

## شناسایی عیوب لوله‌های حامل سیال با استفاده از روش ردگیری اندرکنش دینامیکی بار متحرک خارجی

مهدی کوهدرق<sup>۱\*</sup>، محمدعلی لطف‌اللهی یقین<sup>۲</sup>، میرمحمد اتفاق<sup>۳</sup>، علیرضا مجتهدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

لوله‌های حامل سیال در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع پتروشیمی، نفت، گاز، خطوط انتقال در سازه‌های هیدرولیکی به کار گرفته می‌شود. در آسیب‌های ناشی از ارتعاش مخرب لوله‌هایی که اجزای یک نیروگاه یا دیگر تأسیسات صنعتی را به یکدیگر مرتبط می‌نمایند، یکی از دلایل اصلی در از بین رفتن زمان تولید، خرابی و در نهایت آتش‌سوزی در تأسیسات صنعتی به شمار می‌رود. بنابراین حصول به روشی به‌عنوان شناسایی خرابی در لوله‌های حامل سیال از ضرورت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این پژوهش، ابتدا بررسی اثر جریان داخلی سیال بر مشخصه‌های ارتعاشی یک لوله در قالب روش‌های تئوری می‌باشد. سپس به‌منظور تحلیل ارتعاش اجباری لوله حامل سیال، اثر عبور بار متحرک خارجی مدنظر قرار می‌گیرد و در ادامه روشی برای شناسایی خرابی در لوله‌ها مبتنی بر روش الگوریتم فازی-ژنتیک پیشنهاد می‌گردد. در ابتدا، دستگاه معادلات دینامیکی سیستم یک لوله حامل سیال، همراه با بار متحرک خارجی که شامل برهم‌کنش سه‌گانه میان لوله و سیال و بار متحرک مدل‌سازی می‌شود و سپس بعد از حل معادله ارتعاشی سیستم، تاریخچه زمانی شتاب از نقطه میانی لوله برداشت می‌شود. سیگنال‌های به دست آمده شتاب، با استفاده از روش تبدیل فوریه از قلمرو زمان به قلمرو فرکانس انتقال داده می‌شوند که این فرکانس‌ها به‌عنوان ویژگی برای روشی جدید بر مبنای الگوریتمی فازی-ژنتیک برای یافتن آسیب در لوله دو سر مفصل مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش معرفی‌شده قادر به شناسایی محل و میزان آسیب در لوله می‌باشد. این الگوریتم برای پیدا کردن مکان آسیب در طول لوله طراحی شده که قادر به یافتن مکان آسیب از روی الگوی تغییرات فرکانسی لوله بین حالت سالم و معیوب لوله است و برای پیدا کردن مقدار آسیب نیز از تغییرات کمی فرکانس بهره گرفته شده است.

**کلمات کلیدی:** شناسایی عیوب، لوله‌های حامل سیال، اندرکنش دینامیکی، بار متحرک

## Damage Detection in Fluid-Conveying Pipe Using Dynamic Interaction Tracking of Moving Load Method

Mehdi Kouhdaragh<sup>1\*</sup>, Mohamad Ali Lotfollahi Yaghin<sup>2</sup>, Mir Mohamad Etefagh<sup>3</sup>, Alireza Mojtahedi<sup>4</sup>

1- Ph.D. Student in Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* نویسنده مسئول: مهدی کوهدرق، m-kouhdaragh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۳/۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۶/۲۹

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

Fluid conveying pipe used in different fields such as petrochemical, oil, gas, hydraulic structures in transmission lines. The damage caused by vibrations damaging pipes or other components of a power plant industrial plants are related to each other, one of the main reasons for the loss of production time is considered damage and ultimately fires in industrial plants. So make a way as to identify damage in the fluid conveying pipe is of particular importance. The purpose of this study, the effect of the fluid inside the pipe vibration characteristic is a theoretical approach. Then for forced vibration analysis of fluid pipe considered passes through the external moving oscillator. And then a method to detect damage in pipes recommended based on fuzzy-genetic algorithm. First, fluid conveying pipe dynamic equations, modeled interaction between external moving, pipe and fluid then solving vibration system, acceleration time history extracted from midpoint of pipe. Subsequently, a new method of damage detection in simply supported pipe 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 damage location along the beam, which can detect the damage location based on the pattern of beam frequency variations between undamaged and damaged states. The severity of damage is assessed based on quantitative variations in frequencies.

**Keywords:** Damage detection, Fuzzy-genetic algorithm, EMD, STFT, Fluid conveying pipe

### ۱- مقدمه

لوله‌های حامل سیال در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع پتروشیمی، نفت، گاز، خطوط انتقال در سازه‌های هیدرولیکی، تأسیسات صنعتی به کار گرفته می‌شود. در این پژوهش توجه بیشتر به لوله‌هایی معطوف است که سیال مایع را با سرعت مشخصی از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌نمایند. در یک تقسیم‌بندی کلی لوله‌ها را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی نمود. گروه اول لوله‌هایی هستند که تنها سیال را از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌نمایند. گروه دوم لوله‌هایی هستند که در به‌کارگیری آنها علاوه بر انتقال سیال، اهداف دیگری همچون انتقال حرارت نیز دنبال می‌شود. علاوه بر این آسیب‌های ناشی از ارتعاش مخرب لوله‌هایی که اجزای یک نیروگاه یا دیگر تأسیسات صنعتی را به یکدیگر مرتبط می‌نمایند. از آنجایی که عیب و ازکارافتادگی در سازه‌ها می‌تواند منجر به هدر رفتن منابع انسانی و مالی شود، شناسایی آسیب 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 مدال) تابعی از پارامترهای فیزیکی (جرم، میرایی، سختی) هستند و بنابراین فرض اینکه وجود عیب منجر به تغییر در مشخصات مودال سازه می‌شود منطقی است [۱]. به‌طور معمول اطلاعات اولیه به‌منظور مقایسه، می‌تواند از 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 [۲-۵]. از میان پارامترهای مودال، فرکانس طبیعی از آنجاکه راحت‌تر و با دقت بیشتری می‌تواند اندازه‌گیری شود، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه هر سیستم شناساگر آسیب به چند بخش تقسیم می‌شود که عبارت از کشف آسیب، شناسایی مکان آسیب، شناسایی میزان آسیب، پیش‌بینی میزان عمر آسیب هستند. به‌منظور به دست آوردن عملکرد خوب نیاز به مدل کردن ریاضی خیلی دقیق سیستم‌های مانیتور شده وجود دارد. خطاهای مدل‌سازی می‌تواند بر عملکرد سیستم‌های عیب‌یابی تأثیر بگذارد، بخصوص زمانی که سیستم‌های مانیتور شده غیرخطی باشند. استفاده از روش‌های هوش محاسباتی ممکن است خطاهای مدل‌سازی را جبران کند، به‌طوری‌که این روش‌ها تقریب خوبی از سیستم‌های غیرخطی ارائه می‌دهند. کپایو و همکارانش روش تبدیل موجک را با فوریه سریع برای شناسایی تغییرات سختی در یک قاب دوبعدی سه طبقه مورد مقایسه قرار دادند که نتایج نشان داده است که روش موجک قدرت شناسایی بالایی دارد [۶]. بانرجی برای شناسایی

خرابی از روش‌های پردازش سیگنال استفاده کرده است که برای این منظور از Kalman Filter برای شناسایی خرابی در یک خرپای ۴ دهانه بهره گرفته است [۷]. کیجی ویسکی و همکارانش پایش سلامت بلندترین سازه جهان به نام کالیفرنیا را با روش موجک انجام داده است [۸]. نا و همکارانش از روش الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تغییرات سختی در یک قاب برشی ۲۰ طبقه استفاده کرده است [۹]. مارانو و همکارانش از روش الگوریتم ژنتیک برای شناسایی خرابی در یک قاب برشی با اندازه‌گیری‌های ناقص استفاده کرده است [۱۰]. موسکوریا و همکارانش از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تغییرات جابجایی بر روی یک پل دودهنه در El Centro استفاده کرده است [۱۱]. لوح و همکارانش یک ترک سه‌بعدی را در سازه مدل کرده است و با استفاده از تبدیل‌های موجک و فوریه خرابی را در یک قاب RC که روی میز لرزان قرار داده شده است، شناسایی کردند [۱۲]. گانگولی و همکارانش آسیب را به‌صورت کاهش سختی در مدول الاستیسیته نشان دادند و با استفاده از منطق فازی محل و شدت آسیب را در پره هلیکوپتر معین نمودند [۱۳].

در این مقاله دینامیک برهم‌کنش یک خودرو و یک لوله حامل سیال، مطالعه می‌شود [۱۴]. مدل بار متحرک شامل یک جرم متمرکز، فنر الاستیک خطی و میرا کننده ویسکوز می‌باشد که با سرعت ثابت از روی لوله عبور می‌کند. لوله دارای تکیه‌گاه‌های ساده بوده و از تئوری تیر اوایلر-برنولی تبعیت می‌کند. معادلات حاکم بر حرکت سیستم با استفاده از اصل همپلتون ارزیابی می‌شوند. سپس تاریخچه شتاب-زمان در نقطه میانی لوله استخراج می‌گردد. برای تبدیل سیگنال ارتعاش 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 EMD معرفی و قابلیت‌های آن برای تشخیص عیب بررسی شده است. سپس IMFs های به دست آمده از روش EMD با استفاده از روش تبدیل فوریه از محدوده زمان به محدوده فرکانس تبدیل می‌گردد که در ادامه از ماکزیمم فرکانس هر IMFs، به‌عنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. که با الگوریتم فازی-ژنتیک محل و شدت خرابی در سازه شناسایی می‌گردد.

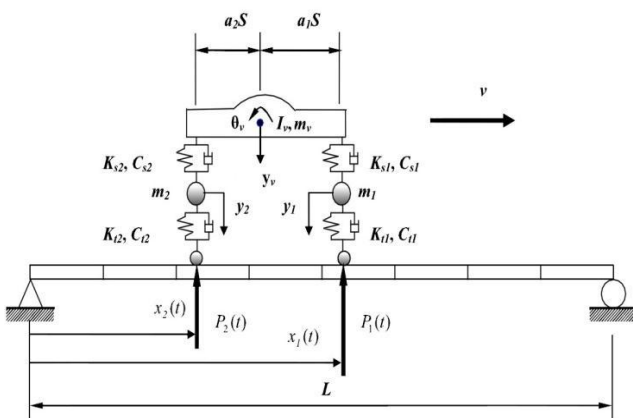
## ۲- مدل‌سازی سیستم ارتعاشی لوله حامل سیال و بار متحرک

مراحل لازم جهت به نتیجه رسیدن هدف را در قالب سه بخش اصلی می‌توان تقسیم‌بندی نمود

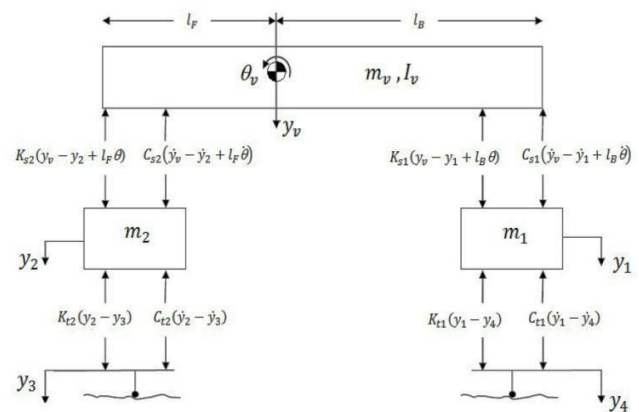
۱) مدل‌سازی سیستم ارتعاشی تیر و ارابه، ۲) تعمیم مدل به سیستم ارتعاشی لوله و ارابه، ۳) مشخصات لوله و وسیله نقلیه

### ۲-۱- استخراج معادله حرکت بار متحرک

بار متحرکی که به‌صورت مدل نصف بار متحرک با ۴ درجه آزادی که با سرعت ثابت  $V$  روی تیر با تکیه‌گاه‌های ساده حرکت می‌کند، در شکل ۱ و ۲ مدل شده است [۱۴].



شکل ۱: سیستم تیر- بار متحرک



شکل ۲: دیاگرام آزاد سیستم تیر- بار متحرک

چهار درجه آزادی این بار متحرک شامل: حرکت عمودی  $y_1$  جرم فنربندی نشده  $m_1$ ، حرکت عمودی  $y_2$  جرم فنربندی نشده  $m_2$ ، حرکت عمودی  $y_3$  جرم فنربندی شده  $m_3$  که به حرکت عمودی معروف است و حرکت زاویه‌ای  $\theta_v$  جرم فنربندی شده. این سیستم ارتعاشی تابع تحریک پایه است که توسط جابجایی‌های  $y_1$  و  $y_2$  تأمین شده است. همه جابجایی‌ها نسبت به وضعیت استاتیکی خود سنجیده می‌شوند و تغییر زاویه  $\theta_v$  کوچک فرض می‌شود. به کمک قانون دوم نیوتون معادلات حرکت هر یک از چهار درجه آزادی بار متحرک مدل شده، که بعد از ساده‌سازی، به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_v \\ \ddot{\theta}_v \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & l_F C_{s2} - l_B C_{s1} & -C_{s1} & -C_{s2} \\ l_F C_{s2} - l_B C_{s1} & l_B^2 C_{s1} + l_F^2 C_{s2} & l_B C_{s1} & -l_F C_{s2} \\ -C_{s1} & l_B C_{s1} & C_{s1} + C_{t1} & 0 \\ -C_{s2} & -l_F C_{s2} & 0 & C_{s2} + C_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & l_F K_{s2} - l_B K_{s1} & -K_{s1} & -K_{s2} \\ l_F K_{s2} - l_B K_{s1} & l_B^2 K_{s1} + l_F^2 K_{s2} & l_B K_{s1} & -l_F K_{s2} \\ -K_{s1} & l_B K_{s1} & K_{s1} + K_{t1} & 0 \\ -K_{s2} & -l_F K_{s2} & 0 & k_{s2} + K_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_v \\ \theta_v \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (C_{t1})\dot{y}_4 + (K_{t1})y_4 \\ (C_{t2})\dot{y}_3 + (K_{t2})y_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

چون مقادیر  $y_1$  و  $y_2$  مشخص نیستند، می‌توان ماتریس  $P(t)$  را به صورت زیر تعریف کرد:

$$P(t) = \begin{bmatrix} (C_{t1})\dot{y}_4 + (K_{t1})y_4 \\ (C_{t2})\dot{y}_3 + (K_{t2})y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1 + a_2 m_v)g + K_{t1} (y_1 - w(\hat{x}_1(t), t) - r(\hat{x}_1(t))) + C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{w}(\hat{x}_1(t), t)) \\ (m_2 + a_1 m_v)g + K_{t2} (y_2 - w(\hat{x}_2(t), t) - r(\hat{x}_2(t))) + C_{t2} (\dot{y}_2 - \dot{w}(\hat{x}_2(t), t)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

که نشان می‌دهد  $P(t)$  از مجموع نیروهای استاتیکی ناشی از وزن بار متحرک و نیروهای ناشی از برهم‌کنش تیر-بار متحرک به دست می‌آید. در رابطه ۲،  $r(x)$  ناهمواری سطح روی تیر در نقطه  $x$ ،  $\hat{x}_1(t)$  و  $\hat{x}_2(t)$  به ترتیب موقعیت محور جلو و عقب بار متحرک در زمان  $t$ ،  $g$  شتاب گرانش،  $w(\hat{x}_1(t), t)$  و  $w(\hat{x}_2(t), t)$  به ترتیب خیز عمودی بدنه تیر در نقطه اثر نیروی جلو و عقب در زمان  $t$  است. نقطه (.) نشانگر مشتق نسبت به زمان است. برای ساده‌سازی شکل معادلات حرکت فرض‌های زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} M_{V1} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & I_v \end{bmatrix}; & M_{V2} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; & C_{V11} &= \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & l_F C_{s2} - l_B C_{s1} \\ l_F C_{s2} - l_B C_{s1} & l_B^2 C_{s1} + l_F^2 C_{s2} \end{bmatrix}; & (3) \\ C_{V21} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & l_B C_{s1} \\ -C_{s2} & -l_F C_{s2} \end{bmatrix}; & C_{V22} &= \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{s2} + C_{t2} \end{bmatrix}; & C_{V12} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & -C_{s2} \\ l_B C_{s1} & -l_F C_{s2} \end{bmatrix} \\ K_{V12} &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & -K_{s2} \\ l_B K_{s1} & -l_F K_{s2} \end{bmatrix}; & K_{V11} &= \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & l_F K_{s2} - l_B K_{s1} \\ l_F K_{s2} - l_B K_{s1} & l_B^2 K_{s1} + l_F^2 K_{s2} \end{bmatrix} \\ K_{V22} &= \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{t1} & 0 \\ 0 & k_{s2} + K_{t2} \end{bmatrix}; & K_{V21} &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & l_B K_{s1} \\ -K_{s2} & -l_F K_{s2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$; C_t = \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix}; K_t = \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix}; P_0 = \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v)g \\ (m_2 + a_1 m_v)g \end{Bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} y_v \\ \theta_v \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

در نتیجه رابطه ۳ را می توان به صورت رابطه ۴ نوشت

$$\begin{bmatrix} M_{V1} & 0 \\ 0 & M_{V2} \end{bmatrix} \ddot{Y} + \begin{bmatrix} C_{V11} & C_{V12} \\ C_{V21} & C_{V22} \end{bmatrix} \dot{Y} + \begin{bmatrix} K_{V11} & K_{V12} \\ K_{V21} & K_{V22} \end{bmatrix} Y = \begin{bmatrix} 0 \\ P(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

که همان «معادله حرکت بار متحرک» است. برای به دست آوردن پاسخ دینامیکی گره های فرض شده روی تیر بر اثر عبور بار متحرک، روش عددی نیومارک-بتا مورد استفاده قرار می گیرد [۱۴]. سپس تاریخچه شتاب- زمان برای نقطه میانی از تیر استخراج می گردد که این سیگنال ها با استفاده از روش EMD به مدهای اصلی خود تجزیه می گردد که در قسمت بعد، توضیح داده خواهد شد.

### ۲-۲- تعمیم مدل به سیستم ارتعاشی لوله و ارابه

با تحلیلی مشابه حالت فوق، مسئله برای لوله تکرار می گردد و ماتریس جرم و سختی و میرایی علاوه بر حالت قبل، به دلیل وجود سیال محاسبه گردیده و به شرح زیر می باشد:

$$M_w = \frac{(m_p + m_f)l_g}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22 & 54 & -13 \\ 22 & 4 & 13 & -3 \\ 54 & 13 & 156 & -22 \\ -13 & -3 & -22 & 4 \end{bmatrix} + \frac{\hat{I}_p + \hat{I}_f}{30 * l_g} \begin{bmatrix} 36 & 3 & -36 & 3 \\ 3 & 4 & -3 & -1 \\ -36 & -3 & 36 & -3 \\ 3 & -1 & -3 & 4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_w = \frac{E_p I_p}{l_g^3} \begin{bmatrix} 12 & 6 & -12 & 6 \\ 6 & 4 & -6 & 2 \\ -12 & -6 & 12 & -6 \\ 6 & 2 & -6 & 4 \end{bmatrix} - \frac{m_f v^2}{30 * l_g} \begin{bmatrix} 36 & 3 & -36 & 3 \\ 3 & 4 & -3 & -1 \\ -36 & -3 & 36 & -3 \\ 3 & 1 & -3 & 4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_w = \frac{v * m_f}{30} \begin{bmatrix} -30 & 6 & 30 & -6 \\ -6 & 0 & 6 & -1 \\ -30 & -6 & 30 & 6 \\ 6 & 1 & -6 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$m_p$  جرم در واحد طول لوله،  $m_f$  جرم در واحد طول سیال،  $L$ : طول لوله،  $I_p$  و  $I_f$ : به ترتیب ممان اینرسی سطحی سیال و لوله و  $v$ : سرعت سیال

### ۲-۳- مشخصات لوله و وسیله نقلیه

برای این منظور یک لوله دوسر مفصل به همراه یک وسیله نقلیه که روی آن قرار دارد مورد استفاده قرار می گیرد. لوله با استفاده از روش المان محدود به ۸ قسمت تقسیم می گردد. جدول ۱ و ۲ مشخصات کامل هندسی و فیزیکی لوله و وسیله نقلیه را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات لوله و سیال

مدول الاستیسیته	$70 \text{ GN/m}^2$
مساحت سطح مقطع	$200 \text{ mm}^2$
طول لوله	$820 \text{ Mm}$
ممان اینرسی	$I_x = 166677 \text{ mm}^4, I_y = 166677 \text{ mm}^4$
چگالی	$2700 \text{ kg/m}^3$
جرم در واحد طول سیال و $v$ : سرعت سیال	$700 \text{ kg/m}^2, 0/1 \text{ m/s}$

جدول ۲: مشخصات بار متحرک

$V=2; mv=5; m1=0/050; m2=0/050; Iv=0/0083; S=0/05; a1=0/5; a2=0/5; Ks1=490/50; Ks2=490/50; Kt1=4900/500; Kt2=4900/500; Cs1=0/2; Cs2=0/2; Ct1=0/2; Ct2=0/2; I=0/0000167;$
--

### ۳- معرفی روش EMD

روش EMD براساس این فرض ساده پایه‌گذاری شده است که هر سیگنال متشکل از اجزاء اساسی خود می‌باشد. براساس این روش هر سیگنال را می‌توان به تعدادی سیگنال که باید دو شرط زیر را برآورده کند تجزیه کرد [۱۵].

✓ اختلاف تعداد اکسترمم‌ها و صفرهای سیگنال باید حداکثر برابر یک باشد.

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

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

۱- تعیین همه نقاط ماکزیمم و مینیمم‌های محلی یک سیگنال

۲- اتصال نقاط ماکزیمم را با Spline درجه سه به یکدیگر. انجام همین عمل برای نقاط مینیمم منحنی

۳- محاسبه مقدار متوسط خطوط Spline 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.

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (8)$$

مقدار  $h_1$  اولین عضوی است که باید بررسی شود که آیا IMFs هست یا خیر. برای این کار باید دو شرط IMFs چک گردد. در صورت IMF بودن،  $h_1$  به عنوان 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 پروسه بالا مجدداً تکرار می‌شود.

$$\begin{aligned} r_1 &= x(t) - c_1 \\ r_{n-1} - c_n &= r_n \end{aligned} \quad (9)$$

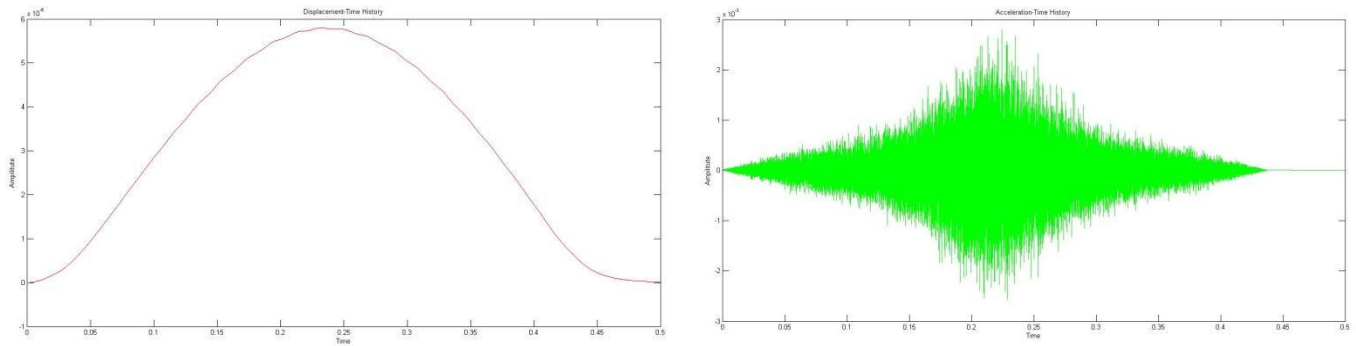
۴- اگر  $h_1$  جزء IMFs نباشد، به عنوان یک سیگنال مبنا عمل می‌کند و مراحل ۱، ۲، ۳ تکرار می‌گردد. این مراحل را تا  $k$  مرحله تکرار کرده تا به مرحله‌ای برسیم که جزء IMFs باشد.

$$\begin{aligned} h_l - m_{ll} &= h_{ll} \\ c_l &= h_{lk} \\ sd &= \sum_f \left[ \frac{|h_{n-1}(t) - h_n(t)|^2}{h_{n-1}^2(t)} \right] < \varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

این پروسه تجزیه وقتی کامل می‌شود که  $I_n$  تابع یکنواخت باشد. برای این موضوع شرط باید نمایش داده شده در رابطه فوق چک گردد.  $n$  مراحل انجام این پروسه می‌باشد و  $\varepsilon$  بین  $0/2$  تا  $0/3$  در نظر گرفته می‌شود. اگر تابع  $I$  شرط بالا را داشته باشد، الگوریتم تمام می‌باشد در غیر این صورت مجدداً باید مراحل قبل تکرار شود. پس از اتمام مراحل تجزیه، سیگنال اولیه را می‌توان به صورت رابطه زیر نمایش داد.

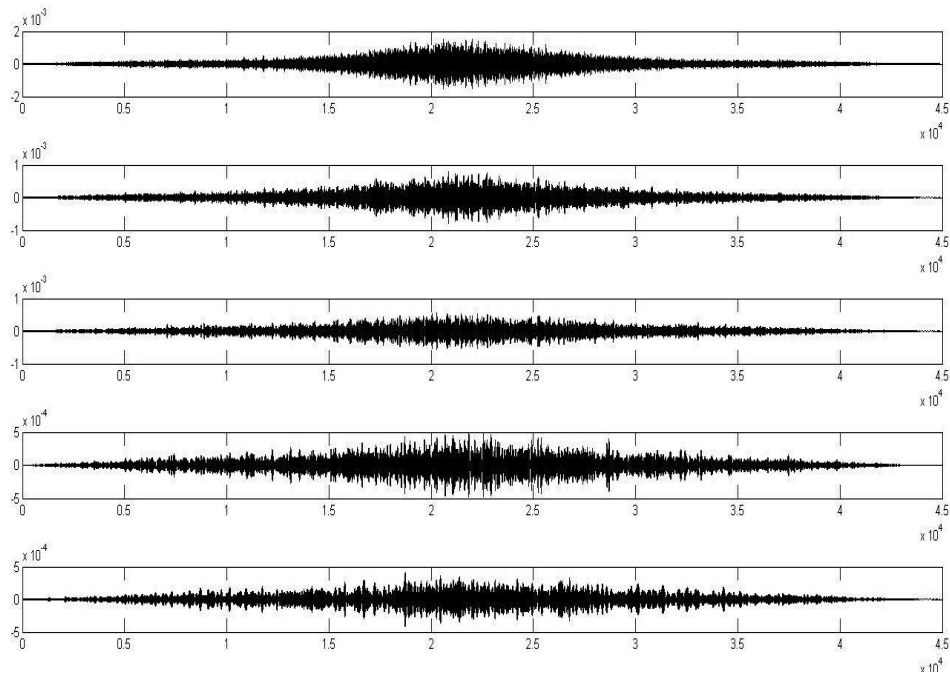
$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (11)$$

سیگنال تاریخیچه شتاب و جابجایی- زمان برای حالت سالم در نقطه میانی از لوله برداشت گردیده و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل دیده می‌شود از لحظه‌ای که بار متحرک وارد می‌گردد، لوله شروع به نوسان کرده که این نوسانات با عبور بار متحرک از روی لوله کاهش پیدا کرده و با گذشت زمان به حالت سکون می‌رسد.

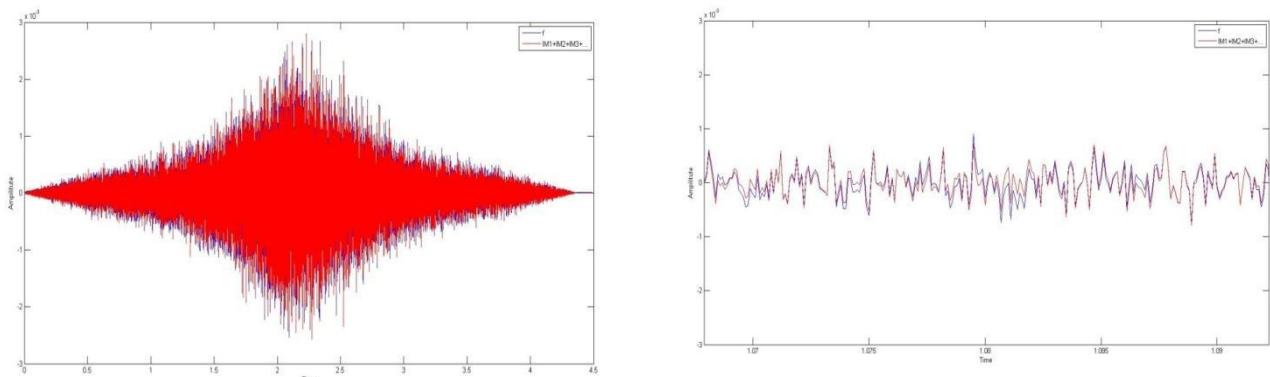


شکل ۳: تاریخچه زمانی برای تیر سالم. الف) شتاب ب) جابجایی

سپس همین سیگنال شتاب زمان با استفاده از روش EMD به شش IMFs تبدیل می‌گردد که می‌توان ادعا نمود که هرکدام از این IMFsها جزءهای فرکانسی از سیگنال اولیه می‌باشند که در شکل ۴ نشان داده شده است. با جمع این شش IMFs مستخرج از سیگنال اصلی، می‌توان به سیگنال اولیه رسید که در شکل ۵ به‌عنوان دلیلی برای صحت روش، آورده شده است.



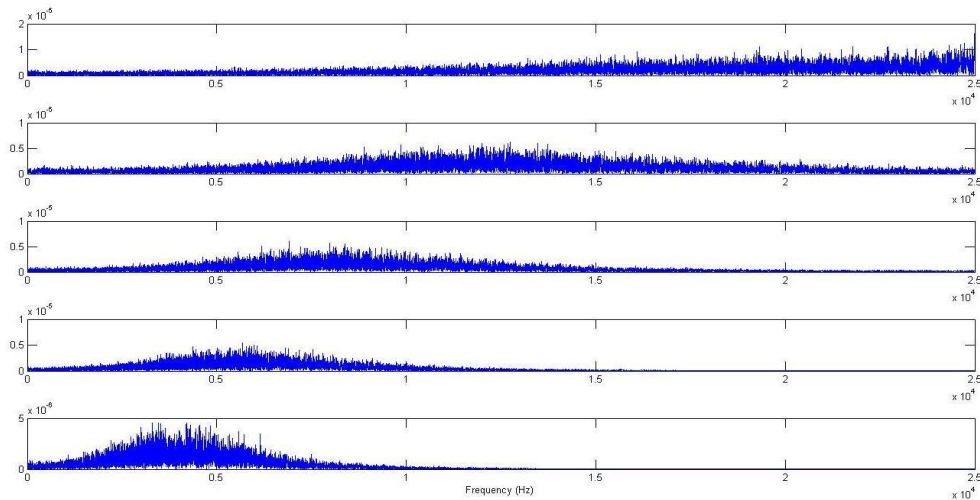
شکل ۴: IMFsهای به دست آمده از سیگنال اصلی



شکل ۵: صحت‌سنجی برای درستی IMFs به دست آمده با سیگنال اصلی



در ادامه با استفاده از تبدیل فوریه سیگنال تاریخیچه شتاب-زمان برای حالت سالم و حالت معیوب با شدت خرابی ۰.۴٪ در المان چهارم از محدوده زمان به محدوده فرکانس تبدیل می‌گردد که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طوری که شکل نشان می‌دهد مقادیر ماکزیمم فرکانس‌ها به نسبت قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به حالت سالم کاهش پیدا نموده‌اند که این امر خود مصداقی بر صحت روش فوق می‌باشد. و همچنین می‌تواند معیار خوبی برای شناسایی آسیب در تیر باشد. زیرا که نسبت به تغییرات آسیب حساس بوده و با تغییر محل و شدت آسیب، این معیار نیز تغییر می‌نماید.



شکل ۶: تبدیل IMFs از محدوده زمان به فرکانس با استفاده از تبدیل فوریه برای حالت سالم

#### ۴- الگوریتم ژنتیک-فازی

##### ۴-۱- مدل‌سازی آسیب

آسیب به صورت کاهش سختی در المان‌های تیر مدل شده است. پارامتر آسیب برحسب درصد از رابطه زیر به دست می‌آید

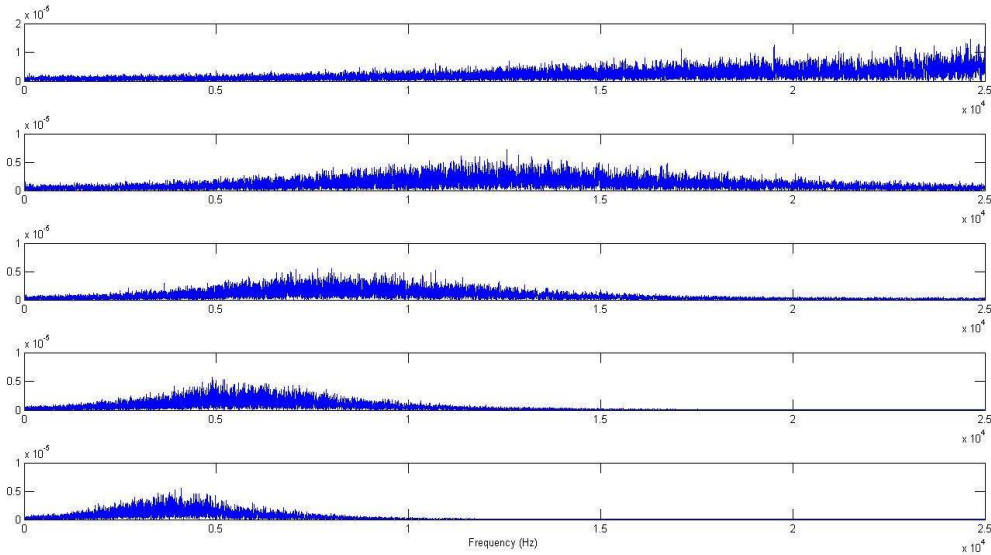
$$D = \frac{E(u) - E(d)}{E(u)} * 100 \quad (12)$$

D میزان کاهش سختی نسبت به تیر سالم در محل آسیب را نشان می‌دهد. اندیس u حالت سالم و اندیس d حالت معیوب سازه را نشان می‌دهد. تیر موردنظر به هشت قسمت مساوی تقسیم شده است. آسیب در هر یک از هشت قسمت به صورت کاهش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی مدول یانگ مدل شده است. این آسیب‌ها به ترتیب آسیب کم، متوسط و شدید نام‌گذاری شده‌اند. همچنین آسیب کمتر از ده درصد به‌عنوان حالت سالم و آسیب بالاتر از ۷۰ درصد آسیب فاجعه بار نامیده شده است (جدول ۳). این‌گونه نام‌گذاری آسیب در قسمت‌های مختلف تیر به راحتی کار با سیستم تشخیص آسیب منجر می‌شود. شاخص آسیب در تیر تفاضل پنج فرکانس طبیعی تیر در حالت سالم و معیوب در نظر گرفته شده است که در حالت بدون بعد به صورت زیر است:

$$\Delta\omega = \frac{\omega(u) - \omega(d)}{\omega(u)} \quad (13)$$

$\Delta\omega$  برابر تفاضل فرکانسی در حالت بدون بعد،  $\omega(u)$  فرکانس طبیعی در حالت سالم و  $\omega(d)$  فرکانس طبیعی در حالت معیوب را مشخص می‌کند. بنابراین ترکیب متفاوت سه سطح مختلف آسیب در مکان‌های مختلف تیر الگوهای مختلفی تولید می‌کند.





شکل ۷: تبدیل IMFها از محدوده زمان به فرکانس با استفاده از تبدیل فوریه برای حالت معیوب

جدول ۳: تفاضل کاهش مدول یانگ نسبت به سطح آسیب به صورت بی بعد

نام آسیب	سالم	کم	متوسط	شدید	فاجعه آور
درصد آسیب	$D < 10$	۱۰-۳۰	۳۰-۵۰	۵۰-۷۰	$D > 70$

## ۵- طراحی سیستم آسیب یاب

سیستم آسیب یاب طراحی شده، از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول وظیفه شناسایی مکان آسیب و بخش دوم وظیفه شناسایی میزان آسیب را دارد. به منظور شناسایی مکان آسیب از منطق فازی بهره گرفته شده است و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساختار آن بهینه شده است. نحوه شناسایی مکان آسیب بدین گونه است که با توجه به اینکه الگوی اختلاف فرکانس در هر مکان سازه در شدت های مختلف آسیب ساختار مشابهی دارد، در هر حالت شبیه سازی مقادیر اختلاف فرکانسی بین ۰ و ۱ نرمال سازی شده اند که مقادیر حاصل در جدول ۲ آمده است. با این عمل ۲۴ حالت آسیب به ۸ طبقه مشابه که هر طبقه مربوط به شبیه سازی آسیب در یک مکان تیر می باشد، تقلیل می یابد که این امر باعث طبقه بندی بهتر این الگوها و در نتیجه دقیق تر بودن آسیب یاب می شود. ورودی سیستم فازی، اختلاف فرکانسی نرمال سازی شده و خروجی آن محل آسیب 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 ۴ است.

جدول ۴: تفاضل فرکانسی نرمال سازی شده بین ۰ و ۱

محل خرابی	شدت خرابی	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_5$
خرابی در گره ۱	کم	۰/۷۵۸۲۰۴	۰/۹۸۷۶	۱	۰/۵۱۱۱۰۱	۰/۲۰۱۹۷۷
	متوسط	۰/۷۷۴۹۶	۱	۰/۹۸۴۳	۰/۶۶۲۷۶	۰/۳۲۳۴
	شدید	۰/۹۱۰۶۸	۰/۹۸۷۶	۱	۰/۷۴۷۸۴	۰/۳۷۵۴۸
خرابی در گره ۲	کم	۱	۰/۱۰۵۴۴۴	۰/۷۶۰۸۱۵	۰/۲۳۴۵۵۲	۰/۶۵۲۴۱۳
	متوسط	۱	۰/۰۳۶۱۹۲	۰/۵۴۳۷۵	۰/۲۰۵۷۵۵	۰/۵۴۳۷۵
	شدید	۰/۹۸۷۶	۰/۰۱۶۷۹۱	۱	۰/۲۶۹۲۶۵	۰/۷۴۱۶۷۵
خرابی در گره ۳	کم	۱	۰/۰۴۴۶۱۳۶	۰/۰۸۴۲۱۶	۰/۱۱۲۷۵۲	۰/۲۵۹۲۶

	متوسط	۰/۹۶۴۳	۰/۰۰۸۵	۰/۰۳۱۰۵۹	۰/۰۸۲۷۳۷	۰/۱۱۶۴۹۳
	شدید	۱	۰/۴۸۶۹۳۹	۰/۰۴۸۶۳۳	۰/۰۲۲۵۳۳	۰/۱۷۲۸۶۹
خرابی در گره ۴	کم	۱	۰/۰۲۹۱۴۵	۰/۱۹۵۷۵	۰/۵۵۷۱۴۸	۰/۰۱۸۶۱۸
	متوسط	۱	۰/۰۴۸۲۸۵	۰/۱۰۸۷۵	۰/۷۵۸۷۲۷	۰/۰۳۰۴۵
	شدید	۱	۰/۰۲۲۲۷۲	۰/۲۹۷۶۲۷	۰/۶۶۰۲۴۳	۰/۰۷۹۴۳۱
	کم	۰/۷۷۰۶۷	۰/۳۱۷۲۵	۰/۸۶۰۸۵	۰/۰۰۸۷	۱
خرابی در گره ۵	متوسط	۰/۵۸۸۸۷	۰/۳۰۹۸۷	۰/۷۷۰۸۵	۰/۰۲۶۱	۱
	شدید	۰/۶۷۸۷۸	۰/۳۰۱۵	۰/۷۷۸۸۶	۰/۰۳۰۲۴	۱
خرابی در گره ۶	کم	۰/۴۱۱۲۱	۰/۱۱۳۳۱	۱	۰/۱۰۲۲۴	۰/۰۵۷۶۹
	متوسط	۰/۴۶۴۴۹	۰/۱۹۳۵	۱	۰/۱۱۷۳۶	۰/۵۹۸۶۸
	شدید	۰/۵۱۲۸۴۷	۰/۳۰۳۹۳	۰/۸۶۰۶۷	۰/۱۰۲۴۲	۰/۵۹۲۳۸
	کم	۰/۷۱۵۰۵	۱	۰/۶۷۸۵۱	۰/۵۳۷۱۲	۰/۰۸۶۲۲
خرابی در گره ۷	متوسط	۰/۵۹۱۲۱	۱	۰/۶۷۵	۰/۴۵۵۰۴	۰/۱۱۲۷۷
	شدید	۰/۷۶۹۹۵	۱	۰/۶۲۸۶۵	۰/۳۵۶۸۵	۰/۰۱۱۲۵
خرابی در گره ۸	کم	۱	۰/۶۴۲۷۸	۰/۳۲۱۳۹	۰/۰۳۲۴۹	۰/۰۳۰۹۶
	متوسط	۱	۰/۷۸۸۰۴	۰/۲۳۹۲۲	۰/۰۲۱۲۴	۰/۰۰۱۰۸
	شدید	۱	۰/۶۸۳۸۲	۰/۳۱۹۶۸	۰/۰۷۴۸۸	۰/۰۳۰۵۱

جدول ۵: توابع فازی گوسی جهت فازی سازی مقادیر عددی

۰-۰/۱۲۵	۰/۱۲۵-۰/۳۷۵	۰/۳۷۵-۰/۶۲۵	۰/۶۲۵-۰/۸۷۵	۰/۸۷۵-۱
(VL) خیلی کم	(L) کم	(M) متوسط	(H) شدید	(VH) خیلی شدید

در گام بعد باید توابع عضویت را تعریف نمود. تابع عضویت، تابعی است که متناسب با داده‌های ورودی به آن خروجی آن عددی بین ۰ و ۱ است. در این تحقیق از توابع عضویت گوسی برای متغیرهای ورودی استفاده شده است. این تابع را می‌توان با رابطه زیر تعریف کرد:

$$\mu(x) = e^{-0.5\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (14)$$

در این رابطه  $m$  نقطه مرکز تابع فازی و  $\sigma$  دامنه آن (انحراف استاندارد) مربوط به متغیرهاست. توابع عضویت فازی گوسی عمومیت زیادی در سیستم‌های 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 تأثیر می‌دهد، نکته مهمی به شمار می‌رود. برای به دست آوردن قوانین فازی با تبدیل اختلاف فرکانسی عددی به عبارات زبانی به هر مکان آسیب یک قانون اختصاص داده شده است. به علاوه سه قانون نیز برای حالات مربوط به وجود آسیب در دو قسمت تیر اختصاص داده شده است. با توجه به تابع عضویت تعریف شده در مرحله قبل درجه عضویت مرتبط با هر اختلاف فرکانس به دست آمده است. هر اختلاف فرکانس به تابع عضویتی با بیشترین مقدار اختصاص داده شده است. با پیگیری روند فوق و با توجه به عبارات زبانی تعریف شده در جدول ۵، هشت قانون تولید شده است، که در جدول ۴ نشان داده شده است. این قوانین را به شکل زیر می‌توان برای آسیب در قسمت یک تیر خواند:

اگر اختلاف فرکانس اول  $H$  و اختلاف فرکانس دوم  $VH$  و اختلاف فرکانس سوم  $VH$  و اختلاف فرکانس چهارم  $H$  و اختلاف

فرکانس پنجم  $L$  باشد، آنگاه آسیب در گره یک موجود است.

قانون‌های مرتبط به آسیب‌های دیگر نیز به همین شکل قابل تفسیر هستند. نگاه دقیق‌تر به جدول ۶ نشان می‌دهد که هر قانون اثر منحصر به فردی دارد و با قوانین دیگر متفاوت است. بنابراین سیستم فازی تعریف شده طبقه‌بندی کننده خوبی است. این قوانین دانشی پایه را پدید می‌آورند و نشان می‌دهند که یک فرد خبره چگونه از تفسیر تغییرات فرکانسی برای تعیین آسیب استفاده می‌کند.

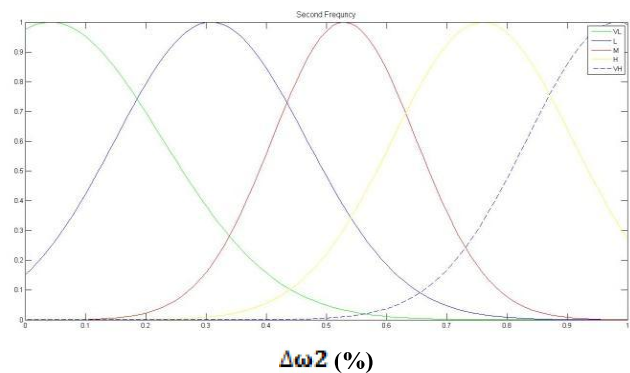
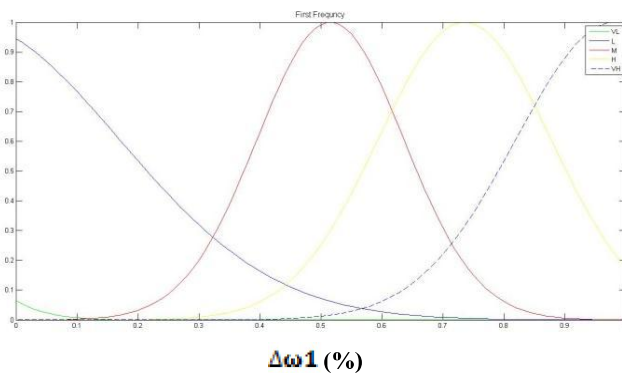
جدول ۶: قوانین سیستم فازی

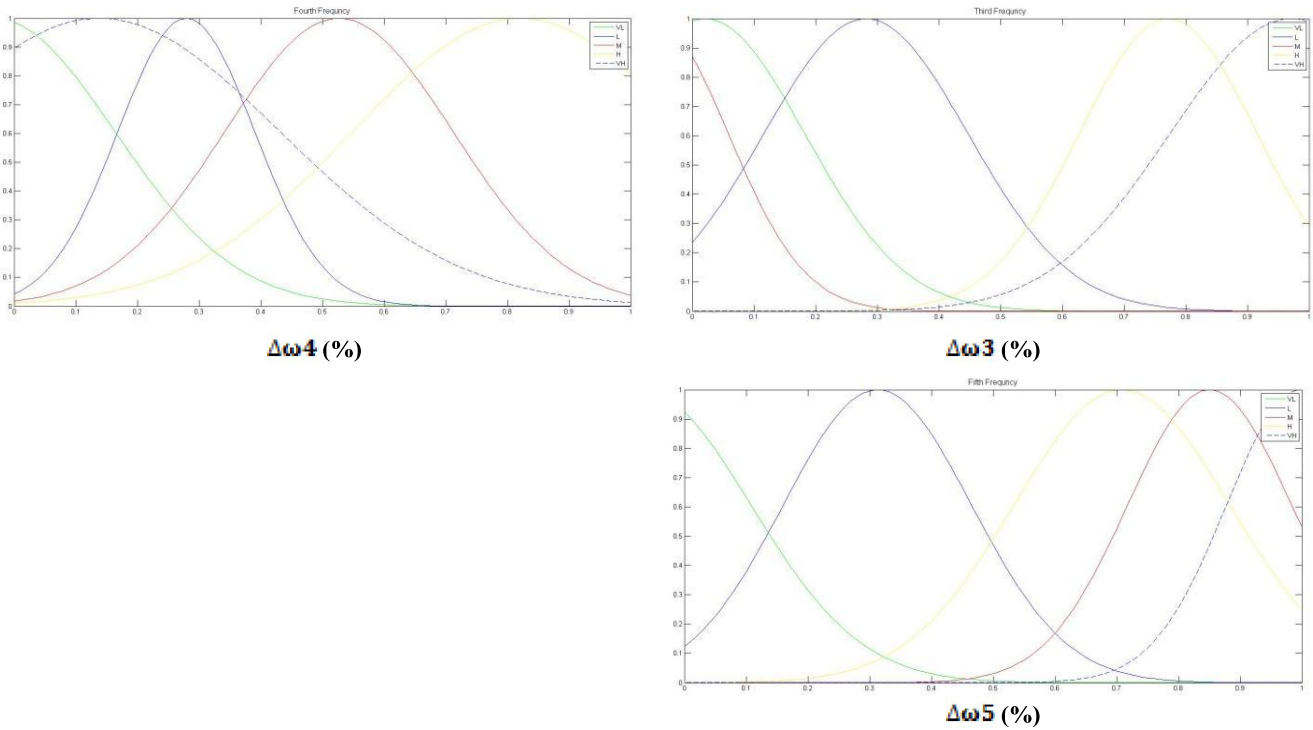
	$\Delta\omega 1$	$\Delta\omega 2$	$\Delta\omega 3$	$\Delta\omega 4$	$\Delta\omega 5$
خرابی در گره ۱	H	VH	VH	H	L
خرابی در گره ۲	VH	VL	H	L	H
خرابی در گره ۳	VH	M	VL	VL	L
خرابی در گره ۴	VH	VL	L	H	VL
خرابی در گره ۵	H	L	VH	VL	VH
خرابی در گره ۶	M	L	VH	VL	H
خرابی در گره ۷	H	VH	H	M	VL
خرابی در گره ۸	VH	H	L	VL	VL

بعد از تعریف قوانین برای بهینه‌سازی توابع عضویت از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده است. الگوریتم‌های ژنتیک تفاوت بسیار زیادی با روش‌های قدیمی دارند. در این الگوریتم‌ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود. بنابراین الگوریتم‌های ژنتیک با یکسری متغیرهای کد شده کار می‌کنند. 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:

$$FF = \frac{\sum_{i=1}^{27} \sum_{j=1}^9 (\alpha_{ij} - \beta_{ij})^2}{27 * 9} \quad (15)$$

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 داده‌های مربوط به یک آسیب به سیستم فازی اعمال شد، قانون مربوط به آن آسیب خروجی یک بدهد و خروجی قوانین دیگر صفر باشد. در ادامه برای درک بهتر تمامی موارد فوق، فلوچارتی ارائه شده است تا روند کلی مقاله را در بر داشته باشد. برای تولید نسل بعدی براساس مقادیر به دست آمده از تابع هدف، بهترین افراد در نسل حاضر با نرخ ۱ کپی می‌شوند. برای تولید بقیه افراد باید از عملگرهای ژنتیکی استفاده شود. عملگر ادغام عملگر ترکیبی است که شامل سه عمل است: اول یک جفت رشته به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، دوم محلی برای عمل ادغام به صورت تصادفی در طول رشته انتخاب شده و سرانجام در سومین مرحله مقدار دو رشته را با توجه به محل ادغام جابه‌جا می‌کند. نرخ این عمل برای تولید فرزند ۸ در نظر گرفته شده است عملگر بعد در الگوریتم ژنتیک، عملگر جهش است، که عبارت است از اعمال تغییرات تصادفی به یک فرد از جمعیت برای تولید فرزند که نرخ آن ۲ در نظر گرفته شده است. با انجام روند فوق نقاط بهینه برای مراکز و دامنه توابع فازی پس از ۱۰۰ تکرار و مقدار تابع هدف برابر ۰/۶۹ به دست آمده است. این توابع با مقادیر به دست آمده از الگوریتم در شکل ۸ نشان داده شده است.





شکل ۸: اشکال توابع عضویت برای پنج اختلاف فرکانس

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 خروجی‌های توابع فازی مربوط به پنج اختلاف فرکانسی به عنوان خروجی سیستم فازی منظور شده است. جدول ۷ این خروجی‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه در این جدول مشخص است، در هر حالت آسیب سیستم فازی توانسته بزرگ‌ترین خروجی که یک است، را تولید کند و مکان تمامی آسیب‌ها را به درستی پیش‌بینی کند.

جدول ۷: خروجی قوانین فازی با داده‌های فرکانسی مختلف

Damage Location	Damage Intensity	Output of Rule1	Output of Rule2	Output of Rule3	Output of Rule4	Output of Rule5	Output of Rule6	Output of Rule7	Output of Rule8
Damage Node 1	Slight Damage	۱	۰/۱۴۴	۰/۱۵۸۸	۰/۲۰۹۵	۰/۴۰۳۳	۰/۲۸۳۳	۰/۶۹۲۹	۰/۱۸۴۱
	Moderate	۱	۰/۱۵۹۲	۰/۱۹۵۸	۰/۱۸۷۶	۰/۳۴۶	۰/۲۷۷۴	۰/۶۹۳۶	۰/۰۶۳۳
	Severe Damage	۱	۰/۰۹۱۷	۰/۲۳۴۷	۰/۲۱۵۱	۰/۳۸۶۱	۰/۲۶۴۵	۰/۵۲	۰/۱۷۶۸
Damage Node 2	Slight Damage	۰/۲۲۸۸	۱	۰/۲۸۱	۰/۴۲۱۸	۰/۳۸۱۹	۰/۵۲۲۹	۰/۲۲۹۳	۰/۲۷۶۸
	Moderate	۰/۱۰۴۷	۱	۰/۳۲۴۹	۰/۴۶۰۱	۰/۱۹۷۶	۰/۳۴۳۱	۰/۲۷۶۷	۰/۳۲۷۷
	Severe Damage	۰/۱۳۶	۱	۰/۲۵۴۶	۰/۴۴۵۷	۰/۲۵۶۲	۰/۲۸۱۴	۰/۳۴۴۱	۰/۲۵۷۸
Damage Node 3	Slight Damage	۰/۲۵۵۵	۰/۳۴۰۹	۱	۰/۳۰۵۴	۰/۲۸۰۴	۰/۲۶۱	۰/۰۸۵۲	۰/۴۶۷۳
	Moderate	۰/۱۵۹۸	۰/۲۹۷	۱	۰/۳۷۹۹	۰/۴۴۶۲	۰/۲۰۸۷	۰/۱۹۵۶	۰/۶۱۹۳
	Severe Damage	۰/۱۹۹۶	۰/۲۵۷۱	۱	۰/۳۲۸۴	۰/۲۸۴۱	۰/۲۵۰۱	۰/۱۲۵۹	۰/۵۴۳۵
Damage Node 4	Slight Damage	۰/۲۵۸۹	۰/۴۱۵۸	۰/۲۸۵۷	۱	۰/۰۹۲۲	۰/۰۵۲۹	۰/۳۷۳۹	۰/۵۶۳۶
	Moderate	۰/۲۶۰۸	۰/۴۰۰۳	۰/۳۸۸۱	۱	۰/۱۰۴۶	۰/۰۶۵۴	۰/۲۵۳۶	۰/۴۸۵۵
	Severe Damage	۰/۳۱۱۶	۰/۴۰۳۱	۰/۲۷۵۸	۱	۰/۰۸۷۶	۰/۰۴۹۱	۰/۲۷۱۷	۰/۵۶۶۸
Damage Node 5	Slight Damage	۰/۳۳۴۶	۰/۲۴۰۲	۰/۳۳۶۸	۰/۱۰۸۱	۱	۰/۶۴۸۵	۰/۱۷۸۷	۰/۲۸۵۴
	Moderate	۰/۳۲۰۶	۰/۲۴۲۱	۰/۲۴۷۹	۰/۰۲۵۸	۱	۰/۶۶۶۷	۰/۳۱۱۵	۰/۲۰۰۲
	Severe Damage	۰/۳۳۰۴	۰/۲۵۵۶	۰/۲۵۸۱	۰/۰۴۴۶	۱	۰/۶۲۴۳	۰/۳۰۴۹	۰/۲۱۷۴
Damage Node 6	Slight Damage	۰/۲۹۵۸	۰/۵۰۰۷	۰/۲۰۰۴	۰/۱۸۹۷	۰/۵۵۳۵	۱	۰/۱۰۷۲	۰/۱۷۷۹
	Moderate	۰/۳۳۰۶	۰/۴۴۱۱	۰/۱۹	۰/۱۱۳۵	۰/۶۴۸۷	۱	۰/۱۵۰۵	۰/۱۶۸۹
	Severe Damage	۰/۳۷۱۳	۰/۳۶۷۸	۰/۲۳۷۶	۰/۰۳۲۹	۰/۷۱۰۶	۱	۰/۲۰۴۳	۰/۱۷۷۹

Damage Node 7	Slight Damage	۰/۶۵۳۵	۰/۲۶۱۶	۰/۱۱۱۳	۰/۳۷۶	۰/۲۱۱۶	۰/۰۷۱۱	۱	۰/۲۳۳۳
	Moderate	۰/۶۵۳۵	۰/۲۷۹۴	۰/۱۰۱۳	۰/۲۸۰۱	۰/۲۳۱۷	۰/۱۳۹۶	۱	۰/۱۷۸۵
	Severe Damage	۰/۴۶۱۵	۰/۴۵۰۱	۰/۱۳۹	۰/۳۸۳	۰/۱۶۸۹	۰/۰۵۲۱	۱	۰/۳۴۵۹
Damage Node 8	Slight Damage	۰/۱۱۵۷	۰/۲۶۶۷	۰/۵۵۶۸	۰/۵۹۸۴	۰/۲۴۶	۰/۲۰۶۷	۰/۲۸۳۴	۱
	Moderate	۰/۲۱۷۲	۰/۲۵۲	۰/۴۶۸۳	۰/۵۹۱۶	۰/۲۴۱۸	۰/۲۰۲۴	۰/۳۹۱۹	۱
	Severe Damage	۰/۱۴۲۲	۰/۲۹۶	۰/۵۰۸۵	۰/۶۰۲۴	۰/۲۳۴۳	۰/۱۹۵	۰/۳۱۲۳	۱

پس از اینکه مکان آسیب مشخص شد، شدت آسیب با روشی که در ادامه توضیح داده می‌شود، به دست آمده است. ابتدا مجموع تفاضل فرکانسی هر حالت آسیب یعنی ۸ حالت مکانی و ۳ شدت مختلف با رابطه زیر به دست آمده است.

$$\sum_{i=1}^5 \Delta\omega = \frac{\omega_i^{(u)} - \omega_i^{(d)}}{\omega_i^{(u)}} \quad (16)$$

$\omega^{(u)}$  فرکانس طبیعی در حالت سالم و  $\omega^{(d)}$  فرکانس طبیعی حالت معیوب و اندیس  $i$  شماره فرکانس را نشان می‌دهد. پس از محاسبه رابطه بالا به ازای هر مکان آسیب و در شدت‌های مختلف یک تابع میاناب از روی این مقادیر عبور داده شده است که قادر به تعیین شدت آسیب با درصد‌های مختلف است. خروجی‌های این تابع با فواصل ده درصد در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر پررنگ مقادیری است که از رابطه ۱۵ به دست آمده و مقادیر دیگر خروجی‌های تابع میاناب است. البته باید توجه داشت که برای استفاده از این جدول ابتدا باید مکان آسیب مشخص شده باشد و سپس با مقداری که از رابطه بالا حاصل می‌شود درصد آسیب در سازه را محاسبه کرد

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق برای پیش‌بینی آسیب در تیر یک سر گیردار الگوریتمی فازی-ژنتیک استفاده شده است. که برای به دست آوردن ویژگی‌ها از روش EMD برای اولین بار استفاده شده است که با این روش سیگنال به اجزای اصلی خود که هر کدام در محدوده فرکانسی مشخصی قرار دارند، تجزیه شده است. سپس با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه ماکزیمم فرکانس هر IMFs به عنوان ویژگی برای الگوریتم فازی-ژنتیک استخراج می‌گردد. سیستم آسیب‌یاب توانایی شناسایی مکان و میزان آسیب در هشت حالت مختلف را دارد، که شامل تمامی حالت‌های مختلف آسیب می‌باشد، که این امر یکی از برتری‌های این تحقیق نسبت به کارهای گذشته است. به منظور یافتن مکان آسیب از منطق فازی استفاده شده است که وظیفه آن پیدا کردن هشت الگوی به دست آمده از فرکانس‌های طبیعی است. بدین منظور هشت قانون تعریف شده و با الگوریتم ژنتیک، نقاط بهینه توابع فازی به دست آمده است. بعد از یافتن مکان آسیب با توجه به اینکه میزان تغییرات فرکانس رابطه‌ای مستقیم با شدت آسیب دارد، لذا از توابع میاناب برای یافتن شدت آسیب استفاده شده است. در پایان نیز برای بررسی مقاومت آسیب‌یاب در برابر عدم قطعیت‌ها، داده‌های فرکانسی با سطوح مختلف نویز به سیستم آسیب‌یاب اعمال شده است، که نتایج حاکی از مقاومت خوب آن است.

## ۷- مراجع

- [1] Montalvao, D., Maia, N.M.M., Ribeiro, M.R; "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials"; *Shock and Vibration Digest* 38 No.4, pages 295-324, 2006.
- [2] Araki, Y., and Miyagi, Y; "Mixed integer nonlinear least-squares problem for damage detection in truss structures"; *Journal of Engineering Mechanics* 131, No. 7, pages 659-667, 2005.
- [3] Ge, M. and Lui, E; "Structural damage identification using system dynamic properties"; *Computers & Structures* 83, No.27, pages 2185-2196, 2005.
- [4] Jiang, L. and Wang, K; "An enhanced frequency-shift-based damage identification method using tunable piezoelectric transducer circuitry"; *Smart Materials and Structures* 15, No.3, 799-808, 2006.

- [5] Lu, Z.R., Liu, J.K., Huang, M. and Xu, W.H; "Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses"; *Journal of Sound and Vibration* 326, No.2, pages 177-189, 2009.
- [6] Qiao, L., Esmaily, A. and Melhem, H.G; "Signal pattern-recognition for damage diagnosis in structures"; *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 27, No.9, pages 121-139, 2012.
- [7] Banerjee, B., Roy, D. and Vasu, R.M; "Self-regularized pseudo timemarching schemes for structural system identification with static measurements"; *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 82, No.7, pages 896-916, 2010.
- [8] Kijewski-Correa, T., Kwon, D., Kareem, A., Bentz, A., Guo, Y., Bobby, S. and Abdelrazaq, A; "SmartSync: an integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings"; *Journal of Structural Engineering* 25, No.33, pages 456-480, 2012.
- [9] Na, C., Kim, S. and Kwak, H; "Structural damage evaluation using genetic algorithm"; *Journal of Sound and Vibration* 330, No.12 pages 2772-2783, 2011.
- [10] Marano, G., Quaranta, G. and Monti, G; "Modified genetic algorithm for the dynamic identification of structural systems using incomplete measurements"; *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 26, No.2, pages 92-110, 2011.
- [11] Mosquera, V., Smyth, A. and Betti, R; "Rapid evaluation and damage assessment of instrumented highway bridges"; *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 41, No.4, pages 755-774, 2012.
- [12] Loh, C., Mao, C., Huang, J. and Pan, T; "System identification and damage evaluation of degrading hysterisis of reinforced concrete frames"; *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 40, No.6, pages 623-640, 2010.
- [13] Ganguli, R; "A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data"; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 12, No.6, pages 397-407, 2001.
- [14] Etefagh, M.M., Behkamkia, D., Pedrammehr, S. and Asadi, K.; "Reliability Analysis of the Bridge Dynamic Response in a Stochastic Vehicle-Bridge Interaction" *KSCE Journal of Civil Engineering* 19, No.1, pages 220-232, 2015.
- [15]-Xianfeng, F., and Ming J Zuo.; "Gearbox fault detection using empirical mode decomposition," *ASME Internatinal Mechanical Congress and Exposition* 25, No.2, pages 123-139, 2004.