



## Damage detection in continuous deck bridges using statistical cross-correlation function method

M. J. Khosraviani<sup>1</sup>, O. Bahar<sup>2,\*</sup>, S. H. Ghasemi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup>Department of Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

**ABSTRACT:** The damage detection (DD) of the bridge has always been a major concern for engineers. This paper attempts to detect damage in the continuous deck bridges by providing a new method based on acceleration responses and their instantaneous amplitudes. The DD in this paper has two steps: firstly, determining the vicinity of damage in global DD. Secondly, determining the location of damage in local DD. Then by acceleration signals, the instantaneous amplitude values of healthy and damaged structural responses are extracted via HHT. Further, for the accurate evaluation of the proposed method, damage locations are determined by the cross-correlation damage index (DICC). To assess the feasibility and reliability of proposed methods, several analytical models of concrete bridges of one to three spans, as well as an experimental model of a simply supported steel beam, have been used. In order to consider noise pollution during data acquisition, a certain amount of noise is added to the response. The results in the analytical and experimental models showed that the proposed methods can determine the damage locations with appropriate accuracy for different damage scenarios and it could provide more exact results with a rapid estimation.

### Review History:

Received: 5/4/2019

Revised: 1/14/2020

Accepted: 1/14/2020

Available Online: 2/8/2020

### Keywords:

Damage detection

Structural health monitoring

Instantaneous amplitude

Cross-correlation

## 1. INTRODUCTION

Growing concerns about the increasing age of highway bridges, which are vital structures making the connection between cities for transportation, have made it crucial to properly evaluate the existing status of these structures [1]. These infrastructures are exposed to various environmental phenomena, temperature variations, and various loads such as wind load, tornadoes, gusts, storms, severe earthquakes, and other human-induced loads including vehicle collisions. Accordingly, bridge structures are likely to be damaged and consequently, it is very important to make appropriate decisions about their service level or remaining life cycle [2]. Therefore, one of the major challenges of current engineering knowledge is to continuously evaluate the structural behavior of bridges and identify possible damages in order to avoid high costs due to unpredictable damages [3]. In this paper, it is attempted to propose a new method for determining the damage location in continuous bridge decks based on the measured acceleration responses. In this paper, the results of analytical and experimental studies are used. The damage index based on the cross-correlation function is also employed for the damage detection process. The damage detection method is evaluated at two global and local levels. To verify the sensitivity and robustness of the proposed method, analytical models of single-, two-, and three-span

concrete bridges are used.

## 2. DAMAGE DETECTION METHODOLOGY

In the first part of the damage detection procedure, the cross-correlation is used in two damaged and healthy conditions. First, each acceleration response recorded from the structure is decomposed into a set of IMFs. Then, for each of the IMFs, the instantaneous amplitude and the associated analytical signal are calculated. This procedure is repeated for all available responses in damaged and undamaged conditions. In order to detect the location of damage, an innovative method that is more compatible with the actual behavior of bridges is proposed. In this method, damage detection is performed using a cross-correlation index. The cross-correlation values of the instantaneous amplitudes of structural response are calculated for two damaged and healthy states, and finally, by defining a new damage index the location of the damage is determined with much higher accuracy. The new index is defined based on the comparison between different levels of the cross-correlation functions of instantaneous amplitudes.

$$R_{hd}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A_{Ah}(t) A_{Ad}(t + \tau) dt \quad (1)$$

Where equation 1, is the cross-correlation function of two structural response signals in either damaged or undamaged

\*Corresponding author's email: omidbahar@iiees.ac.ir



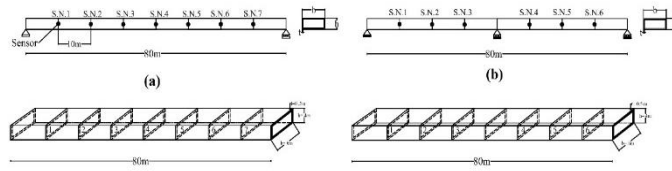


Fig. 1. Three-dimensional and front view of the (a) single-span, (b) two-span

Table 1. The properties of damage scenarios

Damage scenarios	Bridge structure	Damage location with a damage value of 40%
1	Single-span	Between sensors 2 and 3 with a width of 2.5 m
2	Two-span	Between sensors 2 and 3 with a width of 2.5 m

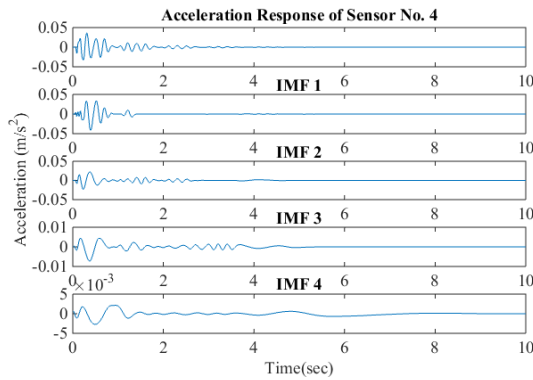


Fig. 2. The IMFs of sensor 1 obtained by the EEMD method

states, equation 2, cross-correlation damage index, and equation 3 is the Hilbert transform of the time series  $x(t)$ .

$$DICC = \frac{S_{R_{hd}(\tau)}(L) - S_{R_{hd}(\tau)}(R)}{S_{R_{hd}(\tau)}(T)} \quad (2)$$

$$HT[x(t)] = y(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

### 3. FINITE ELEMENT AND EXPERIMENTAL MODEL

To evaluate the proposed damage detection methods, the structural model of single-span, two-span, and three-span concrete bridges with specific dimensions and a simply supported steel beam are used. The length of the single-span and two-span bridges is 80 meters, and the three-span bridge length is 120 meters. The length of each span is also 40 meters as shown in Fig. 1.

Moreover, for receiving the responses of the damaged structures, different damage scenarios, as described in Table 1, are considered for the concrete bridges. The major moment of inertia in structural members is reduced by 40% in different scenarios. The damage in a structural member can include different kinds of defects which may ultimately reduce the

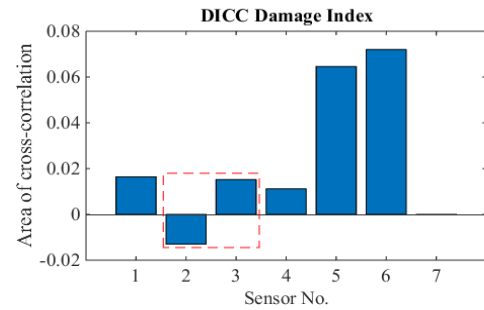


Fig. 3. The DICC damage index for damage scenario 1

stiffness of that member

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The instantaneous amplitudes of all sensors are calculated for healthy and damaged conditions. For instance, Fig. 3 shows the IFMs of sensor 1 based on the EEMD process for the three-span bridge.

Fig. 3 shows the DICC damage index values for the first damage scenario with a 40% damage value. According to the first damage scenario, the damage zone is located between sensors 2 and 3. According to Fig. 3, the damage location is recognized between sensors 2 and 3, which is due to the change in the cross-correlation function and the CCDI index from negative values in sensors 2 to positive values in sensor 3. This pattern correctly shows the location of the damage.

According to Fig. 4, the damage is located between sensors 2 and 3, and the location is correctly determined due to the changes in cross-correlation values from the negative to the positive region for the two-span bridge.

### 5. CONCLUSIONS

New methods for global and local damage detection in concrete bridges and steel beams were presented. To determine the damage location in both global and local views, DICC damage indices were employed. Numerical models of single-, two-, and three-span concrete bridges, as

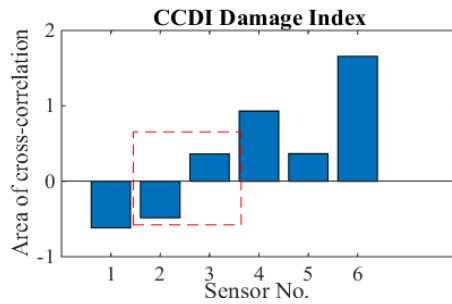


Fig. 4. The DICCC damage index for damage scenario 1

well as experimental models of a simply supported beam, were utilized. Afterward, damage detection procedures were followed for different damage scenarios separately via DICCC indices. The convenience and high reliability of the proposed methods using the instantaneous amplitudes of acceleration responses along with the HHT transform, as well as the combination with the instantaneous amplitudes energy, were evaluated for both indices. The results showed that the CCDI index has high reliability, acceptable accuracy, and fast performance for detecting the global and local damages in analytical and experimental models.

## REFERENCES

- [1] H. Wenzel., 2008. Health monitoring of bridges, John Wiley & Sons.
- [2] F. Magalhães, A. Cunha, and E. Caetano., 2012. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 28, pp. 212-228.
- [3] Y. L. Xu, and, Y. Xia., 2011. Structural health monitoring of long-span suspension bridges, CRC Press.
- [4] A. Pierdicca, F. Clementi, D. Maracci, D. Isidori, and S. Lenci., 2016. Damage detection in a precast structure subjected to an earthquake: A numerical approach, *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 447-458.
- [5] K. Y. Wong., 2004. Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges, *Structural control and health monitoring*, Vol. 11, No. 2, pp. 91-124.
- [6] M. Abe, and Y. Fujino., 2014. Bridge monitoring in Japan, *Encyclopedia of structural health monitoring*
- [7] H. M. Koh, H. S. Lee, S. Kim, and J. F. Choo., 2009. Monitoring of Bridges in Korea, *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*.
- [8] N. A. Londoño., 2006. “Use of vibration data for structural health monitoring of bridges”. (Doctoral dissertation, Carleton University).
- [9] N. Roveri, and A. Carcaterra., 2012. Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert–Huang transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 28, pp. 128-144.
- [10] J. N. Yang, Y. Lei, S. Pan, and N. Huang., 2003. System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 1: normal modes, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 32, No. 9, pp. 1443-1467.

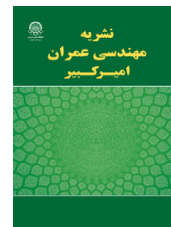
### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. J. Khosraviani, O. Bahar, S. H. Ghasemi, *Damage detection in continuous deck bridges using statistical cross-correlation function method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 137-140.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16248.6173](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16248.6173)







## تشخیص محل آسیب در پل‌های عرشه پیوسته با استفاده از روش آماری تابع همبستگی متقابل

محمدجواد خسرویانی<sup>۱</sup>، امید بهار<sup>۲\*</sup>، هومن قاسمی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

<sup>۲</sup> پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

### کلمات کلیدی:

تشخیص آسیب

پایش سلامت سازه

دامنه آنی

شاخص همبستگی متقابل

**خلاصه:** تشخیص به‌هنگام آسیب پل‌ها یکی از دغدغه‌های همیشگی مهندسين بوده است. در این مقاله تلاش شده با ارائه روش جدیدی براساس پاسخ‌های شتاب سازه و دامنه‌های آنی آنها، محل آسیب در عرشه‌ی پل‌ها تشخیص داده شود. برای این منظور، ابتدا براساس پاسخ‌های شتاب، مقادیر دامنه آنی پاسخ‌های سازه‌ی سالم و آسیب دیده از طریق تبدیل HHT محاسبه شده‌است. در ادامه، با معرفی شاخص جدید همبستگی متقابل (DICC) به تعیین محل‌های آسیب در حالت‌های کلی (Global) و موضعی (Local) پرداخته شده‌است. برای ارزیابی امکان‌پذیر بودن، و تخمین قابلیت اعتماد روش‌های پیشنهادی در تشخیص آسیب در دو سطح کلی و موضعی، از چند مدل تحلیلی پل‌های بتنی یک تا سه دهانه، و همچنین یک مدل آزمایشگاهی تیر دو سر ساده فلزی استفاده شده‌است. به منظور در نظر گرفتن اغتشاشات محیطی در هنگام برداشت داده‌ها و نشان دادن کارایی روش، مقدار نوفه مشخصی به پاسخ‌ها اضافه شده‌است. نتایج ارزیابی‌ها در مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نشان دادند که روش پیشنهادی، می‌تواند برای سناریوهای مختلف آسیب، محل‌های آسیب را با دقت کافی تعیین نمایند. همچنین نتایج روش شاخص آسیب همبستگی متقابل DICC برای تمامی مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، بیانگر این نکته است که با ارزیابی سریع‌تر توانست است نتایج دقیق‌تری را ارائه دهد.

### ۱- مقدمه

خدمت‌رسانی یا عمر باقیمانده آنها را در عین حال که بسیار با اهمیت تلقی می‌گردد، دشوار نماید [۲]. لذا یکی از چالش‌های جدی دانش مهندسی کنونی برای جلوگیری از هزینه‌های تحمیلی بسیار زیاد در شرایط نامطلوب پس از وقوع حوادث غیرمترقبه، استفاده از ارزیابی پیوسته‌ی رفتار سازه‌ی پل‌ها و تشخیص آسیب‌های احتمالی بوجود آمده در آنها است [۳]. براین‌اساس، امروزه موضوع پایش سلامت سازه‌های زیربنایی (ISHM)<sup>۱</sup> به خصوص پل‌ها به عنوان یکی از اجزاء اصلی شریان‌های حیاتی، چالش بزرگی پیش پای مهندسين قرار داده است. پایش سلامت سازه‌های زیربنایی به عنوان ابزاری کارآمد می‌تواند در حفاظت و ایمنی پل‌ها نقش بسزایی ایفا نماید. هدف اصلی

نگرانی‌های فزاینده در خصوص افزایش سن پل‌های بین‌شهری که سازه‌هایی حیاتی و عامل ارتباطی میان شهرها برای رفت و آمد و رساندن خدمات محسوب می‌گردند، بررسی و ارزیابی وضعیت موجود این سازه‌ها را اجتناب‌ناپذیر نموده است [۱]. این سازه‌های زیربنایی ممکن است در یک دوره زمانی تحت شرایط مختلف محیطی و تغییرات دمایی و بارهای متنوع از جمله: انواع بارهای باد مانند گردبادها، تندبادها، طوفان‌ها، جنبش‌های شدید زمین‌لرزه و بارهای تحمیلی دیگر مانند بارهای ناشی از برخورد وسایل نقلیه با دیواره‌ی عرشه پل، دچار آسیب‌هایی شوند که تصمیم‌گیری در مورد سطح

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات:omidbahar@iiees.ac.ir

1 Infrastructure Structural Health Monitoring

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



می‌پذیرد. براین اساس روش‌های کلی تحت عنوان روش تعیین آسیب سازه‌ای کلی (GSDDM)<sup>۵</sup> مطرح شده‌است. یکی از این روش‌ها، تکنیک تشخیص آسیب براساس ارتعاشات سازه می‌باشد که مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. روش‌های تشخیص آسیب براساس ارتعاش نیز به دو بخش مهم تقسیم می‌شوند: (۱) تشخیص آسیب مبتنی بر مدل تحلیلی (MBDDM)<sup>۶</sup> و (۲) تشخیص آسیب مستقل از مدل تحلیلی (NMBDDM)<sup>۷</sup> [۱۳]. براساس پژوهش‌های انجام پذیرفته، روش‌های متنوع تشخیص آسیب و شناسایی سازه‌های مبتنی بر ارتعاش به دلیل ارزیابی‌های دقیق، هزینه پایین، و ابزارهای گسترده‌ی موجود برای پردازش داده‌ها پیشرفت‌های زیادی داشته است [۱۴ و ۱۵]. برای ارزیابی ارتعاش حاصل از پل‌ها، می‌توان پاسخ‌های دینامیکی پل‌ها را تحت ارتعاش‌های آزاد، اجباری و بارهای محیطی اندازه‌گیری نمود و برای تعیین شرایط سالم بودن سازه یا ارزیابی ایمنی آن مورد استفاده قرار داد.

مازورک و دی‌ولف [۱۶] امکان تشخیص آسیب سازه‌ای را در پل‌های بزرگراهی از طریق تحلیل مشخصه‌های ارتعاشی سازه بررسی کردند. لی و ان‌جی [۱۷] و نیز محمود [۱۸] اثرات ترک‌های ایجاد شده در اعضای سازه‌ای را بر روی پاسخ‌های دینامیکی یک تیر با تکیه‌گاه‌های ساده تحت بارهای ناشی از عبور وسیله نقلیه ارزیابی نمودند. ژنگ و همکاران [۱۹] روشی برای شناسایی همزمان وزن وسایل نقلیه‌ی متحرک و آسیب‌های سازه‌ای از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده ارائه کردند. راثورت و همکاران [۲۰] از طریق تحلیل مود و پاسخ‌های دینامیکی یک پل قطارهای سریع‌السیر با بالاست‌های پیوسته روی آن، به تعیین مشخصه‌های دینامیکی پل پرداختند. پارک و همکاران [۲۱] از طریق مشخصه‌های دینامیکی و پاسخ‌های شتاب یک پل کابلی به تخمین مشخصه‌های میرایی آن پرداختند. همچنین شین و پارک [۲۱] با ارائه روشی نوآورانه و معرفی یک شاخص آسیب جدید مبتنی بر ورودی تنها و خروجی تنها، از طریق داده‌های پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی یک پل به تعیین محل دقیق آسیب در حالت‌های مختلف پرداختند. براین اساس تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی پل‌ها و مشخصه‌های دینامیکی آنها صورت پذیرفته است. با توسعه روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال، تعداد مقالاتی که

آن، دسته‌بندی عملکرد سازه‌ها و کمک به نگهداری آنها در طول دوره خدمت‌رسانی است. ISHM شامل: شناسایی مشخصه‌ها و رفتار سازه‌های سالم و آسیب‌دیده، تعیین اختلاف میان آنها و یافتن محل آسیب در سازه‌ها می‌باشد. اغلب آسیب‌ها به صورت نقص‌های سازه‌ای شامل مواردی مانند کاهش سطح مقطع، تغییر در مشخصه‌های هندسی یا تغییر در شرایط مرزی و تغییر در مشخصه‌های رفتاری مصالح برآورد می‌گردند. تعیین این موارد دغدغه‌های اصلی تشخیص آسیب در سازه‌های زیربنایی است [۴].

در سراسر دنیا کاربردهای پیشرفته فراوانی از سامانه‌های پایش سلامت سازه‌های زیربنایی بر روی پل‌ها وجود دارد. برای نمونه از این سامانه‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: پل ما تسینگ در هنگ‌کنگ [۵]، پل آکشی‌کی‌کو در ژاپن [۶]، پل سه‌اواها در کره [۷]، پل کان‌فدری‌شن در کانادا [۸]، پل کومودوره بری در ایالات‌متحده [۹] و پل اوره‌ساند در دانمارک [۱۰]. همچنین برای مطالعه بیشتر در خصوص پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها می‌توان به مراجع [۱۱ و ۱۲] مراجعه نمود.

روش‌های زیادی برای تشخیص آسیب‌های وارده به سازه‌ها ارائه شده‌است که می‌توان آنها را در دو دسته‌ی کلی آزمایش‌های مخرب (DT)<sup>۱</sup> و غیرمخرب (NDT)<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی نمود. اما در برخی از موقعیت‌ها به دلیل سختی برداشت داده‌ها و یا عدم امکان دسترسی به موضع موردنظر، برداشت داده‌ها یا ارزیابی سلامت سازه‌ای به صورت دیداری امکان‌پذیر نخواهد بود. در اینگونه موارد برای برداشت داده، نیاز به سامانه‌های حسگرهای پیشرفته، سامانه‌های سخت افزاری قدرتمند و فناوری‌های روز دنیا داریم تا بتوان آسیب‌های وارده را تشخیص داده و ارزیابی از شرایط و وضعیت موجود پل ارائه نمود [۱]. تلاش‌های زیاد صورت گرفته نشان می‌دهد روش‌های مختلف آزمایش‌های غیرمخرب هم برای تعیین آسیب‌های موضعی<sup>۳</sup> و هم برای ارزیابی و تعیین آسیب‌های کلی<sup>۴</sup> قابل کاربرد است. این موضوع یکی از اهداف این مقاله نیز می‌باشد. به این ترتیب که در ابتدا با یک ارزیابی کلی محدوده‌ی آسیب شناسایی می‌شود، برای نمونه محدوده‌ی میان دو حسگر در یک مقیاس بزرگ. در مرحله‌ی بعدی ارزیابی آسیب موضعی با هدف تعیین محل دقیق آسیب انجام

5 Global structural Damage Detection Method  
6 Model-Based Damage Detection Method  
7 Non-Model- Based Damage Detection Method

1 Destructive Test  
2 Non-Destructive test  
3 Local  
4 Global

## ۲- روش تبدیل هیلبرت - هوانگ

روش تجزیه تجربی مودی<sup>۲</sup> (EMD) و روش تجزیه تجربی مودی گروهی<sup>۳</sup> (EEMD) دو ابزار قدرتمند برای تجزیه سیگنال‌های نامانای به دست آمده از فرآیندهای غیرخطی هستند. سیگنال‌های تجزیه شده مشخصه‌ای از مودهای مستقل تحریک شده‌ی سازه تحت عنوان توابع مودی ذاتی می‌باشند. این روش، یک روش مستقیم و سازگار برای انواع سیگنال‌ها با مشخصات متفاوت می‌باشد. توابع مودی ذاتی (IMFs)<sup>۴</sup> یک فرضیه ساده دارند: یک سیگنال ساده که تعداد قله/دره‌ی آن با تعداد نقاط گذرنده از صفر برابر است<sup>۵</sup> [۳۳]. هر IMF یک بردار پایه برای سیگنال اصلی محسوب می‌گردد که دارای فرکانس و دامنه متغیر با زمان است [۳۴]. اما روش EMD نقطه ضعف‌هایی دارد؛ هر تابع مودی ذاتی لزوماً یک بردار پایه‌ی مستقل نبوده و امکان دارد محدوده‌ی وسیع‌تر فرکانسی را دربرگیرد. به این ترتیب، ممکن است به دلیل برخورد بین دامنه‌های توابع مودی ذاتی، در نهایت نتایج مناسبی به دست نیاید.

برای غلبه بر این مسئله وو و هوانگ [۳۵] روش تجزیه تجربی مودی گروهی (EEMD) را ارائه نمودند. روش EEMD ادعا می‌کند که می‌تواند IMF های مناسب یک سیگنال را به درستی از سیگنال‌های نوفه جدا نماید. در این روش، نوفه‌های سطح کم تصادفی به سیگنال اصلی اضافه شده و پردازش EMD چندین بار انجام می‌شود تا توابع مودی ذاتی اصلی به دست آیند. به این ترتیب سیگنال‌های پاسخ اندازه‌گیری شده که با سطحی از نوفه آلوده شده‌اند، در روش EEMD تا اندازه‌ی زیادی به بردارهای پایه‌ی بدون اغتشاشات نوفه‌ای تجزیه خواهند شد. الگوریتم روش تجزیه تجربی مودی گروهی براساس مراحل موجود در [۳۵] سازماندهی شده‌است. پس از آن، با اعمال تبدیل هیلبرت بر روی هر تابع مودی ذاتی، داده‌های سری زمانی بخش موهومی توابع مودی ذاتی محاسبه می‌شوند. برای نمونه، تبدیل هیلبرت HT داده‌های سری زمانی  $x(t)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$HT[x(t)] = y(t) = \frac{1}{\pi} P.V \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

در دو دهه‌ی اخیر برای تعیین آسیب سازه پل‌ها با روش‌های مستقل از مدل افزایش یافته است. برای مثال، تعداد زیادی از مقالات به سمت تحلیل‌های زمان-فرکانس هدایت شده‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان به تبدیل موجک [۲۳ و ۲۲] و تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT)<sup>۱</sup> [۲۴] با استفاده از پاسخ‌های شتاب و جابجایی، و تبدیل موجک با استفاده از پاسخ‌های شتاب [۲۵ و ۲۶] اشاره نمود. مارچسیلو و همکاران [۲۷] از دیدگاه زمان-فرکانس برای شناسایی فرکانس‌های آنی در یک پل با بارهای عبوری مختلف استفاده کردند. لی و هاو [۲۸] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته و تبدیل HHT به تحلیل پاسخ‌های جابجایی نسبی پرداختند و به‌طور موفقیت‌آمیزی آسیب‌های برشی عرشه‌های کامپوزیتی را تحت بارهای مختلف شناسایی نمودند. ایده‌ی مطالعات فوق براین اساس استوار است که آسیب را می‌توان با پرش یا تکینگی ایجاد شده در پاسخ‌های نوسانی نشان داد. این رویداد از طریق بروز نوسانات مشهود در ویژگی‌های شناسایی شده از یک سیگنال پردازش شده قابل دستیابی است. بنابراین، موفقیت این روش‌ها بستگی به این دارد که تکینگی یا پرش در سیگنال‌های پاسخ توسط تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال در هنگام عبور بار متحرک از روی محل آسیب قابل مشاهده باشد. همچنین در مراجع [۲۹-۳۲] به صورت کامل تشخیص آسیب و تعیین مشخصات سیستم در پل‌های عرشه پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است.

این مقاله به ارائه روشی جدید برای تعیین موقعیت آسیب در عرشه‌ی پیوسته‌ی پل‌ها براساس پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده‌ی آنها می‌پردازد. در این مقاله از نتایج مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده شده‌است. بر این اساس در ابتدا از طریق تبدیل HHT مقادیر دامنه‌های آنی پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود. سپس با استفاده از شاخص آسیب تابع همبستگی متقابل تلاش می‌گردد تا موقعیت و محل دقیق آسیب تعیین گردد. در این مقاله تشخیص آسیب در دو سطح کلی و موضعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی در خصوص حساسیت و توانمندی روش پیشنهادی، از مدل‌های تحلیلی پل‌های بتنی یک الی سه دهانه بهره گرفته شده‌است. همچنین برای تایید روش پیشنهادی و نشان دادن زمینه‌ی کاربرد آن در سازه‌های حقیقی از مطالعات آزمایشگاهی یک تیر ساده استفاده شده‌است.

2 Empirical Mode Decomposition  
3 Ensemble Empirical Mode Decomposition  
4 Intrinsic Mode Function  
5 Zero-crossing extrema

1 Hilbert Huang Transform

دامنه‌های آنی محاسبه شده، محل آسیب با دقت بسیار بالاتر تعیین می‌شود. شایان ذکر است که ابتدا موقعیت آسیب در سطح کلی یعنی بین دو حسگر مشخص می‌شود، و سپس موقعیت موضعی دقیق آسیب تعیین می‌گردد.

### ۳-۱- روش تعیین محل آسیب براساس تابع همبستگی متقابل شتاب سازه

در این بخش روش محاسباتی تعیین محل آسیب براساس ترکیبی از روش تبدیل هیلبرت-هوانگ با استفاده از تجزیه تجربی مودی گروهی و تعیین دامنه‌های آنی سیگنال‌های تجزیه، ارائه شده‌است. با توجه به این که تاثیر گذاری آسیب در پاسخ‌های شتاب دینامیکی بسیار مشهودتر است، از پاسخ‌های شتاب سازه در حالت‌های آسیب و سالم استفاده شده‌است [۳۷ و ۳۸]. پاسخ‌های شتاب سازه در دامنه زمان به سیگنال‌هایی با سطوح مختلف جزئیات تجزیه می‌گردد. تابع همبستگی، میزان وابستگی یا مشابهت میان دو سیگنال با یکدیگر را برآورد می‌کند [۳۹ و ۴۰]. تابع همبستگی متقابل تعمیمی از خود تابع همبستگی است که در آن تاخیر زمانی یک سیگنال نسبت به سیگنال دیگر محاسبه می‌شود. برای دو سیگنال پاسخ سازه در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده تابع همبستگی متقابل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{hd}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A_{Ah}(t) A_{Ad}(t + \tau) dt \quad (5)$$

که در آن  $T$  زمان رخداد سیگنال،  $\tau$  تاخیر زمانی،  $R_{hd}$  تابع همبستگی متقابل بین دو سیگنال دامنه آنی حالت سالم،  $A_{Ah}$  و حالت آسیب‌دیده،  $A_{Ad}$  می‌باشد. مطابق دامنه‌های آنی محاسبه شده در بخش قبل، مقادیر  $R_{hd}$  برای همه دامنه‌های آنی به دست می‌آید. سپس سطح زیر منحنی تابع همبستگی متقابل برای همه حسگرها محاسبه شده و در نهایت سطوح سمت راست و سطوح سمت چپ منحنی تابع همبستگی متقابل به دست می‌آید. هدف آن است که تغییرات حاصل شده در دامنه‌های آنی و به علاوه در  $R_{hd}$  که دو سیگنال دامنه آنی سالم و آسیب دیده را ترکیب کرده، می‌تواند در سطوح زیر منحنی‌ها تاثیر به سزایی داشته باشد. به همین دلیل تعیین اختلاف این سطح می‌تواند به راحتی به تعیین محل آسیب

که در آن  $P.V$  مقدار اصلی انتگرال منفرد را نشان می‌دهد [۳۶]. به این ترتیب، برای یک تابع مودی ذاتی حاصل شده، سیگنال تحلیلی مختلط آن به شکل زیر قابل تعریف خواهد بود:

$$Z(t) = x(t) + iy(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $Z(t)$  سیگنال تحلیلی مختلط یک تابع مودی ذاتی،  $x(t)$  سیگنال داده‌های زمانی و  $y(t)$  تبدیل هیلبرت سیگنال  $x(t)$  می‌باشد. برای سیگنال تحلیلی  $Z(t)$  مقادیر تابع دامنه آنی،  $A(t)$  و تابع فاز آنی،  $\theta(t)$ ، به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}, \quad \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (3)$$

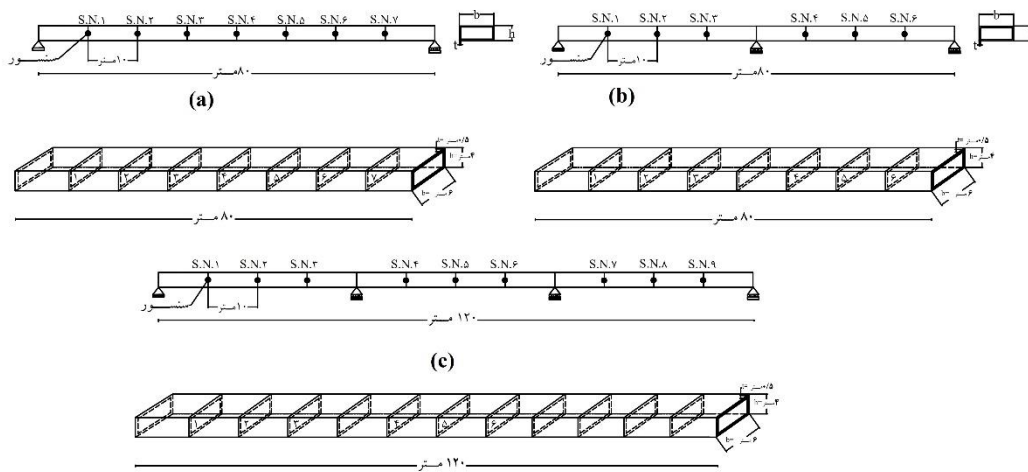
با مشخص شدن توابع دامنه و فاز آنی یک سیگنال مودی ذاتی، فرکانس مودی آنی آن نیز به صورت زیر قابل دستیابی است:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

### ۳- فلسفه روش تعیین محل آسیب

هدف اصلی این مقاله، ارائه روش نوینی برای تعیین محل آسیب در عرشه‌ی پیوسته‌ی پل‌ها براساس پاسخ ثبت‌شده‌ی شتاب است. براین اساس در تشخیص آسیب، از سیگنال‌های دامنه آنی هیلبرت در دو حالت سالم و آسیب‌دیده استفاده شده‌است. ابتدا، هر کدام از پاسخ‌های شتاب برداشت شده از سازه به مجموعه‌ای از توابع مودی ذاتی (IMF) تجزیه می‌شود. سپس، برای هر کدام از توابع مودی ذاتی، دامنه آنی و سیگنال تحلیلی مرتبط با آن محاسبه می‌گردد. این عمل برای همه پاسخ‌های موجود در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده محاسبه می‌شود. در ادامه به منظور ارزیابی آسیب، روش نوین و قدرتمندی که سازگاری بیشتری با مدل واقعی پل‌ها داشته باشد، ارائه شده‌است. در روش جدید، تشخیص آسیب با استفاده از شاخص همبستگی متقابل انجام می‌پذیرد. به این ترتیب که مقادیر تابع همبستگی متقابل دامنه‌های آنی برای پاسخ سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده محاسبه شده، و در نهایت با تعریف یک شاخص آسیب جدید براساس مقایسه سطوح منحنی‌های توابع همبستگی متقابل





شکل ۱. نمای روبرو و سه بعدی پل‌های یک دهانه (a)، دو دهانه (b) و سه دهانه (c)

Fig. 1. Three-dimensional and front view of the (a) single-span, (b) two-span, and (c) three-span bridges

می‌توان محل آسیب در سازه را از این طریق تعیین نمود.

#### ۴- ارزیابی مدل المان محدود روش ارائه شده:

به منظور ارزیابی و بررسی روش‌های تشخیص آسیب ارائه شده، از مدل پل‌های بتنی یک دهانه، دو دهانه و سه دهانه با ابعاد مشخص استفاده شده‌است. طول پل یک دهانه و دودهانه ۸۰ متر و پل سه دهانه ۱۲۰ متر می‌باشد. لایه فوقانی پل به وسیله بتنی با ضخامت  $t=0/5$  متر پوشانیده شده‌است. مطابق شکل ۱ هر بخش بتنی دارای ارتفاع  $h=4$  متر و عرض  $b=6$  متر می‌باشد و مدل المان محدود پل‌ها در برنامه SAP2000 شبیه سازی شده و مدل سازی مقطع بتنی از نوع shell می‌باشد. در شکل ۱ نمای روبرو و سه بعدی پل‌های یک، دو و سه دهانه مشاهده می‌شود. هر المان از پل‌های بتنی برای دریافت پاسخ‌های دینامیکی شماره گذاری شده که برای هر پل به فواصل ۱۰ متری حسگرگذاری شده و پاسخ‌های شتاب هر حسگر دریافت می‌شود. گام‌های زمانی حسگرهای نصب شده با  $dt=0/001$  ثانیه، مدت زمان برداشت ۱۰ ثانیه و نرخ نمونه برداری ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد. معمولاً تهیه و نصب دقیق حسگرها بر روی سازه برای دریافت داده‌های لازم، با هزینه‌های زیادی صورت می‌گیرد. براین اساس در این مقاله فرض شده‌است که در واقعیت، محدودیت تعداد حسگر و هزینه‌های آن وجود دارد و تعداد حسگر محدود در دسترس، می‌بایست به نحوی جانمایی شوند که بتوانند پاسخ‌های مناسبی را دریافت نمایند. بدیهی است با توجه به عدم قطعیت تعداد

در سازه منجر شود. در نهایت شاخص خرابی همبستگی متقابل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{R_{hd}(\tau)}(T.) = \int_0^{\tau} R_{hd} dt, S_{R_{hd}(\tau)}(L) = \int_0^{\frac{\tau}{2}} R_{hd} dt, S_{R_{hd}(\tau)}(R) = \int_{\frac{\tau}{2}}^{\tau} R_{hd} dt, \quad (6)$$

$$DICC = \frac{S_{R_{hd}(\tau)}(L) - S_{R_{hd}(\tau)}(R)}{S_{R_{hd}(\tau)}(T.)} \quad (7)$$

در رابطه‌ی ۶،  $S_{R_{hd}(\tau)}(T.)$  سطح کل منحنی همبستگی متقابل،  $S_{R_{hd}(\tau)}(R)$  سطح سمت راست منحنی همبستگی متقابل در بازه زمان تاخیر  $(\frac{\tau}{2} - \tau)$  و  $S_{R_{hd}(\tau)}(L)$  سطح سمت چپ منحنی همبستگی متقابل در بازه زمان تاخیر  $(0 - \frac{\tau}{2})$  می‌باشد. همچنین به منظور استفاده صحیح از روابط ۶ و مقیاس سازی مناسب، تمامی مراحل با استفاده از شاخص همبستگی متقابل (DICC) مطابق رابطه ۷ بیان خواهد شد. در رابطه ۷ اگر اختلاف بین دوحسگر بر اساس شاخص DICC از بازه مقدار منفی به مقدار مثبت عددی تغییر نماید، محل آسیب دقیقاً در همان حسگر یا منطقه خواهد بود و به راحتی و آسانی

جدول ۱. سناریوهای آسیب و موقعیت آنها  
Table 1. The properties of damage scenarios

سناریوی آسیب	سازه پل	محل آسیب و درصد آسیب	
		محل آسیب	بین حسگر دو و سه به عرض ۲/۵ متر
۱	یک دهانه	درصد آسیب	۱۰٪ ۴۰٪ ۶۰٪
		محل آسیب	بین حسگر دو و سه به عرض ۲/۵ متر
۲	دو دهانه	درصد آسیب	۱۰٪ ۴۰٪ ۶۰٪
		محل آسیب	بین حسگر یک و دو به عرض ۵ متر
۳	سه دهانه	درصد آسیب	۴۰٪
		محل آسیب	بین حسگر یک و دو و نیز حسگر پنج و شش به عرض ۵ متر
۴	سه دهانه	درصد آسیب	۱۰٪ ۴۰٪ ۶۰٪

است. همچنین برای دریافت پاسخهای آسیب دیده سازه، سناریوهای مختلف آسیب برای پل‌های بتنی در نظر گرفته شده‌است که در جدول ۱ ارائه گردیده است:

براساس جدول ۱ از سناریوهای مختلف آسیب تک و دوگانه استفاده شده تا اختلاف پاسخهای دینامیکی سالم و آسیب دیده به منظور تشخیص آسیب در دسترس باشد. همچنین آسیب ایجاد شده به وسیله کاهش سختی در یک یا دو المان مشخص شده و به صورت سختی خمشی در اعضای پل اعمال شده‌است. این کاهش سختی به صورت کاهش مقدار ممان اینرسی حول محور قوی (محور سه) به دلیل تاثیر بیشتر آسیب در آن محور در سناریوهای مختلف به مقدار ۱۰٪/۱۰٪، ۴۰٪/۴۰٪ و ۶۰٪/۶۰٪ درصد کاهش یافته است. آسیب اعمال شده در واقعیت ممکن است به صورت عیوب و نقص هایی در المان سازه باشد که در نهایت منجر به کاهش سختی آن المان گردد. از جمله آسیب های موجود در واقعیت می تواند: محل وصله تیورورق یا جوشکاری که به دلیل نقص در جوشکاری صحیح، همچنین اثرات خوردگی، ترک و یا برخورد وسایل نقلیه دیگر، ایجاد زیرگذر در پل ها و... باشد. در جدول ۲ برای سازه پل یک دهانه مقدار کاهش سختی خمشی محاسبه شده و مطابق محاسبات صورت گرفته به وضوح مقدار کاهش سختی برای پل یک دهانه در آسیب های ۱۰٪/۱۰٪، ۴۰٪/۴۰٪ و ۶۰٪/۶۰٪ را نشان می دهد. براین اساس پس از تشخیص آسیب در هر سناریو به صورت کلی (Global) محل دقیق المان آسیب دیده میان دو حسگر نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت که به عنوان تشخیص آسیب محلی (Local) نیز به شمار می آید.

حسگرها، هرچه تعداد حسگرها افزایش یابد، نتایج قابل اعتماد تر و مطلوب تری حاصل خواهد شد. حال آن که در بخش تعیین آسیب محلی تعداد سنسورها افزایش یافته است. همچنین برای نمونه در پل Putlitz واقع در شهر برلین آلمان یک نمونه واقعی از پایش سلامت سازه، به طور میانگین ۲۱ عدد حسگر برای دهانه‌ی ۲۷۰ متری استفاده شده‌است که این حسگرها تقریباً در فواصل ۱۲ متری می‌باشد. نمونه های بیشتر در مرجع [۱۶] بیان شده‌است. به همین منظور تشخیص آسیب در این تحقیق در دو سطح کلی و محلی برای کل طول پل و بخش های دارای آسیب صورت گرفته است. بنابراین تعداد حسگر های انتخاب شده با توجه موارد یاد شده، محدودیت تعداد سنسورها و فواصل آن ها و نیز مراجع [۳۹ و ۳۶ و ۱] در طول های ۱۰ متری جانمایی شده‌است.

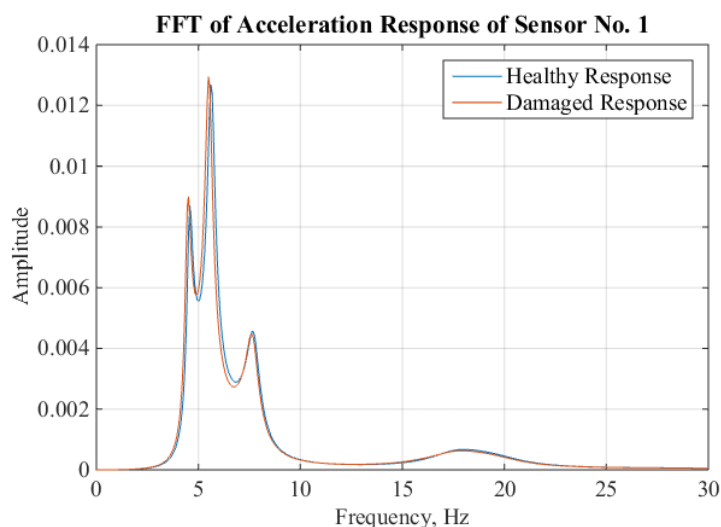
به منظور تحریک سازه پل و دریافت پاسخهای دینامیکی شتاب هر حسگر، یک بار ضربه<sup>۱</sup> به نقطه‌ی مشخص در پل وارد شده‌است که در پل‌های یک و دودهانه در نقطه ۵ پل و در پل سه دهانه در نقطه ۸ اعمال شده‌است. مقدار بار ضربه مثلثی در زمان صفر، صفر، در زمان ۰/۰۱ ثانیه، ۱۰۰ و در زمان ۰/۰۲ ثانیه صفر کیلو نیوتن بوده است. با توجه به دریافت پاسخهای دینامیکی شتاب، بارگذاری مثلثی که به صورت آنی در یک نقطه وارد می شود می‌تواند تحریک مناسبی برای مود های آسیب پل باشد. همچنین هدف در این تحقیق بررسی بار ضربه آنی بوده است. به منظور تایید نوع بارگذاری در تحقیقات [۴۳-۴۰] از بارهای ضربه ای خصوصاً ضربه مثلثی استفاده

1 pulse

جدول ۲. محاسبه کاهش سختی خمشی در پل یک دهانه

Table 2. The stiffness reduction in Single-span bridge

مدل سازه	مدول الاستیسیته $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	طول پل $L$ (m)	ممان اینرسی محور قوی $I$ (m <sup>4</sup> )	سختی خمشی $K$ (kN/m)
سالم	۲۴۸۲۱۱۲۸	۸۰	۲۰/۷۵	۴۸۲۸۴/۸۵
آسیب ۱۰٪			۱۸/۶۷۵	۴۳۴۵۶/۳۷
آسیب ۴۰٪			۱۲/۴۵	۲۸۹۷۰/۹۱
آسیب ۶۰٪			۸/۳	۱۹۳۱۳/۹۴



شکل ۲. مقایسه فرکانسی مدهای سازه پل سه دهانه در حالت سالم و سناریو سوم با مقدار آسیب ۴۰٪ برای سنسور شماره یک  
Fig. 2. Comparison of frequency modes of three-span bridge in healthy and third damage scenario for sensor 1

استفاده از روش تبدیل سریع فوری<sup>۱</sup> برای حسگر شماره یک انجام شده که در شکل ۲ مشخص می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود چهار مود ارتعاشی اول پل سه دهانه برای حالت های سالم و آسیب دیده در سناریوی آسیب سوم به وضوح مشخص می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که به دلیل آسیب وارده در بین حسگرهای یک و دو، مقادیر مدهای فرکانسی اندکی کاهش یافته که دلیل آن تغییر معادلات دینامیکی بر اساس تغییر شتاب سازه به علت آسیب ایجاد شده می‌باشد. برای نمونه در مود دوم مقدار فرکانس در حالت سالم ۵/۶۱ هرتز و در حالت آسیب به مقدار ۵/۴۹ هرتز کاهش یافته است. شایان ذکر است صحت سنجی مدهای فرکانسی حاصل از روش تبدیل سریع فوری با مقادیر حاصل از برنامه SAP2000 صورت پذیرفته است که در جدول ۳ بیان شده است.

## ۵- نتایج ارزیابی

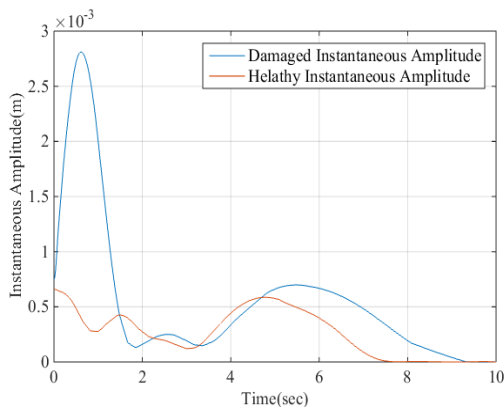
در ابتدا با توجه به ابعاد پل های مدل سازی شده، لزوم پایدار بودن سازه پل در ناحیه خطی باید بررسی گردد. به همین علت مقادیر لنگر پلاستیک، لنگر تسلیم و لنگر حاصل از بار وارد بر پل باید مورد مقایسه قرار گیرد. مطابق برنامه SAP2000 مقدار لنگر تسلیم  $M_y = 31800$  کیلونیوتن متر، مقدار لنگر پلاستیک  $M_p = 41400$  کیلونیوتن متر و بیشترین لنگر ناشی از بار ضربه وارد بر پل یک دهانه نیز  $M = 1875$  کیلونیوتن متر می‌باشد. با توجه به اینکه لنگر ناشی از بار ضربه در پل از لنگر تسلیم بسیار کوچکتر می‌باشد نشان دهنده آن است که سیستم به ناحیه تسلیم نیز نرسیده است و در ناحیه خطی باقی مانده است. پیش از پردازش پاسخ های دینامیکی شتاب پل ها، مقایسه فرکانسی مدهای سازه پل سه دهانه در حالت سالم و سناریو آسیب سوم توسط برنامه متلب با

1 Fast Fourier Transform

جدول ۳. صحت سنجی فرکانس های طبیعی پل سه دهانه در حالت سالم و سناریو آسیب سوم با مقدار آسیب ۴۰٪ برای سنسور شماره یک

**Table 3. The verification of the natural frequencies of the three-span bridge in healthy state and the third damage scenario (40%) for sensor 1**

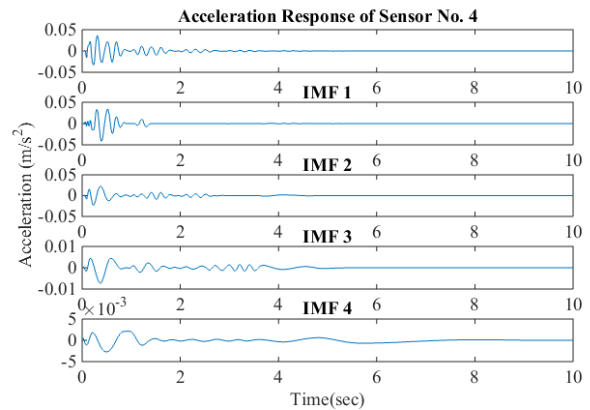
شماره مود	فرکانس طبیعی سیستم (rad/sec)			
	سازه سالم		سازه آسیب دیده	
	SAP2000	FFT	SAP2000	FFT
۱	۴/۸۱	۴/۷۸(۰/۶۲)	۴/۶۰	۴/۵۱(۱/۹۵)
۲	۵/۶۴	۵/۶۱(۰/۵۳)	۵/۴۴	۵/۴۹(۰/۹۱)
۳	۷/۷۲	۷/۶۹(۰/۳۸)	۷/۶۰	۷/۶۳(۰/۳۹)
۴	۱۸/۰۳	۱۷/۹۸(۰/۲۸)	۱۷/۸۴	۱۷/۸۲(۰/۱۱)
میانگین درصد خطا		۰/۴۵	-	۰/۸۴



شکل ۴. دامنه آنی حاصل از تبدیل HHT برای سنسور شماره یک برای پل سه دهانه

**Fig. 4. The instantaneous amplitude obtained by HHT for sensor 1 for the three-span bridge**

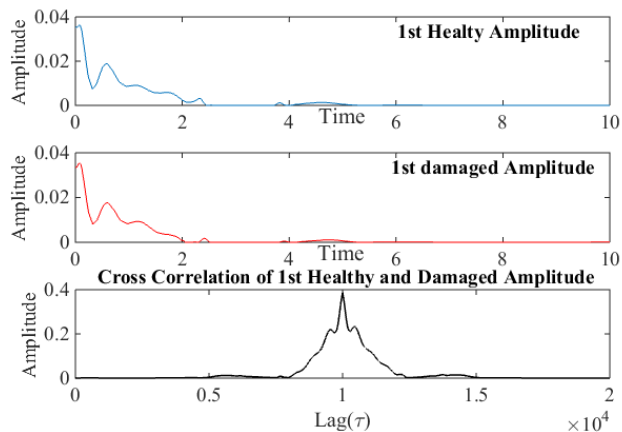
پل‌ها بر اساس تبدیل HHT و کدنویسی در برنامه متلب انجام شده‌است. همچنین مقادیر همه دامنه های آنی حسگرها، برای حالت های سالم و آسیب دیده محاسبه شده‌است. به عنوان مثال در شکل ۳، توابع مودی ذاتی حسگر یک از طریق تبدیل EEMD برای پل سه دهانه مشاهده می شود. همچنین در شکل ۴ دامنه آنی حاصل از تبدیل HHT برای حسگر شماره یک برای پل سه دهانه محاسبه و رسم شده‌است. مطابق شکل ۴ سطح کلی مقادیر دامنه آنی در حالت سالم کمتر از حالت آسیب دیده می‌باشد. شایان ذکر است برای درک بهتر توابع همبستگی متقابل، منحنی آن برای حسگر شماره یک در حالت های سالم و آسیب دیده برای پل یک دهانه در شکل ۵ رسم شده‌است.



شکل ۳. توابع مودی ذاتی سنسور شماره یک از طریق تبدیل EEMD

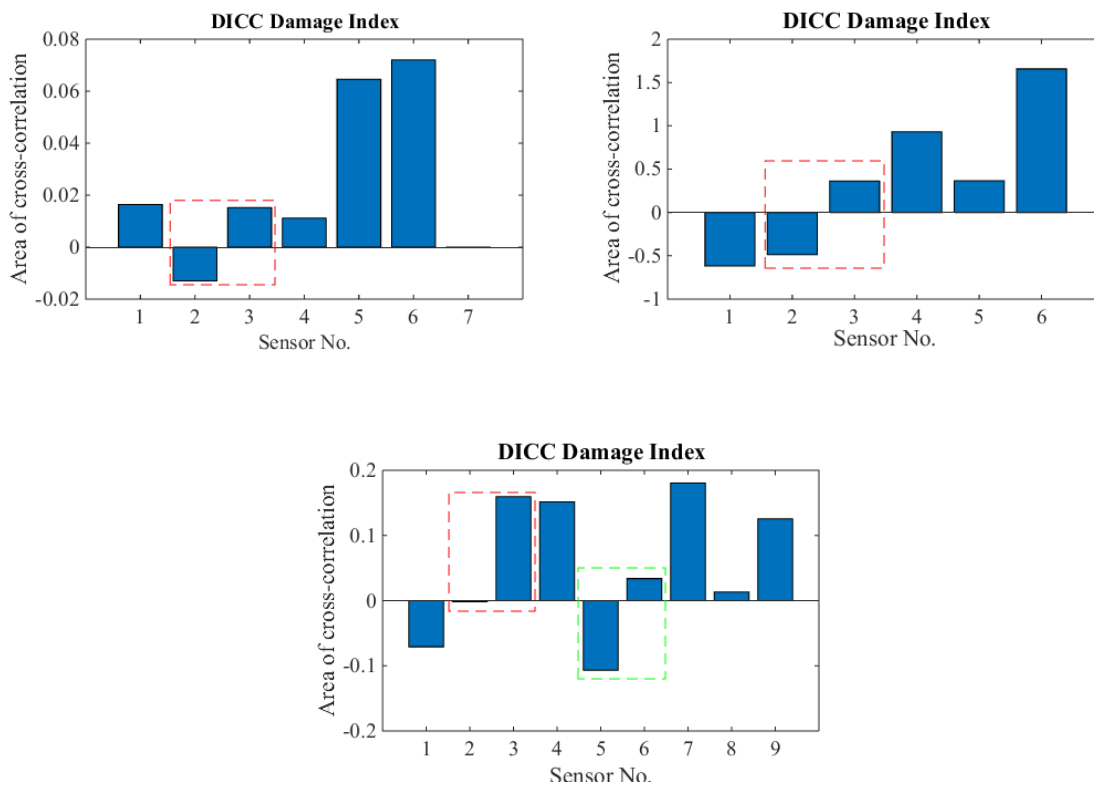
**Fig. 3. The IMFs of sensor 1 obtained by EEMD method**

با توجه به جدول فوق صحت سنجی مقادیر فرکانس طبیعی به‌دست آمده از روش تبدیل سریع فوریه در حالت سالم و سناریو آسیب سوم با مقدار آسیب ۴۰٪/۴۰٪ پل سه دهانه انجام شده‌است. اعداد داخل پرانتز بیانگر خطای روش تبدیل سریع فوریه در مقایسه با مقادیر حاصل از نرم افزار می باشد. مطابق نتایج به‌دست آمده شناسایی اولیه با دقت مناسبی برای فرکانس طبیعی از روش FFT در مقایسه با مقادیر اصلی فرکانس طبیعی سازه صورت گرفته است، به طوری که میانگین درصد خطای حاصل از هر دو حالت سالم و آسیب دیده، کمتر از ۰/۹٪ می باشد. پس از شناسایی اولیه ی پل، پردازش پاسخ‌های دینامیکی شتاب



شکل ۵. منحنی تابع همبستگی متقابل سنسور شماره یک برای پل یک دهانه

Fig. 5. The cross-correlation function curve of sensor 1 for the single-span bridge

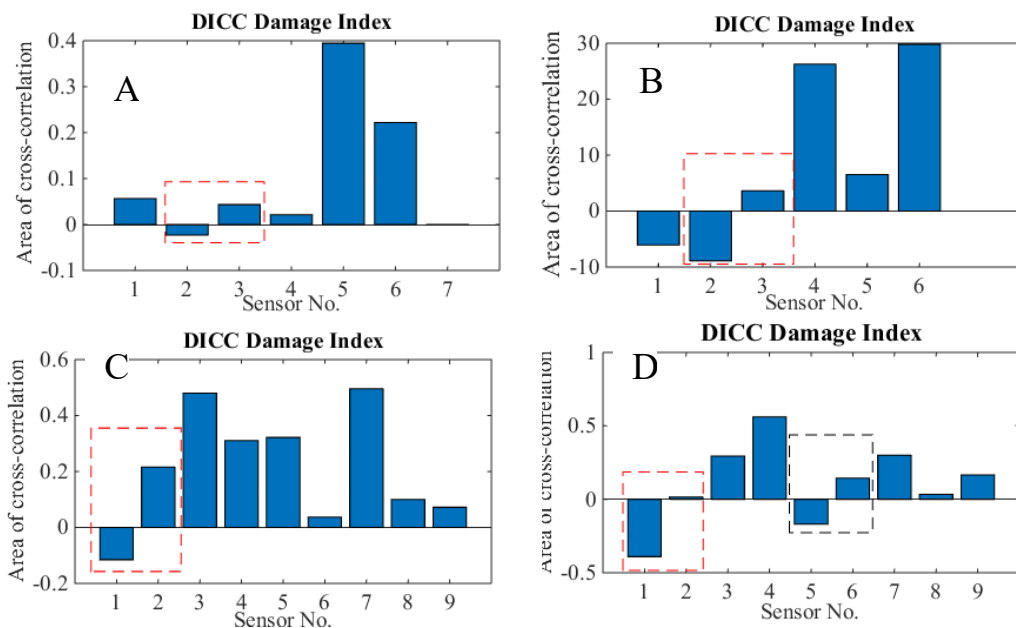


شکل ۶. شاخص آسیب DICC برای A) سناریوی آسیب یک، B) سناریوی آسیب دو و C) سناریوی آسیب چهار برای مقدار آسیب ۱۰٪/۱۰٪

Fig. 6. DICC Damage Index for A) Damage Scenario 1, B) Damage Scenario 2, C) Damage Scenario 4 for %10 damage value.

در شکل ۶ مقدار شاخص آسیب DICC برای سناریوهای آسیب یک، دو و چهار با مقدار آسیب ۱۰٪ محاسبه و رسم شده است. مطابق سناریوی آسیب یک، در بخش A محل آسیب بین حسگرهای دو و سه می باشد و شاخص آسیب DICC برای سناریو یک محاسبه شده است. مطابق شکل به وضوح محل آسیب در بین حسگرهای دو و سه تعیین شده است و علت آن نیز تغییر تابع همبستگی متقابل و

۵-۱- تعیین محل آسیب بر اساس شاخص آسیب DICC در حالت کلی مطابق توضیحات ارائه شده مقدار شاخص آسیب DICC برای همه حسگرها محاسبه شده است. با توجه به اهمیت تعیین محل دقیق آسیب، در این تحقیق در ابتدا محل کلی آسیب در بین حسگرها شناسایی شده است و سپس به تعیین محل دقیق رخداد آسیب که به صورت محلی می باشد پرداخته شده است.



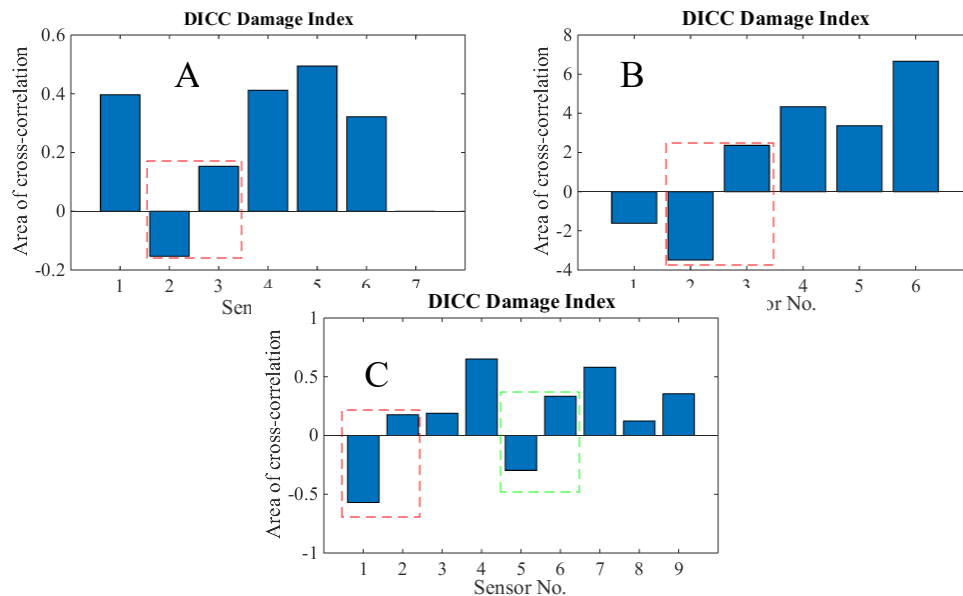
شکل ۷. شاخص آسیب DICC برای A) سناریوی آسیب یک، B) سناریوی آسیب دو، C) سناریوی آسیب سه و D) سناریوی آسیب چهار برای Fig. 7. DICC Damage Index for A) Damage Scenario 1, B) Damage Scenario 2, C) Damage Scenario 3 and D) Damage Scenario 4 for %40 damage value.

مثبت تغییر داشته اند محل آسیب را در همه سناریوها مشخص کرده اند. بنابراین محل های آسیب در حالت آسیب ۴۰٪ به درستی تعیین شده است. در شکل ۸ نیز مراحل برای سناریوهای آسیب یک، دو، سه و چهار با مقدار آسیب ۶۰٪ محاسبه و ترسیم شده است. مطابق نتایج، محل آسیب در همه ی سناریوهای آسیب در این حالت نیز به درستی و دقت بالا تعیین شده اند.

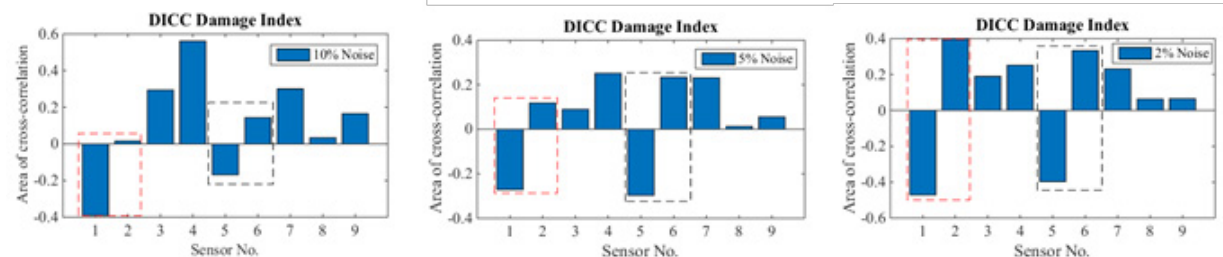
معمولا سیگنال های پاسخ بدون آلودگی نوفه نمی باشند و به دلایل خاصی مانند: نحوه اندازه گیری، خطاهای انسانی، ارتعاشات محیطی و... ایجاد می شوند. به همین دلیل به پاسخ های دینامیکی شتاب در حالت آسیب سناریو چهار، مقادیر ۲٪، ۵٪ و ۱۰٪ نوفه سفید اضافه شده و همچنین نوفه ها در برنامه متلب با کدنویسی به پاسخ ها افزوده شده اند. در ادامه تعیین محل آسیب همراه با نوفه صورت گرفته است. با توجه به اینکه سناریو آسیب چهار برای پل سه دهانه و نیز دارای آسیب دوگانه می باشد انتخاب شده است. در شکل ۹ شاخص آسیب DICC همراه با نوفه سفید برای سناریو آسیب چهار محاسبه و رسم شده است. مطابق نتایج حاصل و با توجه به سناریوی آسیب چهار، محل های آسیب به درستی در حالت آسیب دوگانه همراه با نوفه های سفید ۲٪، ۵٪ و ۱۰٪ به درستی تعیین گردیده است. بنابراین مطابق نتایج حاصل از تشخیص آسیب با استفاده از

شاخص DICC از ناحیه منفی در حسگر شماره دو به ناحیه مثبت در حسگر شماره سه می باشد که به درستی محل آسیب را نشان می دهد. مطابق سناریوی آسیب دو شاخص DICC در بخش B محاسبه گردیده است. مطابق شکل محل آسیب که بین حسگرهای دو و سه می باشد کاملا شاخص آسیب از تغییر ناحیه منفی منحنی های همبستگی متقابل به ناحیه مثبت تغییر یافته و محل آسیب بین حسگرهای دو و سه به درستی تعیین گردیده است. همچنین در بخش C، مطابق سناریوی آسیب چهار، محل آسیب بین حسگرهای یک و دو و نیز بین حسگرهای شماره پنج و شش می باشد که این سناریوی آسیب به صورت آسیب چندگانه (multi damage) می باشد. مطابق شکل محل آسیب با توجه به اینکه تغییر ناحیه منفی مقدار شاخص DICC در بین حسگرهای دو و سه و نیز پنج و شش، به ناحیه مثبت صورت گرفته، محل دقیق آسیب براساس سناریو چهار برای سنسور پنج و شش به تنهایی به درستی تعیین شده است. با توجه به اینکه آسیب به صورت جزئی بوده است در حالت سناریو چهارم تنها یک آسیب از دو آسیب تعیین شده است.

در شکل ۷ مقدار شاخص آسیب DICC برای سناریوهای آسیب یک، دو، سه و چهار با مقدار آسیب ۴۰٪ محاسبه و رسم شده است. مطابق نتایج به دست آمده در سنسورهایی که از ناحیه منفی به ناحیه



شکل ۸. شاخص آسیب DICC برای A) سناریوی آسیب یک، B) سناریوی آسیب دو، C) سناریوی آسیب چهار برای مقدار آسیب ۶۰٪. **Fig. 8. DICC Damage Index for A) Damage Scenario 1, B) Damage Scenario 2, C) Damage Scenario 4 for %60 damage value.**



شکل ۹. شاخص آسیب DICC همراه با مقادیر ۲٪، -۵٪، ۱۰٪، ۱۰٪ نوبه سفید برای سناریو آسیب چهار **Fig. 9. DICC damage Index with %10-%5-%2 White Noise for damage scenario 4**

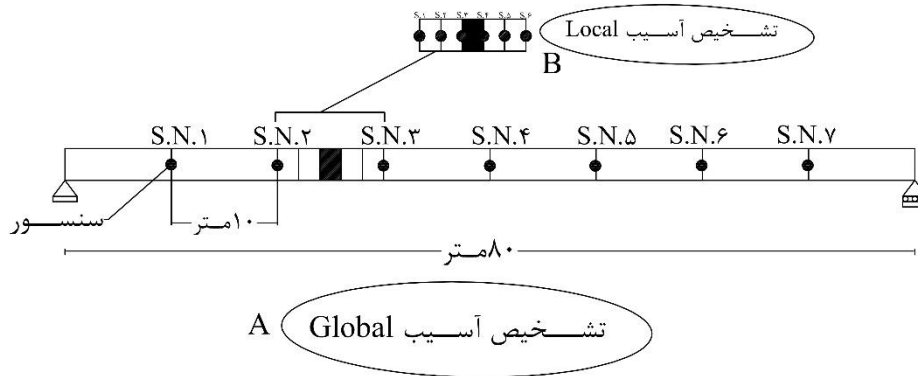
آسیب از طریق شاخص های آسیب DICC انجام شده و نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰ هدف اصلی این مقاله محاسبه محل دقیق آسیب بوده است. به همین خاطر در ابتدا در بخش ۵-۱- محل های آسیب در بین محدوده حسگرها مطابق بخش A از شکل ۱۰ تعیین گردید و حال در این مرحله تشخیص آسیب محلی و یا محل دقیق آسیب در بین دو حسگر مطابق بخش B در شکل ۱۰ می باشد.

بر اساس شکل ۱۰ در بخش A شاخص آسیب DICC در سناریو آسیب اول با مقدار آسیب ۴۰٪ می باشد، بر این اساس تغییر علامت و حرکت از ناحیه منفی به مثبت دقیقاً در حسگرهای سه و چهار (شکل ۱۱) رخ داده است که مشخصاً فاصله میانی بین حسگرهای دو و سه در حالت کلی و نیز بین حسگرهای سه و چهار در حالت محلی

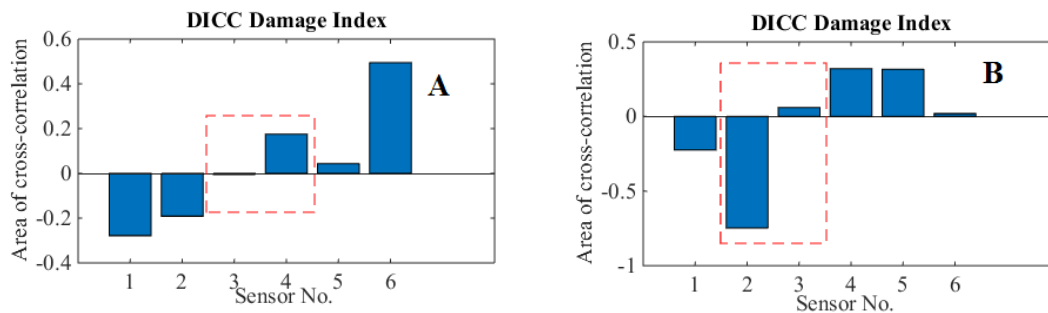
شاخص های ارائه شده در حالت کلی (Global)، می توان نتیجه گرفت که شاخص تابع همبستگی متقابل نتایج بسیار دقیق تر و مناسب تری برای همه حالت های مدل های تحلیلی پل های یک، دو و سه دهانه و نیز آسیب های چندگانه ارائه نموده است.

#### ۲-۵- تعیین محل آسیب بر اساس شاخص DICC در حالت محلی (Local)

پس از تعیین محل های آسیب بر روی مدل های تحلیلی در حالت کلی، هدف در این بخش تعیین محل آسیب بر روی پل های یک دهانه و دو دهانه برای سناریو های آسیب یک و دو می باشد. برای درک بیشتر محل های آسیب در حالت محلی، محل دقیق آسیب ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر این اساس مراحل تشخیص



شکل ۱۰. محل های سناریو های آسیب کلی و محلی در تشخیص آسیب  
 Fig. 10. Damage scenarios location in global and local views



شکل ۱۱. شاخص آسیب DICC در حالت محلی (A) سناریوی آسیب یک (B) سناریوی آسیب دو  
 Fig. 11. The DICC damage index in local view A) damage scenario 1 and B) damage scenario 2

### ۶- مدل آزمایشگاهی

به منظور تایید روش های جدید ارائه شده و نیز اعتبارسنجی آن ها بین حالت مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی، محل آسیب با استفاده از روش شاخص آسیب DICC برای یک مدل آزمایشگاهی [۴۴] نیز تعیین شده است. براین اساس آزمایش های یک تیر فلزی با تکیه گاه های ساده با دو سناریوی مختلف آسیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصه های مکانیکی و هندسی تیر فلزی به صورت کامل در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی اثر آسیب های مختلف بر روی تیر و تعیین محل آسیب ها، از بریدگی های عرضی تیر در موقعیت های مناسب که عمدتاً در وسط المان ها هستند، استفاده شده است. این بریدگی های اندک در موقعیت های مناسب ایجاد شده اند تا بتوانند از طریق حذف مشارکت سطح بریدگی روی تیر به کاهش ماتریس سختی کلی سازه دست یابند. جزییات آسیب ها در شکل ۱۲ بیان شده و همچنین تیرهای فلزی دارای آسیب در آزمایشگاه در شکل ۱۳ مشاهده می شود.

(Local) می باشد.

در سناریو آسیب شماره دو با همان مقدار آسیب می باشد و تشخیص آسیب محلی، محل دقیق بین حسگرهای دو و سه در حالت کلی و حسگرهای سه و چهار به صورت محلی می باشد که در بخش B شاخص آسیب DICC، تغییر علامت مشخصی بر اساس توابع همبستگی متقابل حسگرهای دو و سه از بخش منفی به مثبت صورت گرفته که دقیقاً محل آسیب محلی را مشخص می کند.

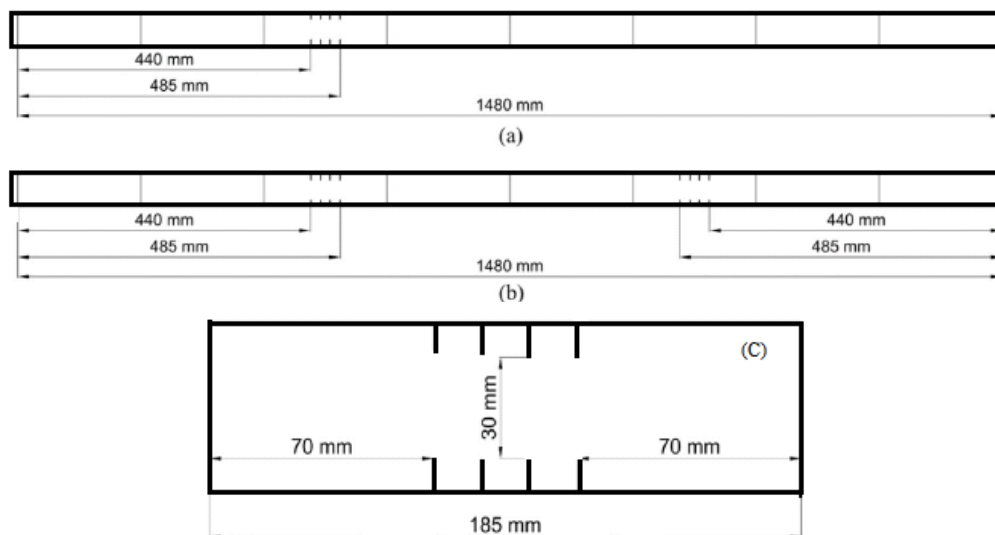
بر اساس نتایج حاصل در این بخش برای تشخیص آسیب محلی و یافتن محل دقیق آسیب، می توان نتیجه گرفت که مانند بخش قبل شاخص DICC در هر دو حالت، محل دقیق آسیب را کاملاً صحیح و به تعیین نموده است. در نهایت با توجه به نتایج بخش تحلیلی می توان روش شاخص تابع همبستگی متقابل DICC را کاملاً قابل اعتماد و مناسب برای تعیین محل آسیب هم در حالت کلی و هم محلی در مدل های عددی مختلف دانست.



جدول ۴. مشخصه‌های هندسی و مکانیکی تیر [۴۴]

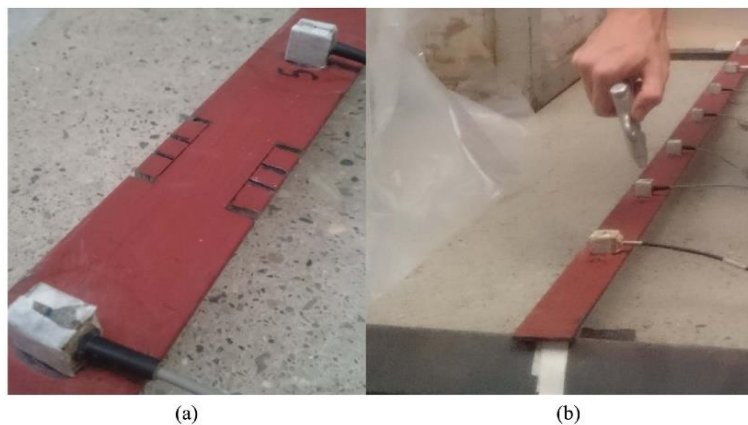
Table 4. Mechanical and geometric properties of the steel beam

ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول یانگ (Gpa)
۵	۵۰	۱۴۸۰	۷۸۵۰	۲۰۰



شکل ۱۲. سناریوی (a) آسیب تک و سناریوی (b) آسیب دوگانه بر روی تیر (c) جزئیات المان آسیب دیده [۴۴]

Fig. 12. Scenario (a) Single damage and scenario, (b) Double damage on the beam and (c) damaged element details



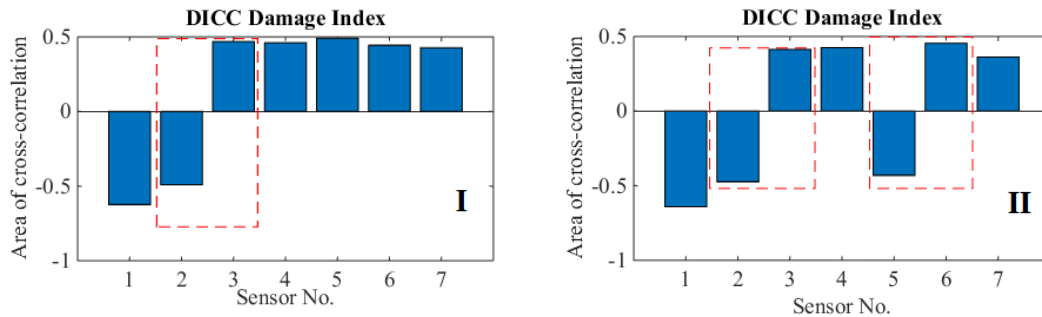
شکل ۱۳. (a) تیر با المان های آسیب دیده (b) تحریک تیر آزمایشگاهی با استفاده از پیستول باد [۴۴]

Fig. 13. (a) beam with damaged elements (b) excitation of the experimental beam using the air pistol

همچنین به منظور تحریک تیر از ارتعاش تصادفی به وسیله یک پیستول باد استفاده شده است.

این اساس نتایج حاصل از روش‌های تشخیص آسیب با استفاده از شاخص DICC در شکل ۱۴ مشخص شده‌اند. در بخش I از شکل

پاسخ‌های تاریخچه زمانی شتاب قائم به وسیله حسگرهای شتاب سنج TML و دستگاه دریافت کننده (Data Logger) حاصل شده است. فرکانس‌های نمونه به اندازه ۱۰۰ و ۲۰۰ هرتز به کار گرفته شده و آزمایش‌ها برای هر فرکانس نمونه صورت گرفته است [۴۴].



شکل ۱۴. شاخص های آسیب (DICC بخش I) سناریوی آسیب (a) و بخش II) سناریوی آسیب (b)  
 Fig. 14. DICC Damage index I) Damage Scenario (a) II) Damage Scenario (b)

تنها یک آسیب از دو آسیب را در پل بتنی تعیین نموده است.

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش های نوینی برای تعیین محل آسیب های کلی (Global) و محلی (Local) برای سازه های پل بتنی ارائه گردیده است. برای تعیین محل آسیب نیز از شاخص تشخیص آسیب تابع همبستگی متقابل DICC در حالت تشخیص آسیب کلی و محلی استفاده شده است. مدل های عددی پل های بتنی یک، دو و سه دهانه و نیز مدل آزمایشگاهی برای یک تیر دوسر ساده به کار گرفته شده است. بر این اساس تشخیص آسیب در هر مرحله برای سناریوهای مختلف آسیب به صورت مجزا برای شاخص DICC صورت پذیرفته است. راحتی و قابلیت اعتماد بالای روش های ارائه شده با استفاده از دامنه های آنی پاسخ های شتاب همراه با تبدیل HHT و نیز ترکیب با انرژی دامنه آنی در هر دو شاخص ارائه شده می باشد. همچنین به منظور بهره گیری از نوبه های اندازه گیری ارتعاش مقدار ۲٪، ۵٪ و ۱۰٪ نوبه در شاخص های آسیب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که روش پیشنهاد شده می تواند محل آسیب را در یک تیر دوسر ساده فلزی برای سناریوهای آسیب مختلف تعیین نمایند. همچنین شاخص آسیب DICC عملکرد بسیار مناسبی در هر دو حالت سناریوی آسیب تک و چندگانه داشته است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

- ۱- محل های آسیب موجود در پل ها در همه سناریوهای آسیب در مدل پل های بتنی با استفاده از شاخص DICC در حالت کلی با دقت بسیار زیاد تعیین گردیدند.
- ۲- محل آسیب در سناریوهای آسیب یک و دو پل بتنی با

۱۴ مقادیر دامنه های آنی براساس پاسخ های شتاب تیر در هفت نقطه (سنسور) دریافت شده و محاسبه شده است. بدین صورت که پس از تحریک تیر با پیستول باد مطابق شکل ۱۳، مقادیر پاسخ های شتاب به دست آمده و سپس از طریق تبدیل HHT مقادیر دامنه آنی همه سنسورها محاسبه شده است. با توجه به تغییر مقدار علامت شاخص DICC در سنسورهای دو و سه، از ناحیه منفی به مثبت و همچنین توضیحات ارائه شده در بخش ۳-۱ برای تعیین محل آسیب با استفاده از تابع همبستگی متقابل، محل دقیق آسیب در سناریو (a) به درستی تعیین شده است. در بخش II نیز با توجه به سناریوی آسیب (b) که محل آسیب بین سنسورهای دو و سه و نیز پنج و شش می باشد، تغییر علامت مشخص در بین سنسورهای دو و سه و نیز سنسورهای پنج و شش مشخص می باشد. با توجه به سناریوی آسیب دو گانه، محل آسیب در این روش به درستی تعیین شده است. بر اساس نتایج حاصل شده در مدل آزمایشگاهی می توان نتیجه گرفت که نتایج روش DICC برای سناریو آسیب تک و چندگانه نتیجه قابل قبولی را ارائه نموده است. همچنین مطابق اعتبارسنجی صورت گرفته در این بخش با استفاده از مدل آزمایشگاهی بیان شده، می توان به خوبی قدرت روش تعیین آسیب با استفاده از شاخص DICC را هم در مدل های تحلیلی و هم در مدل آزمایشگاهی نشان داد. از جمله نقاط قوت روش ارائه شده می توان به تعیین محل آسیب هم در مدل تحلیلی و هم در مدل آزمایشگاهی برای آسیب های به نسبت متوسط و بالا در حالت های تک و چندگانه اشاره نمود. همچنین مقادیر آسیب های فوق در طول عرشه های زیاد پل بتنی نیز به درستی تعیین شده است. شایان ذکر است در مواردی که مقادیر آسیب اندک می باشد، با توجه به اینکه آسیب به صورت جزئی بوده روش ارائه شده

- [5] K.Y. Wong, Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges, *Structural control and health monitoring*, 11(2) (2004) 91-124.
- [6] M. Abe, Y. Fujino, Bridge Monitoring in Japan, *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 5(2009), in, Wiley Online Library.
- [7] H. M. Koh, H. S. Lee, S. Kim, and J. F. Choo, Monitoring of Bridges in Korea, *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009.
- [8] N.A. Londono, Use of vibration data for structural health monitoring of bridges, Carleton University, 2006.
- [9] A.E. Aktan, F.N. Catbas, K.A. Grimmelsman, M. Pervizpour, Development of a model health monitoring guide for major bridges, Rep. Dev. FHWA Res. Dev, (2002).
- [10] B. Peeters, G. Couvreur, O. Razinkov, C. Kundig, H. Van der Auweraer, and G. De Roeck, Continuous Monitoring of the Oresund bridge: system and data analysis. In *IMAC-XXI: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 2003.
- [11] M. Abe, J. Abot, G. Achs, J. Agius, A. E. Aktan, J. C. Aldrin, and I. Bartoli, *Encyclopedia of structural health monitoring*, 2009.
- [12] J. Ko, Y.Q. Ni, Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering structures*, 27(12) (2005) 1715-1725.
- [13] Z. Yang, L. Wang, H. Wang, Y. Ding, X. Dang, Damage detection in composite structures using vibration response under stochastic excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 325(4-5) (2009) 755-768.
- [14] G.B. Whitham, *Linear and nonlinear waves*, John Wiley & Sons, 2011.
- [15] D. Huston, *Structural sensing, health monitoring, and performance evaluation*, CRC Press, 2010.
- [16] D.F. Mazurek, J.T. DeWolf, Experimental study of bridge monitoring technique, *Journal of Structural Engineering*, 116(9) (1990) 2532-2549.
- [17] H. Lee, T. Ng, Dynamic response of a cracked beam subject to a moving load, *Acta mechanica*, 106(3-4) (1994) 221-230.

استفاده از شاخص آسیب DICC در حالت محلی با دقت بالایی به دست آمدند.

۳- نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی حاکی از آن است که شاخص DICC با دقت بسیار بالا و کافی محل های آسیب های تک و چندگانه را تعیین نموده است.

۴- با توجه به اعتبار سنجی صورت گرفته در مدل آزمایشگاهی در تعیین محل آسیب سناریوهای مختلف، می توان به خوبی قدرت روش جدید تعیین آسیب با استفاده از شاخص DICC را هم در مدل های تحلیلی و مدل آزمایشگاهی نشان داد.

بنابر نتایج حاصل شده مشخص گردید که روش شاخص آسیب تابع همبستگی متقابل (DICC) از قابلیت اعتماد بالا، دقت مناسب و عملکرد سریع برای تعیین آسیب های کلی و محلی در مدل های تحلیلی و آزمایشگاهی را برخوردار می باشد. شایان ذکر است که می توان برای مطالعات آینده روش های پیشنهاد شده را در سازه پل های واقعی متنوع دیگری با آسیب های متفاوت در معرض بار وسایل نقلیه قرار دارند به کار برد.

#### ۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از جناب آقای دکتر قربانی تنها، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران جهت به اشتراک قراردادن داده های آزمایشگاهی برای این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

#### مراجع

- [1] H. Wenzel, *Health monitoring of bridges*, John Wiley & Sons, 2008.
- [2] F. Magalhães, A. Cunha, E. Caetano, Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28 (2012) 212-228.
- [3] Y.L. Xu, Y. Xia, *Structural health monitoring of long-span suspension bridges*, CRC Press, 2011.
- [4] A. Pierdicca, F. Clementi, D. Maracci, D. Isidori, S. Lenci, Damage detection in a precast structure subjected to an earthquake: A numerical approach, *Engineering Structures*, 127 (2016) 447-458.

- with crossing loads, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6) (2009) 2019-2028.
- [28] J. Li, H. Hao, Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60 (2015) 124-150.
- [29] J. Kwark, E. Choi, Y. Kim, B. Kim, S. Kim, Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridges under moving high-speed train, *Computers & structures*, 82(4-5) (2004) 463-474.
- [30] S. Marchesiello, A. Fasana, L. Garibaldi, B. Piombo, Dynamics of multi-span continuous straight bridges subject to multi-degrees of freedom moving vehicle excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 224(3) (1999) 541-561.
- [31] P. Chatterjee, T. Datta, C. Surana, Vibration of continuous bridges under moving vehicles, *Journal of Sound and Vibration*, 169(5) (1994) 619-632.
- [32] X. Zhu, S. Law, Moving load identification on multi-span continuous bridges with elastic bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7) (2006) 1759-1782.
- [33] N. E. Huang, Introduction to the Hilbert–Huang transform and its related mathematical problems, In *Hilbert–Huang transform and its applications* (2014) 1-26.
- [34] X. Zhu, S. Law, Moving load identification on multi-span continuous bridges with elastic bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7) (2006) 1759-1782.
- [35] J. N. Yang, Y. Lei, S. Pan, and 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.
- [36] A. Zarafshan, and F. Ansari, Damage Index Matrix: A Novel Damage Identification Method Using Hilbert–Huang Transformation, In *Topics in Modal Analysis*, 7 (2014) 439-450. Springer, New York, NY.
- [37] B. Chen, S. L. Zhao, and P. Y. Li, Application of Hilbert–Huang transform in structural health monitoring: a state-of-the-art review, *Mathematical Problems in Engineering*, [18] M. Mahmoud, Effect of cracks on the dynamic response of a simple beam subject to a moving load, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 215(3) (2001) 207-215.
- [19] Q. Zhang, Ł. Jankowski, Z. Duan, Simultaneous identification of moving masses and structural damage, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(6) (2010) 907-922.
- [20] T. Rauert, B. Hoffmeister, R. Cantieni, M. Brehm, V. Zabel, Experimental modal analysis of a twin composite filler beam railway bridge for high-speed trains with continuous ballast, *Proceedings of the IABMAS*, 8 (2008).
- [21] H.-M. Koh, D. Frangopol, Bridge Maintenance, Safety Management, Health Monitoring and Informatics-IABMAS'08: Proceedings of the Fourth International IABMAS Conference, Seoul, Korea, July 13-17, CRC Press, 2008.
- [22] X. Zhu, S. Law, Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history, *International Journal of Solids and Structures*, 43(7-8) (2006) 2299-2317.
- [23] A. Khorram, M. Rezaeian, and F. Bakhtiari-Nejad, Multiple cracks detection in a beam subjected to a moving load using wavelet analysis combined with factorial design, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 40 (2013) 97-113.
- [24] N. Roveri, and A. Carcaterra, Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert–Huang transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28 (2012) 128-144.
- [25] D. Hester, and A. González, A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28 (2012) 145-166.
- [26] A. González, and D. Hester, An investigation into the acceleration response of a damaged beam-type structure to a moving force, *Journal of Sound and Vibration*, 332(13) (2013) 3201-3217.
- [27] S. Marchesiello, S. Bedaoui, L. Garibaldi, and P. Argoul, Time-dependent identification of a bridge-like structure

- [42] A.K. Upadhyay, R. Pandey, and K.K. Shukla, Nonlinear dynamic response of laminated composite plates subjected to pulse loading, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(11) (2011) 4530-454.
- [43] S. A. Ramu, and V. T. Johnson, Damage assessment of composite structures—A fuzzy logic integrated neural network approach, *Computers & structures*, 53(3) (1995) 491-502.
- [44] A. H. Shahri, and A. K. Ghorbani-Tanha, Damage detection via closed-form sensitivity matrix of modal kinetic energy change ratio, *Journal of Sound and Vibration*, 401(2017) 268-281.
- (2014).
- [38] A. S. Nowak, and K. R. Collins, *Reliability of structures*, CRC Press, 2012.
- [39] K. Shin, and J. Hammond, *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*, John Wiley & Sons, 2008.
- [40] D. Zonta, A. Lanaro, and P. Zanon, A strain-flexibility-based approach to damage location, In *Key Engineering Materials*, 245 (2003) 87-96. Trans Tech Publications.
- [41] S. Laflamme, L. Cao, E. Chatzi, and F. Ubertini, Damage detection and localization from dense network of strain sensors, *Shock and Vibration*, (2016).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Khosraviani, O. Bahar, S. H. Ghasemi, *Damage detection in continuous deck bridges using statistical cross-correlation function method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 589-606.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16248.6173](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16248.6173)



