاهش می‌یابد و از طرفی چون کاهش تعداد فرکانس از سه به دو فرکانس موجب افزایش مینیمم‌های نسبی می‌شود، بنابراین الگوریتم گربه در مقایسه با الگوریتم ژنتیکی از توانایی بیشتری در بهینه‌سازی تابع هزینه با مینیمم‌های نسبی زیاد (مانند تابع هزینه در شناسایی ترک با استفاده از دو فرکانس) برخوردار است. جدول 3 نیز بیشترین، کمترین و میانگین خطای تخمین الگوریتم اجتماع گربه را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که توانائی الگوریتم اجتماع گربه در شناسائی ترک با دو فرکانس طبیعی اول تیر مناسب می‌باشد.

4-2- نتایج تست تجربی

در این تحقیق جهت اعتباربخشی به روش ارائه شده برای عیب‌یابی تیر ترک‌دار، نیاز به انجام آزمایش‌های تجربی بود. برای انجام آزمایش‌های تجربی تیری از جنس فولاد و با ابعاد هندسی و مشخصات مکانیکی که در بخش 2 آمده، مورد استفاده قرار گرفته است. برای استخراج مشخصه‌های فرکانسی تیر ترک‌دار، بر روی چند تیر فولادی با استفاده از دستگاه خستگی امزله¹ ساخت شرکت زویک² ترک‌های خستگی واقعی ایجاد گردید. در شکل 7 یک نمونه‌ای از یک ترک واقعی در تیر با بزرگنمایی 50× نشان داده شده است.

شکل 8 نمونه‌ای از طیف فرکانسی پاسخ تیری به طول 30 سانتی متر و با ترک خستگی در موقعیت $L_0 = 81\text{mm}$ و عمق میلی‌متر 2/6 را نشان



شکل 6 فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی گربه در شناسائی ترک

1- Amsler HA250
2- Zwick/Roell

فرکانس‌های طبیعی در برابر تغییرات موقعیت نسبی ترک (L_0/L) به ازای دو تیر با عمق‌های ترک $2/3$ و $2/6$ میلی‌متر بدست آمده است که نتایج آن در جدول 4 قابل مشاهده است.

فرکانس‌های حاصل از آزمایشات تجربی که در جدول 4 نشان داده شده است، به الگوریتم‌های فرا اکتشافی داده می‌شود. الگوریتم اجتماع گربه براساس فلوجارت نشان داده شده در شکل 6 به شناسائی پارامترهای ترک می‌پردازد. میانگین نتایج حاصل از 5 بار اجرای برنامه توسط این الگوریتم جهت شناسائی ترک خستگی در جدول 5 نشان داده شده است.

همچنین جدول 6 نیز بیشترین، کمترین و میانگین خطای تخمین الگوریتم اجتماع گربه را در شناسائی ترک با استفاده از فرکانس‌های تست تجربی را نشان می‌دهد.

جدول 4 فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده از آزمایش تست تجربی

نقطه	طول تیر (mm)	محل ترک (mm)	عمق ترک (mm)	فرکانس طبیعی اول (Hz)	فرکانس طبیعی دوم (Hz)	فرکانس طبیعی سوم (Hz)
1	160	13/5	2/3	19/929	124/311	3534/008
2	180	33/5	2/3	15/182	100/840	2787/923
3	195	48/5	2/3	13/986	853/373	2350/510
4	205	58/5	2/3	12/640	771/043	2118/879
5	240	93/5	2/3	89/380	558/013	1560/579
6	300	153/5	2/3	57/480	357/031	1008/378
7	300	81	2/6	56/792	360/317	999/855
8	370	151	2/6	37/670	235/050	663/779
9	420	201	2/6	29/303	182/233	512/992
10	455	236	2/6	25/000	155/007	438/329

جدول 5 مقادیر تخمین زده شده پارامترهای ترک توسط الگوریتم اجتماع گربه با

استفاده از دو فرکانس طبیعی تست‌های تجربی

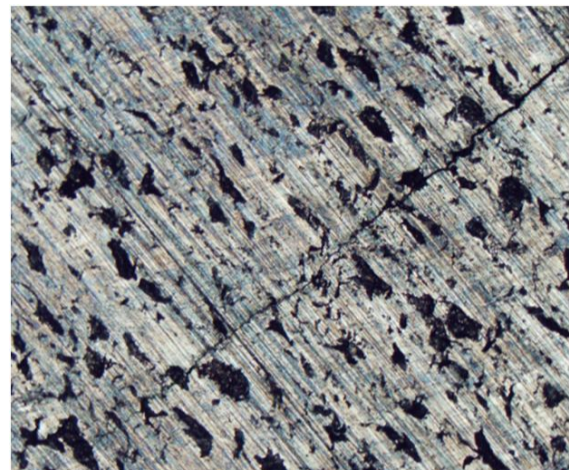
نقطه	طول تیر (mm)	مقادیر دقیق ترک (mm)		مقادیر شبیه‌سازی (تخمین زده شده توسط الگوریتم) (mm)		
		مکان ترک	عمق ترک	مکان ترک	عمق ترک	خطا (%)
1	160	13/5	2/3	12/78	-5/36	2/29
2	180	33/5	2/3	30/06	-10/26	2/24
3	195	48/5	2/3	53/29	9/88	2/40
4	205	58/5	2/3	60/57	54/3	2/33
5	240	93/5	2/3	95/59	23/2	2/32
6	300	153/5	2/3	149/46	-2/63	2/37
7	300	81	2/6	82/01	25/1	2/55
8	370	151	2/6	144/80	-4/11	2/55
9	420	201	2/6	186/80	-7/07	2/61
10	455	236	2/6	239/02	1/28	2/67

جدول 6 درصد خطای تخمین الگوریتم‌ها برای داده‌های تجربی

میزان خطا	مکان ترک	عمق ترک
بیشترین خطا (%)	10/26	10
متوسط خطا (%)	4/76	9
کمترین خطا (%)	1/28	7

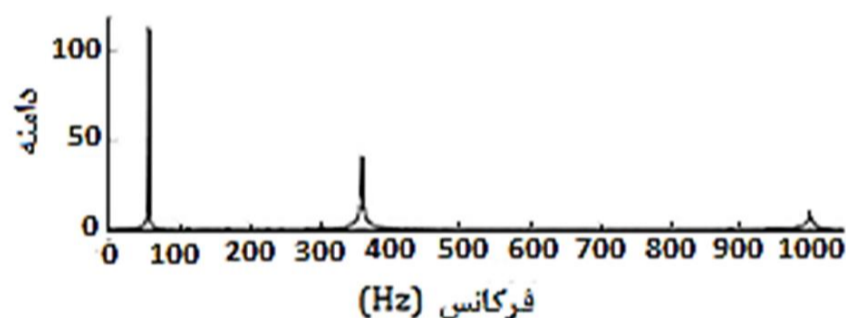
جدول 3 درصد خطای تخمین الگوریتم برای نتایج شبیه‌سازی

میزان خطا	مکان ترک	عمق ترک
بیشترین خطا (%)	3/4000	1/3100
متوسط خطا (%)	0/4612	0/1515
کمترین خطا (%)	0/0007	0/0001



شکل 7 نمونه‌ای از سطح بزرگنمایی شده یک ترک واقعی در تیر که در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه تبریز ایجاد شده است و با میکروسکوپ اولیمپوس $\times 61$ از آن تصویربرداری شده است.

می‌دهد. این شکل حاکی از آن است که فقط سه فرکانس طبیعی اول تیر تحریک شده است و مود اول، مود غالب ارتعاشی تیر است و فرکانس‌های بالاتر از فرکانس سوم در این طیف فرکانسی قابل مشاهده نیست. در شکل 9 نیز چنانچه مشاهده می‌شود، تیر یکسرگیردار با ترک خستگی به یک پایه سنگین فولادی محکم شده است، سپس با استفاده از تجهیزات مناسب پاسخ ارتعاشی آن اندازه گرفته می‌شود و با اعمال تبدیل فوریه سریع فرکانس‌های اصلی تیر ترک‌دار مشخص می‌گردد. با تغییر طول تیر نیز تغییرات



شکل 8 طیف فرکانسی پاسخ تیر ترک‌دار به طول 300 میلی‌متر و با ترک خستگی در موقعیت $mL_0 = 81$ و با عمق $2/6$ میلی‌متر



شکل 9 استخراج پاسخ ارتعاش تیر فولادی با شتابسنج پیزوالکتریک Type4507 شرکت B&K و دستگاه داده‌برداری چهار کاناله Type 3109

5- جمع‌بندی

سازه‌های تیری شکل یکی از المان‌های مهم انواع سازه‌ها هستند. پیش سلامتی این سازه‌ها به علت این که تحت ارتعاشات عرضی قرار می‌گیرند و در معرض خستگی و از این‌رو شکست ناگهانی قرار دارند، مورد توجه محققان قرار گرفته است. جهت پایش سلامتی چنین سازه‌هایی، الگوریتم‌های براساس الگوریتم ژنتیکی و الگوریتم ازدحام ذرات در ادبیات فن موجود است ولی مدل‌های استفاده شده در این الگوریتم‌ها فرض می‌کند که دهانه ترک در مدت ارتعاش تیر همواره باز باقی می‌ماند. لذا استفاده از چنین مدلی برای شناسائی ترک در ارتعاشات عرضی سازه‌های تیری شکل منجر به نتایج غلط خواهد شد. علاوه بر این در این تحقیقات در آزمایشات تجربی از شیار به جای ترک واقعی استفاده شده است و نشان داده شده است که الگوریتم‌های پیشنهادی با دقت خیلی خوبی این شیارها را شناسائی کرده‌اند. در حالی که افت فرکانسی در یک سازه شیاردار با عمق مساوی و موقعیت یکسان بیشتر از سازه ترک‌دار می‌باشد. همچنین در خیلی از مواقع، فرکانس‌های بالای سازه نظیر فرکانس‌های سوم یا چهارم تحریک نمی‌شود، از این‌رو در چنین حالاتی این الگوریتم‌ها کارائی خود را از دست خواهند داد. از آنجایی که در موارد عملی سازه‌های مرتعش به جای وجود شیار در معرض خستگی و ایجاد ترک قرار دارند، بنابراین هدف از این تحقیق ارائه یک الگوریتم کارا مبتنی بر الگوریتم‌های متاهیورستیک بود که بتوان از آن برای پایش سلامتی سازه استفاده کرد. همچنین الگوریتم باید بتواند با کمترین تعداد فرکانس طبیعی ترک خستگی در سازه‌های تیری شکل را شناسائی کند. در این تحقیق مساله شناسائی ترک در قالب یک مساله بهینه‌سازی تعریف شده است. با توجه به نوع تابع هدف، الگوریتمی مورد استفاده قرار گرفت که توانائی جستجوی محلی بالاتری را دارا باشد، لذا الگوریتم اجتماع گربه که جز آخرین ورژن های الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی می‌باشد، انتخاب گردید. در حالت تئوری این الگوریتم قادر است تنها با دو فرکانس طبیعی محل و عمق ترک خستگی در انواع حالات را درست تشخیص دهد. آزمایش‌های تجربی نیز نشان داد که دقت الگوریتم پیشنهادی مناسب است، چنان‌چه نتایج حاصل از شناسائی ترک توسط الگوریتم مورد استفاده در جدول 5 ارائه شده است. همچنین مدل ارائه شده در این تحقیق می‌تواند برای شناسائی ترکی که دهانه آن در مدت ارتعاش تیر همواره باز باقی می‌ماند نیز استفاده شود در این صورت در رابطه (14) باید به جای فرکانس ω_b ، از فرکانس ω_0 استفاده شود.

6- مراجع

- functions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 265, No 1, pp. 1-22, 2003.
- [5] K. H. Barada, D. S. Sharma, V. Vyas, Crack detection in cantilever beam by frequency based method, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 770-775, 2013.
- [6] N.T.Khiem, L.K.Toan, A novel method for crack detection in beam-like structures by measurements of natural frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, pp. 4084-4103, 2014.
- [7] G. R. Irwin, Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate, *Journal of applied mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364, 1957.
- [8] F. Kang, J.Li, Q. Xu, Damage detection based on improved particle swarm optimization using vibration data, *Applied Soft Computing*, Vol. 12, pp. 2329-2335, 2012.
- [9] J. R. Rice, N. Levy, The part-through surface crack in an elastic plate, *Journal of Applied Mechanics vibration data*, Vol. 39, No 1, pp. 185-194, 1972.
- [10] T. G. Chondros, A. D. Dimarogonas, J. Yao, Vibration of a beam with a breathing crack, *Journal of Sound and vibration*, Vol. 239, No 1, pp. 57-67, 2001.
- [11] M. Rezaee, R. Hassannejad, Free vibration analysis of simply supported beam with breathing crack using perturbation method, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 23, No 5, pp. 459-470, 2010.
- [12] S. M. Cheng, X. J. Wu, W. Wallace, Vibrational response of a beam with a breathing crack, *Journal of Sound and vibration*, Vol. 225, No 1, pp. 201-208, 1999.
- [13] N. Khaji, M. Mehrjoo, Crack detection in a beam with an arbitrary number of transverse cracks using genetic algorithms, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No 3, pp. 823-836, 2014.
- [14] M. Karthikeyana, R. Tiwaria, S. Talukdarb, Crack localisation and sizing in a beam based on the free and forced response measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 1362-1385, 2007.
- [15] K. Mazanoglu, M. Sabuncu, A frequency based algorithm for identification of single and double cracked beams via a statistical approach used in experiment, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 30, pp. 168-185, 2012.
- [16] J. Lee, Identification of multiple cracks in a beam using natural frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 320, No 3, pp. 482-490, 2009.
- [17] M. T. Vakil-Baghmisheh, M. Peimani, M. H. Sadeghi, M. M. Etefagh, Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms, *Applied Soft Computing*, Vol. 8, pp. 1150-1160, 2008.
- [18] O. Begambrea, J.E. Laiera, A hybrid Particle Swarm Optimization – Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification, *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, No 9, pp. 883-891, 2009.
- [19] S. H. Zainud-Deen, W. M. Hassen, K.H. Awadalla, Crack detection using a hybrid finite difference frequency domain and particle swarm optimization techniques, *Progress Electromagnetic Researches*, Vol. 82, pp. 47-58, 2009.
- [20] H. Hao, Y. Xia, Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm, *Journal of Computing in Civil Engineering-ASCE*, Vol. 16, No 3, pp. 222-229, 2002.
- [21] J.H. Chou, J. Ghaboussi, Genetic algorithm in structural damage detection, *Computers & Structures*, Vol. 79, No 14, pp. 1335-1353, 2001.
- [22] F.S. Buezas, M.B. Rosales, C.P. Filipich, Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No 4, pp. 695-712, 2011.
- [23] M. T. Vakil-Baghmisheh, M. Peimani, M. H. Sadeghi, M. M. Etefagh, A. F. Tabrizi, A hybrid particle swarm–Nelder–Mead optimization method for crack detection in cantilever beams, *Applied Soft Computing*, Vol. 12, pp. 2217-2226, 2012.
- [24] S. Moradi, P. Razi, L. Fatahi, On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures, *Computers and Structures*, Vol. 89, pp. 2169-2175, 2011.
- [25] T.G. Chondros, A.D. Dimarogonas, A continuous cracked beam vibration theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 215, No 1, pp. 17-34, 1998.
- [26] P.F. Rizos, N. Aspragathos, A.D. Dimarogonas, Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 183, No 3, pp. 381-388, 1990.
- [27] S. S. Rao, Vibration of continuous systems, *John Wiley & Sons Inc, New Jersey*, 2007.
- [28] S. C. Chu, and P. W. Tsai, Computational intelligence based on the behaviour of cats, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 3, No 1, pp. 163-173, 2007.
- [1] M. Rezaee, R. Hassannejad, A new approach to free vibration analysis of a beam with a breathing crack based on mechanical energy balance method, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 24, No 2, pp. 185-194, 2011.
- [2] G. Yan, A. D. Stefano, E. Matta, R. Feng, A novel approach to detecting breathing-fatigue cracks based on dynamic characteristics, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, pp. 407-422, 2013.
- [3] V. Meruane, W. Heylen, An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No 5, pp. 1559-1573, 2011.
- [4] G.M. Owolabi, A. S. J. Swamidias, R. Seshadri, Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response