



## شناسایی خرابی در تیر با استفاده از سیستم محرک دینامیکی بصورت آزمایشگاهی

محمدعلی لطف‌اللهی یقین<sup>1\*</sup>، مهدی کوهدراق<sup>2</sup>، میرمحمد اتفاق<sup>3</sup>، علیرضا مجتهدی<sup>4</sup>

1- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز  
 2- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز  
 4- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز  
 \* تیریز، صندوق پستی 51666، lotfollahi@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 15 بهمن 1394  
 پذیرش: 29 اسفند 1394  
 ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395  
 کلید واژگان:  
 شناسایی خرابی  
 سیستم دینامیکی  
 روش EMD  
 الگوریتم فازی-ژنتیک

### چکیده

بسیاری از شکست‌های سازه‌ای بسبب گسیختگی مواد تشکیل دهنده رخ می‌دهند. آغاز این گسیختگی‌ها با ترک توأم بوده که با گسترش خود به عنوان تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می‌شوند، در این راستا متدهای پایش سلامت سازه‌ها، موضوع تحقیقات پرآمنه‌ای است که تا کنون انجام شده و کماکان ادامه دارد. در این مقاله که بصورت آزمایشگاهی صورت گرفته است، یک سیستم جدید مکانیکی پرتابل هوشمند جهت شناسایی خرابی در سازه‌های تیری شکل با استفاده از الگوریتم فازی-ژنتیک معرفی گردیده است. در ابتدا تاریخچه شتاب-زمان از سه نقطه تیر دو سر مفصل ساده با استفاده از سنسورهای شتاب سنج برداشت می‌گردد و سپس این سیگنال با استفاده از روش جدید تجزیه سیگنال به عناصر جزئی‌تر، به اجزاء خود تقسیم می‌گردد که هرکدام از این جزها در بر دارنده محدوده خاصی از فرکانس می‌باشند و با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس‌های غالب سازه از روی همین جزها استخراج می‌گردد. در ادامه روشی بر مبنای الگوریتمی فازی-ژنتیک برای یافتن خرابی در تیر دو سر مفصل ساده معرفی می‌گردد. این الگوریتم برای پیدا کردن مکان و شدت خرابی در طول تیر طراحی شده که قادر به یافتن مکان و شدت خرابی از روی الگوی تغییرات فرکانسی تیر بین حالت سالم و معیوب تیر می‌باشد.

## Damage detection in beam using dynamic excitation system by experimental

Mohamad Ali Lotfollahi Yaghin<sup>1\*</sup>, Mehdi Koohdaragh<sup>1</sup>, Mir Mohamad Etefagh<sup>2</sup>, Alireza Mojtahedi<sup>1</sup>

1- Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 \* P.O.B. 51666, Tabriz, Iran, lotfollahi@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 04 February 2016  
 Accepted 19 March 2016  
 Available Online 20 April 2016

**Keywords:**  
 Damage detection  
 Dynamic system  
 EMD method  
 Fuzzy-genetic algorithm

### ABSTRACT

Most structural failures are because of break in consisting materials. These breaks Begin with crack, the extension of which is a serious threat to the behavior of structure, so the methods of distinguishing and showing of cracks are the most important subjects being investigated. In this article, a new smart portable mechanical system to detect damage in beam structures form using fuzzy-genetic algorithm is introduced. Acceleration-time history of the three points of beam is obtained. The signals are then decomposed into smaller components using new EMD (Empirical Mode Decomposition) method with every IMF containing a specific range of the frequency. The dominate frequencies of the structure are obtained from these IMFs using Short-Time Fourier transform. Subsequently, a new method of damage detection in simply supported beams is introduced based on fuzzy-genetic algorithm. The new method is capable of identifying the location and severity of the damage. This algorithm is developed to detect the location and severity of the damage along the beam, which can detect the damage location and severity based on the pattern of beam frequency variations between undamaged and damaged states.

### 1- مقدمه

اطلاعات اندازه‌گیری شده از سازه سالم یا مدل المان محدود بدون عیب استخراج شود. پارامترهای مودال مورد استفاده جهت شناسایی عیوب سازه شامل تابع فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی، انحنای شکل مد، خمش مودال و غیره می‌باشند [3-5]. وظیفه هر سیستم شناساگر خرابی به چند بخش تقسیم می‌شود، که عبارت از کشف خرابی، شناسایی مکان خرابی، شناسایی میزان خرابی و پیش بینی میزان عمر خرابی هستند. به منظور بدست آوردن عملکرد خوب نیاز به مدل کردن ریاضی خیلی دقیق سیستم‌های مانیوتور شده وجود دارد. خطاهای مدلسازی می‌تواند بر عملکرد سیستم‌های عیب‌یابی تاثیر بگذارد، بخصوص زمانی که سیستم‌های مانیوتور شده غیرخطی باشند. استفاده

از آنجایی که عیب و از کار افتادگی در سازه‌ها می‌تواند منجر به هدر رفتن منابع انسانی و مالی شود، شناسایی خرابی در سازه‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. روش‌های آنالیز مودال به علت عملی بودن آنها عمومیت زیادی دارند. روش‌های مبتنی بر آنالیز مودال بر این حقیقت استوار هستند که پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، شکل مد و میرایی مودال) تابعی از پارامترهای فیزیکی (جرم، میرایی، سختی) هستند و بنابراین فرض اینکه وجود عیب منجر به تغییر در مشخصات مودال سازه می‌شود منطقی است [1,2]. به طور معمول اطلاعات اولیه به منظور مقایسه، می‌تواند از

Please cite this article using:

M. A. Lotfollahi Yaghin, M. M. Koohdaragh, M. M. Etefagh, A. Mojtahedi, Damage detection in beam using dynamic excitation system by experimental, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 307-314, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از روش‌های هوش محاسباتی ممکن است خطاهای مدل‌سازی را جبران کند، به طوری که این روش‌ها تقریب خوبی از سیستم‌های غیر خطی ارائه می‌دهند. لیادینگ و همکارانش در دانشگاه وسترن استرالیا تحقیقاتی را در زمینه ارزیابی نیروهای محوری دینامیکی اربابه به همراه شرایط سطح جاده‌ای متفاوت به انجام رساندند. نوآوری این تحقیق در بکارگیری «روش طیفی تکاملی» برای ارزیابی بارهای دینامیکی اربابه روی تیر بود که روی سطح ناصاف تیر با سرعت ثابت حرکت می‌کرد [6]. جین چارلس و همکارانش در دانشکده عمران دانشگاه توکیو ژاپن روشی برای پیش‌بینی پاسخ‌های موضعی تحریک تیر مایل توسط اربابه پیشنهاد دادند [7]. لاو در دانشکده مهندسی‌سازه دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ تحقیقی را در مورد شناسایی بار محوری اربابه روی تیر با ناهمواری سطح جاده انجام دادند. بارهای محوری بکار رفته روی تیر در این تحقیق با در نظر گرفتن ناهمواری‌های سطح جاده تخمین زده شد [8]. نوس و همکارانش در دانشگاه پورتو پرتغال از روش مستقیمی جهت آنالیز بر هم کنش عمودی سازه-ارابه استفاده کردند. روش پیشنهادی آن‌ها برای سیستم‌هایی با حجم سازه‌ای بالا مناسب‌تر از روش‌هایی بود که دائماً به روز رسانی می‌شوند [9]. لاو و همکارانش در دانشکده مهندسی سازه دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ تحقیقی را در زمینه پیش‌بینی آماری پاسخ دینامیکی سازه تیر با خصوصیات ذاتی نامعلوم بر اثر عبور بارهای متحرک اتفاقی به انجام رساندند. خصوصیات نامعلوم در سازه تیر که به صورت گاوسی فرض شده بود، به کمک روش المان محدود مدل شد و خصوصیات نامعلوم اربابه با توزیع گاوسی به کمک بسط «کارهون-لوو» ارائه شد [10]. نا از روش الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تغییرات سفتی در یک قاب برشی بیست طبقه استفاده کرده است [11]. مارانو از روش الگوریتم ژنتیک برای شناسایی خرابی در یک قاب برشی با اندازه‌گیریهی ناقص استفاده کرده است [12]. موسکارو از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تغییرات جابجایی بر روی یک پل دو دهانه در السنترو استفاده کرده است [13]. لوح یک ترک سه بعدی را در سازه مدل کرده است و با استفاده از تبدیل‌های موجک و فوریه خرابی در یک قاب RC که روی میز لرزان قرار داده شده است را شناسایی کردند [14]. گانقولی خرابی را بصورت کاهش سفتی در مدول الاستیسیته نشان دادند و با استفاده از منطق فازی محل و شدت خرابی را در پره هلیکوپتر معین نمود [15]. نجف آبادی و همکارانش به پایش خرابی در ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار پرداختند و با استفاده از معرفی یک روش جهت تحلیل فرکانسی امواج، سعی بر شناسایی محدوده فرکانسی خرابی‌های مختلف کردند که در این حالت، محدوده‌های فرکانسی معرف یک مشخصه از ورق می‌باشند [16]. حسن نژاد و همکارانش مسئله شناسایی پارامترهای ترک را بصورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف کردند که در آن هدف کمینه کردن اختلاف فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده، بود که برای این امر از الگوریتم اجتماع گربه‌ها استفاده کردند [17]. از میان پارامترهای مودال، فرکانس طبیعی از آنجا که راحت‌تر و با دقت بیشتری می‌تواند اندازه‌گیری شود، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از برتری‌های این مقاله نسبت به کارهای قبلی نحوه استخراج فرکانس طبیعی می‌باشد که برای این امر، از روشهای تجربی تجزیه سیگنال به مدهای اصلی (EMD) و تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده شده است.

در این مقاله بار متحرک شامل جرم متمرکز و فنر الاستیک خطی، با سرعت ثابت برای تحریک دینامیکی تیر دو سر مفصل ساده استفاده می‌گردد. سپس تاریخچه شتاب-زمان در سه نقطه از تیر توسط سنسورهای شتاب سنج استخراج می‌گردد. برای تبدیل تاریخچه شتاب-زمان به اطلاعات قابل استفاده جهت تشخیص عیب، از روش تجزیه سیگنال به مدهای اصلی به روش EMD استفاده شده است. در این مقاله ابتدا روش تجربی تجزیه سیگنال به مدهای اصلی معرفی و قابلیت‌های آن برای تشخیص عیب بررسی می‌گردد. سپس جزای سیگنالی<sup>2</sup> (IMFs) بدست آمده از روش EMD با استفاده از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه از محدوده زمان به محدوده فرکانس تبدیل می‌شود. در ادامه فرکانس‌های غالب هر IMF، به عنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد که با این الگوریتم محل و شدت خرابی در سازه شناسایی می‌گردد.

## 2- معرفی روش EMD

روش EMD بر اساس این فرض ساده پایه گذاری شده است که هر سیگنال متشکل از اجزای اساسی خود می‌باشد. بر اساس این روش هر سیگنال را می‌توان به تعدادی سیگنال که باید دو شرط زیر را برآورده کند تجزیه کرد [18] الف) اختلاف تعداد اکستریم‌ها و صفرهای سیگنال باید حداکثر برابر یک باشد.

ب) مقدار متوسط دامنه محلی ماکزیمم و مینیمم هر قسمت سیگنال برابر صفر باشند.

به این سیگنال‌های تجزیه شده IMF گفته می‌شود. برای تجزیه سیگنال حوزه زمان و به دست آوردن IMF باید این مراحل را به ترتیب انجام داد:

- 1) تعیین همه نقاط ماکزیمم و مینیمم‌های محلی یک سیگنال
- 2) اتصال نقاط ماکزیمم با اسپیلاین درجه سه<sup>3</sup> به یکدیگر. انجام همین عمل برای نقاط مینیمم منحنی.
- 3) محاسبه مقدار متوسط خطوط تابع مربوط به ماکزیمم و مینیمم  $m_1$  و تفاوت آن با مقدار سیگنال اصلی ورودی مربوط به ارتعاشات  $x(t)$  که برابر  $h_1$  قرار داده می‌شود [18].

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (1)$$

مقدار  $h_1$  اولین عضوی است که باید بررسی شود که آیا شرایط IMF را دارد. برای این کار باید دو شرط IMF چک گردد. در صورت IMF بودن،  $h_1$  بعنوان اولین IMF، از سیگنال اولیه جدا شده و  $c_1$  نامیده می‌شود. باقی مانده  $r_1$  نامیده می‌شود. در مرحله بعد  $r_1$  همانند سیگنال پایه رفتار می‌کند و فرایند بالا مجدداً تکرار می‌شود [18].

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (2)$$

$$r_{n-1} - c_n = r_n \quad (3)$$

4) اگر  $h_1$  جزء IMF نباشد، بعنوان یک سیگنال مبنا عمل می‌کند و مراحل 1، 2 و 3 تکرار می‌گردد. این مراحل را تا  $k$  مرحله تکرار کرده تا به مرحله ای برسیم که جزء IMF باشد [18].

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (4)$$

$$c_1 = h_{1k} \quad (5)$$

این فرایند تجزیه وقتی کامل می‌شود که  $r_n$  تابع یکنواخت باشد. برای این موضوع باید شرط نمایش داده شده در رابطه فوق چک گردد [18].

$$sd = \sum_f \left[ \frac{|h_{n-1}(t) - h_n(t)|^2}{h_{n-1}^2(t)} \right] < \varepsilon \quad (6)$$

$n$  مراحل انجام این فرایند می‌باشد و  $\varepsilon$  بین 0.2 تا 0.3 در نظر گرفته می‌-

2- Intrinsic Mode Function  
3- Spline

1- Empirical Mode Decomposition



Fig.1 Simply support

شکل 1 تکیه گاه مفصلی متحرک

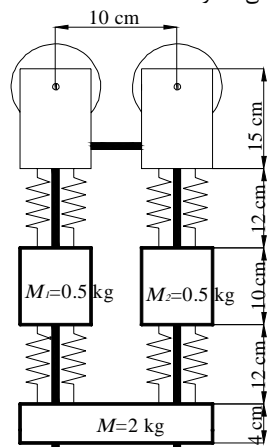


Fig. 2 Physical model of moving load

شکل 2 مدل فیزیکی بار متحرک

توسط موتور الکتریکی با سرعت ثابت یک متر در ثانیه به حرکت در می‌آید و کل طول تیر را می‌پیماید که این امر باعث تولید ارتعاش در طول تیر می‌گردد که توسط شتاب سنج‌ها ذخیره می‌گردد و برای اینکه قابلیت اعتماد به داده‌های استخراج شده بیشتر باشد این عمل به تعداد 20 بار تکرار می‌گردد یعنی به عبارت دیگر در هر بار آزمایش سه عدد سنسور در مکان‌های مختلف سیگنال شتاب را برداشت کرده و این عمل بیست بار تکرار می‌گردد که در حالت کلی برای یک حالت سناریو خرابی، 60 سیگنال بدست می‌آید که محیط آزمایشگاه در شکل 4 آورده شده است.

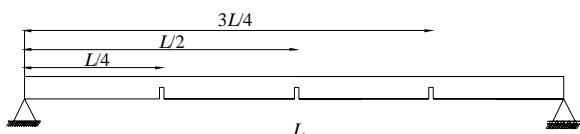


Fig.3 Location of crack in beam

شکل 3 محل قرارگیری ترک در تیر

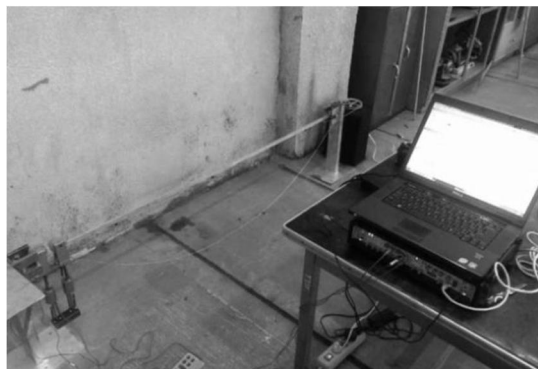


Fig. 4 Beam in laboratory

شکل 4 محیط آزمایشگاه

شود. اگر تابع  $r$  شرط بالا را داشته باشد، الگوریتم تمام می‌باشد، در غیر اینصورت مجدداً مراحل قبل تکرار شود. پس از اتمام مراحل تجزیه، سیگنال اولیه را می‌توان بصورت رابطه زیر نمایش داد [19-21].

### 3- تبدیل فوریه بازمان کوتاه

در برخورد با سیگنال‌های غیرایستا، گاهی اوقات می‌توان فرض کرد که قسمتی از آن ساکن است. اگر قسمت ساکن یک سیگنال بسیار کوچک باشد، باید از پنجره‌هایی با اندازه متناسب و کوچک استفاده کرد. در این روش سیگنال به تکه‌هایی به اندازه کافی کوچک که بتوان فرض ساکن بودن آنها را درست دانست، تقسیم می‌شود. برای این منظور، یک پله انتخاب می‌شود و عرض آن باید معادل قسمتی از سیگنال باشد که فرض ساکن بودن آن متغیر است. این پله ابتدا در قسمت آغازین سیگنال  $t = 0$  قرار داده می‌شود. اگر فرض کنیم که عرض پله  $T$  ثانیه باشد، در زمان  $t = 0$ ، پله‌ای اولین  $T/2$  ثانیه از سیگنال را خواهد پوشاند. در گام بعدی، پله‌ای در سیگنال ضرب می‌شود. اگر پله به شکل مستطیل با مقدار یک باشد، محصول مساوی با همان قسمت از سیگنال خواهد بود. سپس این محصول به عنوان یک سیگنال مستقل با تبدیل فوریه پردازش می‌شود.

$$STFT_f^{(w)}(t, w) = \int [f(t) \times w^*(t - t^t)] \times e^{-iwt} dt \quad (7)$$

که  $f(t)$  سیگنال مورد بررسی و  $w(t)$  تابع پنجره (پله) و  $*$  علامت مزدوج مختلط تابع است. اگر سیگنال جدا شده از سیگنال اصلی ساکن باشد، طیف فوریه آن بدون هیچ اشکالی می‌تواند به عنوان ارائه درستی از محتوای فرکانسی اولین  $T/2$  ثانیه از سیگنال بشمار آید. گام بعدی، تغییر محل این پله به محل بعدی و تکرار مراحل پیش گفته است. این روند تا پایان سیگنال ادامه می‌یابد.

### 4- مدل سازی تیر و بار متحرک

برای این منظور یک تیر آلومینیومی به ابعاد مقطع  $20 \times 10$  میلی‌متر به طول دو متر مورد آزمایش قرار گرفت که ابتدا و انتهای تیر توسط دو ستون نیم متری که دو فک به آن‌ها متصل است مدل سازی شده است. تیر آلومینیومی وارد این دو فک می‌گردد و دقیقاً توسط بلبرینگ‌هایی که به آن متصل است رفتار تکیه گاه مفصلی ساده را خواهد داشت. برای مدل سازی سیستم محرک دینامیکی یک اربه معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل 1 در محیط آزمایشگاهی و در شکل 2 بصورت فیزیکی نشان داده شده است. شکل 2 نشان می‌دهد این اربه شامل دو عدد چرخ از نوع تفلون است که به علت وزن همواره در تماس با تیر حرکت می‌کند و احتمال جداسازی از روی تیر را نخواهد داشت و دو عدد جرم  $m_1$  و  $m_2$  به وزن 0.5 کیلوگرم که توسط دو فنر کششی به جرم دیگر به وزن 2 کیلوگرم وصل شده است. این اربه توسط یک موتور الکتریکی که مجهز به گیربکس نیز می‌باشد با سرعت ثابت یک متر بر ثانیه بر روی تیر کشیده می‌شود و باعث ارتعاش در تیر می‌شود. همچنین شکل ترک‌ها و محل قرارگیری آنها در شکل 3 نشان داده شده است.

### 5- استخراج سیگنال‌های ارتعاش

برای استخراج سیگنال‌های ارتعاشی از تیر در سه قسمت از تیر به فاصله‌های 168، 94، 54 سانتی‌متر از ابتدای تیر سنسورهای شتاب سنج B&K مدل 4507 با فرکانس نمونه برداری 6.4 kHz نصب می‌گردد که این سنسورها توانایی ثبت کوچکترین ارتعاش را بر روی تیر دارند در ادامه اربه ذکر شده

1/2 از ابتدا با شدت های 50 درصد و 80 درصد قرار داده می‌شود و همان مراحل ذکر شده در حالت سالم دوباره تکرار می‌گردد و نتایج بیست بار آزمایش به طور جداگانه ذخیره می‌گردد که نتایج دو آزمایش اول با شدت 50 درصد در شکل 7 نشان داده شده است. در حالت سوم و چهارم ترک در قسمت های 1/4 و 3/4 از ابتدا با شدت های 50 و 80 درصد قرار داده می‌شود و دوباره ارابه به تعداد بیست بار از روی تیر عبور داده می‌شود و نتایج به طور جداگانه ذخیره می‌شود ولی به علت تکراری بودن عملیات از نشان دادن شکل های این حالت ها خودداری می‌گردد.

سیگنال‌های به دست آمده از هر حالت به طور جداگانه با استفاده از روش EMD به 31 قسمت تقسیم می‌شوند و همان طور که قبلا به آن اشاره شده است، مقدار فرکانس که بیشترین دامنه را دارد (فرکانس غالب) به عنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک انتخاب می‌گردد. برای نمونه سیگنال

سه عدد ترک در محل های 1/4 ، 1/2 و 3/4 تیر با شدت های 50 و 80 درصد ( $d/h$ ) بر روی تیر قرار داده شده که برای ایجاد ترک در محل‌های ذکر شده از اره با ضخامت کم استفاده شده است و بیست بار آزمایش بر روی هر کدام از آن ها تکرار می‌گردد. در حالت اول تیر سالم بر روی دو تکیه گاه مفصلی قرار می‌گیرد و ارابه به تعداد بیست بار از روی تیر با سرعت ثابت یک متر بر ثانیه حرکت داده می‌شود و نتایج شتاب به دست آمده در هر آزمایش به طور جداگانه ذخیره می‌گردد که نتایج دو بار عبور ارابه در شکل 5 و 6 نشان داده شده است.

همان طوری که شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهد با شروع حرکت ارابه، تیر نوسان کرده که این نوسانات با عبور کامل ارابه کاهش یافته و به حالت سکون می‌رسد و با بررسی سیگنال های حاصل از بیست بار آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که سیستم قابلیت تکرارپذیری را دارد. در حالت دوم ترک در

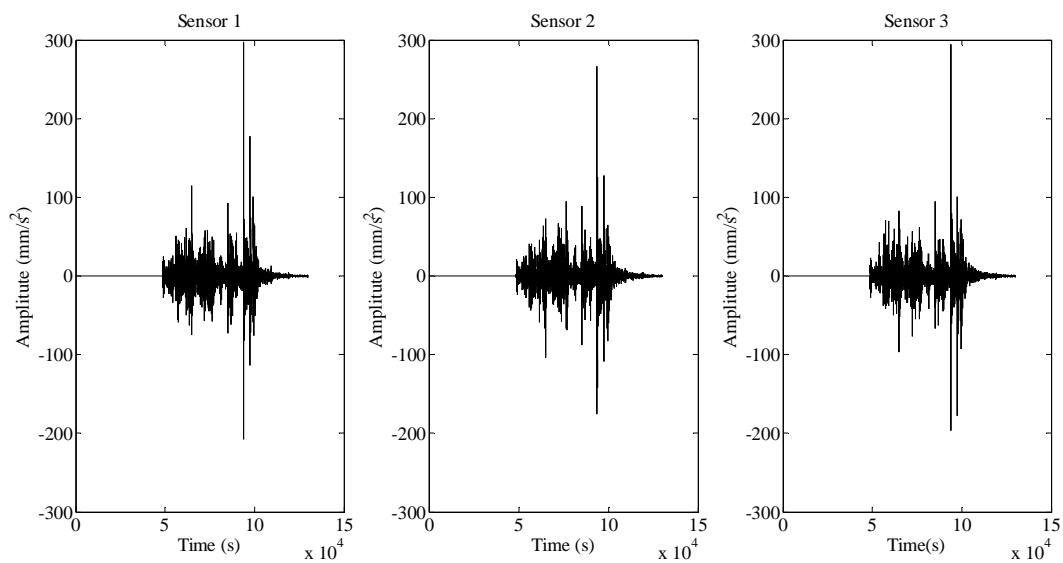


Fig.5 Acceleration time history for safe beam in first test

شکل 5 تاریخچه شتاب-زمان برای تیر سالم در آزمایش اول

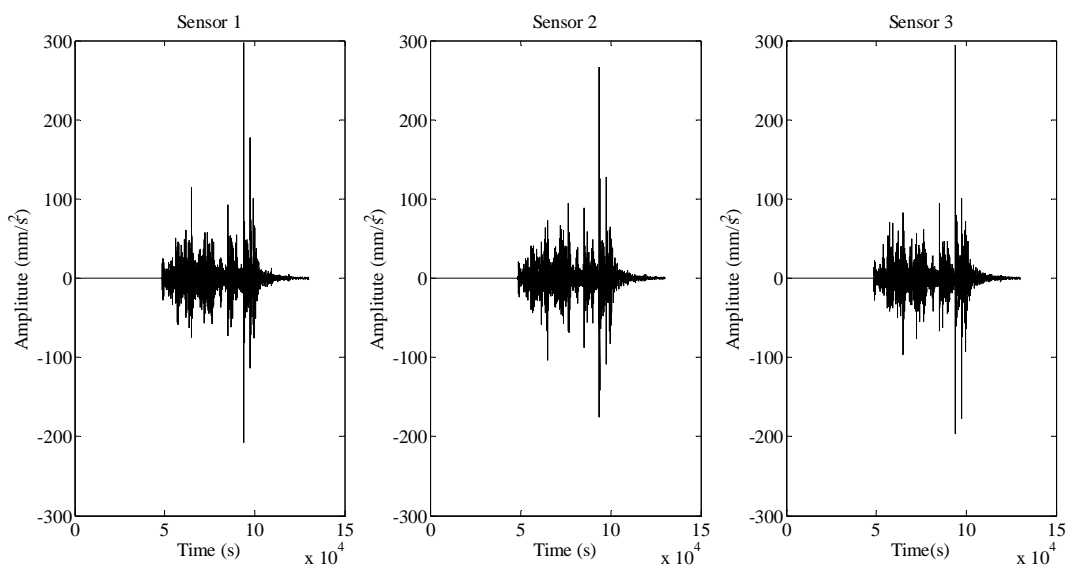


Fig. 6 Acceleration time history for safe beam in second test

شکل 6 تاریخچه شتاب-زمان برای تیر سالم در آزمایش دوم

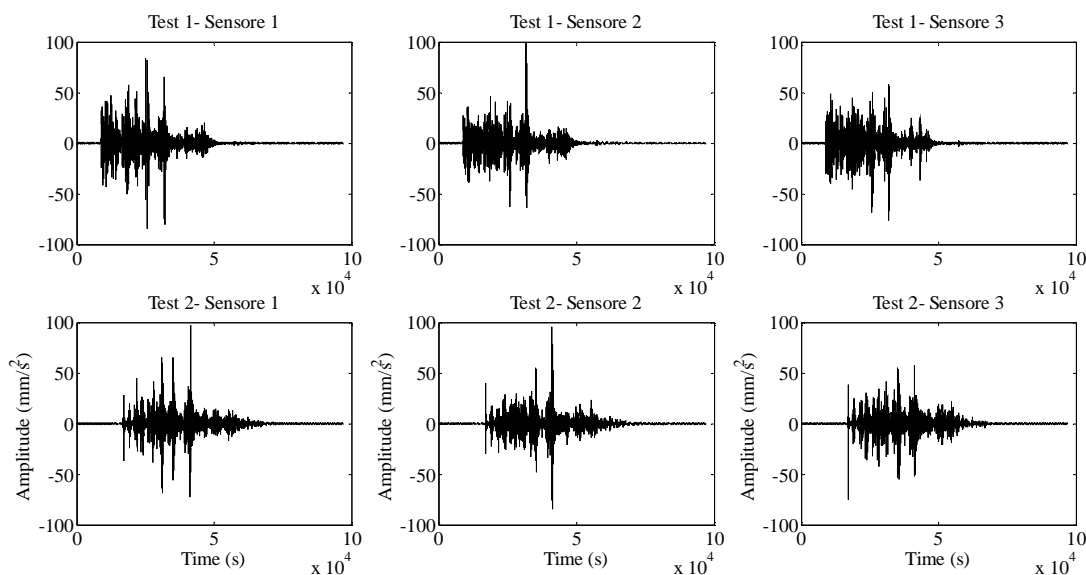


Fig. 7 Acceleration time history for damage beam in first and second test

شکل 7 تاریخچه شتاب-زمان برای تیر معیوب در وسط و شدت 50 درصد در آزمایش اول و دوم

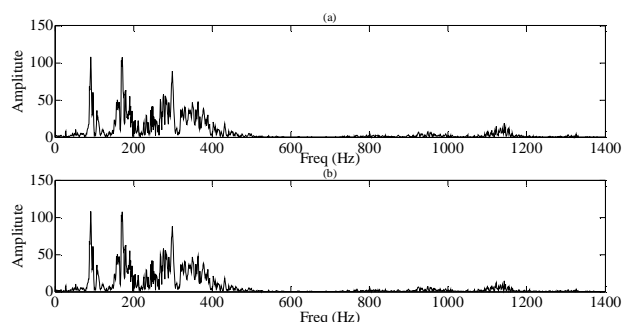


Fig. 9 Compliance two frequencies from sum of the 31 IMFs the frequency of EMD (a) and the frequency of the original signal with PSD (b)

شکل 9 انطباق دو فرکانس بدست آمده از جمع 31 جز فرکانسی از روش EMD (a) و فرکانس از سیگنال اصلی (b) با روش PSD

همانطوری که شکل 9 نشان میدهد انطباق کاملاً قابل قبولی برای جمع محدوده فرکانسی و فرکانس سیگنال اصلی وجود دارد. نتایج بدست آمده از روش EMD با استفاده از روش تبدیل فوری به زمان کوتاه از محدوده زمان به محدوده فرکانس تبدیل می‌شوند و سپس فرکانس‌های غالب هر IMFها بدست می‌آید که این فرکانس‌ها به عنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که در این مرحله از هر سیگنال سی و یک IMF بدست می‌آید. سپس با استفاده از تبدیل فوری فرکانس غالب هر کدام از جزها بدست می‌آید. بعبارت دیگر در هر بار آزمایش سه سیگنال بدست می‌آید و از هر سیگنال 31 فرکانس غالب حاصل می‌گردد که در مجموع با بیست بار آزمایش 1860 فرکانس بدست می‌آید.

از آنجایی که این تعداد ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک بسیار زیاد می‌باشد و ضرورتی برای این امر وجود ندارد لذا از هر سیگنال 3 عدد فرکانس استخراج گردیده و با این احتساب در هر آزمایش  $3 \times 3 = 9$  فرکانس بدست می‌آید. همچنین همانطوری که اشاره گردید، الگوریتم فازی-ژنتیک ابتدا باید آموزش داده شود و سپس بعد از اتمام فرایند آزمایش می‌بایستی صحت سنجی شود و درصد جواب‌های صحیح بیان گردد. بنابراین 10 آزمایش اول

شتاب حالت سالم با استفاده از روش EMD به 31 جز تقسیم می‌گردد که در شکل 8 بخاطر طولانی نشدن شکل، تنها شش جزء از آنها نشان داده شده است.

همانطوری که شکل 8 نشان می‌دهد سیگنال شتاب بدست آمده از آزمایش اول در سنسور اول به 31 محدوده فرکانسی تبدیل شده است که در شکل 8 تنها پنج قسمت ابتدایی آن ترسیم شده است. برای صحت این موضوع با استفاده از روش PSD محدوده فرکانسی هر جز را جداگانه محاسبه کرده و سپس همه این 31 محدوده با هم جمع گردیده و با PSD بدست آمده از فرکانس سیگنال اصلی در شکل 9 مقایسه می‌گردد.

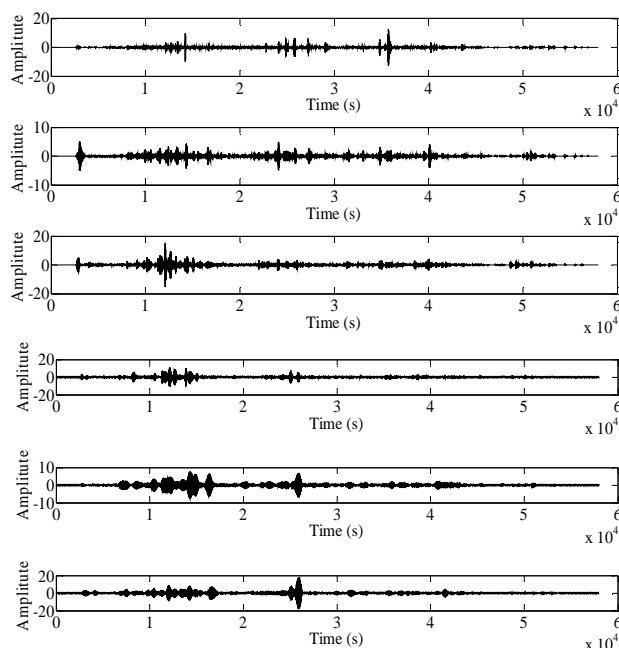


Fig.8 IMFs extracted from the acceleration time history signal

شکل 8 تجزیه سیگنال شتاب تیر سالم در آزمایش اول و سنسور اول به IMFs با استفاده از روش EMD

می‌گردد و این مقادیر بین اعداد صفر و یک نرمال سازی می‌شوند که مقادیر حاصل در جدول 1 آمده است. با این عمل یک حالت سالم و شش سناریو خرابی تولید می‌شود. ورودی سیستم فازی، اختلاف فرکانسی نرمال‌سازی شده و خروجی آن محل و شدت خرابی مورد نظر است. هدف پیدا کردن ارتباط میان آنها است. گام اول در تعریف سیستم فازی، فازی سازی داده های موجود به معنی تبدیل آنها به عبارات زبانی است. بدین منظور هر اختلاف فرکانسی نرمال سازی شده به پنج قسمت تبدیل شده است که قابل مشاهده در جدول 2 است.

در گام بعد باید توابع عضویت را تعریف نمود. تابع عضویت، تابعی است که متناسب با داده‌های ورودی به آن، خروجی، عددی بین صفر و یک است. در این مقاله از توابع عضویت گوسی برای متغیرهای ورودی استفاده شده است. این تابع را میتوان با رابطه زیر تعریف کرد:

$$\mu(x) = e^{-0.5\left(\frac{x-m}{\delta}\right)^2} \quad (9)$$

در این رابطه  $m$  نقطه مرکز تابع فازی و  $\delta$  دامنه آن (انحراف استاندارد) مربوط به متغیرهاست. توابع عضویت فازی گوسی عمومیت زیادی در سیستم های فازی دارند. نقاط میانه برای این توابع باید به نحوی انتخاب شود که محدوده اختلاف فرکانسی را پوشش دهد.

انتخاب انحراف استاندارد برای توابع فازی با توجه به اینکه عملکرد سیستم فازی را تا حد زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد، نکته مهمی به شمار می‌رود. برای بدست آوردن قوانین فازی با تبدیل اختلاف فرکانسی عددی به عبارات زبانی به هر مکان و شدت خرابی یک قانون اختصاص داده شده است. با توجه به تابع عضویت تعریف شده در مرحله قبل درجه عضویت مرتبط با هر اختلاف فرکانسی به دست آمده است.

هر اختلاف فرکانسی به تابع عضویت با بیشترین مقدار اختصاص داده شده است. با پیگیری روند فوق و با توجه به عبارات زبانی تعریف شده در جدول 2، هفت قانون تولید شده است، که در جدول 3 نشان داده شده است. این قوانین را به شکل زیر می‌توان برای حالت خاص تفسیر نمود:

اگر اختلاف فرکانس اول  $M$  و اختلاف فرکانس دوم  $L$  و اختلاف فرکانس نود  $VL$  باشد، آن گاه خرابی در فاصله 50 سانتی با شدت 50% می‌باشد قانون های مرتبط به خرابی های دیگر نیز به همین شکل قابل تفسیر هستند. نگاه دقیق تر به جدول 3 نشان میدهد که هر قانون اثر منحصر به فردی دارد و با قوانین دیگر متفاوت است. بنابراین سیستم فازی تعریف شده

جدول 1 تفاضل فرکانسی نرمال‌سازی شده بین صفر و یک

Table 1 Normalized frequency difference between 0 and 1

$\Delta\omega_{90}$	...	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_1$	شدت	محل خرابی
0.05	...	0.15	0.49	50%	50 سانتی از ابتدا
0.56	...	0.29	0.53	80%	100 سانتی از ابتدا
0.67	...	0.34	0.45	50%	150 سانتی از ابتدا
0.56	...	0.56	0.65	80%	
0.09	...	0.87	0.98	50%	
0.34	...	0.56	0.34	80%	

جدول 2 توابع فازی گوسی جهت فازی سازی مقادیر عددی

Table 2 Fuzzy-Gaussian functions to fuzzify numerical values

0.87-1	0.62-0.87	0.37-0.62	0.12-0.37	0-0.12
خیلی زیاد (VH)	زیاد (H)	متوسط (M)	کم (L)	خیلی کم (VL)

برای آموزش الگوریتم و 10 تای بعدی برای صحت‌سنجی الگوریتم خواهد بود. شکل 10 فرکانس‌های تیر سالم را برای آزمایش اول و سنسور اول با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نمودارها سه بعدی زمان-فرکانس-مقدار هستند که در این مقاله بصورت دوبعدی فرکانس-مقدار نشان داده شده است.

## 6- الگوریتم ژنتیک-فازی

منطق فازی بر اساس توابع عضویت‌هایی که تشکیل می‌دهد توانایی بالایی در کلاس بندی داده‌ها را دارد و از آنجایی که در این امر نیاز به تعیین میانگین و واریانس داده‌ها می‌باشد، لذا این متغیرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شوند. بنابراین ترکیب این دو باهم یک الگوریتم کارآمد و توانا را حاصل می‌نماید.

## 6-1- مدل سازی شاخص خرابی

شاخص خرابی در تیر تفاضل 90 فرکانس طبیعی غالب بدست آمده از خروجی تبدیل فوریه زمان کوتاه تیر، در حالت سالم و معیوب در نظر گرفته شده است که در حالت بدون بعد به صورت زیر است:

$$\Delta\omega = \frac{\omega(u) - \omega(d)}{\omega(u)} \quad (8)$$

$\Delta\omega$  برابر تفاضل فرکانسی در حالت بدون بعد،  $\omega(u)$  فرکانس غالب طبیعی در حالت سالم و  $\omega(d)$  فرکانس غالب طبیعی در حالت معیوب را مشخص می‌کند.

## 6-2- طراحی سیستم خرابی یاب

در این سیستم فرکانس‌های طبیعی هر سناریو از تیر از فرکانس‌های تیر سالم کم شده و به مقدار فرکانس‌های بدست آمده از تیر سالم تقسیم

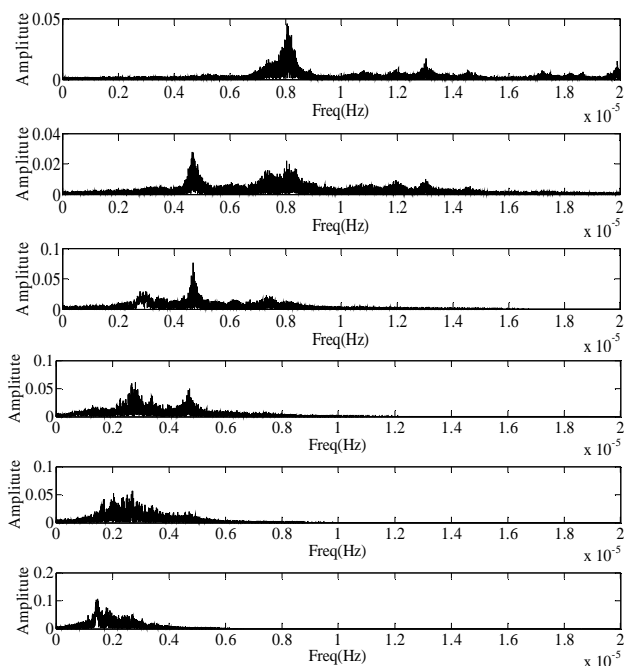


Fig. 10 STFT diagram of time-frequency-value safe beam for all IMF in first test in sensor 1

شکل 10 فرکانس‌های تیر سالم بدست آمده از تبدیل فوریه زمان کوتاه برای آزمایش اول و سنسور اول

جدول 3 قوانین سیستم فازی

Table 3 Fuzzy system rules

$\Delta\omega_{90}$	...	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_1$	شدت خرابی	محل خرابی
N	...	N	N	سالم	سالم
VL	...	L	M	50%	فاصله 50
M	...	L	M	80%	سانتی
H	...	L	M	50%	فاصله 100
M	...	M	H	80%	سانتی
VL	...	H	VH	50%	فاصله 150
L	...	M	L	80%	سانتی

طبقه بندی کننده خوبی است. این قوانین دانشی پایه را پدید می آورند و نشان می دهند که یک فرد خبره چگونه از تفسیر تغییرات فرکانسی برای تعیین خرابی استفاده میکند.

بعد از تعریف قوانین برای بهینه سازی توابع عضویت از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده است. الگوریتم های ژنتیک تفاوت بسیار زیادی با روش های قدیمی دارند. در این الگوریتم ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود. بنابراین الگوریتم های ژنتیک با یک سری متغیرهای کد شده کار می کنند. هدف استفاده از این روش در این مقاله پیدا کردن نقاط مرکز و دامنه برای توابع گوسی مطرح شده در بخش فازی است. بدین منظور باید ابتدا تابع هزینه برای پیدا کردن مینیمم، تعریف شود. برای تعریف تابع هدف به صورت زیر عمل شده است:

$$FF = \frac{\sum_{i=1}^{27} \sum_{j=1}^9 (\alpha_{ij} - \beta_{ij})^2}{27 \times 9} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $\alpha$  مقدار خروجی مطلوب از سیستم فازی طراحی و  $\beta$  مقدار خروجی واقعی از سیستم فازی است. خروجی مطلوب به نحوی فرض شده است، که برای مثال اگر داده های مربوط به یک خرابی به سیستم فازی اعمال شد، قانون مربوط به آن خرابی خروجی یک بدهد و خروجی قوانین دیگر صفر باشد.

برای تولید نسل بعدی بر اساس مقادیر به دست آمده از تابع هدف، بهترین افراد در نسل حاضر با نرخ یک کپی می شوند. برای تولید بقیه افراد باید از عمل قسمت های ژنتیکی استفاده شود. عملگر تقاطع عملگر ترکیبی است که شامل سه عمل است: اول یک جفت رشته بصورت تصادفی انتخاب می شوند، دوم محلی برای عمل تقاطع به صورت تصادفی در طول رشته انتخاب شده و سرانجام در سومین مرحله مقدار دو رشته را با توجه به محل تقاطع جابه جا می کند. نرخ این عمل برای تولید فرزند 8 در نظر گرفته شده است. عملگر دیگر در الگوریتم ژنتیک، عملگر جهش، که عبارت است از اعمال تغییرات تصادفی به یک فرد از جمعیت برای تولید فرزند که نرخ آن 2 در نظر گرفته شده است. با

جدول 4 خروجی قوانین فازی با داده های فرکانسی مختلف

Table 4 Output of fuzzy rules with different frequency data

خروجی قانون	خروجی قانون	خروجی قانون	خروجی قانون	خروجی قانون	خروجی قانون	خروجی قانون	شدت خرابی	محل خرابی
7	6	5	4	3	2	1		
0.32	0.97	0.08	0.63	0.76	0.34	1	سالم	سالم
0.16	0.21	0.76	0.13	0.54	1	0.34	شدت 50%	خرابی در فاصله
0.26	0.28	0.21	0.11	1	0.32	0.34	شدت 80%	50 سانتی
0.43	0.06	0.11	1	0.42	0.41	0.25	شدت 50%	خرابی در فاصله
0.32	0.08	1	0.42	0.27	0.42	0.31	شدت 80%	100 سانتی
0.14	1	0.31	0.59	0.44	0.54	0.13	شدت 50%	خرابی در فاصله
1	0.19	0.23	0.60	0.54	0.68	0.12	شدت 80%	150 سانتی

انجام روند فوق نقاط بهینه برای مراکز و دامنه توابع فازی پس از 100 تکرار و مقدار تابع هدف برابر 0.69 بدست آمده است.

برای آزمایش سیستم فازی طراحی شده مقادیر اختلاف فرکانسی به عنوان ورودی به سیستم اعمال شده است، به علاوه برای به دست آوردن خروجی سیستم فازی، میانگین خروجی های توابع فازی مربوط به نود اختلاف فرکانسی به عنوان خروجی سیستم فازی منظور شده است. جدول 4 این خروجی ها را نشان می دهد. چنانچه در این جدول مشخص است، در هر حالت خرابی سیستم فازی توانسته بزرگترین خروجی که یک است، را تولید کند و مکان و شدت تمامی خرابی ها را به درستی پیش بینی کند.

پس از مرحله آموزش (کلاس بندی فازی) که با استفاده از 10 آزمایش اول صورت گرفت، روش پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار می گیرد. بدین منظور از 10 آزمایش دیگر که در مرحله آموزش استفاده نگردیده است برای صحت سنجی مورد استفاده قرار می گیرد. در این حالت مشابه حالت آموزش، ویژگی ها استخراج گردیده و به عنوان ورودی، وارد سیستم فازی می گردد و شماره کلاس بعنوان خروجی دریافت می گردد. با مقایسه این شماره کلاس با شماره کلاس صحیح در هر شبیه سازی، درصد موفقیت مانند فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$S_R = \left( \frac{N_C}{N} \right) \times 100 \quad (11)$$

که در آن  $N$  تعداد کل نمونه های شبیه سازی شده و  $N_C$  تعداد نمونه های درست تشخیص داده شده در کلاس متناظر در جدول 5 می باشد در این جدول، درصد موفقیت هر نوع خرابی درج شده و در نهایت درصد موفقیت متوسط نیز اعلام گردیده است. همچنین به منظور مطالعه تاثیر نویز اندازه گیری شده، نویز با درصدهای متفاوت بر روی مشخصه های استخراجی اعمال گردیده و سپس درصد موفقیت برای هر کلاس نشان داده شده است. نویز نیز باعث بروز خطا در داده های اندازه گیری شده می شود. اگرچه استفاده از تجهیزات مدرن این نوع از مزاحمت را کم کرده است، اما هیچ گاه نمی توان آن را حذف کرد. بنابراین سیستم تشخیص خرابی نباید تنها با مقادیر ایده آل کار کند، بلکه باید توانایی کار با داده های نویز دار را نیز داشته باشد. در این تحقیق عدم قطعیت در مدلسازی و نویز اندازه گیری به مقادیر تفاضل فرکانسی اضافه شده است.

برای این منظور از رابطه زیر استفاده گردیده است. در رابطه 12 عدد تصادفی  $u$  در بازه  $[-1,1]$  انتخاب می شود و  $\alpha$  سطح نویز را نشان می دهد [19]:

$$\Delta\omega_{\text{noisy}} = \Delta\omega + \alpha u \quad (12)$$

پارامتر  $\alpha$  ماکزیمم واریانس میان مقدار  $\Delta\omega$  و مقدار شبیه سازی شده  $\Delta\omega_{\text{noisy}}$  را معین می کند. برای مثال اگر  $\alpha=0.1$  باشد، مقدار  $\Delta\omega_{\text{noisy}}$  به

- [2] Y. Araki, Y. Miyagi, Mixed integer nonlinear least-squares problem for damage detection in truss structures, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, No. 7, pp. 659–667, 2005.
- [3] M. Ge, E. Lui, Structural damage identification using system dynamic properties, *Computers & Structures*, Vol. 83, No. 27, pp. 2185–2196, 2005.
- [4] L. Jiang, K. Wang, An enhanced frequency-shift-based damage identification method using tunable piezoelectric transducer circuitry, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 799–808, 2006.
- [5] Z. R. Lu, J. K. Liu, M. Huang, W. H. Xu, Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 326, No. 2, pp. 177–189, 2009.
- [6] Z. Lina Ding, R. Hong Hao, I. Xinqun Zhu, Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, No. 4, pp. 826–848, 2009.
- [7] H.O. Jean-Charles Wyss, J. Di Su, T. Yozo Fujino, Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge, *Engineering Structures*, Vol. 33, No. 1, pp. 1088–1097, 2011.
- [8] S.Q. Wu, S.S. Law, Vehicle axle load identification on bridge deck with irregular road surface profile, *Engineering Structures*, Vol. 33, No. 3, pp. 591–601, 2011.
- [9] S.G.M. Neves, A.F.M. Azevedo, R. Calçada, A direct method for analyzing the vertical vehicle–structure interaction, *Engineering Structures*, Vol. 34, No. 12, pp. 414–420, 2012.
- [10] S.Q. Wu, S.S. Law, Evaluating the response statistics of an uncertain bridge–vehicle system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 27, No. 11, pp. 576–589, 2012.
- [11] C. Na, S. Kim, H. Kwak, Structural damage evaluation using genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 12, pp. 2772–2783, 2011.
- [12] G. Marano, G. Quaranta, G. Monti, Modified genetic algorithm for the dynamic identification of structural systems using incomplete measurements, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 92–110, 2011.
- [13] V. Mosquera, A. Smyth, R. Betti, Rapid evaluation and damage assessment of instrumented highway bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41, No. 4, pp. 755–774, 2012.
- [14] C. Loh, C. Mao, J. Huang, T. Pan, System identification and damage evaluation of degrading hysteretic of reinforced concrete frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, No. 6, pp. 623–640, 2010.
- [15] R. Ganguli, A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 12, No. 6, pp. 397–407, 2001.
- [16] M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, M. Sedighi, Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 1–9, 2016. (in Persian فارسی)
- [17] R. Hasannezhad-Gadim, Sh. Tasojian, M.R. Alipor, Breathing crack identification in beam-type structures using cat swarm optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 24–17, 2015. (in Persian فارسی)
- [18] F. Xianfeng, J. Mingzuo, Gearbox fault detection using empirical mode decomposition, *ASME International Mechanical Congress and Exposition*, Vol. 12, No. 4, pp. 456–467, 2004.
- [19] Y. Dejie, Z. Junsheng, Y. Cheng, Y. Yang, Application of EMD method and Hilbert Spectrum to the fault diagnosis of roller bearings, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 19, No. 3, pp. 259–270, 2003.
- [20] N. E. Huang, The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 454, No. 5, pp. 903–995, 2002.
- [21] P. Beena, R. Gangul, Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning, *Journal of Applied Soft Computing*, Vol. 12, No. 3, pp. 132–144, 2010.

جدول 5 پیش بینی‌های درست سیستم فازی به ازای سطوح مختلف نویز

Table 5 Amount of SR

	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	
قانون 1	81.9	88.3	91.2	98.3	
قانون 2	76.4	81.3	89.4	99.3	
قانون 3	70.3	74.3	81.3	97.4	
قانون 4	69.9	76.6	85.5	98.5	
قانون 5	71.1	86.6	90.4	96.8	
قانون 6	61.2	71.2	88.4	92.5	

مقدار ده درصد می‌تواند از مقدار  $\Delta\omega$  متفاوت باشد. بنابراین  $\alpha$  برای کنترل میزان نویز در داده‌های ورودی به سیستم فازی استفاده شده است.

برای بررسی عملکرد سیستم تشخیص خرابی، به ازای هر سطح نویز، داده‌های فرکانسی تیر با استفاده از رابط 12 به نویز آلوده شده‌اند و بعد از آن به سیستم فازی اعمال شده‌اند که میزان نتایج درست شناسایی خرابی از رابط 12 محاسبه شده است. جدول 5 میزان نتایج درست در سطوح مختلف نویز را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشاهده می‌گردد که اولاً در حالت نویز 0.05 عیب یابی به نحو احسن در تمامی کلاس‌های عیب، انجام گرفته و با درصد‌های بسیار بالایی موفق بوده است. ثانیاً با زیاد شدن نویز، همانطوری که قابل انتظار است، قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص موفق کلاس‌های عیب کاسته می‌شود ولی با این حال امکان شناسایی وجود دارد که این امر برتری این روش را نشان می‌دهد.

همان طوری که جدول 5 نشان می‌دهد نتایج بدست آمده از 10 آزمایش دیگر که در مرحله آموزش مورد استفاده قرار نگرفته بودند، در این مرحله به سطح‌های مختلف نویز آلوده شده و سپس در الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج بالای جدول، نشان دهنده صحت و قدرت روش پیشنهادی می‌باشد.

## 7- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سیستم جدید مکانیکی پرتابل هوشمند جهت شناسایی خرابی در سازه‌های تیری شکل با استفاده از الگوریتم فازی-ژنتیک معرفی گردیده است که این سیستم توانایی تشخیص مکان و شدت خرابی را دارد. برای بدست آوردن ویژگی‌ها از روش EMD برای اولین بار استفاده شده است که با این روش تاریخچه شتاب-زمان به اجزای اصلی خود که هر کدام در محدوده فرکانسی مشخصی قرار دارند، تجزیه شده است. سپس با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه، فرکانس غالب هر IMF‌ها بعنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک استخراج می‌گردد. سیستم خرابی یاب توانایی شناسایی مکان و شدت خرابی را در تمامی حالات مختلف دارد، که این امر یکی از برتری‌های این تحقیق نسبت به کارهای گذشته است.

## 8- مراجع

- [1] M. A. Lotffolahi-Yaghin, M. Koohdaragh, Examining the function of wavelet packet transform (WPT) and continuous wavelet transform (CWT) in recognizing the crack specification. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 497–506, 2011.