Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 837-840
DOI: 10.22060/mej.2021.18630.6866

Experimental verification of indirect bridge mode shape identification using transmissibility of a passing vehicle

S. M. Marashi[1], M. H. Pashaei[1*] , M. M. Khatibi[2], M. Abdollahi[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
[2] Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University

ABSTRACT: The use of structural vibration is one of the bridge health monitoring approaches which is often costly, time-consuming. The response of a passing vehicle includes the bridge response so that it is used for extracting the bridge modal parameters. In this paper, the transmissibility measurement of a passing vehicle is employed in order to identify the bridge mode shape indirectly. As the sensor is embedded on the axle of the vehicle, recording the signal is fulfilled during the vehicle passage and there is no need to stop the vehicle. On the other hand, there is white noise assumption in most other techniques, but excitation characteristics are not considered in the proposed method which is another advantage. In the numerical simulation, the bridge is assumed to be Euler Bernoulli and the vehicle is modeled as a 4DOF system. Solving the vehicle-bridge interaction equations, the acceleration of all degrees of freedom are obtained. Afterwards, the mode shape is identified by applying the short time transmissibility measurement on the acceleration. Since the performance of the indirect methods in real cases is associated with many obstacles and challenges, a setup for experimental verification of the proposed method has been designed and constructed in a laboratory. Numerical simulations and experimental results indicate the capability of the proposed method for indirect identification of bridge mode shape.

Review History:

Received: Jun. 23, 2020
Revised: Dec, 04, 2020
Accepted: Jan. 05, 2021
Available Online: Jan. 17, 2021

Keywords:

Bridge mode shape
Health monitoring
Indirect identification
Tran-smissibility
Experimental verification.

1- Introduction

Estimating the mode shapes of a bridge is an important key in studying its dynamic behavior. As there are discontinuities at the damage points in the mode shapes of a damaged bridge, including slope discontinuities at the points.

Although the study by Zhang et al. [1] can be considered as the first attempt at indirect identification of bridge mode shapes, the method is based on utilizing an excitation machine via the vehicle and measuring the excitation force, which may be not an easy task to perform in a real case. Recently, some interesting ideas [2] have been proposed which are based on only the response measurement of a passing vehicle. The method proposed by Yang et al. [3] provides high resolution mode shape with acceptable accuracy, particularly for the first mode shape. However, the performance of the method in the presence of measurement noise needs to be investigated. On the other hand, the methods proposed by Oshima et al. [4] and Malekjafarian and OBrien [5] show high sensitivity to measurement noise which is an inherent characteristic of a real measurement system.

Since among the available methods, only the method based on transmissibility is independent of white noise assumption for the excitation and has also good performance in the presence of noise, so in this research, a method based on short time transmissibility is used to identify the mode shape. In this approach, the measurement of acceleration is performed during the passage of the vehicle and there is no need to stop the vehicle. Moreover, using the transmissibility may result in independency of the method to white assumption for the excitation.

In order to evaluate the method numerically, the bridge is assumed to be simply supported and the vehicle is modeled as a 4-degree of freedom mass-stiffness-damping by FEM procedure. By solving the bridge-vehicle interaction model simultaneously, the vehicle response is calculated. Using the short time acceleration, the transmissibility is calculated and the SVD is performed on the matrices so that the bridge mode shape will be estimated. Next, a laboratory-scale setup is designed and implemented to examine the performance of the method in real conditions.

2- Theory

In this section, the theory of indirect bridge mode shape identification by the passing recorder vehicle is presented. First, by the FEM procedure, the interaction between vehicle and bridge is modeled. Next, the theory

*Corresponding author's email: mpashaei@nit.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

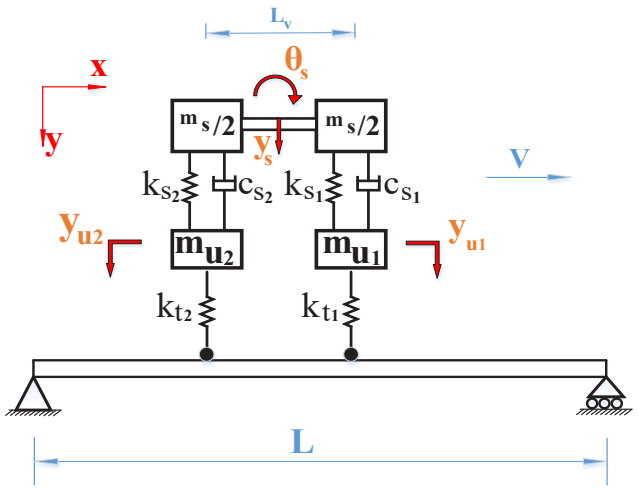


Fig. 1. Vehicle bridge interaction model

of transmissibility is explained briefly and estimation of the bridge mode shape by short time method is established.

The bridge is simply supported and the vehicle is assumed to be 4 degree of freedom as shown in Fig. 1.

Combining the bridge and vehicle equations, the coupled equation of motion is formed as:

$$[M_T]\{\ddot{Y}_T\}+[C_T]\{\dot{Y}_T\}+[K_T]\{Y_T\}=\{F_T\} \tag{1}$$

where M_T and M_C are the mass and damping matrices of the combined system, respectively, K_T stands for the coupled time-varying system stiffness matrix and F represents the system force vector. The vector, $Y_T=\{y_v\ ,y_b\}^T$, indicates the displacement vector of the system. Wilson-Theta integration scheme is employed to solve the above equation for the coupled system and the optimal value of the parameter $\theta=1.420815$ guarantees unconditional stability.

By using the modal contribution representations and the assumptions such as the mode shapes to be well separated, modal damping ratios to be small, the dynamical response of the system at the resonant frequency to be dominated by the contribution of the corresponding mode shape and the other mode shapes to have negligible contributions, one may have [6]:

$$\lim_{i\omega\to i\omega_l} T^k_{x_o x_j}(i\omega)=\lim_{i\omega\to i\omega_l}\frac{S_{x_o x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)}=\frac{\psi^*_{ol}}{\psi^*_{jl}} \tag{2}$$

where ψ^*_{ol} and ψ^*_{jl} are the amplitudes of mode l; o and k stand for the degrees of freedom and ω_l is the natural frequency of mode l.

3- Numerical Simulation

The indirect estimation of the mode shapes of a bridge using short time transmissibility measurement [7] is investigated numerically in this section. The vehicle is considered as a 4-degree of freedom system and the bridge is assumed to be a simply-supported Euler Bernoulli beam. To obtain the mode shape of the bridge in all stages of simulation by finite element method, the approach is implemented in MATLAB software.

4- Experimental Validation

In this section, in order to evaluate the method experimentally, a laboratory-scale setup is established. As a nutshell, the mode shape extracted by the aforementioned indirect method is compared to the one by the hammer test.

In order to fulfill the indirect identification of the bridge mode shape, two accelerometers records the data on the vehicle (Fig. 2).

The local mode shape in each segment is defined by the

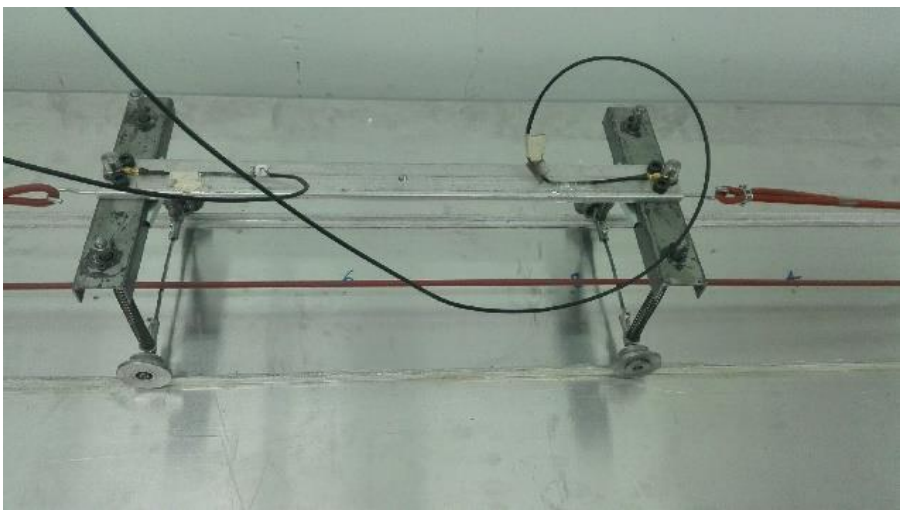


Fig. 2. The vehicle with two accelerometers on the front and rear axles

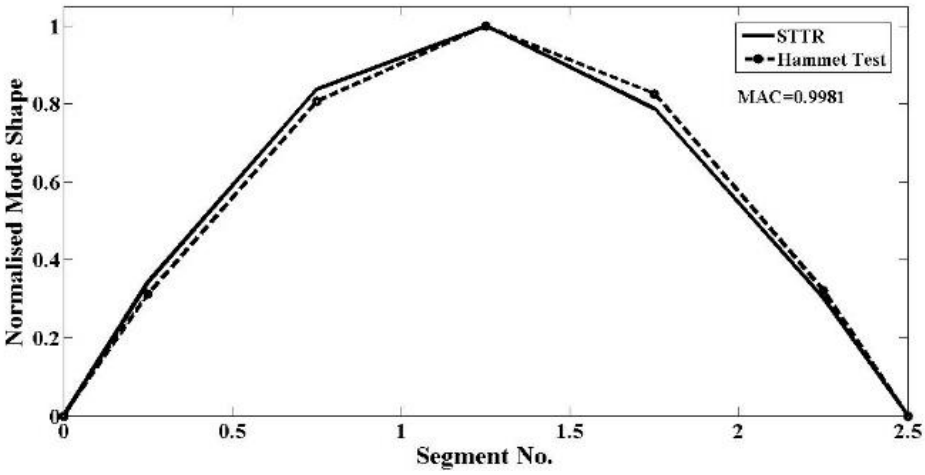


Fig. 3. The comparison between the first bridge mode shape from indirect and classical method

singular vectors corresponding to their own singular values which are the peaks of the diagrams. In order to extract the first two global mode shapes of the bridge, the rescaling process of the local mode shapes would be carried out (Fig. 3).

5- Conclusions

In this paper, indirect identification of bridge mode shape using transmissibility measurement is presented both theoretically and experimentally. The independence of the characteristics of the forces can be mentioned as an advantage of this method in comparison with the previous methods which assume white noise excitation. As a highlight difference between this method and the other transmissibility method it should be stated that there is no need to use a reference vehicle, here, and also the vehicles are moving without any stop duration.

Since the effectiveness of every method should be examined in real cases, the experimental establishment of the indirect method is considered a significant feature of the research. A laboratory structure is designed and established as the experimental setup. An aluminum plate with a roller and a pinned support is embedded in the structure to serve as the simply supported bridge. A two-axle vehicle passes over the plate by constant velocity. The acceleration data are recorded by two accelerometers which are on the rear and front axles. Using the indirect transmissibility approach, the mode shape extraction is performed. The comparison between the indirect and hammer modal test shows the acceptable accuracy of the proposed indirect method.

References

[1] Y. Zhang, L. Wang, Z. Xiang, Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration, 331(2) (2012) 291-307.

[2] X. Kong, C. Cai, B. Kong, Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system, Journal of Engineering Mechanics, 141(1) (2014) 04014102.

[3] Y. Yang, Y. Li, K. Chang, Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study, Smart Structures and Systems, 13(5) (2014) 797-819.

[4] Y. Oshima, K. Yamamoto, K. Sugiura, Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles, Smart Structures and Systems, 13(5) (2014) 731-753.

[5] A. Malekjafarian, E. OBrien, Identification of bridge mode shapes using Short Time Frequency Domain Decomposition of the responses measured in a passing vehicle, Engineering Structures, 81 (2014) 386-397.

[6] I.G. Araújo, J.E. Laier, Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices, Mechanical Systems and Signal Processing, 46(1) (2014) 129-145.

[7] J. Keenahan, P. McGetrick, E.J. O'Brien, A. Gonzalez, Using instrumented vehicles to detect damage in bridges, in: 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22-27 July 2012, Paper No. 2934, Faculty of Engineering, University of Porto, 2012.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. M. Marashi, M. H. Pashaei , M. M. Khatibi, M. Abdollahi, Experimental verification of indirect bridge mode shape identification using transmissibility of a passing vehicle , Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 837-840.

DOI: 10.22060/mej.2021.18630.6866

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۵۲۹ تا ۳۵۴۸
DOI: 10.22060/mej.2021.18630.6866

صحه‌گذاری تجربی شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از نسبت انتقال‌پذیری وسیله‌نقلیه عبوری

سیدمازیار مرعشی[۱]، محمدهادی پاشائی[۱*]، محمدمهدی خطیبی[۲]، محمد عبدالهی[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

خلاصه: استفاده از داده‌های ارتعاشی یکی از راه‌های پایش سلامت پل می‌باشد که معمولاً پرهزینه و زمان‌بر است. پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه در حال عبور از پل، شامل پاسخ ارتعاشی پل نیز می‌باشد که می‌توان از آن برای استخراج پارامترهای مودال پل بهره برد. در این مقاله، به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل از نسبت انتقال‌پذیری پاسخ وسیله‌نقلیه استفاده شده است. با نصب شتاب‌سنج بر روی محورهای وسیله‌نقلیه، اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله‌نقلیه روی پل ندارد. از طرفی، در اغلب روش‌های موجود فرض بر آن است که نیروی تحریک به صورت نویز سفید باشد اما در روش حاضر خصوصیات نیروی تحریک در نظر گرفته نمی‌شود که این مورد از دیگر مزایای این روش است. در شبیه‌سازی عددی، پل به صورت اویلر برنولی و وسیله‌نقلیه به صورت چهار درجه آزادی مدل شده‌اند. با حل همزمان معادله برهم‌کنش پل با وسیله‌نقلیه، شتاب کلیه درجات آزادی حاصل آمده است. در ادامه شکل مود پل با اعمال روش انتقال‌پذیری زمان کوتاه بر داده شتاب‌محور وسیله‌نقلیه استخراج شده است. از آن‌جا که عملکرد روش‌های غیرمستقیم در شرایط واقعی با موانع و چالش‌های بسیار همراه است، در ادامه این تحقیق، مجموعه‌ای برای صحه‌گذاری تجربی روش پیشنهادی به صورت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی و نیز آزمایشگاهی دلالت بر توانایی روش حاضر برای شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

کلمات کلیدی:
شکل مود پل
پایش سلامت
شناسایی غیرمستقیم
نسبت انتقال‌پذیری
صحه‌گذاری تجربی

۱- مقدمه

تخمین شکل مودهای پل در بررسی رفتار دینامیکی آن حائز اهمیت است. زیرا ناپیوستگی شکل مود در نقاط دارای آسیب اتفاق می‌افتد که شامل ناپیوستگی شیب در نقاط مربوطه می‌باشد. از تغییر انحنای شکل مود می‌توان برای تشخیص ناپیوستگی‌ها استفاده نمود [۱, ۲]. همچنین، شکل مودهای پل می‌تواند به‌عنوان ابزاری مهم در به‌روزرسانی مدل پل مورد استفاده قرار گیرد [۳].

ژانگ و همکارانش [۴] با استفاده از شتاب‌سنج و لرزاننده[۱] عبور وسیله‌نقلیه از پل را مدل‌سازی نمودند. نتایج حاکی از آن است که اندازه طیف بدست‌آمده از امپدانس نقطه‌ای تقریباً با مربع شکل مود[۲] متناسب است که می‌تواند برای تشخیص آسیب بکار رود. اگرچه هدف اصلی این روش، تخمین شکل مودهای پل نیست اما اولین کاربرد روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی مشخصه‌های مرتبط با شکل مود می‌باشد.

یانگ و همکارانش [۵] روشی تئوری برای شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل معرفی نمودند. آن‌ها نشان دادند که، دامنه‌ی بخشی از پاسخ وسیله‌نقلیه که مربوط به یکی از فرکانس‌های طبیعی پل می‌باشد، دقیقا متناظر با شکل مود آن فرکانس است. بنابراین پس از شناسایی فرکانس طبیعی پل، جزء پاسخ مربوط به آن فرکانس می‌تواند به‌عنوان شکل مود متناظر محسوب گردد. این امر با استفاده از تبدیل هیلبرت[۳] پاسخ فیلترشده میان گذر[۴] انجام شده است.

اوشیما و همکارانش [۶] روشی را برای شناسایی آسیب پل طرح‌ریزی نمودند که شامل تخمین شکل مودهای پل از پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه متحرک می‌باشد. در این روش، شکل مودهای حاصل از روش تجزیه مقدار ویژه به منظور تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته‌است. این آزمایش توسط دو یدک‌کش سنگین دو محوره و چند وسیله‌نقلیه شناسایی تک‌محوره صورت گرفته است. نتایج نشان

1 Shaker
2 Mode Shape Square
3 Hilbert Transform
4 Band-Pass Filter

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mpashaei@nit.ac.ir

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.

می‌دهد که میانگین مقادیر معیار اطمینان مودال[1] به تعداد وسایل نقلیه تک محوره وابسته است. هنگامی‌که نویز اندازه‌گیری بزرگتر از یک درصد باشد، این روش نیازمند تعداد اندازه‌گیری‌های بی‌شماری است که یکی از موانع اصلی برای کاربرد عملی این روش می‌باشد.

ملک‌جعفریان و اوبرایان [۷] استفاده از روش تجزیه حوزه فرکانسی زمان کوتاه[2] برای شناسایی شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ اندازه‌گیری‌شده از دو محور متوالی را ارائه نمودند. آن‌ها روش تجزیه حوزه فرکانسی را بر سیگنال‌های زمان‌کوتاه در طی چندین مرحله، اعمال و فرآیند میزان‌سازی مجدد را بر بردارهای شکل مود موضعی اجرا نمودند تا شکل مودهای کلی بدست آید. اگر نویز و سرعت وسیله‌نقلیه پایین باشد، شکل مودها می‌توانند با دقت قابل قبولی بدست آیند. همچنین اعمال رفت و آمد بر روی پل می‌تواند حساسیت روش به نویز را کاهش دهد.

هی و همکارانش [۸] با استفاده از تبدیل هیلبرت، شکل مود مرتبه اول با وضوح بالا را استخراج نموده‌اند و انحنای شکل مود موضعی[3] در محدوده آسیب به منظور افزایش توانایی غلبه بر نویز را معرفی نمودند. در تحقیقی دیگر [۹]، آن‌ها روشی برای شناسایی شکل مودهای نرمال‌شده به جرم بر اساس ویژگی تحمل بار پیشنهاد دادند. اگرچه این روش، شکل مودهایی با وضوح بالا بدست می‌آورد اما سفتی وسیله‌نقلیه را بی‌نهایت درنظر گرفته است و در حین داده‌برداری، وسیله نقلیه روی پل به حالت سکون باشد.

الگوریتم دیگری نیز برای تخمین شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه عبوری توسط ملک‌جعفریان و اوبرایان [۱۰] ارائه گردیده است. در این روش از یک سیستم یدک و یدک‌کش با اعمال تحریک خارجی به پل به‌منظور رساندن انرژی لازم برای ارتعاش در فرکانس های مورد نظر، استفاده شده است.

اخیراً، یانگ و همکارانش [۱۱]، مروری جامع بر شناسایی غیرمستقیم پارامترهای مودال و تشخیص آسیب در پل‌ها از وسیله‌نقلیه عبوری ارائه داده‌اند و متذکر شدند که باید بررسی‌های بیشتری پیرامون استفاده از مدل چند درجه آزادی برای وسیله‌نقلیه در شبیه‌سازی عددی، تست در مقیاس آزمایشگاهی و نیز آزمایش میدانی انجام پذیرد.

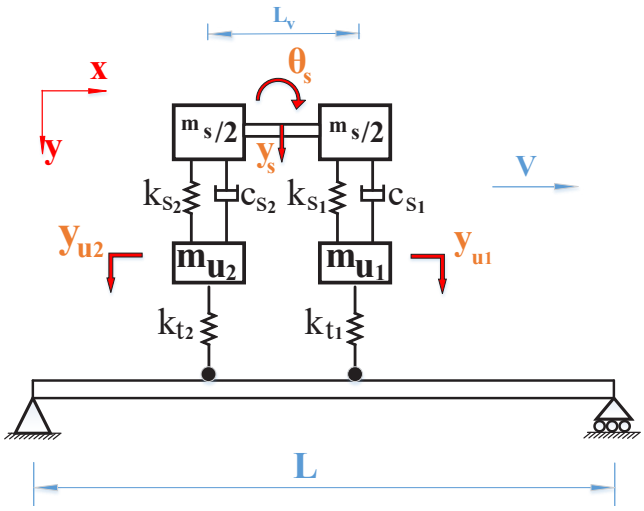
اگر چه تحقیق ژانگ و همکارانش [۴] می‌تواند به‌عنوان اولین تلاش در شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل به حساب آید، ولی مبتنی بر به‌کارگرفتن وسیله‌نقلیه محرک و اندازه‌گیری نیروی تحریک می‌باشد که ممکن است در حالت واقعی قابل اجرا نباشد. در این راستا، ایده‌های دیگری [۱۲] نیز ارائه گردیده‌اند که فقط بر اساس پاسخ اندازه‌گیری‌شده یک وسیله‌نقلیه عبوری می‌باشد. روش ارائه‌شده توسط یانگ و همکارانش [۵]، شکل مودهایی با وضوح بالا و دقت قابل قبول، به‌خصوص برای اولین شکل مود، بدست آورده است. اما، عملکرد این روش در حضور نویز نیاز به بررسی دارد. از طرف دیگر، روش‌های ارائه‌شده توسط اوشیما و همکارانش [۶] و ملک جعفریان و اوبرایان [۷] نشان‌دهنده حساسیت بالا به نویز است که یکی از خصوصیات ذاتی یک سیستم در اندازه‌گیری واقعی می‌باشد. اگرچه کنگ و همکارانش [۱۲]، از انتقال‌پذیری به منظور شناسایی آسیب در پل استفاده نمودند اما توقف حداقل یکی از دو وسایل‌نقلیه در حین داده‌برداری لازم می‌باشد.

به نظر می‌رسد که روش‌های پایش غیرمستقیم پل که تمرکز بر شناسایی شکل مودهای پل داشته، دارای قابلیت‌های بالقوه بوده و از مزایای بسیاری برای یافتن و مکان‌یابی آسیب برخوردار هستند. اما در حال حاضر این روش‌ها به‌علت کمبود مطالعات آزمایشگاهی برای نشان‌دادن برخی مشکلات عملی، محدود می‌باشند. بر اساس مطالعات موجود، می‌توان نتیجه گرفت که این روش‌ها نیاز به بهبود قابل ملاحظه و به دنبال آن اعتبارسنجی داشته تا در عمل بتواند قابلیت اجرای خوبی داشته باشد.

از آنجاکه در میان روش‌های موجود، صرفاً روش بر مبنای انتقال‌پذیری مستقل از فرض نویز سفید برای تحریک است و کارایی مناسبی در حضور نویز دارد، لذا در این مقاله، از روش بر مبنای انتقال‌پذیری زمان کوتاه [۱۳] استفاده می‌گردد تا شکل مود پل بدست آید. در این روش اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت وسیله نقلیه صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله‌نقلیه نمی‌باشد؛ همچنین، با توجه به استفاده از نسبت انتقال‌پذیری نیازی به فرض نویز سفید در تحریک نمی‌باشد.

به منظور ارزیابی عددی روش، یک پل دوسر مفصل به صورت المان محدود و وسیله‌نقلیه به صورت یک سیستم چهاردرجه آزادی جرم-فنر-دمپر مدل شده است. با حل هم‌زمان مدل پل-وسیله‌نقلیه،

1 Modal Assurance Criterion (MAC)
2 Short Time Frequency Domain Decomposition (STFDD)
3 Regional mode shape curvature



شکل ۱. مدل برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل

Fig. 1. Vehicle bridge interaction model

پاسخ وسیله نقلیه محاسبه می‌گردد. با کمک سیگنال شتاب کوتاه‌شده، نسبت انتقال‌پذیری محاسبه و روش تجزیه مقدار تکین بر ماتریس‌های انتقال‌پذیری اعمال گشته و شکل مود پل بدست آمده است. در ادامه، مجموعه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و پیاده‌سازی شده است تا عملکرد روش را در شرایط واقعی مورد بررسی قرار دهد.

۲- تئوری شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل

در این بخش، تئوری و روش به‌کاررفته در تحقیق حاضر به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از شتاب ثبت‌شده از وسیله‌نقلیه عبوری پی‌ریزی می‌شود. در ابتدا با استفاده از روش اجزاء محدود، مدلسازی برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل انجام می‌گیرد. پس از آن تئوری روش انتقال‌پذیری به عنوان یک روش آنالیز مودال فقط خروجی به طور مختصر تشریح و در ادامه آن، تخمین شکل مودهای پل به روش زمان کوتاه مطرح می‌گردد.

در این تحقیق به منظور بررسی عددی مساله برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل از روش اجزاء محدود بهره گرفته شده است [۱۴]. مدل وسیله‌نقلیه به‌صورت یک سیستم چهار درجه آزادی مانند شکل ۱ انتخاب شده است. کلیه معادلات برهم‌کنش پل و وسیله‌نقلیه به صورت یک دستگاه معادلات وابسته درنظر گرفته می‌شود که حل آن در هر گام زمانی انجام می‌پذیرد.

در شکل فوق، اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به اولین و دومین محور وسیله‌نقلیه و پارامترهای m_s، m_u، k_s، k_t، c_s به ترتیب؛ جرم بدنه، جرم اکسل، سفتی سیستم تعلیق، سفتی لاستیک و میرایی سیستم تعلیق می‌باشند. y_u به عنوان جابجایی عمودی اکسل و y_s و θ_s به ترتیب به عنوان جابجایی عمودی بدنه و چرخش آن تعریف شده‌اند. سرعت وسیله‌نقلیه نیز، مقدار ثابت v و فاصله دو محور از هم L_v می‌باشد. وسیله‌نقلیه در زمان صفر در ابتدای پل طوری قرار دارد که لاستیک عقب آن بر روی تکیه‌گاه سمت چپ در تماس است. همچنین فرض تعادل استاتیکی برای سیستم در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱ و پارامترهای مذکور، معادلات حرکت وسیله‌نقلیه به روش تعادل نیرو بدست آمده و می‌تواند به فرم ماتریسی زیر بیان شود:

$$[M_v]\{\ddot{Y}_v\}+[C_v]\{\dot{Y}_v\}+[K_v]\{Y_v\}=\{f_v\} \qquad (۱)$$

که $\{f_v\}$، بردار نیروی برهم‌کنش وارد بر وسایل‌نقلیه و $\{Y_v\}$، $\{\dot{Y}_v\}$ و $\{\ddot{Y}_v\}$، به ترتیب بردار جابجایی، سرعت و شتاب و $[M_v]$، $[C_v]$ و $[K_v]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی وسیله‌نقلیه می‌باشند.

پل نیز به صورت یک تیر اویلر برنولی دوسر مفصل با طول L در نظر گرفته‌شده و جرم واحد طول $(\bar{m})$، مدول الاستیک (E) و ممان اینرسی مقطع آن (I) ثابت فرض شده است. برای مدل کردن

پل از المان تیر[1] با دو درجه آزادی استفاده می‌شود. این المان شامل دوگره است که هر گره دارای دو درجه آزادی جابجایی و دورانی می‌باشد. تغییر شکل تیر به وسیله این درجه آزادی‌ها بیان می‌شود [۱۵].

با توجه به تعداد المانهای استفاده‌شده برای مدل‌سازی تیر و نیز مکان حضور محورهای وسیله‌نقلیه بر روی آن، معادله حرکت پل می‌تواند به صورت رابطه زیر بیان شود:

$$[M_b]\{\ddot{Y}_b\}+[C_b]\{\dot{Y}_b\}+[K_b]\{Y_b\}=[N_b]\{f_{\text{int}}\} \qquad (۲)$$

که $[M_b]$، $[C_b]$ و $[K_b]$ به ترتیب ماتریس‌های کلی جرم، میرایی و سفتی پل و $\{Y_b\}$، بردار کلی جابجایی و چرخش گرهی می‌باشند. $\{\dot{Y}_b\}$ و $\{\ddot{Y}_b\}$ به ترتیب مشتق اول (سرعت) و مشتق دوم (شتاب) جابجایی و چرخش گرهی می‌باشد و $[N_b]\{f_{\text{int}}\}$ نیز بردار کلی نیروی وارده بر گره‌های پل است. $[N_b]$ نیز ماتریسی می‌باشد که نیروهای برهم‌کنش اعمالی بر المان‌های تیر را به نیروهای گره‌ای معادل بسط می‌دهد.

با ترکیب معادلات (۱) و(۲)، معادله به‌هم وابسته برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل به صورت رابطه زیر بازنویسی می‌گردد:

$$[M_T]\{\ddot{Y}_T\}+[C_T]\{\dot{Y}_T\}+[K_T]\{Y_T\}=\{F_T\} \qquad (۳)$$

که $[M_T]$، $[C_T]$ و $[K_T]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی کل سیستم برهم‌کنش پل با وسیله‌نقلیه، $\{F_T\}$ بردار مربوط به نیروی برهم‌کنش و $\{Y_T\}$، بردار جابجایی می‌باشد.

پاسخ معادله (۳) با استفاده از روش انتگرال‌گیری ویلسون تتا قابل دستیابی است [۱۶]. مقدار بهینه برای پایداری غیرمشروط در انتگرال‌گیری ویلسون تتا مقدار $\theta_{wilson}=1.420815$ و کلیه شرایط اولیه صفر درنظر گرفته می‌شود [۱۶].

پس از بدست‌آوردن شتاب کلیه درجات آزادی سیستم برهم‌کنش از جمله محور وسیله‌نقلیه، نیاز است تا شناسایی پارامترهای مودال پل با استفاده از داده شتاب انجام پذیرد. بدین منظور از روش انتقال پذیری برای بدست‌آوردن فرکانس طبیعی و شکل مود پل بهره گرفته می‌شود. چگالی طیف توان انتقال‌پذیری[2] به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد [۱۷]:

$$T_{xoxj}^{k}(i\omega)=\frac{S_{xoxk}(i\omega)}{S_{xjxk}(i\omega)} \qquad (۴)$$

در رابطه اخیر، چگالی طیف توان خروجی‌های x_o و x_k، با نام $S_{x_o x_k}$، به صورت نسبت چگالی طیف توان نقطه o به نقطه مرجع k تعریف شده است. همچنین، چگالی طیف توان خروجی‌های x_j و x_k با نام $S_{x_j x_k}$ به طور مشابه قابل محاسبه است. i نیز عدد موهومی $\sqrt{-1}$ و ω فرکانس مورد بررسی می‌باشد.

با فرض جدابودن مودهای ارتعاشی و کوچک‌بودن میرایی، در نزدیکی هر یک از مودهای سیستم، فرکانس متناظر با آن مود، فرکانس غالب در پاسخ ارتعاشی سازه می‌باشد و سهم سایر مودهای ارتعاشی قابل صرف‌نظرکردن است [۱۷] لذا رابطه زیر قابل دستیابی است:

$$\lim_{i\omega\to i\omega_l} T_{x_o x_j}^{k}(i\omega)=\lim_{i\omega\to i\omega_l}\frac{S_{x_o x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)}=\frac{\psi^*_{ol}}{\psi^*_{jl}} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، $\varnothing_{kl}$ به عنوان عنصری از بردار شکل مود می‌باشد که k نماد درجه آزادی و l نماد شکل مود مربوطه است. ω_l نیز به عنوان فرکانس طبیعی مود lام در نظر گرفته می‌شود.

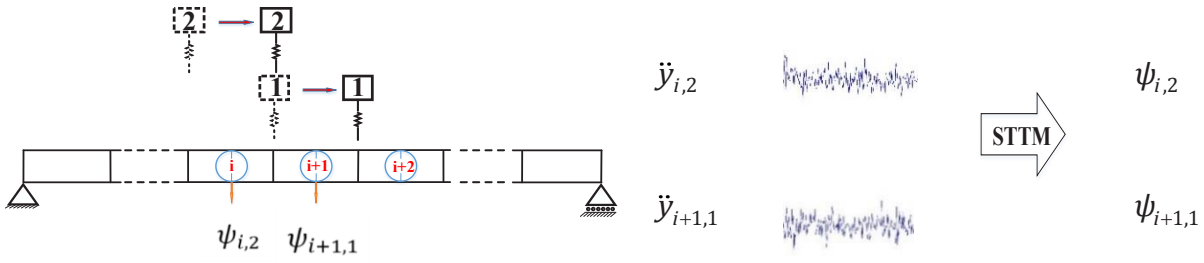
به روشی مشابه، با تعریف نقطه مرجعی دیگر مانند z، انتقال پذیری به سمت مقداری مشابه میل می‌نماید. اکنون با تغییر نقطه o ، ماتریس انتقال‌پذیری به صورت زیر قابل بیان است:

$$T_{x_{o_i} x_j}^{z_i}(i\omega)=\begin{bmatrix} T_{x_{o_1} x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_{o_1} x_j}^{z_2}(i\omega) \\ T_{x_{o_2} x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_{o_2} x_j}^{z_2}(i\omega) \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

با انجام تجزیه مقدار تکین، دومین مقدار تکین این ماتریس به سمت صفر میل خواهد کرد. بنابراین، معکوس دومین مقدار تکین

1 Beam element

2 Power Spectrum Density of Transmissibility



شکل ۲. محاسبه شکل مود به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری زمان کوتاه [۱۳]

Fig. 2. Mode shape extraction by short time transmissibility measurement

می‌تواند برای بدست‌آوردن فرکانس طبیعی سیستم بکار گرفته شود [۱۷]. تجزیه مقدار تکین ماتریس انتقال‌پذیری $T^{Z_i}_{x_{o_i}x_j}(i\omega)$ در رابطه(۷) تعریف می‌گردد:

$$\left[T^{Z_i}_{x_{o_i}x_j}(i\omega)\right]=\left[U^j(i\omega)\right]_{2\times2}\left[\Lambda^j(i\omega)\right]_{2\times2}\left[V^j(i\omega)\right]^*_{2\times2} \quad (۷)$$

بردارهای تکین چپ و راست ماتریس $T^{Z_i}_{x_{o_i}x_j}(i\omega)$، به ترتیب $\left[U^j(i\omega)\right]$ و $\left[V^j(i\omega)\right]$ و * مزدوج مختلط می‌باشند. مقادیر تکین ماتریس $T^{Z_i}_{x_{o_i}x_j}(i\omega)$ ، به صورت قطری در ماتریس $\left[\Lambda^j(i\omega)\right]$ طوری چیده شده‌اند. از طرفی، در نزدیکی فرکانس طبیعی، اولین بردار تکین در ماتریس $\left[U(i\omega)\right]$ از رابطه (۷)، متناسب با شکل مود سیستم می‌باشد [۱۷].

از آنجاکه در روش مورد استفاده در این تحقیق صرفاً از دو شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی وسیله‌نقلیه متحرک برای اندازه‌گیری شتاب پل استفاده می‌شود، بنابراین امکان استفاده مستقیم از رابطه(۷) برای محاسبه شکل مود وجود ندارد در نتیجه در این بخش با تقسیم‌بندی داده‌های شتاب به بازه‌های زمانی، امکان محاسبه شکل مود فراهم گردد [۷]. برای این امر، داده دریافت‌شده از دو محور متوالی در بازه‌های زمان کوتاه درنظر گرفته می‌شود (شکل ۲). فاصله بین دو محور نیز برای تقسیم‌بندی پل مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از عبور وسیله‌نقلیه از پل، تمام بردارهای شکل مود موضعی بدست می‌آیند. از آنجاکه بردارهای شکل مود موضعی به طور همزمان بدست نیامده‌اند، برای دست‌یابی به بردار شکل مودهای کلی باید مقیاس‌گذاری انجام گیرد. روند مقیاس‌گذاری بدین گونه است که اولین بردار شکل مود موضعی به عنوان شکل مود کلی در نظر گرفته می‌شود و سایر شکل مودهای کلی از رابطه زیر قابل محاسبه هستند [۱۳]:

$$\varphi=\left\{\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \psi_{3,1}\frac{\varphi_2}{\psi_{2,2}} \quad \dots \quad \psi_{i+1,1}\frac{\varphi_i}{\psi_{i,2}}\right\}^T \qquad i=3:n+1 \quad (۸)$$

که φ_i شکل مود کلی مربوط به وسط قسمت iام پل و $\varnothing_{i+1,1}$ و $\varnothing_{i,2}$ به ترتیب شکل مود موضعی قسمت $i+1$ و i می‌باشد که از اولین و دومین شتاب‌سنج بدست آمده است [۱۳].

۳- شبیه‌سازی

در این بخش، روش موردنظر [۱۳] برای شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل وسیله‌نقلیه به صورت یک سیستم چهار درجه آزادی و مدل پل به صورت یک تیر اویلر-برنولی خواهد بود. قابل ذکر است که برای بدست‌آوردن شکل مود پل در تمام مراحل شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود، برنامه‌ها در دامنه نرم‌افزار متلب[1] نوشته شده است.

به منظور بررسی عددی شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده داده‌های شتاب حاصل از دو محور وسیله‌نقلیه، پلی از مرجع [۱۸] با مشخصات مندرج در جدول ۱ درنظر گرفته شده است. پل موردنظر به صورت اویلر-برنولی فرض و با استفاده از روش اجزاء

1 MATLAB

جدول ۱. مشخصات پل

Table 1. Properties of the bridge

مشخصات	نام‌گذاری	مقدار
جرم واحد طول (kg/m)	$\bar{m}$	۲۱۷۵۲
طول (m)	L	۳۵
مدول الاستیک (MPa)	E	۳۵۰۰۰
ممان دوم سطح مقطع (m^4)	I	۳/۴۱۶۲
ضریب میرایی	ζ	۰/۰۳

جدول ۲. مشخصات ارتعاشی وسیله‌نقلیه [۱۸]

Table 2. Properties of the vehicle model

مشخصات	نام‌گذاری	مقدار
جرم بدنه (kg)	m_s	۱۶۶۰۰
جرم محور (kg)	m_{u1}, m_{u2}	۷۰۰
سفتی تعلیق (N/m)	k_{s1}, k_{s2}	۴×۱۰^۵
میرایی تعلیق (N.s/m)	c_{s1}, c_{s2}	۱۰×۱۰^۳
سفتی لاستیک (N/m)	k_{t1}, k_{t2}	۱/۷۵×۱۰^۶
سرعت وسیله‌نقلیه (m/s)	v	۲
فاصله دو محور (m)	L_v	۵

محدود مدلسازی شده است.

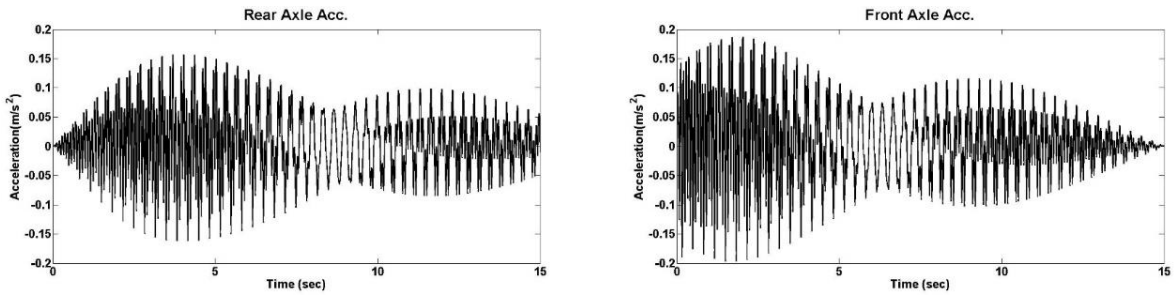
مقادیر به‌کارگرفته‌شده برای مشخصات ارتعاشی وسیله‌نقلیه نیز درجدول ۲ آورده شده است [۱۸].

با توجه به فاصله دو محور از هم، تعداد ۷ المان در مدل اجزاء محدود برای تیر درنظرگرفته و برای حل مساله برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل از بازه‌های زمانی به مقدار ۰/۰۰۱ ثانیه، استفاده شده است. بر روی هر یک از محورهای وسیله‌نقلیه، یک شتاب‌سنج وظیفه ثبت داده‌ها را برعهده دارد. با توجه به مقدار فاصله هر محور ازهم ($L_v = 5m$)، تعداد ۷ نقطه برای شکل مود حاصل خواهد آمد که هر یک از این نقاط مربوط به وسط قسمتی از پل می‌باشد که دو محور متوالی از آن گذر کرده است (رابطه(۸)).

با حل معادلات برهم‌کنش (۳)، شتاب دو محور حاصل می‌گردد. قسمت‌های (الف) و (ب) در شکل ۳، به ترتیب مربوط به شتاب اولین و دومین محور می‌باشد.

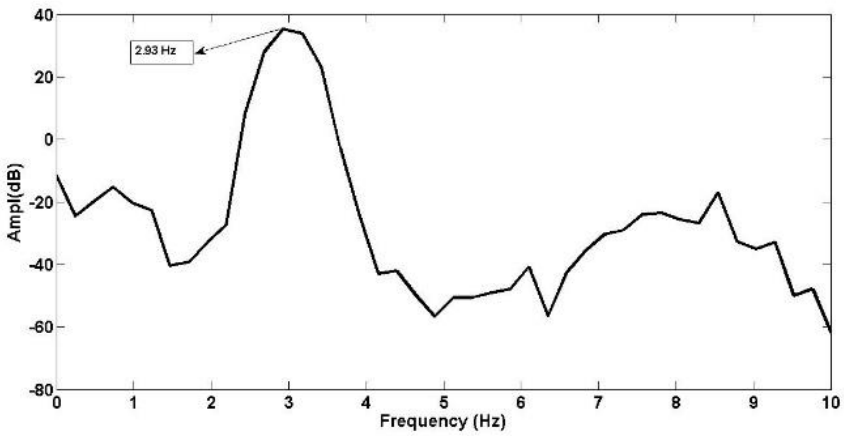
شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری انجام می‌گیرد [۱۷]. به منظور محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم، معکوس دومین مقدار تکین بر حسب ω ترسیم می‌شود. قله‌های این نمودار همان فرکانس‌های طبیعی هستند. به عنوان مثال، شکل ۴ برای اولین مرحله از اعمال انتقال‌پذیری بر روی داده‌های شتاب‌آورده شده است.

اولین بردار تکین در ماتریس $\left[U\left(i\omega\right)\right]$ از رابطه (۷) متناسب با شکل مود سیستم می‌باشد. اما با توجه به حرکت وسایل‌نقلیه و به تبع آن شتاب‌سنج‌های روی آن، می‌بایست با تقسیم‌بندی داده شتاب اندازه‌گیری‌شده به بازه‌های زمانی، امکان محاسبه شکل مود فراهم گردد. با استفاده از رابطه (۸) شکل مود تیر از روش غیرمستقیم حاصل آمده و با شکل مود دقیق مقایسه شده است (شکل ۵).



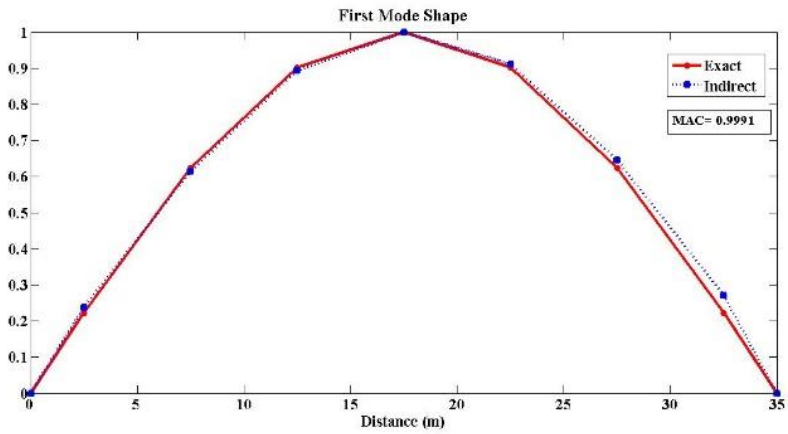
شکل ۳. شتاب (الف) اولین و (ب) دومین محور وسیله‌نقلیه

Fig. 3. Acceleration of the (a) first and (b) second axle of the vehicle



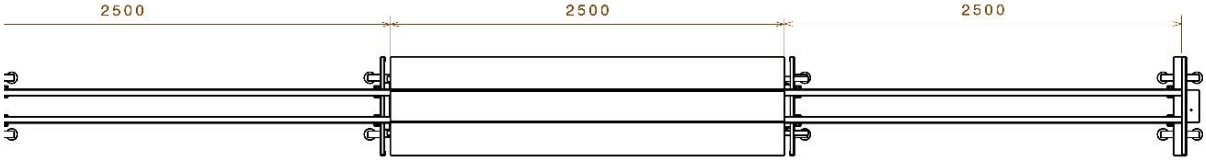
شکل ۴. معکوس دومین مقدار تکین بر حسب ω برای مرحله اول

Fig. 4. Inverse of the second singular value versus ω in the first stage



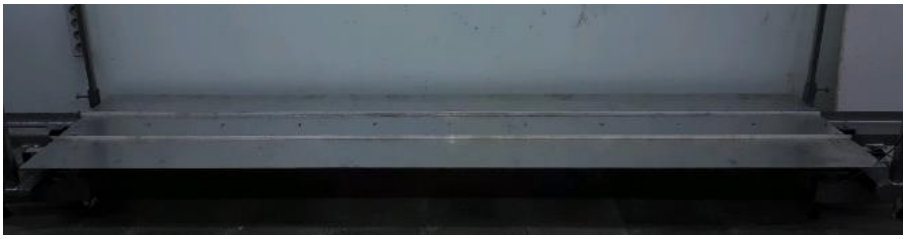
شکل ۵. اولین شکل مود پل از روش غیرمستقیم و مقایسه آن با حل تحلیلی

Fig. 5. The first mode shape of the bridge from indirect method and analytical solution



شکل ۶. نمای بالا از مدل کلی مجموعه مورد آزمایش در نرم‌افزار کتیا

Fig. 6. Top view of the laboratory model in CATIA



شکل ۷. صفحه آلومینیومی با تکیه‌گاه ساده

Fig. 7. Simply supported Aluminum plate

۴- تست

کارآمدی هر روش نیاز به بررسی آن روش در محیط عملی دارد. در این بخش به منظور اعتبارسنجی روش [۱۳]، ساخت یک پل در مقیاس آزمایشگاهی پی‌ریزی شده است. به طور خلاصه در این فصل شکل مود پل آزمایشگاهی با روش غیرمستقیم استخراج و با شکل مود حاصل از آزمایش کلاسیک چکش مقایسه می‌گردد.

نمای بالا از مجموعه مورد آزمایش را در نرم‌افزار کتیا نشان می‌دهد که طول تقریبی آن ۷/۵۰ متر و عرض آن ۱ متر می‌باشد. این مجموعه ۷/۵ متری از سه بخش تشکیل شده است. در بخش اول که طول آن قریب ۲/۵ متر است، وسیله‌نقیله از سرعت صفر شروع به حرکت نموده تا به سرعت مورد نظر برسد. وسیله‌نقلیه پس از آن با سرعت ثابت وارد بخش میانی سازه یا همان پل می‌شود. این بخش که از یک صفحه آلومینیومی تشکیل شده است به طول ۲/۵ متر می‌باشد. سرانجام وسیله‌نقلیه پس از عبور از بخش میانی به بخش انتهایی می‌رسد تا بتواند با طی مسافت نهایتاً متوقف گردد. این سازه مورد آزمایش توسط چهار ستون نگهداری می‌شود. این ستونها با استفاده از قطعات لاستیکی روی زمین قرار گرفته‌اند تا مجموعه کاملاً روی زمین تراز شده و از ارتعاشات مزاحم نیز جلوگیری شود.

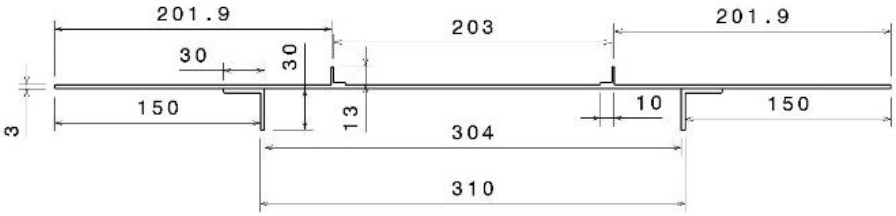
جدول ۳. مشخصات صفحه آلومینیومی

Table 3. The properties of the Aluminum plate

مشخصات	مقدار
طول (m)	۲/۵
عرض (m)	۰/۶۲۵
ضخامت (mm)	۳

وسیله‌نقلیه موردنظر نیز دارای دو درجه آزادی بوده که توسط تسمه لاستیکی به موتور الکتریکی متصل می‌شود. موتور الکتریکی از نوع سه فاز وظیفه چرخاندن پولی و به دنبال آن حرکت تسمه لاستیکی را برعهده دارد. با حرکت تسمه لاستیکی می‌توان حرکت وسیله‌نقلیه را کنترل نمود. در بالای سازه مورد آزمایش یک ریل آلومینیومی قرار دارد تا سیم‌های شتاب‌سنج توسط قرقره‌هایی بتوانند به راحتی در جهت حرکت وسیله‌نقلیه جابجا شوند.

شکل ۷ صفحه آلومینیومی مورد نظر را نشان می‌دهد. این صفحه که به عنوان پل در نظر گرفته می‌شود دارای دو تکیه‌گاه ساده بوده و مشخصات مندرج در جدول ۳ برای ساخت آن درنظر گرفته شده است. شکل ۸ سطح مقطع صفحه آلومینیومی را در نرم‌افزار کتیا نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، دو عدد نبشی



شکل ۸. نمای سطح مقطع صفحه آلومینیومی در نرم‌افزار کتیا

Fig. 8. The cross section of the Aluminum plate in CATIA

شکل ۹. نمای مختلف از تکیه‌گاه مفصلی

Fig. 9. Different views of the pinned support

آلومینیومی به عنوان مسیر حرکت وسیله‌نقلیه در بالای این صفحه نصب شده است. همچنین به منظور ایجاد تکیه‌گاه ساده، دو عدد نبشی آلومینیومی دیگر در زیر صفحه تعبیه شده که از سمت راست مفصل و از سمت چپ بر روی تکیه‌گاه غلطکی قرار داده شده است.

به منظور ایجاد تکیه‌گاه مفصلی از یک پین با حالت گوه‌ای استفاده شده است. حالت گوه‌ای پین باعث جلوگیری از ارتعاشات ناخواسته پل شده و بهترین شرایط را برای ایجاد تکیه‌گاه مفصلی مهیا می‌نماید. تصاویر مربوط به تکیه‌گاه مفصلی در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

تکیه‌گاه غلطکی نیز به کمک دو عدد یاتاقان به همراه پین‌های مربوطه، طوری طراحی شده است که تیغه‌های آلومینیومی زیرین پل بر روی این دو پین قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ نمای مختلف از این تکیه‌گاه را نشان می‌دهد.

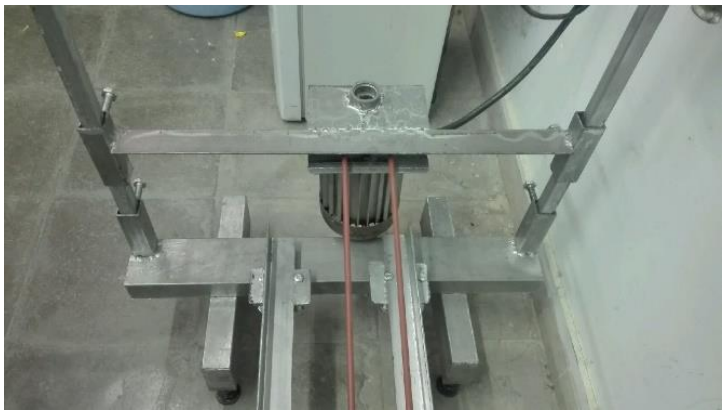
به منظور به‌حرکت‌درآوردن وسیله‌نقلیه، یک موتور سه فاز وظیفه ایجاد کشش در تسمه لاستیکی را به عهده دارد. این موتور سه فاز بر روی اولین پایه با استفاده از یک نگهدارنده جایگذاری شده است که شکل ۱۱ نمایی از آن را نشان می‌دهد. یک پولی هرزگرد نیز در آخرین پایه، وظیفه نگهداری طرف دیگر تسمه لاستیکی را به عهده دارد.

شکل ۱۲ نیز نمایی از آخرین پایه نگهدارنده را نشان می‌دهد که یک مکانیزم ساده نیز برای سفت‌کن‌کردن تسمه لاستیکی در این شکل به تصویر درآمده است.

همانطور که پیش‌تر بیان شد، در مجموعه مورد آزمایش، از یک بخش به عنوان شتاب‌دهنده برای وسیله‌نقلیه استفاده می‌شود. این بخش توسط دو نبشی فولادی قبل از ورود وسیله‌نقلیه بر روی پل طوری جانمایی شده است که فاصله بین دو نبشی به اندازه فاصله بین دو چرخ از یک محور وسیله‌نقلیه می‌باشد. به همین صورت برای توقف وسیله‌نقلیه نیز، بخشی در مجموعه مورد آزمایش برای توقف مورد نیاز است که این بخش بعد از صفحه آلومینیومی قرار داده شده است. شکل ۱۳ تصویری از کل مجموعه مورد آزمایش را نشان می‌دهد که دو بخش مذکور نیز در این شکل مشاهده می‌شود. وسیله‌نقلیه در این

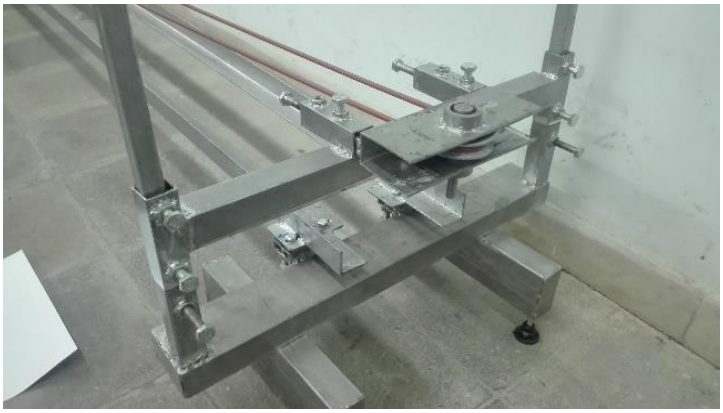
شکل ۱۰.نمای مختلف از تکیه‌گاه غلطکی

Fig. 10. Different views of the roller supportt



شکل ۱۱. اولین پایه به همراه موتور سه فاز و نگهدارنده موتور

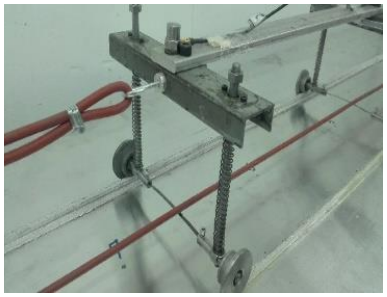
Fig. 11. The first support and the 3-phase motor casing



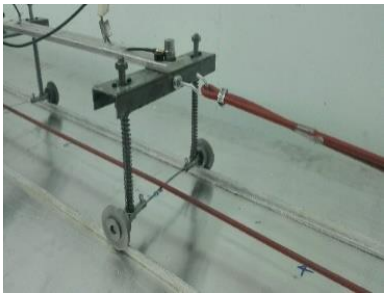
شکل ۱۲. آخرین پایه به همراه نگهدارنده و تسمه سفت‌کن

Fig. 12. The last support and the cable tightener

(a)
(الف)



(b)
(ب)



(c)
(ج)

شکل ۱۴. (الف) نمایی از وسیله‌نقلیه (ب) نمای محور عقب و (ج) نمای محور جلو وسیله‌نقلیه به همراه شتاب‌سنج، سیم شتاب‌سنج و تسمه لاستیکی

Fig. 14. (a) The vehicle picture (b) The view of the rear axle (c) The view of the front axle accompanied by the accelerometer, wire and rubber cable

شکل ۱۳. نمای کلی از مجموعه مورد آزمایش که دو بخش مربوط به کاهنده شتاب و افزاینده شتاب به ترتیب در ابتدا و انتهای تصویر مشخص می‌باشد

Fig. 13. The setup overview picture; the acceleration and deceleration ramp in front and back of the picture, respectively

آزمایش ازقطعاتی تشکیل شده است که اهم آن عبارتند از: چهار فنر، چهار عدد میله نگهدارنده فنر، چهار عدد بوش ساچمه‌ای فلنج‌دار و چهار عدد چرخ فولادی، دو عدد نبشی و یک تیغه آلومینیومی تشکیل شده است. بوش ساچمه‌ای فلنج‌دار به‌منظور به‌حداقل‌رساندن اصطکاک در سیستم ارتعاشی وسیله‌نقلیه مورد استفاده قرار گرفته شده است. این چهار عدد بوش طوری در بالای چهار فنر تعبیه شده‌اند که چهار میله نگهدارنده فنر می‌توانند به طور کاملاً روان از درون آن‌ها حرکت داشته باشند.

نمایی از وسیله‌نقلیه در قسمت (الف) از شکل ۱۴ به تصویر کشیده شده است. دو سیم برای دو شتاب‌سنج نیز کاملاً در این تصویر مشهود است. دو عدد سیم شتاب‌سنج طوری بر روی تیغه آلومینیومی چسبانده شده است که در حرکت ارتعاشی وسیله‌نقلیه اخلالی ایجاد ننماید. نمای محور جلو و عقب وسیله‌نقلیه به همراه شتاب‌سنج، سیم شتاب‌سنج و تسمه لاستیکی نیز به ترتیب در قسمت‌های (ب) و (ج) از شکل ۱۴ نشان داده شده است.

به منظور فراهم‌آوردن توان مورد نیاز برای حرکت وسیله‌نقلیه و نیز کنترل دقیق‌تر حرکت آن، از موتور سه فاز با حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است. یک پولی در انتهای روتور، تسمه لاستیکی را به حرکت وامی‌دارد که قسمت (الف) در شکل ۱۵ تصویری از آن را نشان می‌دهد. همچنین یک مبدل[1] جریان به منظور تغییر برق تک فاز شهری به برق سه فاز مورد نیاز موتور مورد استفاده قرار گرفته که نمایی از این مبدل در قسمت (ب) از شکل

1 Inverter

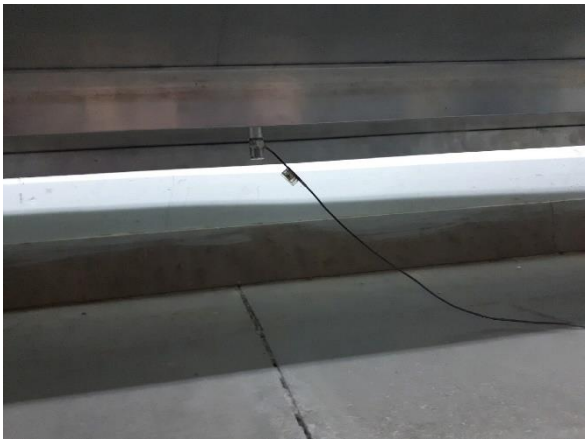
(a)
(الف)

(b)
(ب)

شکل ۱۵. (الف) جانمایی موتور سه فاز بر روی اولین پایه (ب) مبدل جریان

Fig. 15. (a) The 3-phase motor setup over the first support (b) the inverter

(a)
(الف)



(b)
(ب)

شکل ۱۶. (الف) چکش آزمایش مودال کلاسیک (ب) شتاب‌سنج نصب‌شده در زیر پل

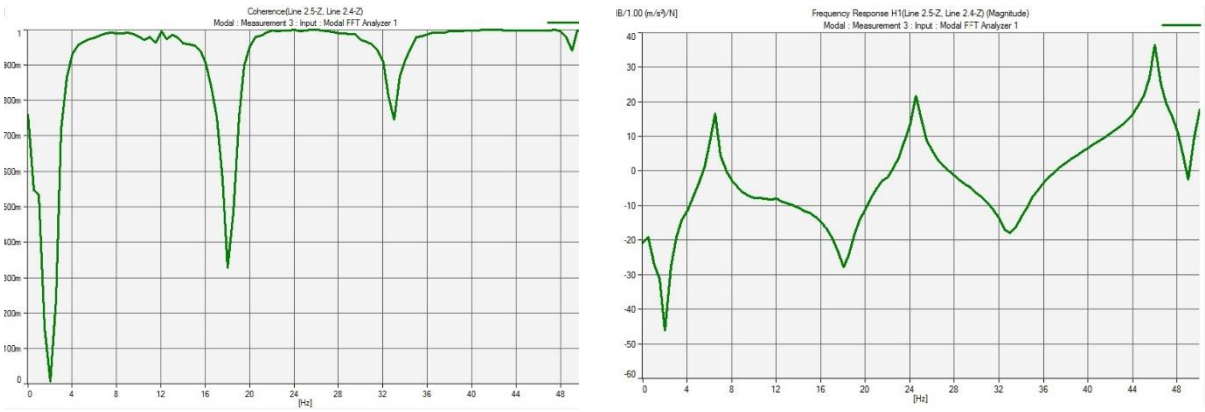
Fig. 16. (a) The hammer for the (b) the accelerometer sensor under the bridge

۱۵ به نمایش درآمده است. مبدل جریان مذکور با نام زیما[1] از مدل G100B008 با توان ۰/۷۵ وات می‌باشد. جریان نامی این مبدل مقدار ۲ آمپر و جریان ورودی آن مقدار ۳/۵ آمپر برآورد شده است. مدت زمان رسیدن دور موتور به مقدار مورد نیاز به گونه‌ای است که قبل از رسیدن وسیله‌نقلیه به پل فراهم می‌آید. بر روی مبدل، یک کلید به منظور تغییر دور موتور و تغییر سرعت حرکت وسیله‌نقلیه و نیز کلیدی دیگر به منظور ترمزگیری و توقف وسیله‌نقلیه قبل از برخورد به انتهای مسیر قرار داده شده است.

۴-۱- آزمایش مودال کلاسیک پل

در این تحقیق از آزمایش چکش به عنوان آزمایش مودال کلاسیک به منظور شناسایی فرکانس و شکل مود پل استفاده می‌شود. شکل مود بدست‌آمده از این بخش به عنوان شکل مود دقیق در حالت آزمایشگاهی محسوب می‌گردد. جهت انجام آزمایش مودال چکش (شکل ۱۶الف)، یک عدد شتاب سنج از نوع DJB/A/120V در خط وسط پل و در فاصله ۷۰ سانتی‌متری از تکیه‌گاه مفصلی قرار داده می‌شود (شکل ۱۶ ب). تحریک توسط چکش ارتعاشی BK/8202 انجام و داده تحریک با آمپلی‌فایر مدل 2647A تقویت شده است. تعداد ۹ نقطه روی پل طوری مشخص شده است که طول پل را به

1 Xima

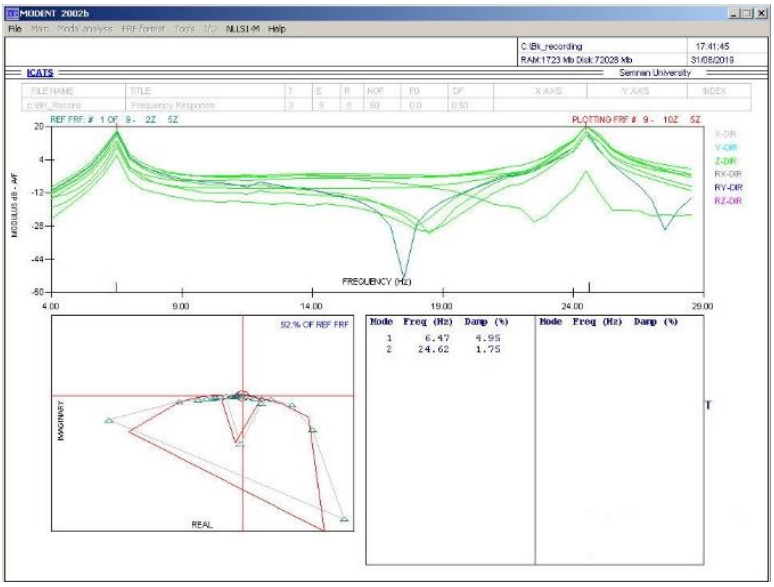


(b) **(a)**

(ب) (الف)

شکل ۱۷. (الف) نمودار تابع پاسخ فرکانسی و (ب) نمودار تابع ارتباط حاصل از آزمایش مودال چکش

Fig. 17. (a) Frequency response function (FRF) (b) the coherence from the hammer modal test



شکل ۱۸. تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مودال کلاسیک در نرم افزار ICATS

Fig. 18. (a) Result analysis of experimental modal in ICATS

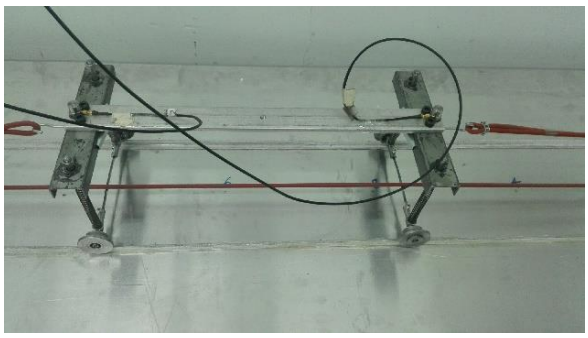
۱۰ قسمت مساوی تقسیم نماید. با انجام آزمایش مودال چکش، توابع پاسخ فرکانسی[1] و نمودارهای ارتباط[2] از نرم‌افزار پالس[3] حاصل آمده که در شکل ۱۷به تصویر کشیده شده است.

به منظور استخراج فرکانس های طبیعی و شکل مود پل، داده‌های آزمایش مودال چکش در نرم افزار مودنت[4] از مجموعه ایکتز[5] تحلیل شده است که فرکانس‌های طبیعی و شکل مود پل استخراج گردیده‌اند (شکل ۱۸ و جدول ۲).

در این تحقیق، فرکانس طبیعی وسیله‌نقلیه از آزمایش ارتعاشات آزاد بدست آمده است. از آنجاکه در واقعیت میرایی وسایل‌نقلیه به گونه‌ای است که دوره ارتعاش وسیله‌نقلیه کمتر از یک سیکل می‌باشد

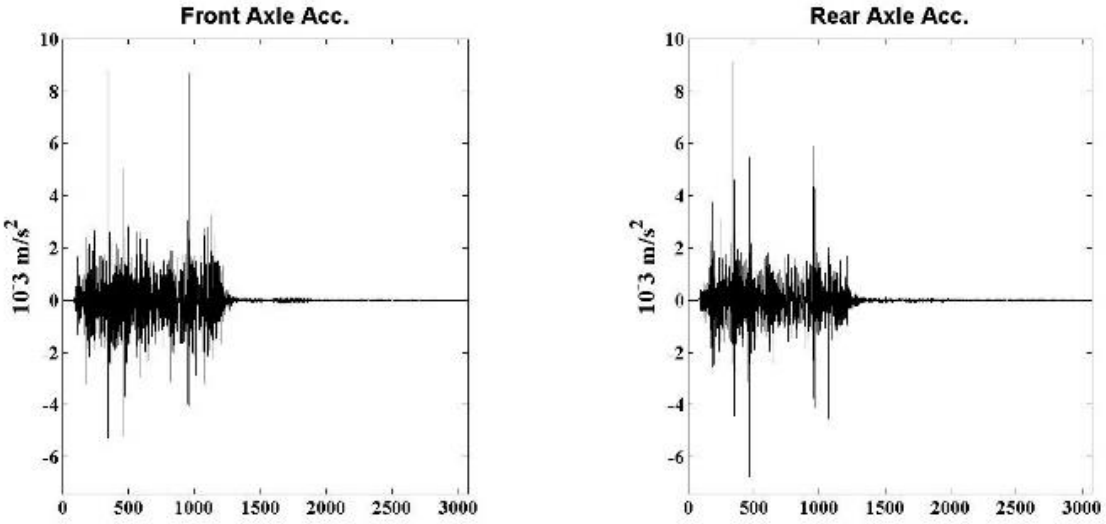
1 [3] Frequency Response Functions (FRF)
2 [4] Coherence
3 Pulse

4 Modent
5 ICATS



شکل ۱۹. وسیله‌نقلیه به همراه دو شتاب‌سنج در جلو و عقب آن

Fig. 19. (a) The vehicle with two accelerometers on the front and rear axles



(b)
(ب)

(a)
(الف)

شکل ۲۰. (الف) داده شتاب‌سنج عقب (ب) داده شتاب‌سنج جلو

Fig. 20. (a) The rear and (b) the front acceleration signals

لذا ارتعاشات آزاد برای استخراج فرکانس طبیعی از کارایی مناسبی برخوردار است. ارتعاشات آزاد وسیله‌نقلیه با اعمال جابجایی اولیه صورت می‌پذیرد و فرکانس طبیعی وسیله‌نقلیه با استفاده از نمودار حوزه فرکانسی، بدست می‌آید.

۴- ۲- شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل

به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل، داده‌های ثبت شده از دو عدد شتاب‌سنجی که بر روی وسیله‌نقلیه قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۹). داده‌های شتاب ثبت‌شده از دو شتاب‌سنج نوع DJB/A/120V به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود تا بتواند برای تخمین شکل مود پل مورد استفاده قرار گیرد.

مقادیر هر یک از پارامترهای ارتعاشی وسیله‌نقلیه با توجه به کمیت‌های مذکور قابل محاسبه می‌باشند که این مقادیر در جدول ۵ مشاهده می‌گردد.

داده‌های شتاب ثبت‌شده از دو شتاب‌سنج در شکل ۲۰ ترسیم شده است. لحظه ورود محورهای جلو و عقب وسیله‌نقلیه به پل به صورت افزایش مقدار شتاب در هر یک از این شکل‌ها مشهود است. با توجه به اینکه مقدار زمان داده‌برداری بیشتر از مدت زمان مورد نیاز

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش مودال چکش

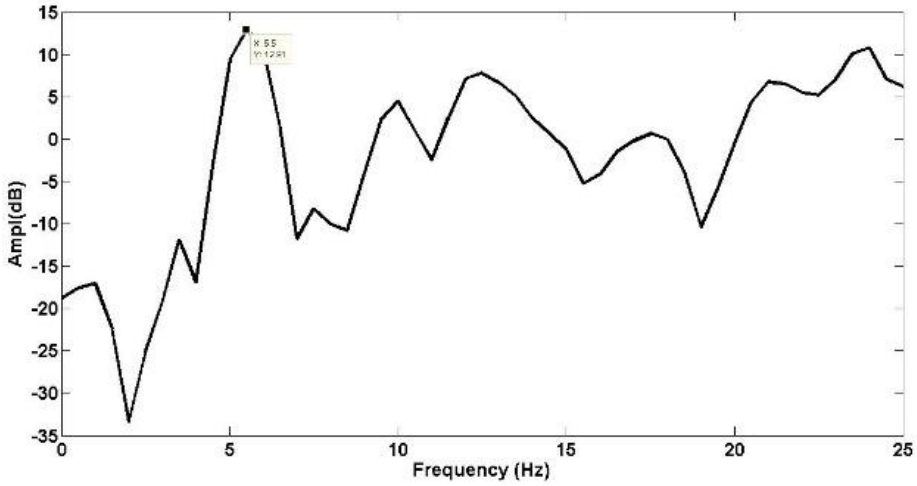
Table 4. The result of the experimental modal test

مشخصات	مقدار
فرکانس طبیعی مود اول (Hz)	۶/۴۷
فرکانس طبیعی مود دوم (Hz)	۲۴/۶۲

جدول ۵. پارامترهای ارتعاشی وسیله‌نقلیه مورد آزمایش

Table 5. The properties of the test vehicle

مشخصات	مقدار
فاصله دو محور وسیله‌نقلیه (m)	۰/۵
جرم وسیله‌نقلیه (kg)	۱/۳۹
سفتی فنر وسیله‌نقلیه (N/m)	۲۰۱۶
سرعت وسیله‌نقلیه (m/s)	۰/۲۹



شکل ۲۱. تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری برای مرحله اول

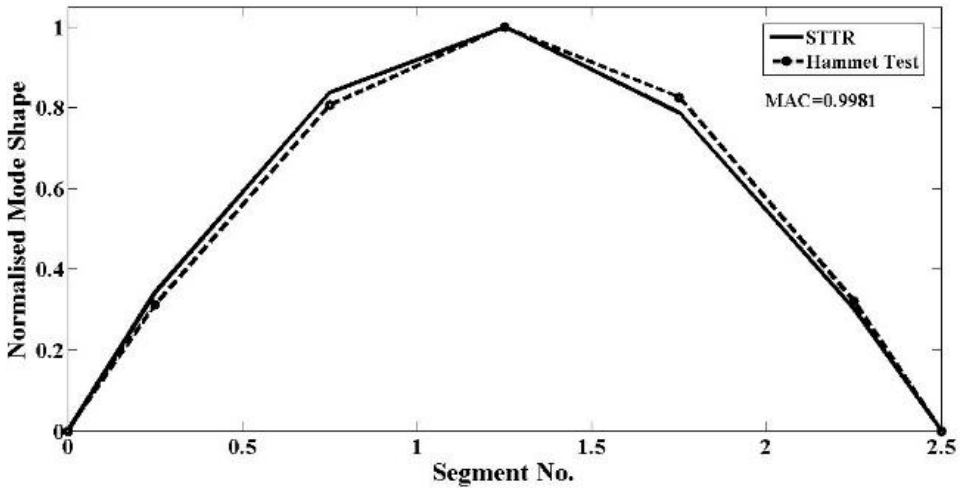
Fig. 21. The SVD of the power spectrum density transmissibility for the first stage

برای طی مسافت پل می‌باشد، باید لحظه ورود و خروج وسیله‌نقلیه به پل تعیین گردد. این امر با ثبت زمان ورود و خروج وسیله‌نقلیه و انجام مقداری محاسبات ساده ریاضی امکان‌پذیر خواهد بود. در روش حاضر [۱۳]، مدت زمان مورد نیاز برای استخراج پارامترهای ارتعاشی پل به صورت فاصله زمانی از لحظه ورود محور عقب به پل تا لحظه خروج محور جلو از پل درنظر گرفته شده است. لذا با انتخاب طول داده‌های شتاب متناسب با این مدت زمان می‌توان ادامه مراحل شناسایی پارامترها را انجام داد.

پس از به‌دست‌آوردن بازه‌های مورد نیاز از داده‌های شتاب، هر یک با نسبت ۵ تقسیم می‌شوند. سپس فرکانس طبیعی با تجزیه مقادیر تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری به صورت قله غالب در نمودار مربوطه قابل رویت خواهد بود. برای نمونه، نمودار تجزیه مقادیر تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری از مرحله اول درشکل ۲۱ به تصویر کشیده شده که فرکانس ۵/۵ هرتز به طور واضح قابل رویت است. اختلاف فرکانس حاصل از روش غیرمستقیم با روش مستقیم (تست مودال کلاسیک چکش) به علت حضور وسیله‌نقلیه روی پل و نیز حرکت وسیله‌نقلیه می‌باشد. حضور وسیله‌نقلیه روی پل باعث افزایش جرم شده و به تبع ان فرکانس طبیعی را کاهش می‌دهد. حرکت شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی وسیله‌نقلیه نیز موجب ایجاد نوعی پدیده مشابه داپلر[1] می‌گردد که باعث ثبت مقادیر کوچکتر یا بزرگتر از فرکانس طبیعی می‌شود [۱۹].

بردارهای تکین متناظر با هر کدام از مقادیر تکین به عنوان شکل مود موضعی نقاط مختلف محسوب می گردد که پس از اعمال

1 Doppler Effect



شکل ۲۲. مقایسه اولین شکل مود پل از روش غیرمستقیم با روش کلاسیک

Fig. 22. The comparison between the first bridge mode shape from indirect and classical method

مقیاس‌گذاری می‌توان به شکل مود کلی پل دست یافت. اولین شکل مود بدست‌آمده از روش غیرمستقیم (خطوط پیوسته) و روش مستقیم آزمایش مودال چکش (نقطه خط چین) در شکل ۲۲ به نمایش درآمده است. مقدار ۰/۹۹۸۱ برای معیار مک[1] میان این دو شکل مود دلالت بر دقت قابل قبول روش غیرمستقیم پیشنهادی در شناسایی شکل مود پل دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از اندازه‌گیری انتقال‌پذیری به صورت تئوری و آزمایشگاهی ارائه شده است. یکی از مزیت‌های این روش را می‌توان عدم وابستگی به خصوصیات نیروی تحریک دانست در حالی که در سایر روش‌ها فرض شده که نیروی تحریک باید به صورت نویز سفید باشد. همچنین، در این روش، نیاز به وسیله‌نقلیه مرجع نبوده و از آنجاکه داده‌برداری توسط شتاب‌سنج‌های تعبیه‌شده بر محور وسیله‌نقلیه انجام می‌گیرد، وسیله‌نقلیه بدون توقف از روی پل عبور می‌کند. این مورد می‌تواند در شرایط میدانی باعث سهولت، صرفه‌جویی در هزینه و زمان گردد و نیاز به حضور افراد متخصص در محل را مرتفع نماید.

به دلیل متحرک‌بودن شتاب‌سنج، شکل مودهای حاصل از روش زمان کوتاه، به عنوان شکل مود موضعی محسوب می‌گردند لذا از میزان‌سازی مجدد به منظور استخراج شکل مودهای کلی استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی، وسیله‌نقلیه به صورت چهار درجه آزادی و پل به صورت اویلر-برنولی درنظر گرفته شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های عددی حاکی از آن است که این روش قادر است، شکل مود پل را با دقت قابل قبولی شناسایی کند.

از آنجا که کارامدی هر روش نیازمند بررسی آن روش در شرایط واقعی است، پیاده‌سازی آزمایشگاهی این روش غیرمستقیم یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های تحقیق حاضر به حساب می‌آید. برای این منظور یک مجموعه به عنوان سازه آزمایشگاهی استفاده شده است. یک صفحه آلومینیومی به عنوان پل طوری طراحی و ساخته شده است که از یک سمت منتهی به تکیه‌گاه مفصلی بوده و از سمت دیگر بر روی تکیه‌گاه غلطکی قرار گرفته است.

یک وسیله‌نقلیه که از دو محور و چهار فنر تشکیل شده است با سرعت ثابت از روی صفحه آلومینیومی عبور کرده است. ثبت داده شتاب بر عهده دو شتاب‌سنج یکی بر روی محور جلو و دیگری بر روی محور عقب گذاشته شده است. با اعمال روش غیرمستقیم پیشنهادی که بر مبنای نسبت انتقال‌پذیری است، استخراج شکل مودهای پل از داده شتاب انجام پذیرفته است. مقایسه شکل مود حاصل از روش غیرمستقیم با شکل مود حاصل از آزمون مودال چکش حاکی از دقت قابل قبول روش غیرمستقیم است.

1 MAC

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_s	میرایی سیستم تعلیق وسیله نقلیه، N.m/s
$[C_v]$	ماتریس میرایی وسیله‌نقلیه، N.s/m
$[C_b]$	ماتریس کلی میرایی پل، N.s/m
$[C_T]$	ماتریس به‌هم وابسته میرایی پل و وسیله‌نقلیه، N.s/m
E	مدول الاستیک پل، N /m^2
$\{f_{\text{int}}\}$	بردار نیروی برهم‌کنش وسایل‌نقلیه و پل، N
$\{f_v\}$	بردار نیروی برهم‌کنش وسایل‌نقلیه، N
i	عدد موهومی $\sqrt{-1}$
I	ممان اینرسی سطح مقطع پل، m^4
$[K_b]$	ماتریس کلی سفتی پل، N/m
K_s	سفتی سیستم تعلیق وسیله‌نقلیه، N/m
K_T	سفتی چرخ وسیله‌نقلیه، N/m
$[K_T]$	ماتریس به‌هم وابسته سفتی پل و وسیله‌نقلیه، N/m
$[K_v]$	ماتریس سفتی وسیله‌نقلیه، N/m
L_v	فاصله بین دو محور وسیله‌نقلیه، m
L	طول پل، m
m_s	جرم بدنه وسیله‌نقلیه، kg
m_u	جرم محور وسیله‌نقلیه، kg
$[M_b]$	ماتریس کلی جرمی پل، N/m
$[M_T]$	ماتریس به‌هم وابسته جرمی پل و وسیله‌نقلیه، kg
$[M_v]$	ماتریس جرمی وسیله‌نقلیه، kg
$\bar{m}$	جرم واحد طول پل، kg/m
$[N_b]$	ماتریس (تابع شکل) بسط نیروی اعمالی بر گره‌های پل
$S_{x_o x_k}$	چگالی طیف توان خروجی‌های x_o و x_k، m^2/s^3
$T^k_{x_o x_j}$	چگالی طیف توان انتقال‌پذیری نسبت به مرجع k
$[U]$	بردار تکین چپ
$[V]$	بردار تکین راست
v	سرعت افقی وسیله‌نقلیه، m/s
x	محور افقی
y	محور افقی
y_b	جابجایی قائم پل در زیر چرخ وسیله‌نقلیه، m
$\{Y_b\}$	بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m
$\{\dot{Y}_b\}$	مشتق اول بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m/s
$\{\ddot{Y}_b\}$	مشتق دوم بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m/s^2
$\{Y_T\}$	بردار به‌هم وابسته جابجایی پل و وسیله‌نقلیه، m
$\{\dot{Y}_T\}$	مشتق اول بردار به‌هم وابسته جابجایی پل و وسیله‌نقلیه، m/s
$\{\ddot{Y}_T\}$	مشتق دوم بردار به‌هم وابسته جابجایی پل و وسیله‌نقلیه، m/s^2
$\{Y_v\}$	بردار جابجایی وسایل‌نقلیه، m
$\{\dot{Y}_v\}$	بردار سرعت وسایل‌نقلیه، m/s
$\{\ddot{Y}_v\}$	بردار شتاب وسایل‌نقلیه، m/s^2
$\ddot{y}_{i+1,1}$	شتاب اولین محور وقتی که از قسمت $(i+1)$ عبور می‌کند، m/s^2
$\ddot{y}_{i,2}$	شتاب دومین محور وقتی که از قسمت (i) عبور می‌کند، m/s^2
y_s	جابجایی قائم بدنه وسیله‌نقلیه، m
y_u	جابجایی قائم محور وسیله‌نقلیه، m

علائم یونانی

ζ	ضریب میرایی پل
θ_s	تغییر زاویه دورانی بدنه وسیله‌نقلیه، rad
$[\Lambda]$	ماتریس قطری مقادیر تکین
φ_1	شکل مود کلی اولین قسمت از پل
φ_2	شکل مود کلی دومین قسمت از پل
$\psi_{i+1,1}$	شکل مود موضعی قسمت $(i+1)$ حاصل از محور اول
$\psi_{i,2}$	شکل مود موضعی قسمت (i) حاصل از محور دوم
ψ_{kl}	درایه kام از شکل مود lام

زیرنویس

1	اولین محور
2	دومین محور
b	پل
s	بدنه وسیله‌نقلیه
T	برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل
u	محور وسیله‌نقلیه
v	وسیله‌نقلیه

بالانویس

*	مزدوج مختلط
k, z_i	مرجع محاسبه انتقال‌پذیری

منابع

[1] A. Pandey, M. Biswas, M. Samman, Damage detection from changes in curvature mode shapes, Journal of sound and vibration, 145(2) (1991) 321-332.

[2] X. Zhu, S. Law, Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history, International Journal of Solids and Structures, 43(7) (2006) 2299-2317.

[3] V. Arora, S. Singh, T. Kundra, Damped model updating using complex updating parameters, Journal of Sound and Vibration, 320(1) (2009) 438-451.

[4] Y. Zhang, L. Wang, Z. Xiang, Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration, 331(2) (2012) 291-307.

[5] Y. Yang, Y. Li, K. Chang, Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study, Smart Structures and Systems, 13(5) (2014) 797-819.

[6] Y. Oshima, K. Yamamoto, K. Sugiura, Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles, Smart Structures and Systems, 13(5) (2014) 731-753.

[7] A. Malekjafarian, E. OBrien, Identification of bridge mode shapes using Short Time Frequency Domain Decomposition of the responses measured in a passing vehicle, Engineering Structures, 81 (2014) 386-397.

[8] W.-Y. He, J. He, W.-X. Ren, Damage localization of beam structures using mode shape extracted from moving vehicle response, Measurement, 121 (2018) 276-285.

[9] W.Y. He, W.X. Ren, X.H. Zuo, Mass-normalized mode shape identification method for bridge structures using parking vehicle-induced frequency change, Structural Control and Health Monitoring, 25(6) (2018) e2174.

[10] A. Malekjafarian, E.J. OBrien, On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes, Journal of Sound and Vibration, 397 (2017) 77-91.

[11] Y. Yang, J.P. Yang, State-of-the-art review on modal identification and damage detection of bridges by moving test vehicles, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 18(02) (2018) 1850025.

[12] X. Kong, C. Cai, B. Kong, Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system, Journal of Engineering Mechanics, 141(1) (2014) 04014102.

[13] S.M. Marashi, M.H. Pashaei, M.M. Khatibi, Estimating the Mode Shapes of a Bridge Using Short Time Transmissibility Measurement from a Passing Vehicle, Journal of Applied and Computational Mechanics, 5(4) (2019) 735-748.

[14] J. Keenahan, E.J. OBrien, P.J. McGetrick, A. Gonzalez, The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping, Structural Health Monitoring, (2013) 1475921713513974.

[15] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, R.L. Taylor, R.L. Taylor, The finite element method: solid mechanics, Butterworth-heinemann, 2000.

[16] J.W. Tedesco, W.G. McDougal, C.A. Ross, Structural dynamics: theory and applications, Addison Wesley Longman, 1999.

[17] I.G. Araújo, J.E. Laier, Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices, Mechanical Systems and Signal Processing, 46(1) (2014) 129-145.

[18] J. Keenahan, P. McGetrick, E.J. O'Brien, A. Gonzalez, Using instrumented vehicles to detect damage in bridges, in: 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22-27 July 2012, Paper No. 2934, Faculty of Engineering, University of Porto, 2012.

[19] Y. Yang, K. Chang, Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: Parametric study, Engineering Structures, 31(10) (2009) 2448-2459.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Marashia, M. H. Pashaei a , M. M. Khatibib, M. Abdollahi, Experimental verification of indirect bridge mode shape identification using transmissibility of a passing vehicle, Amirkabir J. Mech Eng., 53(6) (2021) 3529-3548.

DOI: 10.22060/mej.2021.18630.6866

This page intentionally left blank