



Modal Data Identification of the Prestressed Concrete Bridge Using Variational Mode Decomposition

P. Dindar, M. H. Hosseini* , M. R. Mansoori

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this study, the variational mode decomposition (VMD) algorithm was used to identify the modal characteristics of the structure using the decomposition of the acceleration responses recorded by the sensors. This algorithm has advantages over other signal decomposition methods that is resistant to the noise and sampling frequency. Also, the VMD algorithm extracts the natural frequencies of the structure concurrently. In addition, the damping ratios of the structure were estimated by fitting a linear function to the logarithmic diagram of the modal response in the decaying amplitude and calculating the slope of this line. The efficiency and accuracy of this algorithm were investigated by decomposing the acceleration responses obtained from the sensors installed on a prestressed concrete bridge (PSCB) that is located under the load of passing vehicles. The VMD algorithm was used for signal processing in MATLAB to estimate the natural frequencies, damping ratios and mode shapes of the bridge and ARTEMIS was utilized to verify the results. In addition, the finite element modeling and modal analysis of the bridge were performed in ABAQUS and the natural frequencies and mode shapes of the bridge were obtained. The results showed that the mode shapes estimated by the VMD algorithm were in good agreement with the finite element model and ARTEMIS. Also, the damping ratios estimated by this algorithm were obtained close to the damping value of the prestressed concrete bridge. The difference between the frequencies calculated by the VMD algorithm and ARTEMIS was about 1%, and the difference with the finite element model frequencies was close to 5%.

Review History:

Received: Oct. 02, 2020

Revised: Jan. 18, 2021

Accepted: May, 04, 2021

Available Online: May, 09, 2021

Keywords:

Modal data identification

Variational mode decomposition

Signal processing

Ambient vibration

Prestressed concrete bridge

1- Introduction

Bridges are damaged by various factors such as heavy loads, passing traffic and environmental factors. These damages over time lead to cracks in concrete members, decay of steel components and disruption of bridge operation. Dynamic characteristics of structures are powerful tools for health monitoring that detect abnormal conditions of structural members by processing information obtained from sensors [1-3]. One of the methods of monitoring the health of the structure is the use of ambient vibration test by which the dynamic characteristics of the structure under the operating load are obtained. Methods for identifying modal characteristics are divided into frequency domain and time domain, by which the amount of stiffness, mass and damping of the structure are estimated. One of the signal processing methods is the use of the empirical mode decomposition (EMD). This algorithm is a method to decompose a signal into a finite number of oscillating functions called intrinsic mode functions (IMF), each of which has a separate spectral bandwidth [4-6]. To reduce the limitations of this method in signal processing, the EMD was combined with Hilbert transform. To compensate for

the weaknesses of the above methods in signal processing, a variational mode decomposition (VMD) was proposed. This algorithm, similar to the EMD, decomposes the signal into a set of intrinsic mode functions and, unlike the EMD, is resistant to noise and sampling frequency [7].

The purpose of this study is to identify the modal characteristics of the prestressed concrete bridge (PSCB) by processing the acceleration responses obtained from sensors installed on the bridge. Due to the ability of the VMD in signal processing, this algorithm was used to decompose the acceleration responses in Matlab and the values of the main frequencies, damping ratios and mode shapes of the bridge were obtained. To evaluate the efficiency of this method, a finite element model of the PSCB was developed in Abaqus and modal analysis was used to obtain the modal characteristics of the bridge. Also, to validate the results obtained from the VMD method, Artemis was used to decompose the acceleration responses and calculate the bridge modal information. Finally, the modal characteristics of the PSCB under ambient vibration were calculated with high accuracy using the VMD.

*Corresponding author's email: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir



2- Methodology

In order to process the acceleration responses obtained from the ambient vibration and to detect the modal characteristics of the highway prestressed concrete bridge [8], the VMD was used [7, 9]. Then, by averaging the frequencies obtained from all sensors in each mode, the main frequencies of the bridge were calculated. Also, by fitting a linear function to the logarithmic diagram of the modal response at the decaying of amplitude and calculating the slope of this line, the damping ratios of the bridge were estimated. In addition, by considering the minimum or maximum modal response value simultaneously in all sensors for each mode, the mode shapes of the bridge were identified [10].

3- Results and Discussion

The frequency values for each of the four sensors were first obtained to calculate the main frequencies of the first four vibrating modes of the bridge. Then, the value of the main frequency of that mode was calculated by taking the average of them in each mode, which is equal to 5.896, 6.773, 10.636 and 20.208 Hz for the first to fourth modes, respectively. Also, damping ratios of the first four modes of the bridge were estimated by averaging the values obtained for all four sensors in each mode, which are equal to 1.88, 2.11, 2.18 and 1.25 percent, respectively. These values are close to the damping value of the PSCB. In addition, to identify the mode shapes of the bridge, the amount of modal response at a local point was the minimum or maximum response in each mode and for all sensors, simultaneously was considered and the shape of the first four vibration modes of the PSCB was obtained.

By examining the amount of the main frequencies obtained in the finite element model of Abaqus (equal to 6.0443, 7.773, 11.158 and 20.023 Hz) and the VMD, the first four vibrational modes of the bridge in these two methods were determined. There is a difference of 3, 15, 5 and 1%, respectively, which is due to the consideration of some assumptions in the modeling of finite element and the approximate strength characteristics of the PSCB materials.

Artemis calculates structural modal information through various signal processing methods in the frequency domain and time domain. To obtain the amount of main frequencies, damping ratios and mode shapes of the PSCB, the accelerated responses recorded by the sensors were processed using Artemis and various methods in the frequency domain and time domain. It was found that the difference between the frequencies of the first, third and fourth vibration modes in all methods was about 1% by examining the frequencies obtained from the processing of acceleration responses using the frequency domain and time domain methods. Also, the amount of frequencies calculated for the second mode in the frequency domain is about 6% higher than the same value in the time domain. Therefore, the difference between the frequencies of the first four modes of the bridge in the finite element model of Abaqus and Artemis model are 3%, 5%, 4% and 2% in frequency domain methods and are 3%, 11%,

4% and 2% in time domain methods, respectively.

By examining the amount of frequencies obtained by two signal processing methods with Artemis and the VMD, it was found that the difference between the main frequencies of the first, third and fourth vibration modes of the bridge is about 1% and the frequencies of the second vibration mode are 9% and 3% in the frequency and time domain methods. Also, the damping ratios estimated by the VMD have less error than the time domain methods used in Artemis. In addition, by comparing the shape of the vibration modes obtained by the VMD with Abaqus model and Artemis, it was found that the shape of the vibration modes of the first four bridge modes identified by this algorithm are in good agreement with the other two methods and as shown in Table 1.

Table 1. Comparison of the mode shapes

Abaqus	Artemis	VMD	Beam number	Mode number
0.8948	1	1	1	First mode
0.9849	0.8507	0.9163	3	
0.9849	0.6859	0.8861	5	
0.8948	0.4728	0.6519	7	
-1	-0.6016	-0.9813	1	Second mode
-0.3419	-0.0690	-0.2549	3	
0.3419	0.5729	0.4064	5	
1	1	1	7	Third mode
1	1	1	1	
-0.5428	-0.7249	-0.6872	3	
-0.5428	-0.8709	-0.8432	5	
1	0.7742	0.7311	7	Fourth mode
0.3617	0.2664	0.2552	1	
-1	-0.9068	-0.9022	3	
1	1	1	5	
-0.3617	-0.4759	-0.4161	7	

4- Conclusions

The results of this study are:

1. Intrinsic modes of the bridge were identified and extracted with high accuracy and rapid with one run of the VMD.
2. Noise and unwanted signals from the ambient vibration test were detected and removed using the VMD.
3. Considering the limited part of the free vibration response of the bridge after the maximum acceleration response, the modal characteristics of the bridge were obtained by this algorithm so that the volume of signal processing calculations was significantly reduced.
4. The frequencies of the first four bridge vibration modes in the finite element model and the VMD are 3, 15, 5 and 1% different, respectively. Also, the differences between the frequencies of the first four modes of the bridge in the finite element model and Artemis model are 3, 5, 4 and 2% in the frequency domain methods and 3, 11, 4 and 2% in the time

domain methods, respectively. In addition, the difference amount of frequencies obtained by the two signal processing methods with Artemis and the VMD for the first, third and fourth modes of the bridge is about 1% and for the second mode in the frequency domain 9% and in the time domain 3%.

5. The damping ratios estimated by this algorithm were obtained by fitting a linear function to the logarithmic diagram of the modal response at the decaying of amplitude and calculating the slope of this line close to the damping ratios of the PSCB. Also, the frequency domain methods in Artemis did not calculate the damping ratios of the bridge accurately. In addition, the damping ratios estimated by the VMD have less error than the time domain methods used in Artemis.

6. The mode shapes identified by the VMD are very well with the mode shapes obtained from Abaqus and Artemis models, so this algorithm accurately identified the flexural, torsional and combination mode shapes.

References

- [1] H. Li, S. Li, J. Ou, H.J.S.C. Li, H. Monitoring, Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects, 17(5) (2010) 495-512.
- [2] S.N.J.S.S. Pakzad, Systems, Development and deployment of large scale wireless sensor network on a long-span bridge, 6(5-6) (2010) 525-543.
- [3] Y. Ding, A. Li, D. Du, T.J.S. Liu, I. Engineering, Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge, 6(6) (2010) 725-739.
- [4] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung, H.H.J.P.o.t.R.S.o.L.S.A.m. Liu, physical, e. sciences, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, 454(1971) (1998) 903-995.
- [5] X. Zhang, Z. Liu, Q. Miao, L.J.J.o.S. Wang, Vibration, An optimized time varying filtering based empirical mode decomposition method with grey wolf optimizer for machinery fault diagnosis, 418 (2018) 55-78.
- [6] M. Lazhari, A.J.J.o.S. Sadhu, Vibration, Decentralized modal identification of structures using an adaptive empirical mode decomposition method, 447 (2019) 20-41.
- [7] K. Dragomiretskiy, D.J.I.t.o.s.p. Zosso, Variational mode decomposition, 62(3) (2013) 531-544.
- [8] J.J. Reilly, Load Testing Deteriorated Spans of the Hampton Roads Bridge-Tunnel for Load Rating Recommendations, Virginia Tech, 2017.
- [9] P. Ni, J. Li, H. Hao, Y. Xia, X. Wang, J.M. Lee, K.H.J.S.C. Jung, H. Monitoring, Time-varying system identification using variational mode decomposition, 25(6) (2018) e2175.
- [10] A. Bagheri, O.E. Ozbulut, D.K.J.J.o.S. Harris, Vibration, Structural system identification based on variational mode decomposition, 417 (2018) 182-197.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Dindar, M. H. Hosseini, M. R. Mansoori, Modal Data Identification of the Prestressed Concrete Bridge Using Variational Mode Decomposition, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 145-148.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19075.7055





شناسایی اطلاعات مودال پل بتنی پیش‌تنیده با استفاده از تجزیه مود متغیر

پیام دیندار، میرحمید حسینی*، محمدرضا منصوری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلمات کلیدی:

شناسایی اطلاعات مودال
تجزیه مود متغیر
پردازش سیگنال
ارتعاش محیطی
پل بتنی پیش‌تنیده

خلاصه: در این تحقیق، الگوریتم تجزیه مود متغیر برای شناسایی مشخصات مودال سازه با استفاده از تجزیه پاسخ‌های شتاب ثبت شده توسط سنسورها به کار برده شده است. این الگوریتم برتری‌هایی نسبت به سایر روش‌های تجزیه سیگنال دارد که در برابر نویز و فرکانس نمونه‌برداری مقاوم است. همچنین، الگوریتم تجزیه مود متغیر فرکانس‌های اصلی سازه را به طور همزمان استخراج می‌کند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی سازه با برازش دادن یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط تخمین زده می‌شوند. کارایی و دقت این الگوریتم با تجزیه پاسخ‌های شتاب به دست آمده از سنسورهای نصب شده بر روی یک پل بتنی پیش‌تنیده که تحت بار خودروهای عبوری قرار دارد، بررسی شد. برای پردازش سیگنال و تخمین فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مدهای ارتعاشی پل از الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب و به منظور صحت‌سنجی نتایج از نرم‌افزار آرتیمیس استفاده شد. علاوه بر این، مدل‌سازی اجزا محدود و تحلیل مودال پل در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و فرکانس‌های اصلی و شکل مدهای ارتعاشی پل به دست آمدند. بررسی نتایج نشان داد، شکل مدهای ارتعاشی که توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر تخمین زده شدند، با مدل اجزا محدود و نرم‌افزار آرتیمیس انطباق خوبی دارند. همچنین، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط این الگوریتم نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. اختلاف بین فرکانس‌های محاسبه شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر و نرم‌افزار آرتیمیس در حدود ۱ درصد و اختلاف آن با فرکانس‌های مدل اجزا محدود نزدیک به ۵ درصد می‌باشند.

۱- مقدمه

پل‌ها در اثر عوامل مختلفی از قبیل بارهای شدید، زلزله، باد، ترافیک عبوری و عوامل محیطی دچار آسیب می‌شوند. این آسیب‌ها در طول زمان منجر به ایجاد ترک در اعضای بتنی، پوسیدگی اجزای فولادی، نشست فونداسیون و اختلال در بهره‌برداری از پل می‌شوند. با بازرسی‌های مقطعی از پل می‌توان از گسترش آسیب جلوگیری کرد و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. مشخصات دینامیکی سازه‌ها ابزارهای قدرتمندی برای پایش سلامت هستند که با پردازش اطلاعات به دست آمده از سنسورها شرایط غیرعادی اعضای سازه را برای تعمیر و مقاوم‌سازی شناسایی می‌کنند [۱-۳]. یکی از روش‌های پایش سلامت سازه استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی است که توسط آن مشخصات دینامیکی سازه تحت بار بهره‌برداری به دست می‌آیند. در این آزمایش، بار ورودی به سازه اندازه‌گیری نمی‌شود و مشخصات مودال سازه برای ارزیابی شرایط سازه‌ای

با پردازش پاسخ‌های ثبت شده توسط سنسورها به کار گرفته می‌شود [۷-۴]. همچنین، شناسایی مشخصات مودال در مدل‌سازی و طراحی [۸-۱۰]، شناسایی آسیب [۱۲ و ۱۱]، ظرفیت باربری [۱۳-۱۵]، خدمت‌پذیری ارتعاشی [۱۶] و مقاوم‌سازی [۱۸ و ۱۷] پل کاربرد دارد.

روش‌های شناسایی مشخصات مودال به دو گروه حوزه فرکانس و حوزه زمان تفکیک می‌شوند که توسط آن‌ها مقدار سختی، جرم و میرایی سازه تخمین زده می‌شوند. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه تخمین مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مدهای ارتعاشی با استفاده از روش‌های حوزه فرکانس انجام شده است [۱۹-۲۲]. روش‌های حوزه فرکانس، سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس با تبدیل فوریه انتقال می‌دهند که شامل روش‌های برداشت مقدار حداکثر [۲۳]، تجزیه دامنه فرکانس^۲ [۲۴]، تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته^۳ و دامنه فضایی فرکانس^۴

- 1 Peak Picking
- 2 Frequency Domain Decomposition
- 3 Enhanced Frequency Domain Decomposition
- 4 Frequency Spatial Domain

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir



نویز و فرکانس نمونه برداری مقاوم نمی‌باشد و توابع مود ذاتی استخراج شده توسط این روش تحت اثر ترکیب مودها می‌باشند [۴۲ و ۳۶]. برای کاهش محدودیت‌های این روش در پردازش سیگنال، تجزیه مود تجربی با تبدیل هیلبرت ترکیب شد [۳۹]. تبدیل هیلبرت - هوانگ نمایش یک سیگنال در حوزه زمان - فرکانس را امکان‌پذیر می‌کند که توسط آن فرکانس آنی سیگنال در هر لحظه استخراج می‌شود [۴۴ و ۴۳ و ۳۵]. همچنین، برای به دست آوردن مشخصات مودال سازه از تبدیل هیلبرت هر یک از توابع مود ذاتی برای انتقال پاسخ‌های شتاب به حوزه زمان - فرکانس استفاده می‌شود [۳۲]. برای جبران ضعف‌های روش‌های فوق در پردازش سیگنال، الگوریتم تجزیه مود متغیر^۱ ارائه شد. این الگوریتم مشابه تجزیه مود تجربی، سیگنال را به مجموعه توابع مود ذاتی تجزیه می‌کند. این الگوریتم، سیگنال را بر اساس روابط منطقی ریاضی تجزیه می‌کند و بر خلاف تجزیه مود تجربی در مقابل نویز پایدار است [۳۲]. همچنین، این الگوریتم شکل جدیدی از توابع مود ذاتی ارائه می‌دهد که به صورت سیگنال‌های دامنه - فرکانس می‌باشند. این تعریف جدید از توابع مود ذاتی منجر به ایجاد یک سیگنال با پهنای باند باریک می‌شود که فرض اصلی این روش در جداسازی مودها است. در این روش هر کدام از توابع مود ذاتی به صورت یک سیگنال با پهنای باند محدود حول یک فرکانس مرکزی می‌باشند. همچنین، هر یک از توابع مود ذاتی حول یک فرکانس مرکزی متمرکز می‌باشند و سیگنال اولیه از توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه مود متغیر قابل بازیابی است. علاوه بر این، توابع مود ذاتی را می‌توان با استفاده از این الگوریتم به صورت همزمان محاسبه نمود. به علت ارتباطی که بین تجزیه مود متغیر با فیلتر وینر^۱ وجود دارد، این روش مقاومت بیشتری در برابر نویز دارد. همچنین، نسبت فرکانس‌ها و دامنه‌های بین دو مود در تجزیه سیگنال توسط این الگوریتم محدودیتی ایجاد نمی‌کنند [۴۵ و ۳۲].

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه شناسایی مشخصات مودال سازه با پردازش پاسخ‌های به دست آمده از سنسورها توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر انجام گرفته است. باقری و همکاران [۴۶] عملکرد این الگوریتم را در محاسبه مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی قاب برشی سه طبقه فولادی و پل عابر پیاده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از این الگوریتم توانستند مشخصات مودال سازه را در مقایسه با سایر روش‌های پردازش سیگنال به دقت محاسبه کنند. همچنین، تحقیقاتی توسط باقری و همکاران [۱۳ و ۹ و ۸] برای به دست آوردن

[۲۵] می‌باشند. با توجه اینکه روش‌های حوزه فرکانس پیاده‌سازی نسبتاً راحتی دارند اما، در تجزیه سیگنال برای سیستم‌ها با نسبت‌های میرایی بالا، نویز زیاد و مودهای ارتعاشی نزدیک به هم محدودیت عملکرد دارند. روش‌های حوزه زمان، سیگنال را از حوزه فرکانس به حوزه زمان با تبدیل معکوس فوریه منتقل می‌کنند که برخی از این روش‌ها شامل تکنیک کاهش تصادفی^۱ [۲۶]، الگوریتم سیستم ویژه^۲ [۲۷]، میانگین حرکت خودکار^۳ [۲۸] و شناسایی زیر فضای تصادفی^۴ [۳۰ و ۲۹] می‌باشند. روش‌های حوزه زمان برای فرکانس‌های با وضوح پایین محدودیت عملکرد نسبت به روش‌های حوزه فرکانس ندارند و با تجزیه مقدار منفرد سیگنال در پهنای باند فرکانسی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، هر دو روش حوزه فرکانس و حوزه زمان در شناسایی ویژگی‌های غیرخطی و غیرایستای سیگنال دقت مناسبی ندارند [۳۱]. بنابراین، برای از بین بردن این محدودیت‌ها از روش‌های حوزه زمان - فرکانس به منظور شناسایی مشخصات مودال سازه استفاده می‌شود که می‌تواند به طور همزمان اطلاعات زمان و فرکانس یک سیگنال را استخراج کند. همچنین، این روش عملکرد مناسبی برای پردازش سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا دارد [۳۲]. از مهم‌ترین روش‌های پردازش حوزه زمان - فرکانس می‌توان به تبدیل موجک پیوسته^۵ [۳۳] تبدیل هیلبرت - هوانگ^۶ [۳۴ و ۳۵] و تجزیه مود تجربی^۷ [۳۶] اشاره کرد که کاربردهای بسیاری در شناسایی مشخصات مودال و تشخیص آسیب دارند [۳۸ و ۳۷]. یکی از روش‌های پردازش سیگنال استفاده از الگوریتم تجزیه مود تجربی است. این الگوریتم روشی برای تجزیه یک سیگنال به تعدادی متناهی از توابع نوسانی است که توابع مود ذاتی^۸ نامیده می‌شوند و هر کدام از آن‌ها دارای پهنای باند طیفی جداگانه‌ای می‌باشند [۴۱-۳۹]. به دلیل اینکه توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه مود تجربی بر مبنای پهنای باند محدود فرکانسی نمی‌باشند، امکان جداسازی دو مؤلفه مجزا با پهنای باند فرکانسی نزدیک به هم در این روش وجود ندارد. همچنین، این روش برای محاسبه توابع مود ذاتی به صورت بازگشتی عمل می‌کند به طوری که هر کدام از توابع مود ذاتی به صورت جداگانه محاسبه می‌شوند که باعث کاهش کارایی تجزیه مود تجربی می‌شود. علاوه بر این، تجزیه مود تجربی در مقابل

- 1 Random Decrement
- 2 Eigen-system Realization
- 3 Autoregressive Moving Average
- 4 Stochastic Subspace Identification
- 5 Wavelet Transform
- 6 Hilbert-Huang Transform
- 7 Empirical Mode Decomposition
- 8 Intrinsic Mode Functions

9 Variational Mode Decomposition

10 Wiener Filter

۲- الگوریتم تجزیه مود متغیر

الگوریتم تجزیه مود متغیر برای تجزیه سیگنال شتاب $v(t)$ به یک مجموعه از زیر سیگنال‌ها (مودها) $u_k(t)$ به کار برده می‌شود. در این روش فرض می‌شود که هر مود K پهنای باند محدودی در فضای طیفی دارد و در اطراف ارتعاش مرکزی ω_k فشرده می‌شود. همچنین، هر زیر سیگنال بیانگر یک پاسخ مودال مشخص از سازه با دارا بودن ویژگی‌های خاص است. با استفاده از تبدیل هیلبرت^۴، ترکیب فرکانسی^۵ و هموار کننده گوسی^۶، مسئله متغیر مقید با کمینه کردن تابع هدف به صورت رابطه (۱) ایجاد می‌شود [۴۵ و ۳۲].

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

به طوری که:

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = v(t) \quad \text{و} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

در اینجا، $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ و $\{u_k(t)\} = \{u_1(t), \dots, u_K(t)\}$ به ترتیب بیانگر مجموعه مودها و فرکانس‌های مرکزی در تجزیه سیگنال می‌باشند. همچنین، $\sum_{k=1}^K := \sum_{k=1}^K$ مجموع همه مودها، ∂_t مشتق زمان، δ توزیع دیراک^۷، j برابر است با $\sqrt{-1}$ ، K تعداد مودها در تجزیه سیگنال، * علامت کانولوشن^۸ و $\| \cdot \|_2$ نرم L^2 می‌باشند. علاوه بر این، به منظور ایجاد مسئله متغیر نامقید از ضرب کننده لاگرانژی^۹ و پنالتی درجه دوم^{۱۰} به ترتیب برای ایجاد قید و رسیدن به همگرایی در حضور نویز گوسی^{۱۱} به صورت رابطه (۳) استفاده می‌شود. در اینجا، α پارامتر تعادل، λ ضرب کننده لاگرانژی و $\langle \cdot \rangle$ ترکیب داخلی دو بردار می‌باشند [۴۵ و ۳۲].

مشخصات مودال، سختی خمشی و ظرفیت باربری پل‌های بتنی با استفاده از پاسخ‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی و به کار بردن الگوریتم تجزیه مود متغیر انجام گرفت. نی و همکاران [۴۵] مشخصات مودال قاب برشی چهار طبقه فولادی و پل بتنی را با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر شناسایی کردند. آن‌ها ابتدا توابع مود ذاتی را با استفاده از این الگوریتم به دست آوردند. سپس، مقدار فرکانس‌های مدل‌ها را توسط تبدیل هیلبرت محاسبه نمودند. همچنین، پاسخ‌های به دست آمده توسط این روش دارای خطای کمتری نسبت به تجزیه مود تجربی بودند. تیان و ژانگ [۴۷] به بررسی پردازش پاسخ‌های ایجاد شده توسط وسیله نقلیه در حال حرکت بر روی پل با به کار بردن ترکیب الگوریتم تجزیه مود متغیر و تبدیل هیلبرت پرداختند و ماتریس نرمی و مشخصات مودال پل بتنی را به دست آوردند. ژانگ و ژو [۴۸] تحقیقی برای شناسایی مشخصات مودال سیستم‌های دارای مودهای ارتعاشی نزدیک، پارامترهای مودال با تغییر ناگهانی و پارامترهای مودال وابسته به دامنه با توجه به قابلیت الگوریتم تجزیه مود متغیر در پردازش سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که این الگوریتم از دقت بیشتری نسبت به روش تجزیه مود تجربی برخوردار است.

هدف از این تحقیق، شناسایی مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده با پردازش پاسخ‌های شتاب به دست آمده از سنسورهای نصب شده بر روی پل است. با توجه به توانایی الگوریتم تجزیه مود متغیر در پردازش سیگنال از این الگوریتم برای تجزیه پاسخ‌های شتاب در نرم‌افزار متلب^۱ استفاده شد و مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل به دست آمدند. علاوه بر این، مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده دارای آسیب تحت ارتعاش محیطی با حداقل تعداد سنسور شناسایی شدند. برای بررسی کارایی این روش، مدل اجزا محدود پل بتنی پیش‌تنیده در نرم‌افزار آباکوس^۲ ایجاد شد و از تحلیل مودال برای به دست آوردن مشخصات مودال پل استفاده شد. همچنین، برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از روش تجزیه مود متغیر، از نرم‌افزار آرتیمیس^۳ برای تجزیه پاسخ‌های شتاب و محاسبه اطلاعات مودال پل استفاده شد. در انتها، مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده دارای آسیب تحت ارتعاش محیطی با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر با دقت بالایی محاسبه شدند.

- 4 Hilbert Transform
- 5 Frequency Mixing
- 6 Gaussian Smoothness
- 7 Dirac Distribution
- 8 Convolution
- 9 Lagrangian Multipliers
- 10 Quadratic Penalty
- 11 Gaussian Noise

- 1 Matlab
- 2 Abaqus
- 3 ARTEMIS

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{v}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (۶)$$

برای اجرای دقیق بازسازی سیگنال تا رسیدن به معیار همگرایی، صعود دوگانه^۲ به صورت رابطه (۷) ادامه پیدا می‌کند. در اینجا، ε حالت حدی انتخاب شده برای معیار همگرایی است [۳۲ و ۴۵].

$$\sum_{k=1}^K \frac{\left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2}{\left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2} < \varepsilon \quad (۷)$$

پاسخ‌های شتاب ایجاد شده تحت آزمایش ارتعاش محیطی^۳ که برای تشخیص فرکانس‌های اصلی استفاده شده‌اند، دارای مقداری میرایی می‌باشند. بنابراین، فرکانس‌های اصلی به دست آمده از تحلیل‌ها بیانگر فرکانس‌های طبیعی میرا شده $\omega_{d,k}$ می‌باشند.

علاوه بر این، با در نظر گرفتن کاهش دامنه پاسخ مودال به علت وجود میرایی در سازه نسبت میرایی قابل محاسبه است. به همین منظور، رابطه بین لگاریتم طبیعی دامنه پاسخ $\ln[u_k(t)]$ و زمان t به صورت رابطه (۸) نمایش داده می‌شود [۴۶].

$$\ln[u_k(t)] = -\zeta_k \omega_{n,k} t + c \quad (۸)$$

در اینجا، ζ_k ، $\omega_{n,k}$ و c به ترتیب نسبت میرایی، فرکانس مودال نامیرای k امین مود و مقدار ثابت می‌باشند. همچنین، با برازش یک تابع خطی بر نمودار کاهش دامنه پاسخ مودال $\ln[u_k(t)]$ در برابر زمان t با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات خطی^۴ نسبت میرایی تخمین زده می‌شود. با محاسبه شیب این تابع خطی، m_k که بیانگر مقدار $\zeta_k \omega_{n,k}$ است و رابطه بین فرکانس مودال میرا و نامیرا نسبت میرایی به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۴۶].

$$\mathcal{L}(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \hat{\partial}_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + (۳)$$

$$\left\| v(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), v(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle$$

برای حل این مسئله از یک روش بهینه‌سازی تکرار شونده، استفاده می‌شود که در آن مودها $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ با استفاده از فیلتر وینر در دامنه فوریه با یک فیلتر تنظیم شونده به فرکانس مرکزی ω_k^n به صورت رابطه (۴) بروزرسانی می‌شوند. در اینجا، n بیانگر n امین تکرار بروزرسانی و نشان دهنده تبدیل فوریه سیگنال می‌باشند [۳۲ و ۴۵].

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{v}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (۴)$$

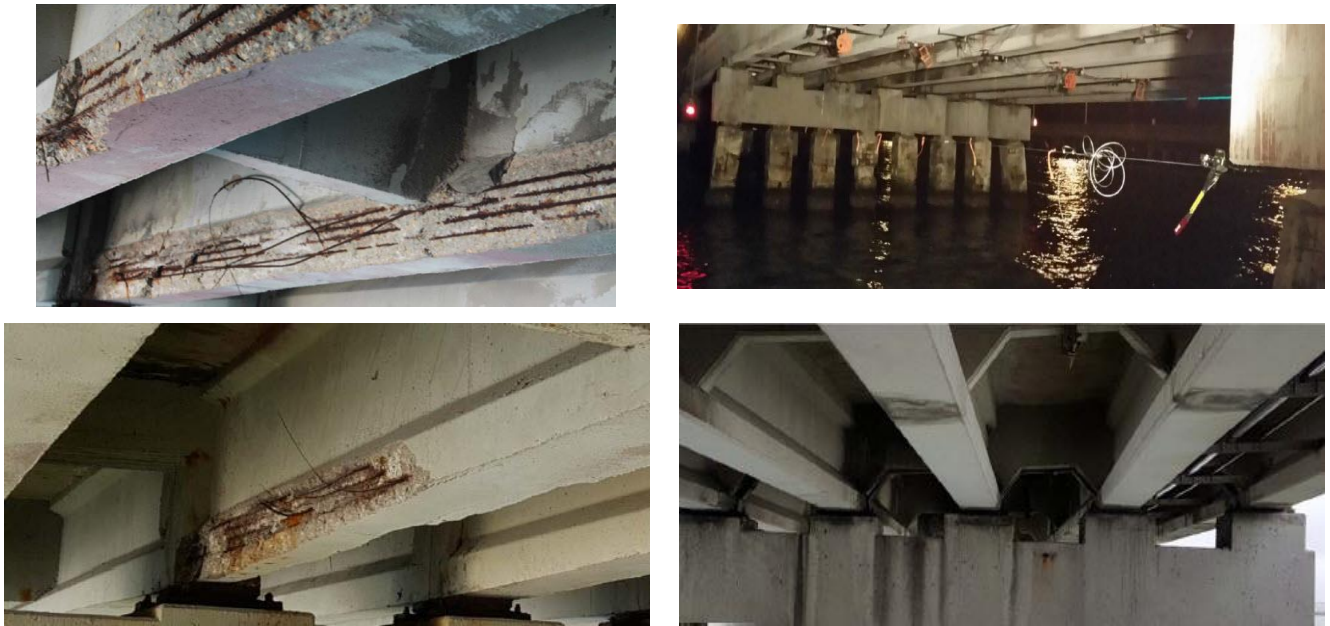
با در نظر گرفتن قسمت حقیقی تبدیل معکوس فوریه سیگنال، پاسخ‌های مودال در حوزه زمان به دست می‌آیند. همچنین، این روش تجزیه می‌تواند محتوای طیفی ناخواسته از سیگنال را با تولید زیر سیگنال‌ها در نتایج تجزیه حذف کند. سپس، فرکانس‌های مرکزی ω_k^{n+1} به عنوان مرکز ثقل طیف توان مود^۱ به صورت رابطه (۵) بروزرسانی می‌شوند [۳۲ و ۴۵].

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega \left| \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right|^2 d\omega}{\int_0^\infty \left| \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right|^2 d\omega} \quad (۵)$$

برای همه فرکانس‌ها $\omega \geq 0$ ضرب کننده لاگرانژی $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)$ بعد از هر تکرار به صورت رابطه (۶) بروزرسانی می‌شود که τ بیانگر شدت قید محدود کننده است [۳۲ و ۴۵].

2 Dual Ascent
3 Ambient Vibration
4 Linear Least Squares Regression

1 Mode's Power Spectrum



شکل ۱. نمای پل بتنی پیش تنیده [۴۹]

Fig. 1. View of the prestressed concrete bridge..

۳- آزمایش دینامیکی پل بتنی پیش تنیده

۳-۱- توصیف پل

در این تحقیق با هدف ارزیابی سلامت سازه‌ای، آزمایش دینامیکی بر روی پل بتنی پیش‌تنیده قرار گرفته در بزرگراه همپتون^۱ از نورفولک^۲ به همپتون ویرجینیا^۳ انجام شد. این پل - تونل یک سازه ترکیبی دو مسیره شرقی - غربی است که اولین مسیر آن در سال ۱۹۵۶ ساخته شده است و دومین مسیر آن در سال ۱۹۷۶ کامل شده است. این سازه دارای سه بخش اصلی است که جنوب آن از ویلوقبی اسپیت^۴ به یک جزیره مصنوعی می‌رسد. در ادامه، شمال پل از جزیره مصنوعی شمالی به همپتون می‌رسد. علاوه بر این، بین دو مسیر جنوبی و شمالی یک تونل برای ارتباط آن‌ها احداث گردیده است.

این پل از چند تیر بتنی پیش‌تنیده با تکیه‌گاه‌های ساده و یک عرشه بتنی تشکیل شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. بررسی‌های چشمی

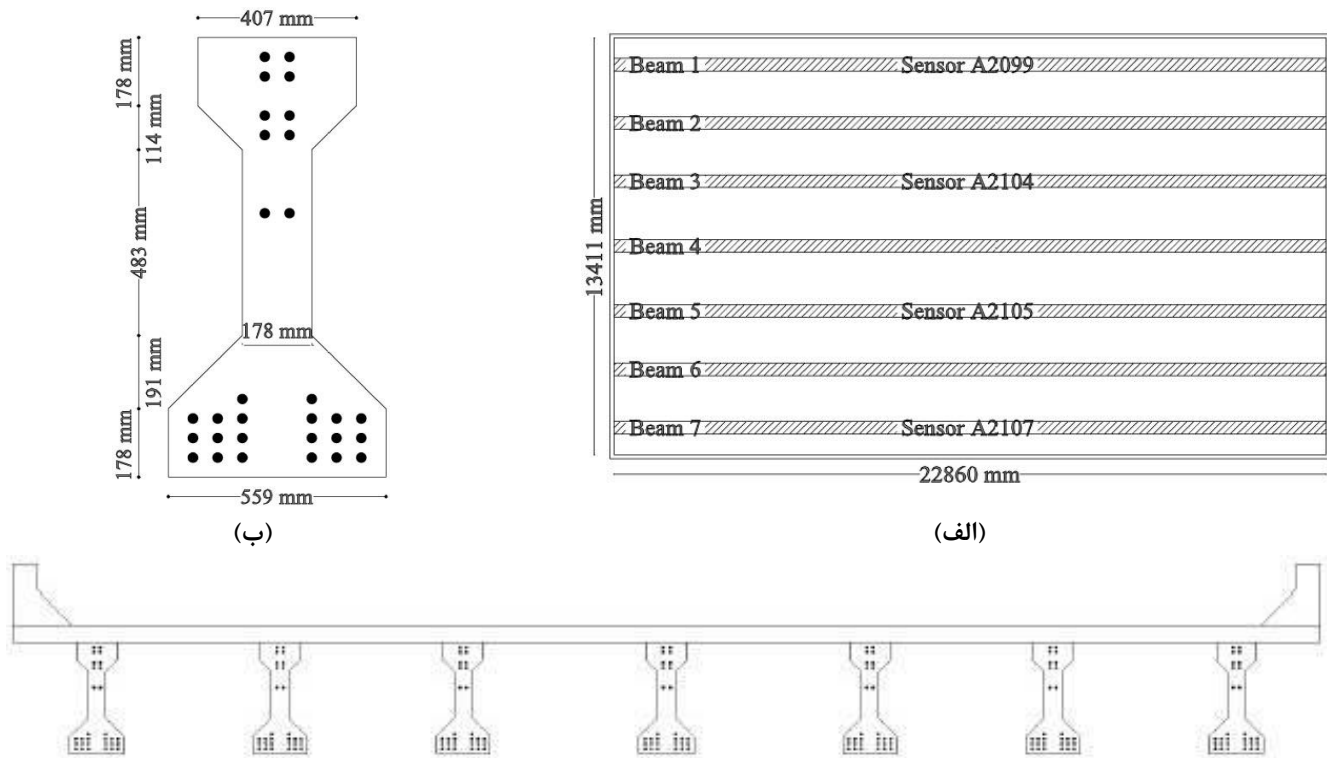
$$\zeta_k = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{d,k}}{m_k}\right)^2}} \quad (9)$$

علاوه بر این، با در نظر گرفتن پاسخ‌های مودال سازه در یک نقطه مینیمم یا ماکزیمم محلی در محل همه سنسورها، شناسایی شکل مودهای ارتعاشی انجام می‌شود. بنابراین، بردار شکل مودی برای k امین مود از سازه به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۴۶].

$$\Phi_k = \left\{ u_{k,1}(t_m) \ u_{k,2}(t_m) \ \dots \ u_{k,j}(t_m) \ \dots \ u_{k,N}(t_m) \right\}^T \quad (10)$$

در اینجا $u_{k,j}$ بیانگر پاسخ مودال k ام در j امین محل سنجش، t_m زمانی است که مینیمم یا ماکزیمم پاسخ مودال اتفاق افتاده است و N تعداد سنسورهای نصب شده در سازه است.

- 1 Hampton
- 2 Norfolk
- 3 Virginia
- 4 Willoughby Spit



شکل ۲. هندسه پل بتنی پیش تنیده، (الف) پلان، (ب) برش مقطع تیر، (ج) برش عرضی

Fig. 2. Geometry of the prestressed concrete bridge, (a) plan, (b) cross section of beam, (c) cross section

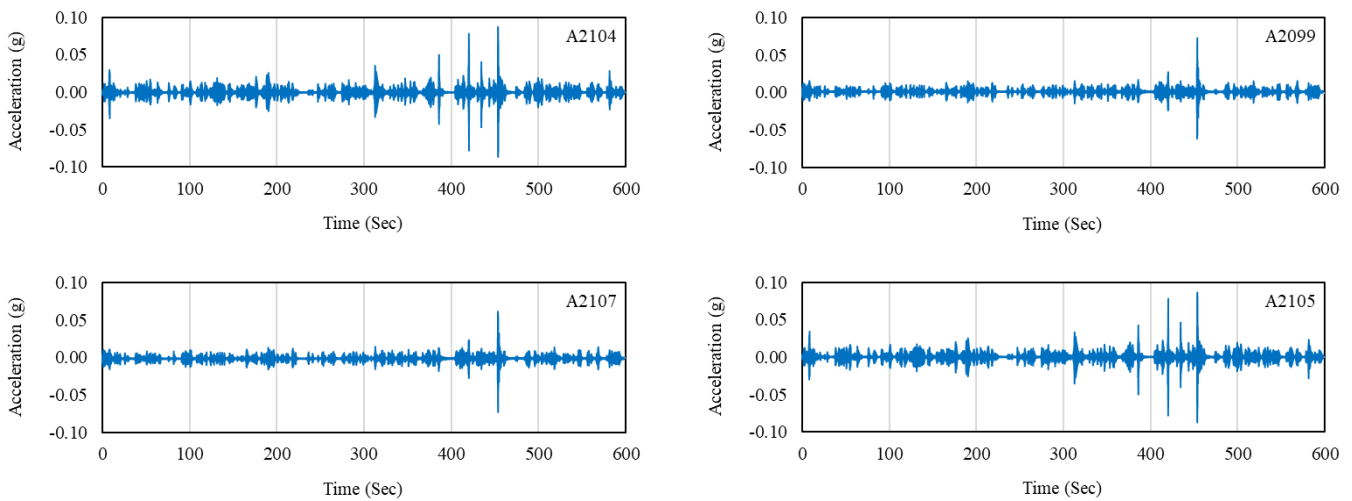
بر این، پاسخ‌های شتاب به مدت ۶۰۰ ثانیه با فرکانس نمونه برداری ۲۰۰ هرتز ثبت شد. در این آزمایش، شتاب وسط دهانه ۴ تیر از ۷ تیر پل برای یک دهانه در مسیر شرقی - غربی ثبت شد که مکان قرارگیری سنسورها، پلان و مقطع عرضی پل در شکل ۲ نشان داده شده است [۴۹].

در آزمایش ارتعاش محیطی ارتعاش پل که توسط سنسورهای شتاب ثبت شده است، دارای دو مقدار ماکزیمم در حدود زمان‌های ۴۲۰ و ۴۵۰ ثانیه است. با مشاهده پاسخ‌های شتاب دریافت می‌شود که تیرهای میانی نسبت به تیرهای کناری پل مقدار ماکزیمم شتاب بیشتری را به علت عبور وسایل نقلیه ثبت کرده‌اند و تحت تحریک دینامیکی بیشتری قرار گرفته‌اند. در این آزمایش سنسورهای شتاب با نام‌های A2099، A2104، A2105 و A2107 به ترتیب بر روی تیرهای شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ نصب شده‌اند که پاسخ‌های ثبت شده توسط آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

نشان داد، آسیب‌های زیادی در تیرهای بتنی پیش تنیده وجود دارد که این آسیب‌ها شامل ترک خوردگی و شکستن موضعی بتن، قطع و کاهش سطح مقطع کابل‌های پیش تنیده است [۴۹].

۳-۲- توصیف آزمایش

برای ارزیابی ظرفیت باربری تیرهای آسیب دیده، دهانه‌هایی از پل تحت انجام آزمایش بار زنده وسایل نقلیه عبوری قرار گرفتند. در هنگام اجرای آزمایش هیچ باری به غیر از بارهای محیطی باد، حرارت و ترافیک معمولی به پل وارد نشد و از نتایج ارتعاش آزاد پل استفاده گردید. برای انجام آزمایش از سیستم جمع‌آوری اطلاعات بیسیم استفاده شد که از طریق این سیستم اطلاعات سنسورها به شرکت تشخیص آسیب پل^۱ و ایستگاه مرکزی منتقل گردید. همچنین، شتاب‌سنج‌های مدل AI521 شرکت تشخیص پل مورد استفاده قرار گرفت که شتاب‌های در محدوده $\pm 5g$ را ثبت می‌کند. علاوه



شکل ۳. پاسخ‌های ارتعاشی پل ثبت شده توسط سنسورهای شتاب

Fig.3. Vibration responses of the bridge recorded by acceleration sensors.

پل پاسخ‌های شتاب چهار سنسور نشان داده شده در شکل ۴ با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر پردازش و تجزیه شدند. سپس، بعد از حذف نویز از آن‌ها پاسخ‌های مودال اصلی پل به دست آمدند که در شکل ۵ نشان داده شده است. به همین منظور از تبدیل سریع فوری^۱ و تبدیل هیلبرت به همراه الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با مشاهده نتایج دریافت می‌شود، هر پاسخ مودال دارای یک فرکانس مرکزی مشخص است که مقدار آن با افزایش شماره مود افزایش می‌یابد. همچنین، دامنه پاسخ مودال به علت تاثیر میرایی با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند.

برای محاسبه فرکانس‌های اصلی چهار مود اول ارتعاشی پل، ابتدا مقدار فرکانس‌ها برای هر یک از چهار سنسور به دست آمدند. سپس، با میانگین گرفتن از آن‌ها در هر مود مقدار فرکانس اصلی آن مود محاسبه شد که برای مودهای اول تا چهارم به ترتیب برابر $۵/۸۹۶$ ، $۶/۷۷۳$ ، $۱۰/۶۳۶$ و $۲۰/۲۰۸$ هرتز می‌باشند که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. مطابق نتایج، فرکانس‌های محاسبه شده برای هر سنسور در هر مود اختلاف بسیار کمی با هم دارند.

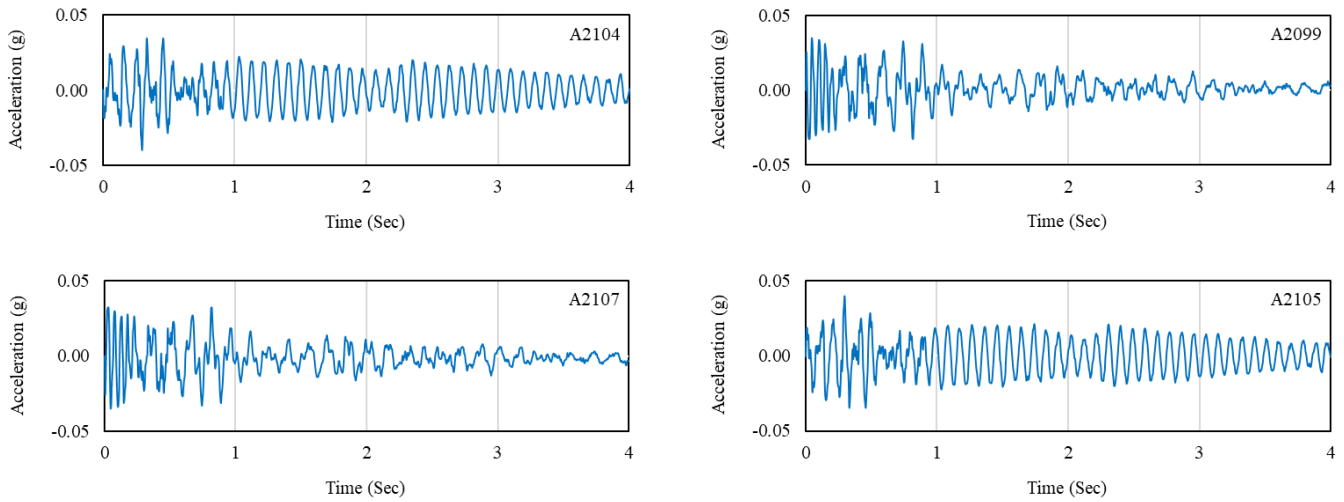
۴- شناسایی مشخصات مودال پل توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر

به منظور پردازش پاسخ‌های شتاب حاصل از آزمایش دینامیکی و تشخیص مشخصات مودال پل از الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب استفاده شد. سپس، با میانگین‌گیری از فرکانس‌های به دست آمده از همه سنسورها در هر مود، فرکانس‌های اصلی پل محاسبه شدند. همچنین، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط، نسبت‌های میرایی پل تخمین زده شدند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن مقدار مینیمم یا ماکزیمم پاسخ مودال به صورت همزمان در همه سنسورها برای هر مود، شکل مودهای ارتعاشی پل شناسایی شدند.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شد، در این آزمایش پاسخ‌های شتاب ایجاد شده توسط ارتعاش محیطی پل به مدت ۶۰۰ ثانیه به وسیله چهار سنسور ثبت شده است. در این تحقیق، به منظور کاهش حجم محاسبات پردازش سیگنال از اطلاعات ارتعاش آزاد پل بعد از نقطه ماکزیمم شتاب که حدود ثانیه ۴۵۰ است، استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

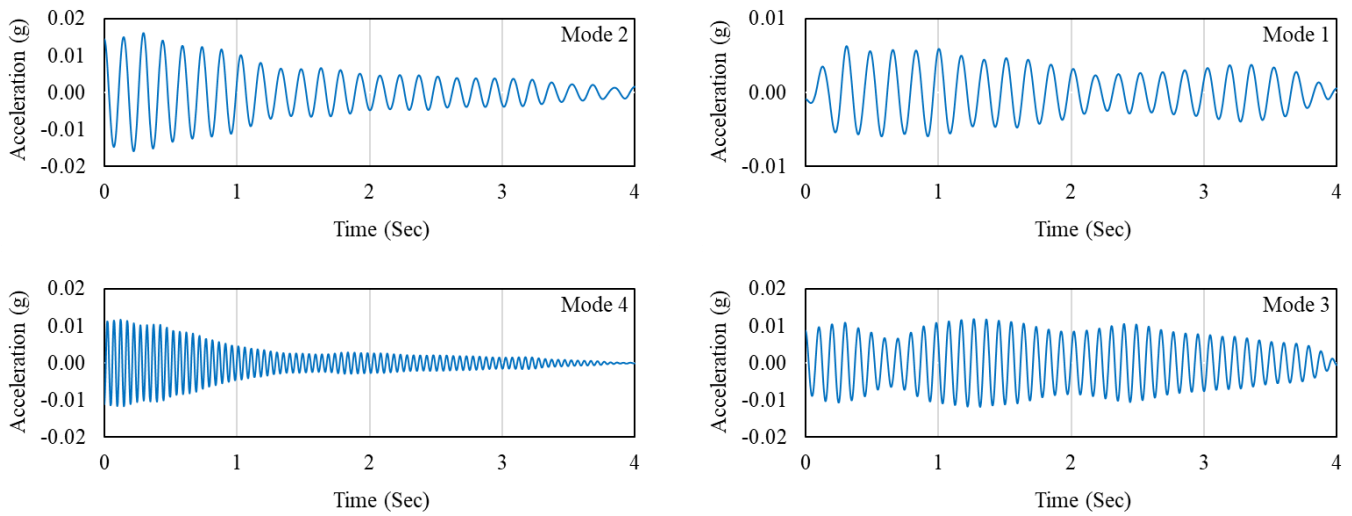
برای به دست آوردن مقدار فرکانس‌های اصلی چهار مود اول ارتعاشی

1 Fast Fourier transform

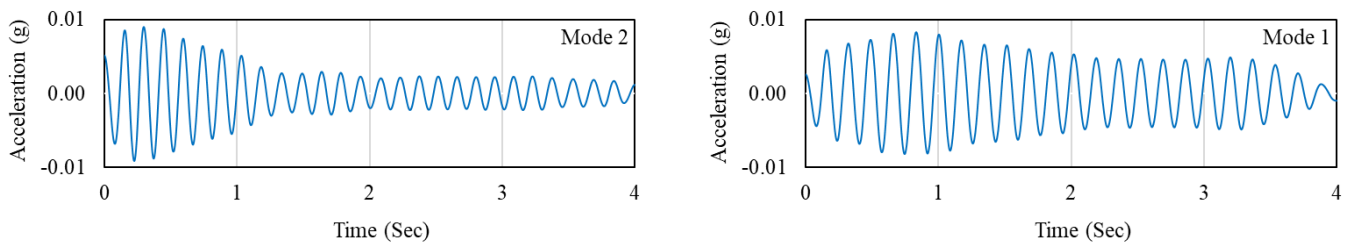


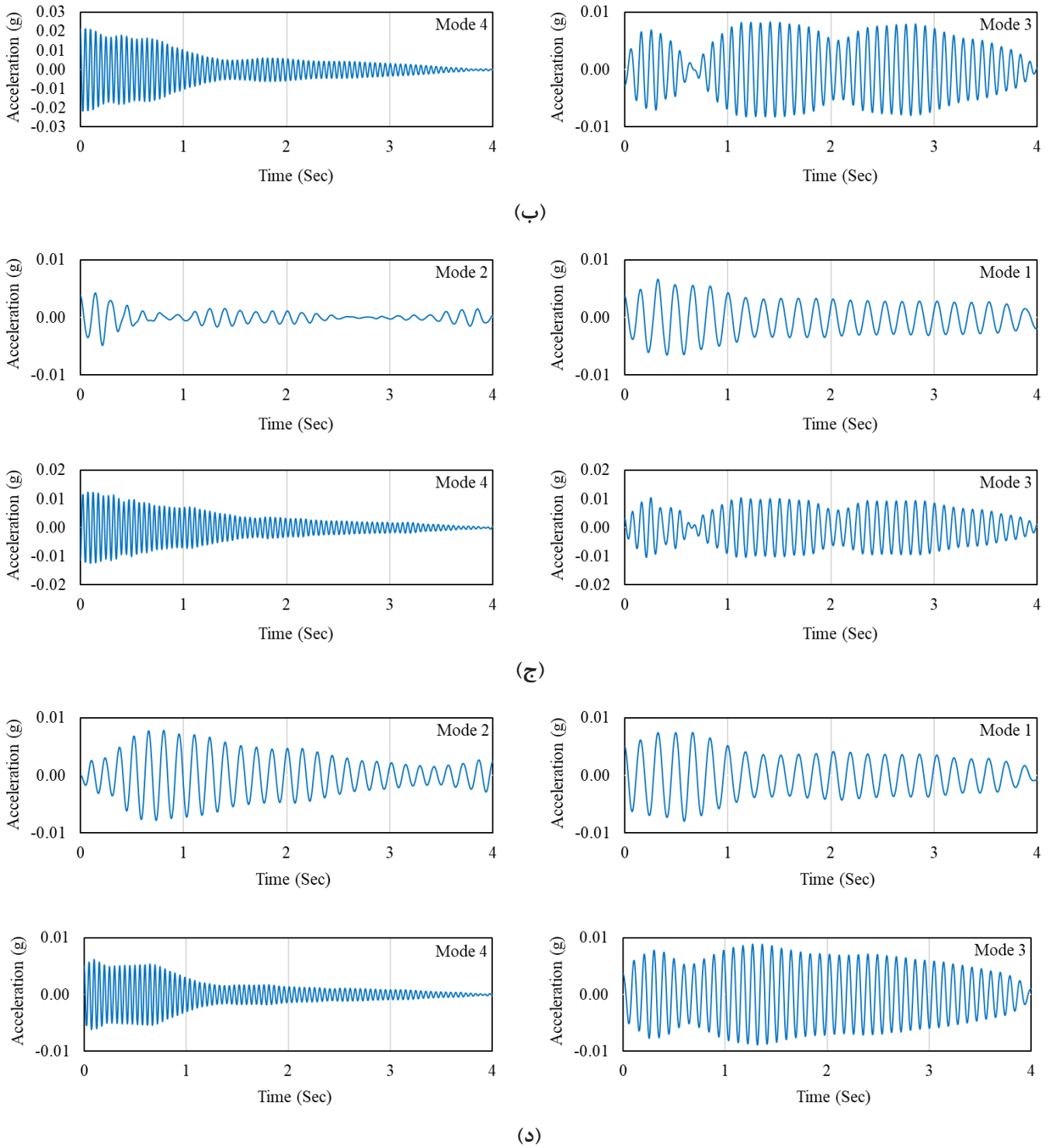
شکل ۴. پاسخ های شتاب پل استفاده شده در الگوریتم تجزیه مود متغیر

Fig. 4. Acceleration responses of the bridge used in the variational mode decomposition.



(الف)





شکل ۵. پاسخ های مودال پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) سنسور A2099، (ب) سنسور A2104، (ج) سنسور A2105، (د) سنسور A2107

Fig.5. Modal responses of the bridge extracted from variational mode decomposition, (a) sensor A2099, (b) sensor A2104, (c) sensor A2105, (d) sensor A2107.

جدول ۲. نسبت‌های میرایی پل به روش تجزیه مود متغیر (درصد)

Table 2. Damping ratios of the bridge by variational mode decomposition (percentage).

شماره مود ارتعاشی	سنسور شتاب			
	A2107	A2105	A2104	A2099
مود اول	۵/۸۹۶	۵/۹۰۴	۵/۹۰۴	۵/۸۳۹
مود دوم	۶/۷۷۳	۶/۷۲۷	۶/۷۶۴	۶/۷۷۲
مود سوم	۱۰/۶۳۶	۱۰/۵۴۹	۱۰/۷۶۵	۱۰/۵۴۴
مود چهارم	۲۰/۲۰۸	۲۰/۲۲۷	۲۰/۱۷۲	۲۰/۲۱

جدول ۲. نسبت‌های میرایی پل به روش تجزیه مود متغیر (درصد)

Table 2. Damping ratios of the bridge by variational mode decomposition (percentage).

شماره مود ارتعاشی	سنسور شتاب			
	A2107	A2105	A2104	A2099
مود اول	۱/۸۸	۱/۹۴	۱/۱۱	۱/۶۹
مود دوم	۲/۱۱	۲/۴۸	۲/۰۵	۱/۹
مود سوم	۲/۱۸	۲/۳۴	۲/۰۷	۲/۴۳
مود چهارم	۱/۲۵	۰/۹۹	۱/۳۴	۱/۱۴

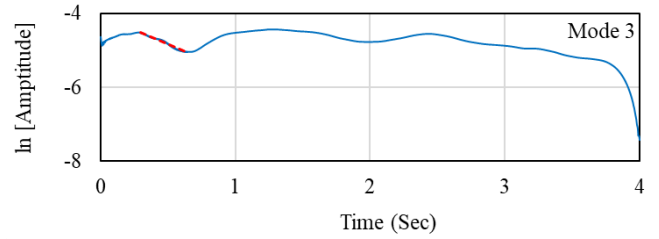
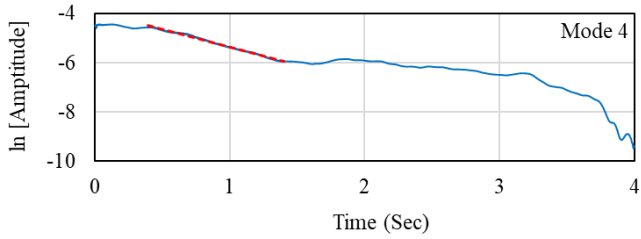
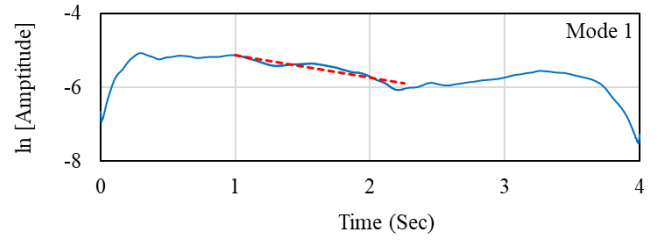
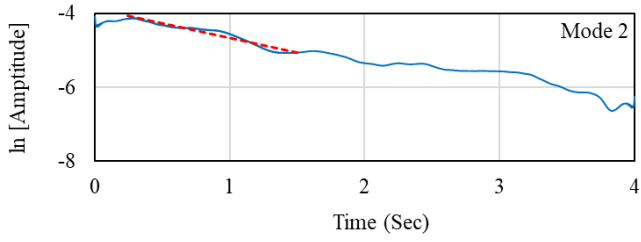
برای تخمین میرایی پل در هر مود ابتدا نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال در برابر زمان ترسیم شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال که به صورت خط چین قرمز رنگ ترسیم شده است، شیب خط کاهش دامنه مطابق رابطه (۹) محاسبه شد که بیانگر نسبت میرایی پل است. محدوده مناسب نمودار برای برازش خط و محاسبه شیب کاهش دامنه پاسخ لگاریتمی در قسمت نزولی تدریجی نمودار انتخاب شده است، به صورتی که در قبل و بعد از این محدوده کاهش تدریجی دیگری در دامنه پاسخ لگاریتمی مشاهده نشود. به همین دلیل تمامی محدوده‌های محتمل بررسی شد و قسمت مناسب نمودار برای محاسبه شیب کاهش لگاریتمی دامنه پاسخ انتخاب گردیده است.

نسبت‌های میرایی چهار مود اول پل با میانگین گرفتن از مقدار به دست آمده برای همه چهار سنسور در هر مود تخمین زده شدند که به ترتیب برابر ۱/۸۸، ۲/۱۱، ۲/۱۸ و ۱/۲۵ درصد و نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده می‌باشند که در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، از نتایج دریافت می‌شود نسبت‌های میرایی به دست آمده توسط هر سنسور در هر مود اختلاف کمی با هم دارند.

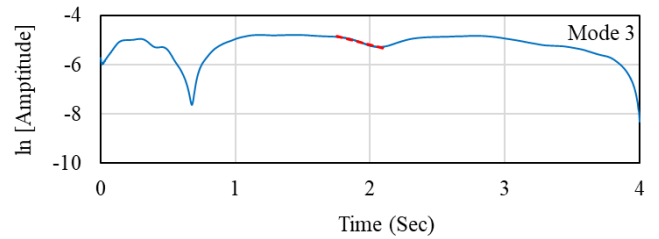
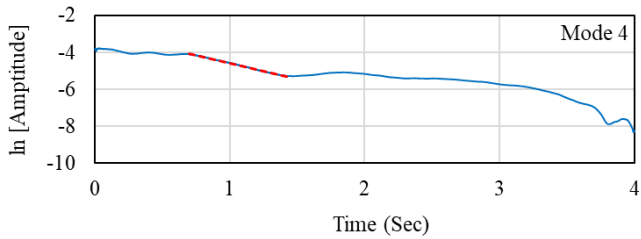
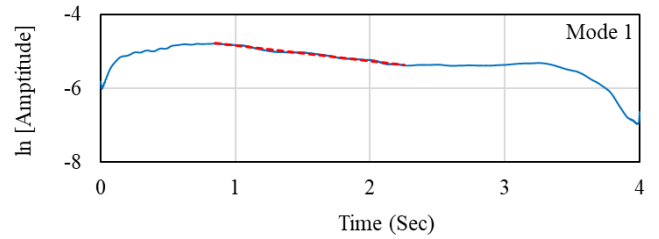
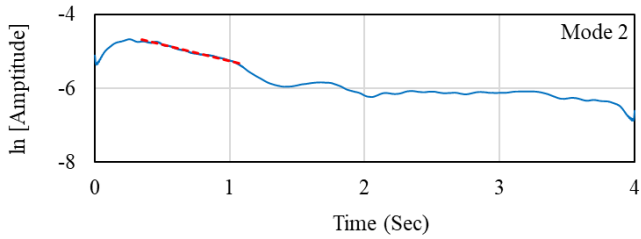
برای شناسایی و ترسیم شکل مودهای ارتعاشی پل، مقدار پاسخ مودال در یک نقطه محلی مینیمم یا ماکزیمم پاسخ در هر مود و برای همه سنسورها به صورت همزمان در نظر گرفته شدند که شکل چهار مود اول ارتعاشی پل در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، همانطور که انتظار می‌رود پل در مود اول ارتعاشی بیشترین تغییر شکل در بزرگ‌ترین دهانه را به صورت خمشی داشته است. علاوه بر این، با به کار بردن این الگوریتم شکل مودهای ترکیبی خمشی، پیچشی و دورانی پل شناسایی شدند که در شکل مودهای ارتعاشی دوم تا چهارم قابل مشاهده می‌باشند.

برای تخمین میرایی پل در هر مود ابتدا نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال در برابر زمان ترسیم شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال که به صورت خط چین قرمز رنگ ترسیم شده است، شیب خط کاهش دامنه مطابق رابطه (۹) محاسبه شد که بیانگر نسبت میرایی پل است. محدوده مناسب نمودار برای برازش خط و محاسبه شیب کاهش دامنه پاسخ لگاریتمی در قسمت نزولی تدریجی نمودار انتخاب شده است، به صورتی که در قبل و بعد از این محدوده کاهش تدریجی دیگری در دامنه پاسخ لگاریتمی مشاهده نشود. به همین دلیل تمامی محدوده‌های محتمل بررسی شد و قسمت مناسب نمودار برای محاسبه شیب کاهش لگاریتمی دامنه پاسخ انتخاب گردیده است.

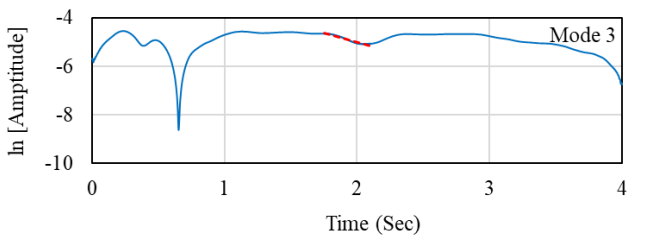
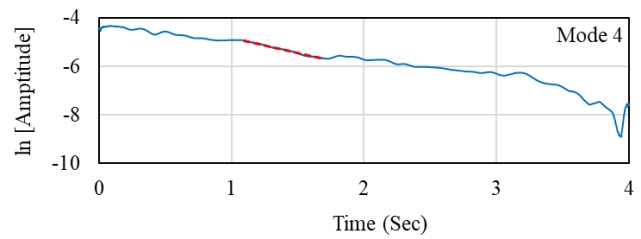
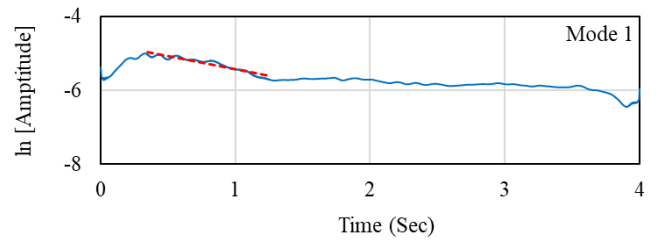
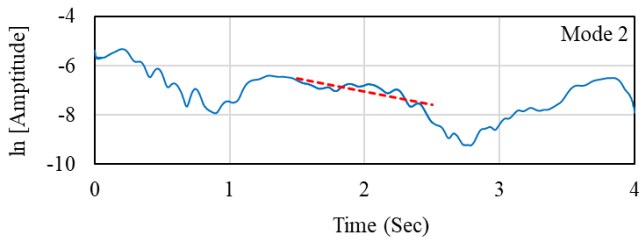
نسبت‌های میرایی چهار مود اول پل با میانگین گرفتن از مقدار به دست آمده برای همه چهار سنسور در هر مود تخمین زده شدند که به ترتیب برابر



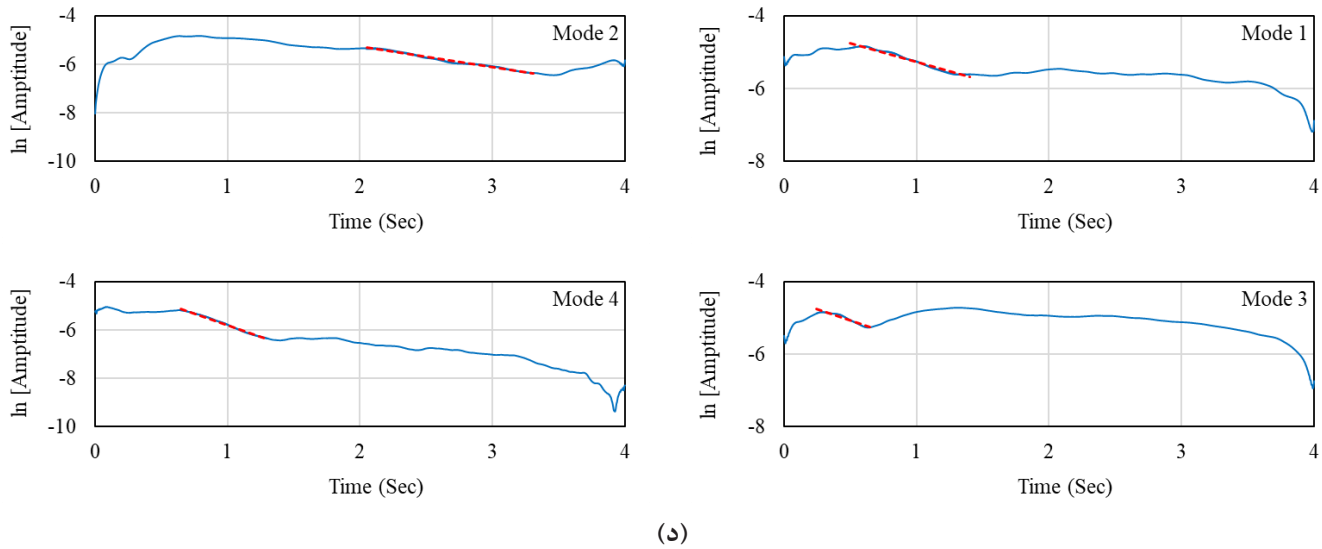
(الف)



(ب)

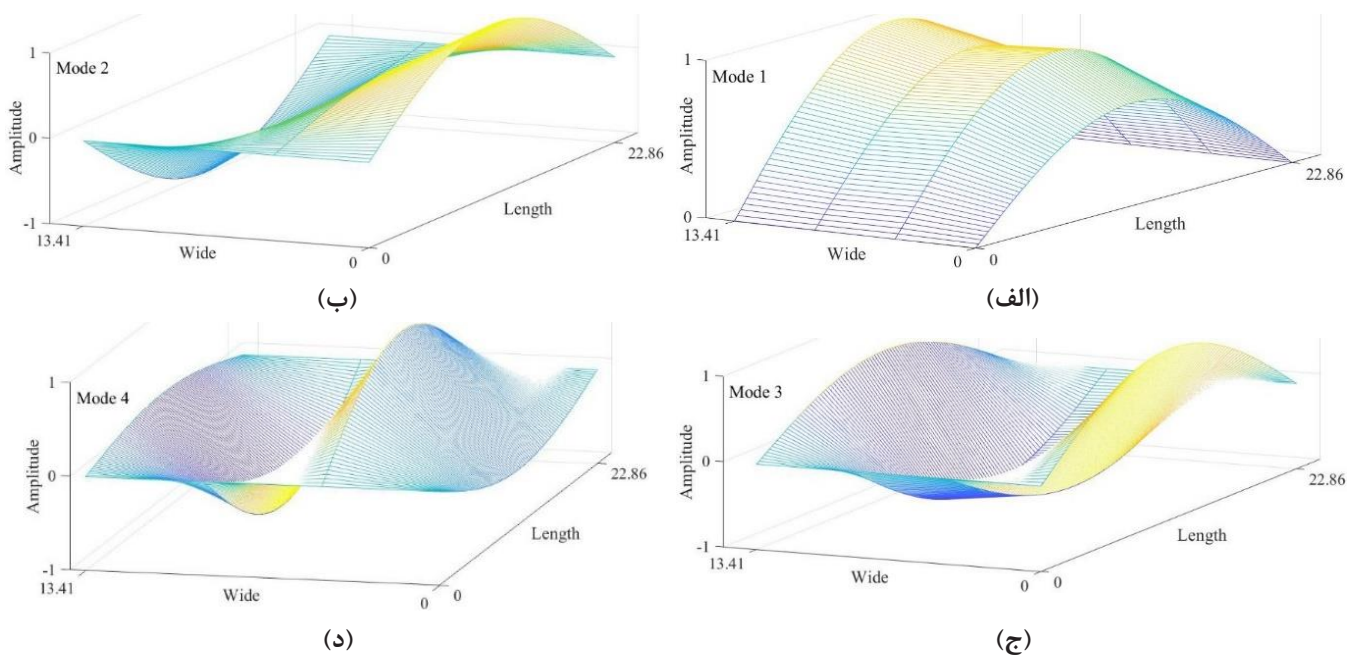


(ج)



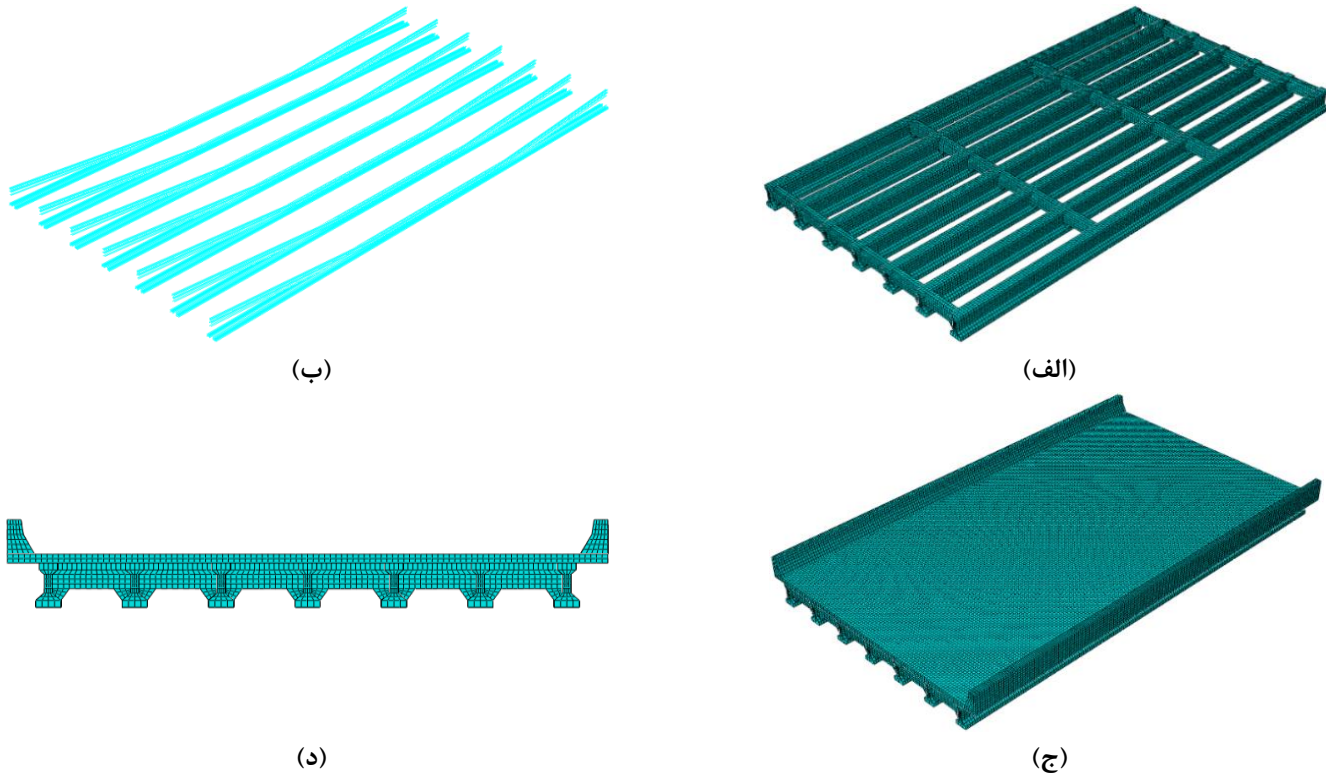
شکل ۶. کاهش دامنه پاسخ های مودال پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) سنسور A2099، (ب) سنسور A2104، (ج) سنسور A2105، (د) سنسور A2107

Fig. 6. Decaying amplitude of the modal responses of the bridge by variational mode decomposition, (a) sensor A2099, (b) sensor A2104, (c) sensor A2105, (d) sensor A2107.



شکل ۷. مودهای ارتعاشی پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

Fig.7. Mode shapes of the bridge by variational mode decomposition, (a) first mode, (b) second mode, (c) third mode, (d) fourth mode.



شکل ۸. مدل سازی پل بتنی پیش تنیده در نرم افزار آباکوس، (الف) تیرها، (ب) کابل‌ها، (ج) عرشه، (د) برش عرضی

Fig.8. Modeling of the prestressed concrete bridges in Abaqus, (a) beams, (b) cables, (c) decks, (d) cross section.

۵- صحت‌سنجی نتایج

مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌های کناری ۲۷/۵۸ مگاپاسکال می‌باشند. بنابراین، مدول الاستیسیته و چگالی تیرهای پیش‌تنیده به ترتیب برابر ۲۷/۷۹ گیگاپاسکال و ۲۴۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب در مدل‌سازی فرض شدند. همچنین، مدول الاستیسیته و چگالی بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌های کناری به ترتیب برابر ۲۴/۸۶ گیگاپاسکال و ۲۴۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شدند که مشخصات مصالح پل در جدول ۳ آورده شده است. علاوه بر این، تعداد ۳۰ عدد کابل پیش‌تنیده با قطر ۰/۱۱۲ متر در مقطع عرضی تیرها قرار گرفته است که دارای تنش تسلیم ۱۶۸۹/۹۱ مگاپاسکال، تنش نهایی ۱۸۶۱/۵۸ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۱۹۶/۵۰ گیگاپاسکال و چگالی ۷۸۴۹/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند.

سپس، با انجام تحلیل مودال فرکانس‌های اصلی و شکل موده‌های ارتعاشی پل بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. مقدار فرکانس‌های چهار مود اول پل به ترتیب برابر ۶/۰۴۳، ۷/۷۷۳، ۱۱/۱۵۸ و ۲۰/۰۲۳ هرتز می‌باشند که در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که

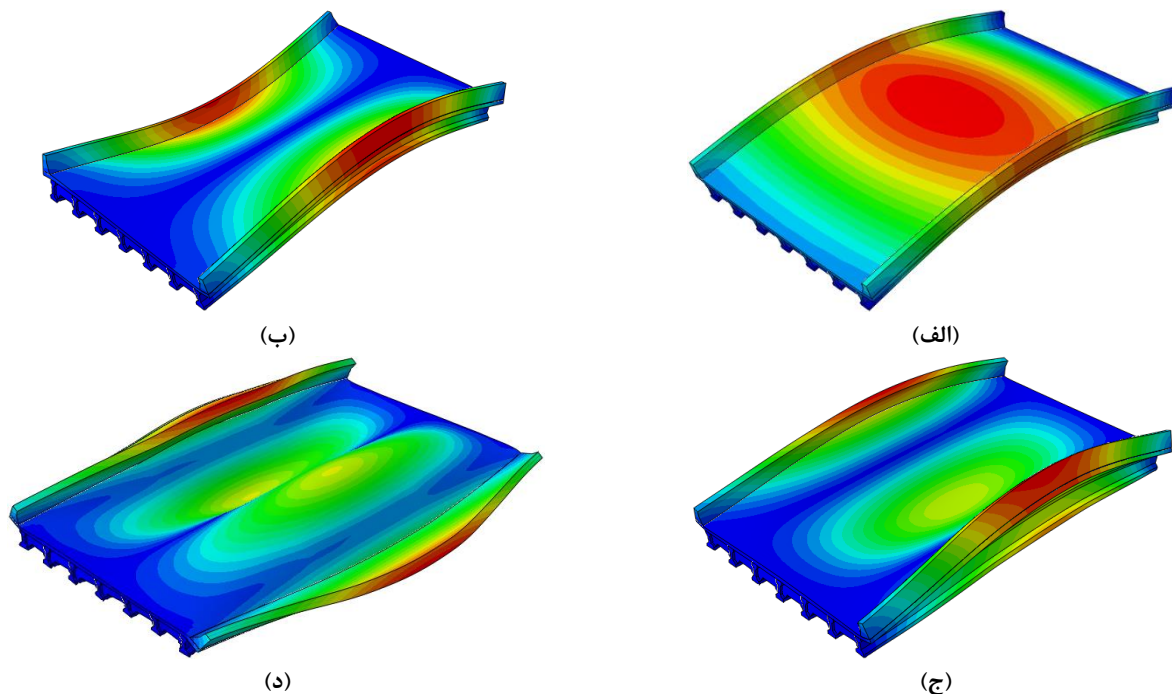
۱- ۵- مدل‌سازی اجزا محدود پل بتنی پیش‌تنیده توسط نرم‌افزار آباکوس برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی پل پیش‌تنیده به روش اجزا محدود مدل این سازه در آباکوس ایجاد شد. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی تیرها، عرشه بتنی، دیافراگم‌ها، جان‌پناه‌ها و تکیه‌گاه‌ها از المان سالیده^۱ سه بعدی C3D8R با اندازه مش ۰/۲۵۴ متر و برای مدل‌سازی کابل‌ها از المان تراس^۲ T3D2 با اندازه مش ۰/۲۵۴ متر استفاده شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. این پل از ۷ تیر بتنی پیش‌تنیده با تکیه‌گاه‌های ساده، دال بتنی مسلح به ضخامت ۰/۱۹ متر و دو عدد دیواره بتنی که بر روی لبه‌های کناری دال قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. همچنین، طول دهانه پل ۲۲/۸۶ متر و عرض آن ۱۳/۴۱ متر است. برای کنترل تغییر مکان جانبی تیرهای پل دیافراگم‌های بتنی در بین تیرها قرار گرفته است. بر اساس نقشه‌های موجود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن تیرهای پیش‌تنیده ۳۴/۴۷

- 1 Solid
- 2 Truss

جدول ۳. مشخصات مصالح تشکیل دهنده پل

Table 3. Material properties of the bridge components.

چگالی کابل‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته کابل‌ها (گیگاپاسکال)	چگالی تیرها، دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (گیگاپاسکال)	مدول الاستیسیته تیرها (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری بتن تیرها (مگاپاسکال)
۷۸۴۹/۰۵	۱۹۶/۵۰	۲۴۰۳	۲۴/۸۶	۲۷/۷۹	۲۷/۵۸	۳۴/۴۷

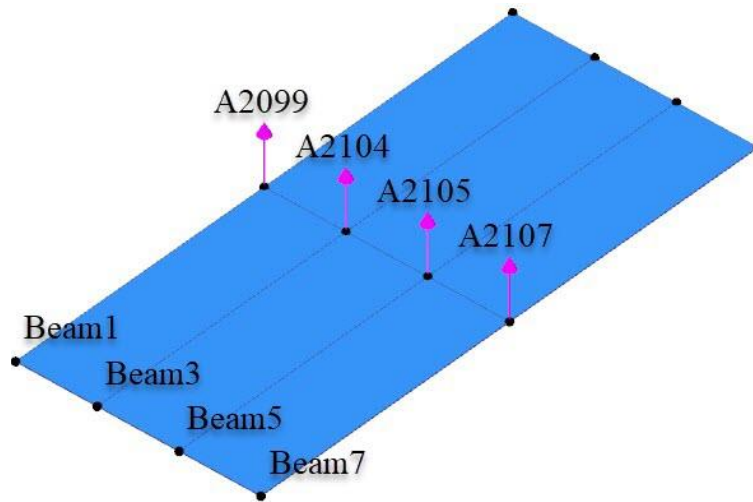


شکل ۹. فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی پل در نرم‌افزار آباکوس، (الف) فرکانس مود اول ۶/۴۳ هرتز، (ب) فرکانس مود دوم ۷/۷۷۳ هرتز، (ج) فرکانس مود سوم ۱۱/۱۵۸ هرتز، (د) فرکانس مود چهارم ۲۰/۰۲۳ هرتز

Fig. 9. Frequencies and mode shapes of the bridge in Abaqus, (a) frequency of the first mode 6.443 Hz, (b) frequency of the second mode 7.773 Hz, (c) frequency of the third mode 11.158 Hz, (d) frequency of the fourth mode 20.023 Hz.

الگوریتم تجزیه مود متغیر مشخص گردید، چهار مود اول ارتعاشی پل در این دو روش به ترتیب ۳، ۱۵، ۵ و ۱ درصد با هم اختلاف دارند که این اختلاف به دلیل در نظر گرفتن برخی فرضیات در مدل‌سازی اجزا محدود و تقریبی بودن مشخصات مقاومتی مصالح پل است.

پل در مود اول به صورت خمش حول محور عرضی و در مود دوم به صورت ترکیب حالات خمشی و پیچشی ارتعاش کرده است. همچنین، پل در مود سوم به صورت خمش حول محور طولی ارتعاش کرده است. با بررسی مقدار فرکانس‌های به دست آمده در مدل اجزا محدود و



شکل ۱۰. مکان نصب چهار سنسور بر روی پل در نرم‌افزار آرتیمیس

Fig. 10. Location of four sensors on the bridge in Artemis.

اصلی^۵ SSI-PC، مولفه اصلی بی‌وزن^۶ SSI-UPC، مولفه اصلی بی‌وزن^۷ SSI-UPCX و تحلیل متغیر استاندارد^۸ SSI-CVA که تعمیم یافته^۹ SSI-UPCX و تحلیل متغیر استاندارد^۸ SSI-CVA که همه آن‌ها بر اساس شناسایی زیر فضای تصادفی^۹ SSI حاصل می‌شوند. این روش‌ها پارامترهای مودال را به طور مستقیم از سری‌های زمانی اندازه‌گیری شده و با خطای بسیار کم محاسبه می‌کنند. روش زیر فضای تصادفی از راه حل‌های موثری برای مقابله با نویز و خطاهای تصادفی استفاده می‌کند و توانایی تخمین مقدار کم یا زیاد میرایی را دارد. همچنین، این روش مودهای ارتعاشی را به صورت خودکار استخراج می‌کند و پارامترهای مودال سازه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ارتعاشی به دست می‌آورد.

برای به دست آوردن مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل پیش‌تنیده، پاسخ‌های شتاب ثبت شده به وسیله سنسورها با استفاده از نرم‌افزار آرتیمیس و روش‌های مختلف در حوزه فرکانس و حوزه زمان پردازش شدند. به همین منظور هندسه پل و مکان نصب سنسورها در وسط تیرهای پل در نرم‌افزار آرتیمیس ایجاد شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۵-۲- صحت‌سنجی مشخصات مودال پل توسط نرم‌افزار آرتیمیس

روش‌های بسیاری برای تشخیص خروجی سیستم سازه‌ای وجود دارد که مبنای کار آن‌ها بررسی ارتباط بین ورودی‌های مجهول و خروجی‌های حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی است. نرم‌افزار آرتیمیس اطلاعات مودال سازه را از طریق روش‌های مختلف پردازش سیگنال در حوزه فرکانس و حوزه زمان محاسبه می‌کند. در این نرم‌افزار، تجزیه سیگنال در حوزه فرکانس شامل سه روش است که در آن‌ها توابع پاسخ فرکانسی با ماتریس چگالی طیفی توان^۱ که از پردازش خروجی تخمین زده می‌شوند، مرتبط می‌شوند. این روش‌ها شامل تجزیه دامنه فرکانس^۲ FDD، تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته^۳ CFDD و تجزیه دامنه فرکانس برازش منحنی^۴ EFDD می‌باشند. در همه این روش‌ها، مشخصات مودال سازه با برداشت نقاط حداکثر در دامنه فرکانس تخمین زده می‌شوند. این روش‌ها به شکلی طراحی شده‌اند که سیگنال‌های هارمونیک را در حالت دوران بخش‌های مختلف سازه‌ای و سایر تحریک‌های سینوسی در نظر می‌گیرند. علاوه بر این، در نرم‌افزار آرتیمیس تجزیه سیگنال در حوزه زمان شامل چهار روش است که عبارتند از: مولفه

5 Principal Component
6 Unweighted Principal Component
7 Extended Unweighted Principal Component
8 Canonical Variate Analysis
9 Stochastic Subspace Identification

1 Power Spectral Densities Matrix
2 Frequency Domain Decomposition
3 Enhanced Frequency Domain Decomposition
4 Curve-fit Frequency Domain Decomposition

جدول ۴. فرکانس‌های پل در نرم‌افزار آرتمیس (هرتز)

Table 4. Frequencies of the bridge in Artemis (Hz).

روش پردازش سیگنال						شماره مود ارتعاشی
SSI-CVA	SSI-UPC	SSI-PC	CFDD	EFDD	FDD	
۵/۸۹	۵/۸۵۳	۵/۸۵۲	۵/۸۸۵	۵/۸۸۲	۵/۸۹۱	مود اول
۶/۹۴۸	۷/۰۳۲	۷/۰۱۳	۷/۴۱۲	۷/۴۱۲	۷/۴۰۸	مود دوم
۱۰/۷۵۷	۱۰/۷۳۸	۱۰/۷۴۶	۱۰/۷۷۲	۱۰/۷۸۶	۱۰/۷۹۹	مود سوم
۲۰/۴۲۱	۲۰/۵۲۳	۲۰/۴۴۸	۲۰/۴۶۴	۲۰/۴۷۶	۲۰/۵۱۵	مود چهارم

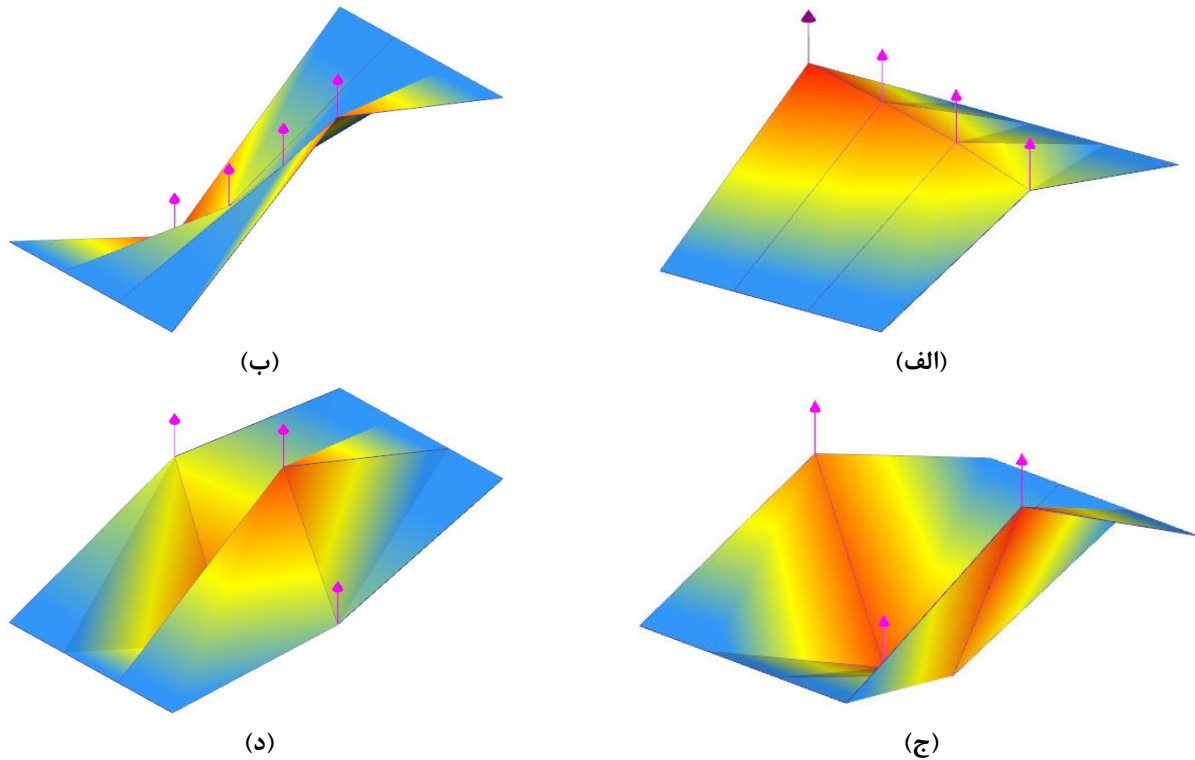
جدول ۵. نسبت‌های میرایی پل در نرم‌افزار آرتمیس (درصد)

Table 5. Damping ratios of the bridge in Artemis (percentage).

روش پردازش سیگنال						شماره مود ارتعاشی
SSI-CVA	SSI-UPC	SSI-PC	CFDD	EFDD	FDD	
۴/۱۸۴	۴/۹۱۸	۳/۶۵	۰/۳۵۸	۰/۸۸۳	-	مود اول
۴/۰۵۴	۴/۵۱	۴/۴۳۷	۰/۰۵۴	۰/۱۱۱	-	مود دوم
۱/۳۸۵	۱/۴۷۹	۱/۵۴۸	۰/۷۳۳	۱/۴۶۲	-	مود سوم
۱/۹۱۳	۱/۹۶۹	۲/۰۶۴	۰/۵۴۸	۱/۳۹۳	-	مود چهارم

با بررسی مقدار فرکانس‌های به دست آمده توسط دو روش پردازش سیگنال با نرم‌افزار آرتمیس و الگوریتم تجزیه مود متغیر مشخص شد، فرکانس‌های مودهای اول، سوم و چهارم ارتعاشی پل در حدود ۱ درصد و فرکانس‌های مود دوم ارتعاشی در روش حوزه فرکانس ۹ درصد و در روش حوزه زمان ۳ درصد با هم اختلاف دارند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر نسبت به روش‌های حوزه زمان که در نرم‌افزار آرتمیس استفاده شد، دارای خطای کمتری می‌باشند. در ادامه، با استفاده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال و اطلاعات به دست آمده از سنسورهای شتاب، شکل مودهای ارتعاشی چهارم مود اول پل شناسایی شدند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی شکل مودهای ارتعاشی دریافت می‌شود ارتعاش پل در مود اول به صورت خمشی است و تیرها به صورت نامتقارن تغییر شکل داده‌اند. ارتعاش پل در مود دوم به صورت دوران حول محور طولی پل و با چرخش به سمت جانبی رخ داده است. همچنین، پل در مود سوم به صورت خمشی حول محور طولی و در

با بررسی فرکانس‌های به دست آمده از پردازش پاسخ‌های شتاب با استفاده از روش‌های حوزه فرکانس و حوزه زمان مشخص شد که اختلاف بین مقدار فرکانس‌های مودهای اول، سوم و چهارم در همه روش‌ها در حدود ۱ درصد به دست آمده است. علاوه بر این، مقدار فرکانس‌های محاسبه شده برای مود دوم در حوزه فرکانس حدود ۶ درصد بیشتر از مقدار مشابه در حوزه زمان است. علاوه بر این، اختلاف بین مقدار فرکانس‌های چهارم مود اول پل در مدل اجزا محدود و مدل آرتمیس به ترتیب در روش‌های حوزه فرکانس برابر ۳، ۴، ۵، ۲ درصد و در روش‌های حوزه زمان برابر ۳، ۱۱، ۴ و ۲ درصد می‌باشند. نسبت‌های میرایی که با روش‌های حوزه زمان تخمین زده شد نزدیک به مقدار میرایی موجود در پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمده است. همچنین، روش‌های حوزه فرکانس در مقایسه با روش‌های حوزه زمان قادر به تخمین میرایی پل با دقت کافی نبوده‌اند. مقدار فرکانس‌های اصلی و نسبت‌های میرایی چهارم مود اول پل در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۱۱. شکل مودهای ارتعاشی پل در نرم افزار آرتمیس، (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

Fig. 11. Mode shapes of the bridge in Artemis, (a) first mode, (b) second mode, (c) third mode, (d) fourth mode.

جدول ۶. مقایسه فرکانس‌های پل (هرتز)

Table 6. Comparison of the bridge frequencies (Hz).

آباکوس	آرتمیس (SSI-) (CVA)	تجزیه مود متغیر	شماره مود ارتعاشی
۶/۰۴۳	۵/۸۹	۵/۸۹۶	مود اول
۷/۷۷۳	۶/۹۴۸	۶/۷۷۳	مود دوم
۱۱/۱۵۸	۱۰/۷۵۷	۱۰/۶۳۶	مود سوم
۲۰/۰۲۳	۲۰/۴۲۱	۲۰/۲۰۸	مود چهارم

تحقیق، مقایسه‌ای بین سه روش مورد استفاده برای تعیین فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی پل در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای چهار مود اول ارتعاشی پل توسط سه روش مورد بحث با دقت مناسبی دارای مقادیر نزدیک به هم می‌باشند.

مود چهارم به صورت خمش ناحیه‌ای ارتعاش کرده است. با مقایسه شکل مودهای ارتعاشی به دست آمده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر با روش‌های مدل اجزا محدود و نرم‌افزار آرتمیس مشخص شد که شکل مودهای ارتعاشی شناسایی شده توسط این الگوریتم مطابقت خوبی با دو روش دیگر دارند. به منظور بررسی عملکرد روش پردازش سیگنال ارائه شده در این

جدول ۷. مقایسه مقادیر شکل مودهای ارتعاشی پل

Table 7. Comparison of the mode shapes of the bridge.

شماره مود ارتعاشی	شماره تیر پل	تجزیه مود متغیر	آرتمیس (-SSI) (CVA)	آباکوس
مود اول	۱	۱	۱	۰/۸۹۴۸
	۳	۰/۹۱۶۳	۰/۸۵۰۷	۰/۹۸۴۹
	۵	۰/۸۸۶۱	۰/۶۸۵۹	۰/۹۸۴۹
	۷	۰/۶۵۱۹	۰/۴۷۲۸	۰/۸۹۴۸
مود دوم	۱	-۰/۹۸۱۳	-۰/۶۰۱۶	-۱
	۳	-۰/۲۵۴۹	-۰/۰۶۹	-۰/۳۴۱۹
	۵	۰/۴۰۶۴	۰/۵۷۲۹	۰/۳۴۱۹
	۷	۱	۱	۱
مود سوم	۱	۱	۱	۱
	۳	-۰/۶۸۷۲	-۰/۷۲۴۹	-۰/۵۴۲۸
	۵	-۰/۸۴۳۲	-۰/۸۷۰۹	-۰/۵۴۲۸
	۷	۰/۷۳۱۱	۰/۷۷۴۲	۱
مود چهارم	۱	۰/۲۵۵۲	-۰/۲۶۶۴	۰/۳۶۱۷
	۳	-۰/۹۰۲۲	-۰/۹۰۶۸	-۱
	۵	۱	۱	۱
	۷	-۰/۴۱۶۱	-۰/۴۷۵۹	-۰/۳۶۱۷

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، روشی برای پردازش سیگنال پاسخهای شتاب پل بتنی پیش‌تنیده آسیب دیده با هدف شناسایی مشخصات مودال مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از الگوریتم تجزیه مود متغیر برای تجزیه پاسخهای شتاب در نرم‌افزار متلب استفاده شد. سپس، این الگوریتم پاسخهای شتاب را به مودهای ذاتی تجزیه کرد و مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل به دست آمدند. همچنین، برای ثبت پاسخهای شتاب ایجاد شده توسط آزمایش ارتعاش محیطی از کمترین تعداد سنسور در وسط دهانه پل استفاده شد. برای بررسی عملکرد این الگوریتم، پاسخهای شتاب ثبت شده توسط سنسورها در نرم‌افزار آرتمیس با استفاده از روشهای مختلف پردازش سیگنال تجزیه شدند و مشخصات مودال پل به دست آمدند. علاوه بر این، مدل اجزا محدود پل در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد و با انجام تحلیل مودال مقدار فرکانس‌های اصلی و شکل مودهای ارتعاشی محاسبه شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مودهای ذاتی پل با دقت و سرعت بالا و با یک بار اجرای الگوریتم تجزیه مود متغیر شناسایی و استخراج شدند.
- ۲- نویز و موارد ناخواسته از سیگنال آزمایش ارتعاش محیطی با به کار بردن این الگوریتم شناسایی و حذف شدند.
- ۳- با در نظر گرفتن بخش محدودی از پاسخ ارتعاش آزاد پل بعد از ماکزیمم پاسخ شتاب، مشخصات مودال پل توسط این الگوریتم به دست آمدند به طوری که حجم محاسبات پردازش سیگنال به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرد.
- ۴- مقدار فرکانس‌های چهار مود اول ارتعاشی پل در مدل اجزا محدود و الگوریتم تجزیه مود متغیر به ترتیب ۳، ۱۵، ۵ و ۱ درصد با هم اختلاف دارند. همچنین، اختلاف بین مقدار فرکانس‌های چهار مود اول پل در مدل اجزا محدود و مدل آرتمیس به ترتیب در روش‌های حوزه فرکانس برابر ۳، ۵، ۴ و ۲ درصد و در روش‌های حوزه زمان برابر ۳، ۱۱، ۴ و ۲ درصد می‌باشند. علاوه بر این، مقدار فرکانس‌های به دست آمده توسط دو روش پردازش

bient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge, *Engineering Structures*, 32(8) (2010) 2003-2018.

[8] A. Bagheri, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Identification of Flexural Rigidity in Bridges with Limited Structural Information, *Journal of Structural Engineering*, 144(8) (2018) 04018126.

[9] A. Bagheri, M. Alipour, S. Usmani, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Structural stiffness identification of skewed slab bridges with limited information for load rating purpose, *Dynamics of Civil Structures*, Volume 2, (2017) 243-249.

[10] Y. Tian, J. Zhang, Q. Xia, P. Li, Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data, *Engineering Structures*, 146 (2017) 158-169.

[11] K.-C. Chang, C.-W. Kim, Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge, *Engineering Structures*, 122 (2016) 156-173.

[12] L.S. Hogan, L. Wotherspoon, S. Beskhyroun, J. Ingham, Dynamic field testing of a three-span precast-concrete bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 21(12) (2016) 06016007.

[13] A. Bagheri, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, M. Alipour, A. Zare Hosseinzadeh, A hybrid experimental-numerical approach for load rating of reinforced concrete bridges with insufficient structural properties, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(6) (2019) 754-770.

[14] A.K. Ndong, M.S. Dizaji, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Load Rating of a Reinforced Concrete T-beam Bridge through Ambient Vibration Testing and Finite Element Model Updating, *Dynamics of Civil Structures*, Volume 2, (2019) 337-343.

[15] A. Bagheri, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, A nondestructive method for load rating of bridges without structural properties and plans, *Engineering Structures*, 171 (2018) 545-556.

[16] W.-H. Hu, C. Moutinho, E. Caetano, F. Magalhães, A. Cunha, Continuous dynamic monitoring of a lively foot-bridge for serviceability assessment and damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 33 (2012) 38-55.

[17] B.J. Costa, F. Magalhães, Á. Cunha, J. Figueiras, Rehabilitation assessment of a centenary steel bridge based on modal analysis, *Engineering structures*, 56 (2013) 260-272.

[18] B.J.A. Costa, F. Magalhães, Á. Cunha, J. Figueiras, Modal analysis for the rehabilitation assessment of the Luiz I Bridge, *Journal of bridge engineering*, 19(12) (2014) 05014006.

[19] Y. Lee, A.F. Vakakis, D. McFarland, L. Bergman, A global-local approach to nonlinear system identification: a review, *Structural Control and Health Monitoring*, 17(7)

سیگنال با نرم‌افزار آرتمیس و الگوریتم تجزیه مود متغیر برای مودهای اول، سوم و چهارم ارتعاشی پل در حدود ۱ درصد و برای فرکانس‌های مود دوم ارتعاشی در روش حوزه فرکانس ۹ درصد و در روش حوزه زمان ۳ درصد با هم اختلاف دارند.

۵-نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط این الگوریتم با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. همچنین، روش‌های حوزه فرکانس در نرم‌افزار آرتمیس میرایی پل را با دقت کافی محاسبه نکردند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر نسبت به روش‌های حوزه زمان که در نرم‌افزار آرتمیس استفاده شد، دارای خطای کمتری است.

۶-شکل مودهای ارتعاشی شناسایی شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر انطباق بسیار خوبی با شکل مودهای ارتعاشی به دست آمده از مدل‌های نرم‌افزارهای آباکوس و آرتمیس دارند به طوری که این الگوریتم شکل مودهای ارتعاشی خمشی، پیچشی و ترکیبی از آن‌ها را با دقت مناسبی شناسایی کرد.

منابع

- [1] H. Li, S. Li, J. Ou, H. Li, Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects, *Structural Control and Health Monitoring*, 17(5) (2010) 495-512.
- [2] S.N. Pakzad, Development and deployment of large scale wireless sensor network on a long-span bridge, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6) (2010) 525-543.
- [3] Y. Ding, A. Li, D. Du, T. Liu, Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge, *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(6) (2010) 725-739.
- [4] A. Gheitasi, O.E. Ozbulut, S. Usmani, M. Alipour, D.K. Harris, Experimental and analytical vibration serviceability assessment of an in-service footbridge, *Case Studies in Non-destructive Testing and Evaluation*, 6 (2016) 79-88.
- [5] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, A summary review of vibration-based damage identification methods, *Shock and vibration digest*, 30(2) (1998) 91-105.
- [6] F. Amini, Y. Hedayati, Underdetermined blind modal identification of structures by earthquake and ambient vibration measurements via sparse component analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 366 (2016) 117-132.
- [7] J. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, A. Cunha, Am-

- [33] Z. Hou, M. Noori, R.S. Amand, Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering mechanics*, 126(7) (2000) 677-683.
- [34] J.N. Yang, Y. Lei, S. Pan, N. Huang, System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 1: normal modes, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(9) (2003) 1443-1467.
- [35] N.E. Huang, M.L. Wu, W. Qu, S.R. Long, S.S. Shen, Applications of Hilbert–Huang transform to non-stationary financial time series analysis, *Applied stochastic models in business and industry*, 19(3) (2003) 245-268.
- [36] S. Nagarajaiah, Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 16(7-8) (2009) 800-841.
- [37] T. Kijewski-Correa, A. Kareem, Efficacy of Hilbert and wavelet transforms for time-frequency analysis, *Journal of engineering mechanics*, 132(10) (2006) 1037-1049.
- [38] H. Li, X. Deng, H. Dai, Structural damage detection using the combination method of EMD and wavelet analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1) (2007) 298-306.
- [39] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971) (1998) 903-995.
- [40] X. Zhang, Z. Liu, Q. Miao, L. Wang, An optimized time varying filtering based empirical mode decomposition method with grey wolf optimizer for machinery fault diagnosis, *Journal of Sound and Vibration*, 418 (2018) 55-78.
- [41] M. Lazhari, A. Sadhu, Decentralized modal identification of structures using an adaptive empirical mode decomposition method, *Journal of Sound and Vibration*, 447 (2019) 20-41.
- [42] C.A. Perez-Ramirez, J.P. Amezcua-Sanchez, H. Adeli, M. Valtierra-Rodriguez, R.d.J. Romero-Troncoso, A. Dominguez-Gonzalez, R.A. Osornio-Rios, Time-frequency techniques for modal parameters identification of civil structures from acquired dynamic signals, *Journal of Vibroengineering*, 18(5) (2016) 3164-3185.
- [43] S. Mahato, M.V. Teja, A. Chakraborty, Adaptive HHT (AHHT) based modal parameter estimation from limited measurements of an RC-framed building under multi-component earthquake excitations, *Structural Control and Health Monitoring*, 22(7) (2015) 984-1001.
- (2010) 742-760.
- [20] J.M. Caicedo, J. Marulanda, Fast mode identification technique for online monitoring, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(4) (2011) 416-429.
- [21] F. Abazarsa, S. Ghahari, F. Nateghi, E. Taciroglu, Response-only modal identification of structures using limited sensors, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6) (2013) 987-1006.
- [22] A. Bayraktar, T. Türker, J. Tadla, A. Kurşun, A. Erdiş, Static and dynamic field load testing of the long span Nissibi cable-stayed bridge, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94 (2017) 136-157.
- [23] N. Maia, J. Silva, Modal analysis identification techniques, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778) (2001) 29-40.
- [24] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart materials and structures*, 10(3) (2001) 441.
- [25] L. Zhang, T. Wang, Y. Tamura, A frequency–spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis, *Mechanical systems and signal processing*, 24(5) (2010) 1227-1239.
- [26] S. Ibrahim, Random decrement technique for modal identification of structures, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 14(11) (1977) 696-700.
- [27] J.-N. Juang, R.S. Pappa, An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 8(5) (1985) 620-627.
- [28] P.-E. Gautier, C. Gontier, M. Smail, Robustness of an ARMA identification method for modal analysis of mechanical systems in the presence of noise, *Journal of Sound and Vibration*, 179(2) (1995) 227-242.
- [29] M. Döhler, X.-B. Lam, L. Mevel, Uncertainty quantification for modal parameters from stochastic subspace identification on multi-setup measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(2) (2013) 562-581.
- [30] L. Faravelli, F. Ubertini, C. Fuggini, System identification of a super high-rise building via a stochastic subspace approach, *Smart Structures and Systems*, 7(2) (2011) 133-152.
- [31] P.F. Pai, L. Huang, J. Hu, D.R. Langewisch, Time-frequency method for nonlinear system identification and damage detection, *Structural Health Monitoring*, 7(2) (2008) 103-127.
- [32] K. Dragomiretskiy, D. Zosso, Variational mode decomposition, *IEEE transactions on signal processing*, 62(3) (2013) 531-544.

- [47] Y. Tian, J. Zhang, Structural flexibility identification via moving-vehicle-induced time-varying modal parameters, *Journal of Sound and Vibration*, (2020) 115264.
- [48] M. Zhang, F. Xu, Variational mode decomposition based modal parameter identification in civil engineering, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(5) (2019) 1082-1094.
- [49] J.J. Reilly, *Load Testing Deteriorated Spans of the Hampton Roads Bridge-Tunnel for Load Rating Recommendations*, Virginia Tech, 2017.
- [44] M. Barbosh, A. Sadhu, M. Vogrig, Multisensor-based hybrid empirical mode decomposition method towards system identification of structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5) (2018) e2147.
- [45] P. Ni, J. Li, H. Hao, Y. Xia, X. Wang, J.M. Lee, K.H. Jung, Time-varying system identification using variational mode decomposition, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(6) (2018) e2175.
- [46] A. Bagheri, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Structural system identification based on variational mode decomposition, *Journal of Sound and Vibration*, 417 (2018) 182-197.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Dindar, M. H. Hosseini, M. R. Mansoori, Modal Data Identification of the Prestressed Concrete Bridge Using Variational Mode Decomposition, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 715-736.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19075.7055



