



Subspace based identification of structural parameters of the base isolation level

K. Karami* , P. Fatehi , A. Hosseini

Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ABSTRACT: One of the common methods in controlling the seismic response of structures is the use of seismic isolators. Base isolations reduce the base shear as well as the relative displacement of the floors by increasing the period of the structure. Typically, extreme deformation of the base isolation level occurs due to severe environmental factors, which can lead to damage to the base isolations; As a result, there is a possibility of permanent deformation in the base isolation and also the collision of the structure with adjacent buildings. Therefore, to prevent damage to buildings equipped with base isolations due to severe ground motions, it is important to identify damage at the base isolations. In this study, assuming the linear behavior of the main structure, a proposed subspace-based method for identifying the stiffness of the base isolation with a limited number of sensors is presented. For this purpose, using the compression technique, the structure equipped with a separator with a large number of degrees of freedom (DOFs) is transformed into a two DOF structure; So that the stiffness associated with the first DOF in the reduced system corresponds to the stiffness of the Base isolation level in the original structure. Then, using the identified Markov parameters of the system, the reduced structural stiffness is identified. Numerical examples are used to evaluate and compare the performance of the proposed method. The results show that even in the presence of noises in the measured responses, the proposed method detects the amount of damage at the base isolation level with acceptable accuracy.

Review History:

Received: Jul. 27, 2020

Revised: Aug. 31, 2020

Accepted: Aug. 31, 2020

Available Online: Sep. 24, 2020

Keywords:

Base isolation

Damage identification

Subspace technique

Passive control

Structural health monitoring

1- Introduction

One of the acceptable strategies to ensure the promotion of safety and long-term performance of the structure is the use of control equipment to reduce the dynamic response of the structure under the impact of severe earthquakes [1-4]. A new approach to seismic design is moving towards reducing demand as an alternative to increasing capacity, and one way to achieve this is to use flexible devices at foundation levels to prevent the transfer of seismic energy to the structure [5]. By increasing the period of the structure, the base isolation reduces both the base shear and the relative displacement of the floors [6]. Large deformations caused by severe environmental factors such as earthquakes and winds at the base isolation level can lead to damage to them. Damage to the base isolation will significantly increase the rigid displacement of the structure; as a result, there is a possibility of residual deformation in the base isolation level as well as the collision of the structure with adjacent buildings [7]. Therefore, early detection of structural damage before it causes irreparable damage is essential. In this article, we try to identify a small part of the structure that includes the level of the base isolation. For this purpose, it is only necessary to measure and record dynamic responses in a limited number of

related DOFs. This reduces the amount of measurement data and equipment required and, consequently, the time required for system identification calculations. As a result, it will save a lot of cost and time. Numerous damage identification methods have been [8]. Damage detection methods in large structures will always have several problems with increasing the number of DOFs and uncertain parameters [9-11]. One of the methods to overcome this problem is the substructure method [12]. In this research, a new substructure-based method for identifying the stiffness of the base isolation level in a structure equipped with base isolation with a limited number of sensors is presented. In the proposed method, a structure with several DOFs equipped with base isolation is transformed into a two-DOFs structure using the compression technique. The stiffness corresponding to the first DOF in the reduced mathematical model of the structure is equal to the stiffness of the base isolation level in the original structure. Here, the damage detection algorithm based on the identified system Markov parameters (DDA/ISMP) [8] is used to identify the structural parameters of the reduced model

*Corresponding author's email: ka.karami@uok.ac.ir



2- Compression of the structure equipped with a base isolation

Figure 1 shows a floor building equipped with a base isolation. x_i where $i = b, 1, 2, 3, \dots, n$ represents the displacement of the i -th story relative to the base isolation level. m_i , c_i and k_i are the mechanical properties of the i -th story of the structure, indicating the mass, damping and stiffness, respectively. In order to identify the system, it is assumed that excitations f_b , f_n are applied to the structure by two actuators installed in the base isolation level and the roof floor, respectively. Also, the dynamic response of the structure under the effect of input excitation is measured only in two DOFs, including the level of the base isolation and the roof floor by sensors installed in these DOFs. Let's, define the following parameters:

$$\begin{aligned}
 \Delta &= [1 \quad \mathbf{O}] & \Omega &= [\mathbf{O}^T \quad \mathbf{I}] \\
 \varphi_s &= \Omega \tilde{\varphi}_1 & \mathbf{m} &= 6\varphi_s^T \mathbf{m}_s \mathbf{L} \\
 c_r &= \varphi_s^T \mathbf{c}_s \varphi_s & f_{r1} &= \Delta \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f} \\
 k_r &= \varphi_s^T \mathbf{k}_s \varphi_s & f_{r2} &= \varphi_s^T \Omega \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f} \\
 m_{r2} &= \varphi_s^T \mathbf{m}_s \varphi_s - \frac{m}{3} & m_{r1} &= m_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \mathbf{L} - \frac{m}{3}
 \end{aligned} \tag{1}$$

in which, $\mathbf{m}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{c}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ and $\mathbf{k}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ are the mechanical properties of the structure with fixed support. The location of the inputs in the primary structure is presented by $\mathbf{B}_u \in \mathbb{R}^{(n+1) \times r}$. The external force vector $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^r$ is used to simulate the environmental excitation in the primary structure. The parameter $\tilde{\varphi}_1 \in \mathbb{R}^{(n+1)}$ is the first identified mode shape of the primary structure. The matrices $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ and $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^n$ are the unit matrix, zero matrix and unit vector. The parameter $\Gamma \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ indicates the interaction matrix. The motion equation of the compacted structure is obtained as follows:

$$\mathbf{m}_0 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{c}_0 \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_0 \mathbf{x} = \mathbf{f}_r \tag{2}$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_b \\ x_n \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{m}_0 = \begin{bmatrix} \frac{m}{3} + m_{r1} & \frac{m}{6} \\ \frac{m}{6} & \frac{m}{3} + m_{r2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{c}_0 = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_0 = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_r = \begin{Bmatrix} f_{r1} \\ f_{r2} \end{Bmatrix}$$

In fact, Equation 2 represents the equation of motion of a reduced two DOFs system in which the vector $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$ is the displacement of the system, respectively. Also, $\mathbf{m}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $\mathbf{c}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ and $\mathbf{k}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ are mass, damping and stiffness of the two DOFs system, respectively. Finally, the mechanical properties of the reduced structure is estimated using the DDA/ISMP method.

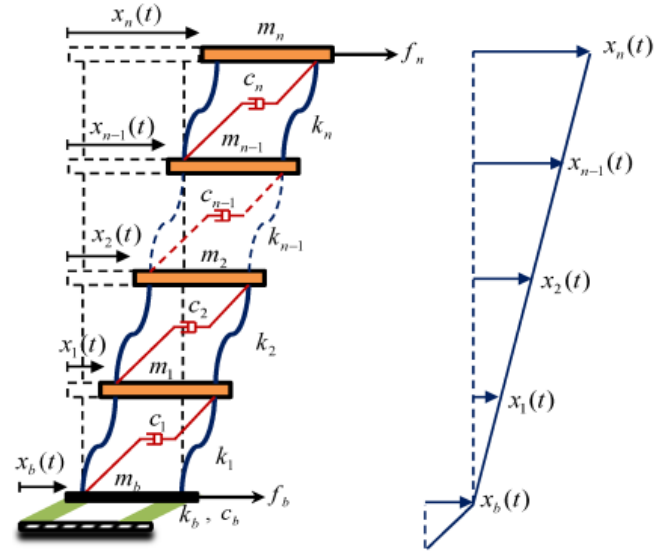


Fig. 1. Shear model of n degree freedom structure equipped with base isolation.

3- Numerical example

In this paper, in order to evaluate the performance of the proposed method in identifying the occurred damage in the isolation layer, two structures of five [13] and eight [14] stories equipped with base isolation is applied. In order to evaluate the accuracy of the proposed method, the amount of error in identifying base isolation stiffness in three noise intensities of 0%, 3% and 5% has been estimated. The error value in the identification of the eight-story structure is 0.81%, 2.28% and 4.44% and for the five-story structure is equal to 1.02%, 4.23% and 7.74%. Also, the correlation between the responses of the primary and reduced systems in the two structures of eight and five stories is 83.82% and 97.73%, respectively. The results show that the percentage of error in the absence of noise is less than 2% and the identification precision error decreases under the high noise intensity level; however, the error rate is less than 10%.

4- Conclusions

In this paper, a substructure identification method is proposed to identify the stiffness of the isolation level in structures equipped with the base isolation. The results showed that the proposed method, using a smaller number of sensors, detects the amount of stiffness in the level of the base isolation with appropriate accuracy even in the presence of high noise intensity. Moreover, due to the reduction in the number of data, the time required to identify the structure in the compressed case is approximately half of the original structure; this shows the efficiency and effectiveness of the proposed method in terms of cost and time.

References

[1] F. Amini, K. Karami, Capacity design by developed pole placement structural control, Structural Engineering and

- Mechanics, 39(1) (2011) 147-168.
- [2] K. Karami, F. Amini, Decreasing the damage in smart structures using integrated online DDA/ISMP and semi-active control, Smart Materials and Structures, 21(10) (2012) 105017.
- [3] K. Karami, S. Nagarajaiah, F. Amini, Developing a smart structure using integrated DDA/ISMP and semi-active variable stiffness device, SMART STRUCTURES AND SYSTEMS, 18(5) (2016) 955-982.
- [4] K. Karami, S. Manie, K. Ghafouri, S. Nagarajaiah, Nonlinear structural control using integrated DDA/ISMP and semi-active tuned mass damper, Engineering Structures, 181 (2019) 589-604.
- [5] F. Zhou, P. Tan, Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 17(1) (2018) 19-27.
- [6] M.G. Soto, H. Adeli, Vibration control of smart base-isolated irregular buildings using neural dynamic optimization model and replicator dynamics, Engineering Structures, 156 (2018) 322-336.
- [7] E.A. Mavronicola, P.C. Polycarpou, P. Komodromos, Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(7) (2017) 1161-1179.
- [8] F. Amini, K. Karami, Damage detection algorithm based on identified system Markov parameters (DDA/ISMP) in building structures with limited sensors, Smart Materials and Structures, 21(5) (2012) 055010.
- [9] K. Karami, S. Akbarabadi, Developing a smart structure using integrated subspace-based damage detection and semi-active control, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 31(11) (2016) 887-903.
- [10] S. Manie, K. Karami, P. Fatehi, Real time system identification in smart structures using wavelet transform based sparse component analysis, Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2019) -.
- [11] K. Karami, P. Fatehi, A. Yazdani, On-line system identification of structures using wavelet-Hilbert transform and sparse component analysis, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, (2020).
- [12] T.N. Trinh, C.G. Koh, An improved substructural identification strategy for large structural systems, Structural Control and Health Monitoring, 19(8) (2012) 686-700.
- [13] F. Amini, S.A. Mohajeri, M. Javanbakht, Semi-active control of isolated and damaged structures using online damage detection, Smart Materials and Structures, 24(10) (2015) 105002.
- [14] S. Narasimhan, S. Nagarajaiah, E.A. Johnson, H.P. Gavin, Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 13(2-3) (2006) 573-588.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

K. Karami , P. Fatehi , A. Hosseini , Subspace based identification of structural parameters of the base isolation level, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 1139-1142.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18784.6961





شناسایی پارامترهای سازه‌ای تراز جداساز پایه بر اساس روش زیرفضا

کاوه کریمی^{*}، پژمان فاتحی، اسرا حسینی

دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:

جداساز لرزه‌ای
شناسایی آسیب
روش زیر فضا
کنترل غیرفعال
نظارت سلامت سازه‌ای

خلاصه: یکی از روش‌های متداول در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها استفاده از جداساز لرزه‌ای می‌باشد. جداسازها با افزایش زمان تناوب سازه، برش پایه و همچنین جابه‌جایی نسبی طبقات را کاهش می‌دهند. به طور معمول، در اثر عوامل محیطی شدید مانند زلزله و باد تغییر شکل زیادی در تراز جداساز اتفاق می‌افتد که این امر می‌تواند منجر به وقوع آسیب در جداسازها شود؛ که در اثر آن احتمال ایجاد جابه‌جایی ماندگار در تراز جداساز و همچنین برخورد سازه با ساختمان‌های مجاور وجود دارد. از این رو برای جلوگیری از وقوع خسارت در ساختمان‌های مجهز به جداساز تحت اثر تحریکات شدید زمین، شناسایی آسیب در تراز جداساز از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، با فرض رفتار خطی سازه اصلی یک روش پیشنهادی بر مبنای زیرفضا برای شناسایی سختی تراز جداساز با تعداد حسگرهای محدود ارائه می‌گردد. برای این منظور با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی، سازه مجهز به جداساز با تعداد درجات آزادی زیاد به یک سازه دو درجه آزاد تبدیل می‌گردد؛ به طوری که سختی مرتبط با اولین درجه آزادی در سیستم کاهش یافته متناظر با سختی تراز جداساز در سازه اولیه باشد. سپس با استفاده از پارامترهای مارکوف شناسایی شده سیستم، سختی سازه کاهش یافته شناسایی می‌گردد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد روش پیشنهادی از مثال‌های عددی استفاده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حتی با وجود اغتشاش در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده، روش پیشنهادی مقدار آسیب در تراز جداساز را با دقت قابل قبولی شناسایی می‌نماید.

۱- مقدمه

ایجاد شده در جداسازها باعث کاهش سختی تراز جداساز در سازه شده و در نتیجه جابه‌جایی صلب گونه سازه افزایش قابل توجهی می‌یابد؛ که در اثر آن احتمال ایجاد جابه‌جایی ماندگار در تراز جداساز و همچنین برخورد سازه با ساختمان‌های مجاور وجود دارد [۹ و ۱۰]. وجود آسیب می‌تواند عملکرد مطلوب سازه را تحت تأثیر قرار دهد و باعث کاهش عمر مفید آن یا حتی فروریزش در سازه شود؛ بنابراین تشخیص به موقع آسیب‌های سازه‌ای پیش از آن که موجب خسارات جبران‌ناپذیر گردد، امری ضروری است. از این رو برای جلوگیری از وقوع خسارت‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در ساختمان‌های مجهز به جداساز تحت اثر تحریکات شدید زمین، شناسایی آسیب (کاهش سختی) در تراز جداساز از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در سیستم‌های سازه‌ای در ادبیات مهندسی وجود دارد که اغلب آن‌ها نیاز به اندازه‌گیری پاسخ در درجات آزادی متعددی در سازه می‌باشد. از آنجایی که تغییر شکل نسبی در سازه‌های مجهز به جداساز پایه کم است احتمال خرابی در سختی طبقات پایین است. از این رو در این مقاله سعی می‌شود که بخش کوچکی از سازه که شامل تراز جداگر پایه است

یکی از استراتژی‌های قابل قبول جهت تضمین ارتقای ایمنی و عملکرد طولانی مدت سازه، استفاده از تجهیزات کنترلی جهت کاهش پاسخ دینامیکی سازه تحت اثر زلزله‌های شدید می‌باشد [۴-۱]. رویکرد جدید طراحی لرزه‌ای به سمت کاهش تقاضا به عنوان جایگزین افزایش ظرفیت سوق می‌یابد و یکی از روش‌های تحقق این امر استفاده از دستگاه‌های انعطاف‌پذیر در ترازهای شالوده برای جلوگیری از انتقال انرژی زلزله به سازه می‌باشد. جداسازهای پایه یکی از این دستگاه‌ها می‌باشد که به طور گسترده برای سازه‌های مهم مانند بیمارستان‌ها، مدارس و نیروگاه‌ها برای جلوگیری از وقوع خرابی و حفظ کارایی آن‌ها بعد از زلزله استفاده می‌شود [۷-۵]. جداسازها با افزایش زمان تناوب سازه، موجب کاهش هم‌زمان برش پایه و جابه‌جایی نسبی طبقات می‌گردد [۸]. به طور معمول، در اثر عوامل محیطی شدید مانند زلزله و باد تغییر شکل زیادی در تراز جداساز اتفاق می‌افتد که این امر می‌تواند منجر به وقوع آسیب در جداسازها شود. آسیب

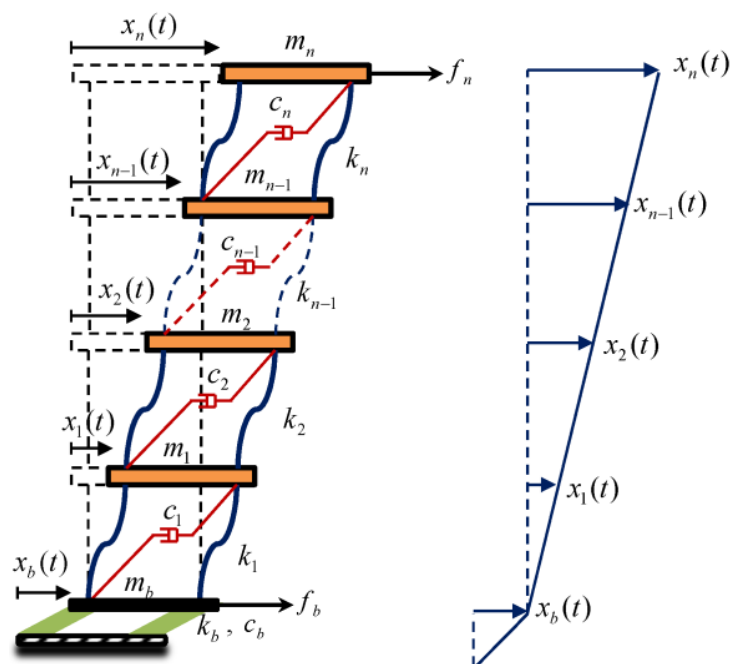
^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ka.karami@uok.ac.ir



با درجه‌های آزادی زیاد به سازه با درجه‌های آزادی کم تبدیل می‌شود. سپس پاسخ‌های سازه و درجات آزادی مهم (یا درجات آزادی فشرده) اندازه‌گیری شده و بر اساس آن، ماتریس سختی زیرسیستم‌ها (یا سازه فشرده) شناسایی می‌شود. با استفاده از یک تابع تبدیل، ماتریس سختی کل سیستم از ماتریس سختی زیرسیستم‌ها (یا سازه فشرده) به دست می‌آید. با مقایسه ماتریس سختی سازه آسیب دیده با ماتریس سختی سازه سالم آسیب‌های سازه‌ای تعیین می‌گردند. روش‌های زیرسازه‌ای با هدف سریع‌تر شدن فرآیند شناسایی سیستم و شناسایی آسیب، همگرایی بهتر نتایج و بهتر شدن دقت شناسایی سیستم و شناسایی آسیب به ویژه برای سازه‌هایی با مقیاس بزرگ شکل گرفته است. از معایب این روش آن است که نحوه انتخاب زیرسازه تأثیر زیادی بر روی دقت شناسایی دارد. همچنین رابطه شناسایی آسیب در هر بخش با فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی همان بخش از سازه رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین تعداد حسگرها و محرک‌ها نیز بر روی دقت شناسایی پارامترهای مودال هر زیرسازه اثر زیادی خواهد داشت. کو و همکاران برای اولین بار از روش زیرفضا برای شناسایی سختی و ضریب میرایی سازه‌ها استفاده کردند. آن‌ها روش زیرفضا را با و بدون هم‌پوشانی اعضا ارائه دادند و با تقسیم سازه به زیرسازه‌های کوچک‌تر و با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته و الگوریتم تکرار محاسبات وزنی، اقدام به شناسایی پارامترهای سازه‌ای کردند [۲۰-۱۸]. روش‌های اصلاح مدل مختلف بر اساس روش زیرسازه‌ای در مدل‌های المان محدود ارائه شده است [۲۳-۲۱]. یوشیموتو و همکاران یک رویکرد تشخیص آسیب برای سازه‌های دارای جداساز پایه بر اساس روش زیرفضای چند ورودی-چند خروجی و آنالیز مودال پیچیده، ارائه دادند. برای سازه دارای جداساز پایه با فرض رفتار کسینوسی شکل مدی طبقات بالای جداساز، اقدام به شناسایی پارامترهای تراز جداساز کردند [۲۴]. یان و همکاران [۲۵] یک روش انتخاب پارامتریک زیرفضا با استفاده از بردار نیروی پسماند دینامیکی برای شناسایی مکان آسیب‌های چندگانه پیشنهاد کردند. فانگ و همکاران [۲۶] بر اساس روش انرژی و با استفاده از بردارهای ویژه اندازه‌گیری شده ناقص از زیرسازه‌های بحرانی، روشی را ارائه کردند که قابلیت شناسایی ماتریس جرم و سختی در سازه‌های شبکه‌ای را دارد. لی و دینگ [۲۷] به کمک روش زیرسازه‌های یک روش شناسایی آسیب بر اساس بازسازی پاسخهای دینامیکی و اصلاح مدل در حوزه فرکانسی پیشنهاد دادند. روش‌های زیرفضای تصادفی نیز به منظور بهبود عملکرد محاسباتی روش شناسایی پارامترهای سازه‌ای مورد استفاده قرار واقع شده است [۲۹ و ۲۸]. یان و همکاران [۳۰] یک روش شناسایی آسیب سازه‌ای

شناسایی شود. برای این منظور، تنها لازم است که پاسخ‌های دینامیکی در تعداد محدودی درجات آزادی مرتبط اندازه‌گیری و ثبت شود. این کار باعث کاهش حجم داده‌های اندازه‌گیری شده و تجهیزات مورد نیاز و بالتبع کاهش زمان مورد نیاز برای محاسبات شناسایی سیستم می‌شود. در نتیجه در بحث هزینه و زمان صرفه جویی مناسبی خواهد شد.

شناسایی سیستم روندی جهت ساخت یک مدل ریاضی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. روش‌های کشف آسیب متعددی بر اساس پاسخ دینامیکی اندازه‌گیری شده وجود دارند [۱۲ و ۱۱]. این روش‌ها را می‌توان بر اساس نوع پاسخ اندازه‌گیری شده، پارامتر بررسی شده برای تعیین آسیب و روش اتخاذ شده برای کمی‌سازی آسیب دسته‌بندی کرد. هر گونه تغییری در پارامترهای فیزیکی تغییر در پارامتر مودال را در پی خواهد داشت [۱۳]. روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌های بزرگ دارای مشکل‌هایی از قبیل (۱) تعداد درجات آزادی و پارامترهای نامشخص در شناسایی سیستم، این در حالی است که تعداد کمی اندازه‌گیری وجود دارد، یعنی محدودیت تعداد حسگرها برقرار می‌باشد؛ (۲) در شناسایی آسیب با بزرگ شدن مقیاس سازه و افزایش تعداد پارامترهای نامشخص مشکلات عددی در همگرایی محاسبات افزایش می‌یابد و (۳) در فرآیند شناسایی سیستم با بزرگ شدن مقیاس سازه عدم قطعیت در شرایط مرزی، پارامترهای فیزیکی و رفتار مصالح ظاهر می‌شود [۱۶-۱۴]. همچنین، در شناسایی سیستم با تعداد درجه آزادی زیاد، برای اندازه‌گیری پاسخ‌های دینامیکی به دلیل محدودیت در نصب حسگرها، نمی‌توان در هر درجه آزادی یک حسگر قرار داد. به علاوه بیشتر روش‌های شناسایی آسیب بر اساس اندازه‌گیری تغییرات در پارامترهای مودال شامل اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی می‌باشند. در نتیجه برای شناسایی پارامترهای مودال سیستم باید پاسخ‌های دینامیکی در تمام درجات آزادی اندازه‌گیری شود. در عمل به دلیل محدودیت در مسائل اجرایی نصب حسگر در تمام درجه‌های آزادی کاری دشوار و غیراقتصادی است. در پایش سلامت بر مبنای ارتعاش، تعداد زیادی داده اندازه‌گیری شده تولید می‌شود که به دلیل حجم زیاد داده‌ها به روشی برای متراکم کردن اطلاعات با تخمین یک مدل آزمایشگاهی از سازه که شامل داده یکسان با داده ارتعاش اصلی باشد، نیاز است [۱۶ و ۱۵]. یکی از روش‌های مطرح در این زمینه روش زیرفضا می‌باشد [۱۷]. در تکنیک زیرفضا به دلیل کاهش تعداد پارامترهای نامشخص و کم شدن تعداد درجات آزادی، کارایی و همگرایی محاسبات افزایش می‌یابد. در این روش یک سیستم سازه‌ای بزرگ و پیچیده به چندین سازه کوچک‌تر (زیرسازه) تقسیم می‌گردد؛ و یا با استفاده از تکنیک‌های فشرده‌سازی، سازه



شکل ۱. مدل برشی سازه n درجه آزاد مجهز به جداساز پایه

Fig. 1. Shear model of n DOFs structure equipped with base isolation

تبدیل می‌گردد. برای این منظور، با فرض رفتار خطی سازه اصلی تابع تغییر شکل ریلی برای سازه بالای تراز جداساز برابر با مود اول سازه در نظر گرفته می‌شود. سختی متناظر با اولین درجه آزادی در مدل ریاضی کاهش یافته سازه، برابر با سختی تراز جداساز در سازه اولیه است. در این تحقیق برای شناسایی پارامترهای سازه‌ای مدل کاهش یافته، از روش شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای مارکوف شناسایی شده سیستم (DDA/ISMP) [۱۱] استفاده می‌شود. در ادامه، عملکرد و کارایی روش پیشنهادی توسط مثال‌های عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- فشرده‌سازی سازه مجهز به جداساز پایه

شکل ۱ یک ساختمان n طبقه مجهز به جداساز پایه را نشان می‌دهد. در این مقاله از جداسازهای پایه از نوع الاستومریک با رفتار خطی استفاده می‌شود [۳۹]. x_i که در آن $i = 1, 2, 3, \dots, n$ نشان دهنده جابه‌جایی طبقه i ام نسبت به تراز جداساز پایه است. m_i ، c_i و k_i مشخصات مکانیکی مربوط به طبقه i ام از سازه می‌باشد که به ترتیب بیان‌گر جرم، میرایی و سختی طبقه است.

بر اساس شبکه عصبی و شیوه استنباط تصادفی ارائه دادند. هو و همکاران [۳۱] روش جداسازی زیرسازه‌ای پیوسته را برای کنترل آسیب‌های موضعی به کار بردند. زیرسازه جدا شده یک سازه مجازی مستقل است که با به کار بردن تکیه‌گاه‌های مجازی در درجات آزادی فصل مشترک و به صورت عددی از سازه اصلی ساخته می‌شود. روش‌های زیرسازه‌ای متعددی برای شناسایی سازه‌های برشی ارائه شده است؛ که در آن‌ها یک سازه برشی به تعداد زیادی زیرسازه ساده تقسیم می‌گردد. سپس یک روند شناسایی قیاسی برای تخمین پارامترهای سازه‌ای از بالا به پایین مشتق می‌شود [۳۲-۳۸]. کرمی و اکبرآبادی یک رویکرد تشخیص آسیب بر اساس روش زیرفضا برای شناسایی مقدار و موقعیت آسیب با استفاده از داده‌های خروجی ناقص که به وسیله تعداد محدودی حسگر اندازه‌گیری می‌شوند را ارائه دادند. این رویکرد برای سازه‌های بلند با تعداد زیاد درجات آزادی که با روش‌های معمول به آسانی قابل شناسایی نمی‌باشند، نیز کاربرد دارد و این مزیت باعث کاهش زمان و هزینه می‌گردد [۱۴].

در این پژوهش، یک روش جدید بر مبنای زیرفضا برای شناسایی سختی تراز جداساز، در یک سازه مجهز به جداساز، با تعداد حسگرهای محدود ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی یک سازه دارای چند درجه آزادی مجهز به جداساز پایه با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی به یک سازه دو درجه آزاد

1 Damage detection algorithm based on identified system Markov parameters (DDA/ISMP).

دهنده ماتریس واحد و بردار صفر است. همچنین $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^n$ برداری می‌باشد که تمام درایه‌های آن برابر با یک است. پارامتر $\tilde{\mathbf{A}} \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ ماتریس اندرکنش نیروهای خارجی است که Γ_{ij} برابر با i و j امین درایه آن به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\Gamma_{ij} = \begin{cases} 1 & j = i \\ -1 & j = i + 1, \quad i \geq 2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

در اینجا، فرض می‌شود که ماتریس شکل‌های مودی سازه مجهز به جداساز در دسترس است. این فرض دور از انتظار نیست چرا که روش‌های بسیاری در ادبیات کنترل، برای شناسایی اشکال مودی سازه وجود دارد. در این تحقیق با استفاده از روش پیشنهادی در مرجع [۱۶] اشکال مودی سازه مجهز به جداساز شناسایی می‌شود. از آنجایی که در سازه‌های مجهز به جداساز پایه، مود اول همواره حاکم است؛ از این رو پاسخ سازه بالای تراز جداساز پایه در مختصات تعمیم یافته را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{x}_s = \boldsymbol{\Phi}_s \mathbf{x}_n \quad (4)$$

که در آن

$$\boldsymbol{\Phi}_s = \boldsymbol{\Omega} \tilde{\boldsymbol{\Phi}}_1 \quad (5)$$

پارامتر $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}_1 \in \mathbb{R}^{(n+1)}$ بردار مود اول شناسایی شده سازه مجهز به جداساز پایه است. با جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۱) معادله حرکت در مختصات تعمیم یافته به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(m_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \mathbf{L}) \ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \boldsymbol{\Phi}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + c_b \dot{\mathbf{x}}_b + k_b \mathbf{x}_b = \Delta \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f} \quad (6)$$

$$\mathbf{m}_s \mathbf{L} \ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{m}_s \boldsymbol{\Phi}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{c}_s \dot{\mathbf{x}}_s + \mathbf{k}_s \mathbf{x}_s = \boldsymbol{\Omega} \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f}$$

با پیش ضرب دومین رابطه (۶) در $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}_s^T$ خواهیم داشت:

به منظور شناسایی سیستم فرض می‌شود تحریک‌های (ورودی‌های سیستم) f_n و f_b توسط دو محرک که به ترتیب در تراز جداساز و طبقه بام نصب شده‌اند به سازه اعمال می‌گردد. همچنین پاسخ دینامیکی سازه (خروجی‌های سیستم) تحت اثر تحریک‌های ورودی، تنها در دو درجه آزادی شامل تراز جداساز و طبقه بام توسط حسگرهای نصب شده در این درجه‌های آزادی اندازه‌گیری می‌شوند. معادله دینامیکی سازه با جداساز پایه، نشان داده شده در شکل ۱، به صورت زیر نوشته می‌شود:

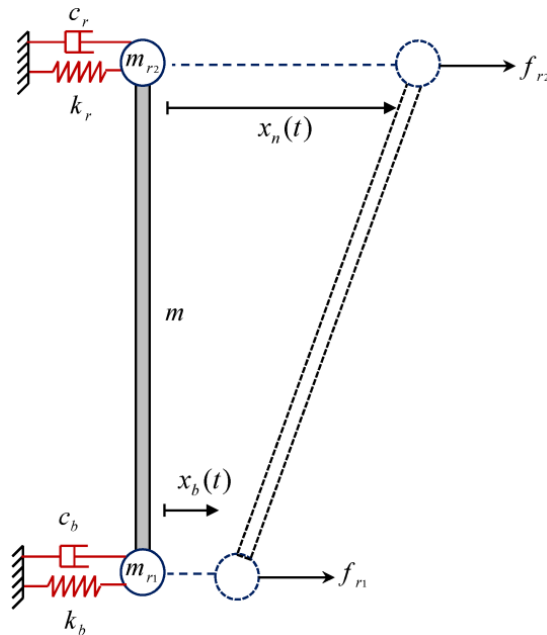
$$(m_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \mathbf{L}) \ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{x}}_s + c_b \dot{\mathbf{x}}_b + k_b \mathbf{x}_b = \Delta \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{m}_s \mathbf{L} \ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{x}}_s + \mathbf{c}_s \dot{\mathbf{x}}_s + \mathbf{k}_s \mathbf{x}_s = \boldsymbol{\Omega} \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f}$$

که در آن

$$\Delta = [1 \quad \mathbf{0}] \quad , \quad \boldsymbol{\Omega} = [\mathbf{O}^T \quad \mathbf{I}] \quad (2)$$

پارامترهای $\mathbf{m}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ، $\mathbf{c}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ و $\mathbf{k}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه اصلی (با فرض تکیه‌گاه گیردار) می‌باشند. مشخصات مکانیکی جداساز پایه شامل: جرم، میرایی و سختی به ترتیب توسط پارامترهای m_b ، c_b و k_b نشان داده شده است. پاسخ‌های دینامیکی طبقه‌های سازه نسبت به تراز جداساز توسط بردارهای $\mathbf{x}_s \in \mathbb{R}^n$ ، $\dot{\mathbf{x}}_s \in \mathbb{R}^n$ و $\ddot{\mathbf{x}}_s \in \mathbb{R}^n$ که به ترتیب برابر با جابه‌جایی، سرعت و شتاب است تعریف می‌شوند. همچنین پاسخ دینامیکی جداساز پایه نسبت به زمین شامل جابه‌جایی، سرعت و شتاب توسط x_b ، \dot{x}_b و \ddot{x}_b نشان داده می‌شود. ماتریس $\mathbf{B}_u \in \mathbb{R}^{(n+1) \times r}$ نشان دهنده موقعیت محل قرارگیری محرکها است. پارامتر r تعداد محرک‌های نصب شده در سازه است؛ که در اینجا از دو محرک برای اعمال نیروی خارجی در ترازهای بام و جداساز پایه استفاده می‌گردد. پارامتر $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^r$ بیان‌گر بردار نیروی خارجی است که در این تحقیق از سیگنال‌های گوسین سفید به عنوان ورودی سیستم استفاده می‌شود. استفاده از نویز سفید گوسی به عنوان ورودی سازه‌های چند درجه آزادی از روش‌های کارآمد جهت شبیه سازی تحریکات محیطی می‌باشد. همچنین استفاده از این ارتعاشات موجب تحریک مودهای بالای سازه شده که در این صورت می‌توان اثر این مودها را نیز بر روی نتایج مشاهده نمود [۴۰]. پارامترهای $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ و $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ به ترتیب نشان



شکل ۲. مدل کاهش یافته سازه n درجه آزاد مجهز به جداساز پایه به یک سازه دو درجه آزاد

Fig. 2. Reduced model of n -DOFs structure equipped with base isolation to a two-DOF structure.

که در آن

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_b \\ x_n \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{m}_0 = \begin{bmatrix} \frac{m}{3} + m_{r1} & \frac{m}{6} \\ \frac{m}{6} & \frac{m}{3} + m_{r2} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{c}_0 = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_0 = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_r = \begin{Bmatrix} f_{r1} \\ f_{r2} \end{Bmatrix}$$

در واقع رابطه (۹) نشان دهنده معادله حرکت یک سیستم کاهش یافته دو درجه آزاد است که در آن بردارهای $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$ ، $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^2$ و $\ddot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^2$ به ترتیب برابر با جابه‌جایی، سرعت و شتاب سیستم کاهش یافته است. همچنین $\mathbf{m}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ، $\mathbf{c}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ و $\mathbf{k}_0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی سیستم دو درجه آزاد میباشند. پارامتر $\mathbf{f}_r \in \mathbb{R}^2$ نشان دهنده بردار نیروی خارجی در سیستم کاهش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که رابطه (۸) معادله حرکت فرم فشرده شده ساختمان n طبقه مجهز به جداساز پایه را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، سازه n درجه آزاد مجهز به جداساز پایه به یک سازه دو درجه آزاد کاهش یافته است؛ که در شکل ۲ طرح شماتیک آن رسم شده است. جرم کل میله صلب رابط بین جرم‌های m_{r1} و m_{r2} برابر با m می‌باشد.

$$(m_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \mathbf{L}) \ddot{x}_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \boldsymbol{\varphi}_s \ddot{x}_n + c_b \dot{x}_b + k_b x_b = \Delta \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{m}_s \mathbf{L} \ddot{x}_b + \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{m}_s \boldsymbol{\varphi}_s \ddot{x}_n + \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{c}_s \boldsymbol{\varphi}_s \dot{x}_n + \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{k}_s \boldsymbol{\varphi}_s x_n = \boldsymbol{\varphi}_s^T \boldsymbol{\Omega} \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f}$$

با تعریف پارامترهای زیر:

$$c_r = \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{c}_s \boldsymbol{\varphi}_s$$

$$k_r = \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{k}_s \boldsymbol{\varphi}_s$$

$$m = 6 \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{m}_s \mathbf{L}$$

$$m_{r1} = m_b + \mathbf{L}^T \mathbf{m}_s \mathbf{L} - \frac{m}{3} \quad (8)$$

$$m_{r2} = \boldsymbol{\varphi}_s^T \mathbf{m}_s \boldsymbol{\varphi}_s - \frac{m}{3}$$

$$f_{r1} = \Delta \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f}$$

$$f_{r2} = \boldsymbol{\varphi}_s^T \boldsymbol{\Omega} \Gamma \mathbf{B}_u \mathbf{f}$$

فرم ماتریسی معادله‌های حرکت در رابطه (۷) به صورت زیر نوشته

می‌شود:

$$\mathbf{m}_0 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{c}_0 \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_0 \mathbf{x} = \mathbf{f}_r \quad (9)$$

۳- شناسایی سیستم

با فرض اندازه‌گیری جابه‌جایی به عنوان خروجی سیستم فرم معادله حرکت در رابطه (۹) در فضای حالت به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{B}\mathbf{f}_r \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{q} + \mathbf{D}\mathbf{f}_r \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{k}_0 & -\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{c}_0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{m}_0^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}], \quad \mathbf{D} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (12)$$

بردارهای $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^2$ و $\mathbf{q} = \{\mathbf{x} \quad \dot{\mathbf{x}}\}^T \in \mathbb{R}^4$ به ترتیب نشان دهنده بردارهای حالت و خروجی سیستم است. همچنین ماتریس‌های $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ، $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ ، $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{2 \times 4}$ و $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ نشان دهنده عملگرهای داخلی سیستم خطی پیوسته زمانی می‌باشد. ماتریس‌های $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ و $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ نیز به ترتیب ماتریس واحد و صفر را نشان می‌دهد. امینی و کرمی [۱۱] با در نظر گرفتن پاسخ جابه‌جایی به عنوان خروجی سیستم رابطه زیر را برای شناسایی ماتریس سختی رابطه (۱۲) پیشنهاد دادند:

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{Y}_2 \mathbf{k}_0 \mathbf{Y}_2 \quad (13)$$

که در آن

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{Y}_3 \mathbf{Y}_2^\dagger \mathbf{Y}_3 - \mathbf{Y}_4 \quad (14)$$

ماتریس $\mathbf{Y}_i \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ نشان دهنده i امین پارامتر مارکوف سیستم (پاسخ ضربه) نامیده می‌شود؛ که با به کارگیری الگوریتم شناسایی تحقق ویژه دارای فیلتر کالمن (ERA/OKID) [۴۱] به طور مستقیم با استفاده از داده‌های ورودی- خروجی اندازه‌گیری شده سیستم محاسبه می‌گردد. ارتباط \mathbf{Y}_i با ماتریس‌های سیستم به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_i &= \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \\ \mathbf{Y}_0 &= \mathbf{D} \quad (i = 0) \end{aligned} \quad (15)$$

برای تعیین ماتریس سختی، رابطه (۱۳) به صورتی بازنویسی می‌شود که ماتریس \mathbf{k}_0 به صورت یک بردار ستونی نامعین $\mathbf{k}_v \in \mathbb{R}^4$ ظاهر می‌گردد:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{k}_v = \mathbf{h}_k \quad (16)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k &= \mathbf{Y}_2 \otimes \mathbf{Y}_2^T \\ \mathbf{k}_v &= \{k_{11} \quad k_{12} \quad k_{21} \quad k_{22}\}^T \\ \mathbf{h}_k &= \{h_{11} \quad h_{12} \quad h_{21} \quad h_{22}\}^T \end{aligned} \quad (17)$$

المان k_{ij} در بردار \mathbf{k}_v ، متناظر با درایه (i, j) از ماتریس \mathbf{k}_0 است. همچنین درایه h_{ij} در بردار $\mathbf{h}_k \in \mathbb{R}^4$ متناظر با درایه (i, j) از ماتریس $\mathbf{U}_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ میباشد. همچنین $\mathbf{A}_k \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ماتریس ضرایب نام دارد. علامت \otimes عملگر ضرب کروئنگر^۲ را نشان می‌دهد. حل رابطه (۱۶) به کمک روش نرم مینیمم حداقل مربعات^۳ پاسخ یکتایی ندارد. برای لحاظ کردن خاصیت تقارن و صفر بودن بعضی درایه‌های ماتریس سختی، این ویژگی‌ها از ماتریس سختی را به عنوان شرط‌های اضافی در نظر گرفته می‌شود. با حذف درایه‌های صفر ماتریس سختی در بردار \mathbf{k}_v بردار $\bar{\mathbf{k}}_v \in \mathbb{R}^2$ به دست می‌آید. به علاوه، با حذف ستون‌هایی از ماتریس \mathbf{A}_k که متناظر با درایه‌های صفر ماتریس سختی می‌باشند ماتریس $\bar{\mathbf{A}}_k \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ ایجاد می‌شود. در نتیجه رابطه (۱۶) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\bar{\mathbf{A}}_k \bar{\mathbf{k}}_v = \mathbf{h}_k \quad (18)$$

با حل رابطه (۱۸) درایه‌های غیر صفر ماتریس سختی سازه فشرده شده به دست می‌آید:

2 Kronecker product

3 minimum norm least-squares method

1 Eigensystem realization algorithm with the observer/ Kalman filter identification

اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. سپس، با استفاده از روش ERA/OKID و بر اساس داده‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده پارامترهای مارکوف سیستم فشرده شده دارای ۲ درجه آزادی شناسایی می‌گردد. با به کارگیری روش شناسایی DDA/ISMP سختی تراز جداگر در مدل کاهش یافته به کمک رابطه (۱۹) شناسایی می‌شود. با مقایسه سختی شناسایی شده با سختی تراز لایه جداگر در حالت سازه سالم، میزان تغییرات یا همان آسیب در لایه جداگرها به کمک رابطه (۲۰) محاسبه می‌گردد. ارزیابی کارایی و دقت روش پیشنهادی در ادامه توسط مثال‌های عددی بررسی می‌گردد.

۴- مثال‌های عددی

۴-۱- سازه سه درجه آزاد مجهز به جداساز پایه

در این مثال مدل عددی یک سازه سه درجه آزاد دارای جداساز به صورت قاب برشی و مدل جرم متمرکز به کار گرفته می‌شود. ضریب میرایی سازه $\xi_s = 0.05$ و تراز جداساز $\xi_b = 0.1$ است. زمان تناوب مدول سازه برابر با $T = 1.98(\text{sec})$ محاسبه شده است. در جدول ۱ مشخصات سازه‌ای شامل جرم و سختی طبقات و تراز جداساز آمده است. جرم طبقات سازه یکسان می‌باشد و جرم تراز جداساز کمتر از طبقات است. سختی تراز جداساز برابر با ۱۰ درصد سختی طبقه اول می‌باشد. برای در نظر گرفتن آلوده بودن پاسخ‌های اندازه‌گیری شده به نویز، در تمام مثال‌ها به پاسخ‌های خروجی اندازه‌گیری شده نویزی با شدت مشخص [۱۱] اضافه می‌شود.

با استفاده از روش فشرده‌سازی پیشنهادی در بخش ۲، مدل کاهش یافته سازه ۳ درجه آزاد مجهز به جداساز پایه تشکیل می‌شود. برای آن که بررسی شود که تا چه حد مدل کاهش یافته می‌تواند نماینده خوبی برای مدل اولیه باشد؛ مقایسه پاسخ دینامیکی جابه‌جایی در تراز بام و تراز جداساز پایه در هر دو حالت سازه اولیه و سازه فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی از نوع سیگنال گوسین سفید در شکل ۴ رسم شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، پاسخ جابه‌جایی طبقه بام در سازه فشرده شده، الگوی پاسخ سازه اصلی را به خوبی دنبال می‌کند هر چند که در تعدادی از نقاط اوج مقدار انطباق قدری کاسته شده است. یکی از عواملی که می‌تواند باعث این اتفاق شود تأثیرگذاری مودهای بالاتر (هر چند کم) در پاسخ سازه مجهز به جداگر است؛ اما این در حالی است که پاسخ جابه‌جایی در تراز لایه جداگر در هر دو حالت انطباق خوبی بین نمودارها وجود دارد و مدل کاهش یافته روند پاسخ سازه اصلی را به خوبی دنبال می‌کند. دلیل این امر تأثیر زیاد مود اول در پاسخ سازه مجهز به جداگر است.

$$\bar{\mathbf{k}}_v = \bar{\mathbf{A}}_k^\dagger \mathbf{h}_k = \left\{ \tilde{k}_b \quad \tilde{k}_r \right\}^T \quad (19)$$

علامت (\dagger) نشان دهنده عملگر شبه وارون است. پارامترهای \tilde{k}_b و \tilde{k}_r مقادیر تخمین زده شده از پارامترهای k_b و k_r می‌باشند. در نتیجه می‌توان مقدار خطا در شناسایی سختی تراز جداگر در سازه اولیه را بر اساس رابطه زیر تعیین نمود:

$$e (\%) = \frac{|\tilde{k}_b - k_b|}{k_b} \times 100 \quad (20)$$

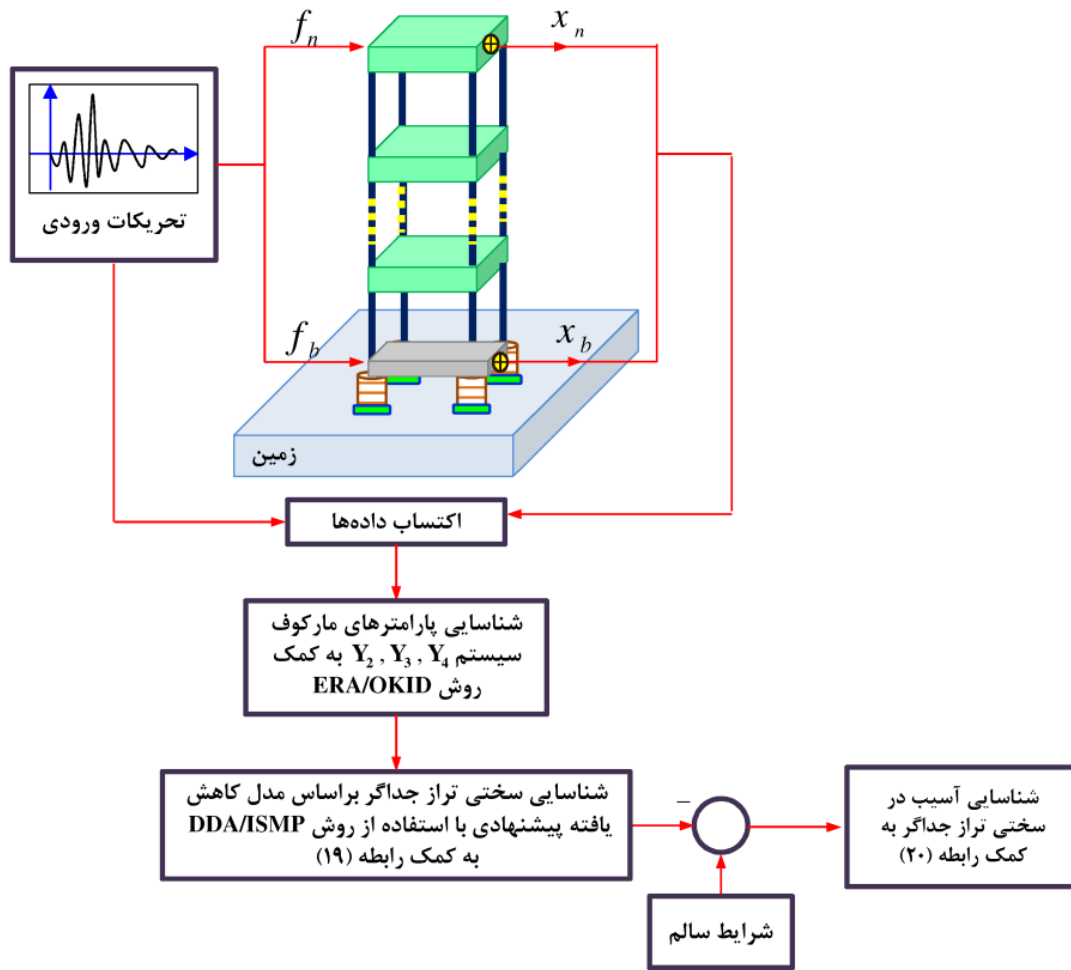
رابطه (۱۹) و (۲۰) نشان می‌دهد که با به کارگیری مدل فشرده شده سازه مجهز به جداگر پایه، می‌توان مقدار سختی و تغییرات آن در تراز جداگر پایه را شناسایی نمود.

از لحاظ تئوری با محاسبه ماتریس‌های حالت سیستم، می‌توان مرتبه غیرصفر و مقادیر قطب‌های مربوط به آن را استخراج نمود. سپس، با تخمین فرکانس‌ها و درصد میرایی، شناسایی سیستم مورد نظر انجام شده است. اما در عمل عدم قطعیت‌های ناشی از اغتشاشات محیطی در اندازه‌گیری باعث ایجاد قطب‌های ناپایدار در سیستم می‌گردد. از معروف‌ترین ابزارها برای شناسایی قطب‌های حقیقی، نمودار پایداری است. اساس کار بر این اصل استوار است که قطب‌های واقعی با توجه به اینکه ناشی از مشخصات ذاتی سیستم است، در هر مرتبه با کمینه اختلاف مرتبه قبلی، رویت می‌شوند. میزان این اختلاف به صورت درصد بیان می‌گردد که به عنوان یک شرط قوی آن را برای مقادیر فرکانس و میرایی برابر با ۱٪ در نظر می‌گیرند. اگر n مرتبه سیستم باشد، شرایط فوق به شکل رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{f_i^n - f_i^{n-1}}{f_i^{n-1}} < 0.01, \quad \frac{\xi_i^n - \xi_i^{n-1}}{\xi_i^{n-1}} < 0.01, \quad (21)$$

که در آن مقادیر f_i^n , ξ_i^n به ترتیب برابر با ضریب میرایی و فرکانس سازه مود i ام در مرتبه n ام می‌باشد. در ادامه، برای درک بهتر موضوع، دیاگرام بلوکی الگوریتم شناسایی آسیب در تراز لایه جداگر بر اساس مدل کاهش یافته در شکل ۳ ترسیم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش اکتساب داده‌ها ابتدا تحریک‌های ورودی و پاسخ‌های ناشی از آن در طبقات بام و لایه جداگر



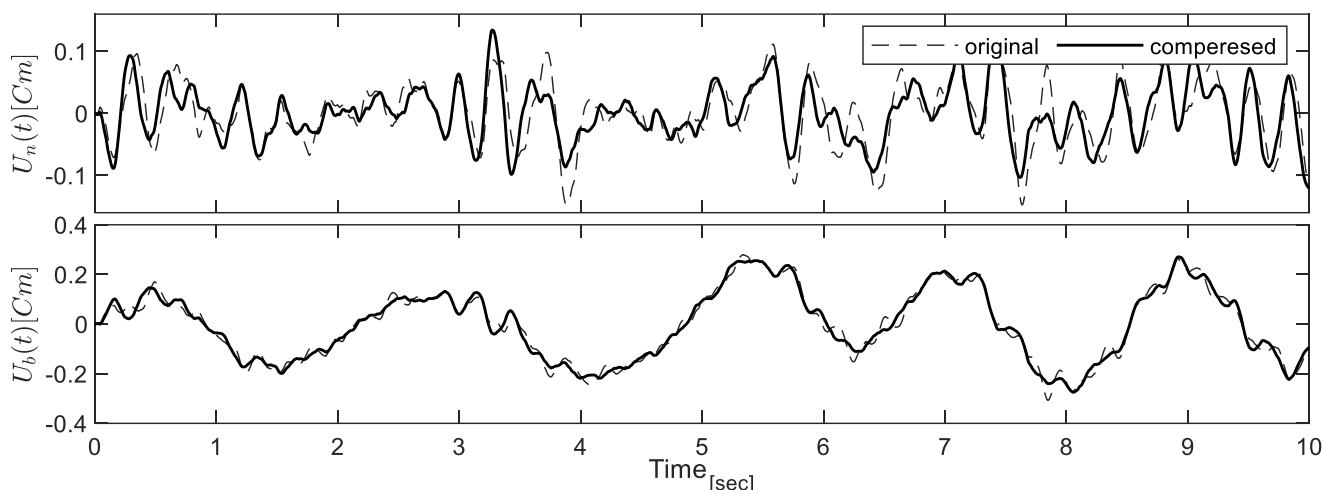
شکل ۳. دیاگرام بلوکی الگوریتم شناسایی آسیب در تراز لایه جداگر بر اساس مدل کاهش یافته.

Fig. 3. Block diagram of the damage detection algorithm at the isolator layer level based on the reduced model

جدول ۱. مشخصات جرم و سختی سازه سه درجه آزاد دارای جداساز

Table 1. The mechanical properties of the three-DOFs structure equipped with base isolation

شماره طبقه	جرم طبقات سازه (ton)	سختی طبقات سازه (kN / m)
جداساز	۲/۵۵	۱۵۵
۱	۳/۸۳	۱۵۵۰
۲	۳/۸۳	۱۹۶۰
۳	۳/۸۳	۱۶۱۰



شکل ۴. مقایسه پاسخ جابه جایی طبقه بام و تراز جداساز در سازه سه درجه آزاد در دو حالت مدل اصلی و مدل فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی

Fig. 4. Comparison of roof displacement response and isolator level in the three-DOFs structure in two case of main model and compressed model under random vibration

مقدار فرکانس مود اول سازه اولیه با دقت بالای ۹۹/۲ درصد شناسایی شده است.

به منظور بررسی بیشتر در دقت شناسایی روش پیشنهادی، مقدار خطا رابطه (۲۰) در شناسایی سختی در تراز جداگر پایه در سه شدت نویز مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که درصد خطا در صورت نبود نویز کمتر از یک درصد است و با آلوده شدن پاسخها با نویز سه و پنج درصد، خطای شناسایی افزایش می‌یابد؛ اما با این وجود مقدار خطا حتی در شرایط آلوده بودن پاسخها به نویز با شدت بالا، کمتر از ۲ درصد شده است؛ که این نشان دهنده کارآمد بودن روش شناسایی پیشنهادی است.

۴-۲- سازه مبنا هشت درجه آزاد دارای جداساز

در اینجا برای نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی ساختمان مبنای مجهز به جداساز، تهیه شده توسط انجمن مهندسان آمریکا مورد بررسی قرار گرفته است [۴۲]. طرح شماتیک ساختمان مبنا در شکل ۶ مشاهده می‌شود. سازه این ساختمان مبنا، یک سازه هشت طبقه فولادی دارای قاب مهاربندی شده به طول ۸۲/۴ و عرض ۵۴/۳ متر که مشابه به یک ساختمان موجود در لس‌آنجلس کالیفرنیا می‌باشد؛ که به عنوان یک سازه مبنا برای ساختمانهای مجهز به جداساز پایه در بیشتر کارهای تحقیقاتی در زمینه جداساز پایه استفاده شده است. با انتخاب این مثال سعی شده است که سیستم سازه‌ای به کار گرفته شده تا حد امکان به واقعیت نزدیکتر باشد. سازه مبنا به

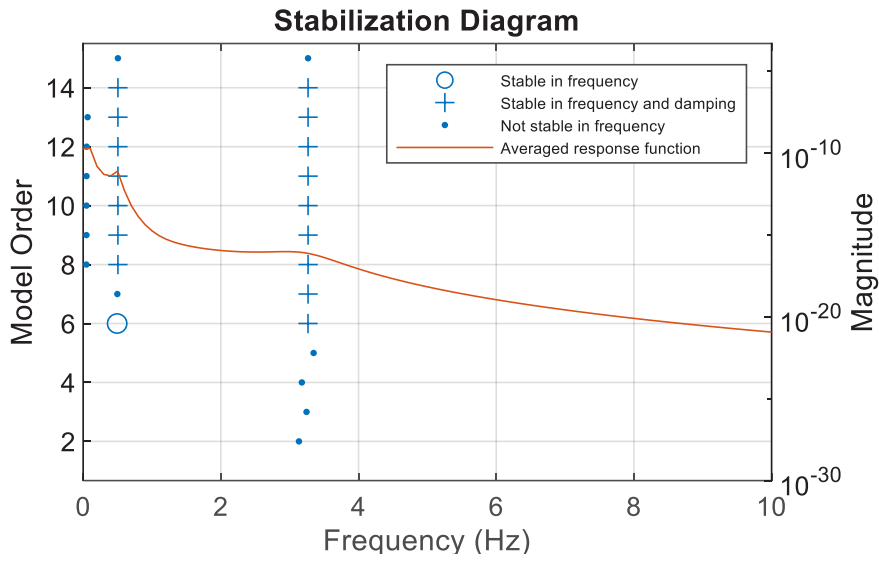
برای مقایسه دقیق‌تر، همبستگی بین پاسخهای مدل اصلی و مدل فشرده شده به کمک شمول واریانس (VAF^1) که رابطه آن در زیر آمده است محاسبه می‌گردد:

$$VAF_i = \left(1 - \frac{\text{var}(y_i - \hat{y}_i)}{\text{var}(y_i)} \right) \times 100\% \quad (22)$$

در رابطه بالا پارامترهای y_i و \hat{y}_i به ترتیب نشان دهنده پاسخ مدل اصلی و مدل فشرده شده هستند. مقادیر VAF محاسبه شده برای تراز جداساز و طبقه بام به ترتیب برابر ۹۷/۴۴ درصد و ۶۶/۱ درصد می‌باشند. مشاهده می‌گردد که مقدار همبستگی میان پاسخها در تراز جداساز به مراتب از طبقه بام بیشتر است، این نشان دهنده انطباق بهتر پاسخ تراز جداساز در دو مدل اصلی و فشرده شده می‌باشد.

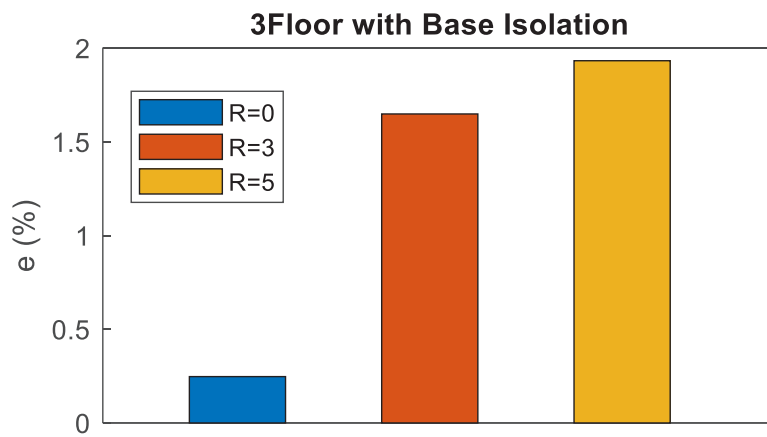
شکل ۵ نمودار پایداری مدل فشرده شده سازه ۳ درجه آزاد تحت اثر ارتعاش تصادفی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مقادیر فرکانسی شناسایی شده برابر با ۰/۵ و ۳/۳ هرتز می‌باشد، با توجه به این مورد که هدف از تحقیق ارائه شده شناسایی و تشخیص آسیب در تراز لایه جداگر می‌باشد فرکانس اول سازه فشرده شده که برابر با مد اول سازه بوده و بیشترین تاثیر را بر پاسخهای سازه دارد، مورد توجه است. مقدار واقعی فرکانس مود اول در سازه اولیه برابر با ۰/۵۰۴ هرتز است، که نشان می‌دهد در روش پیشنهادی

1 Variance accounted for



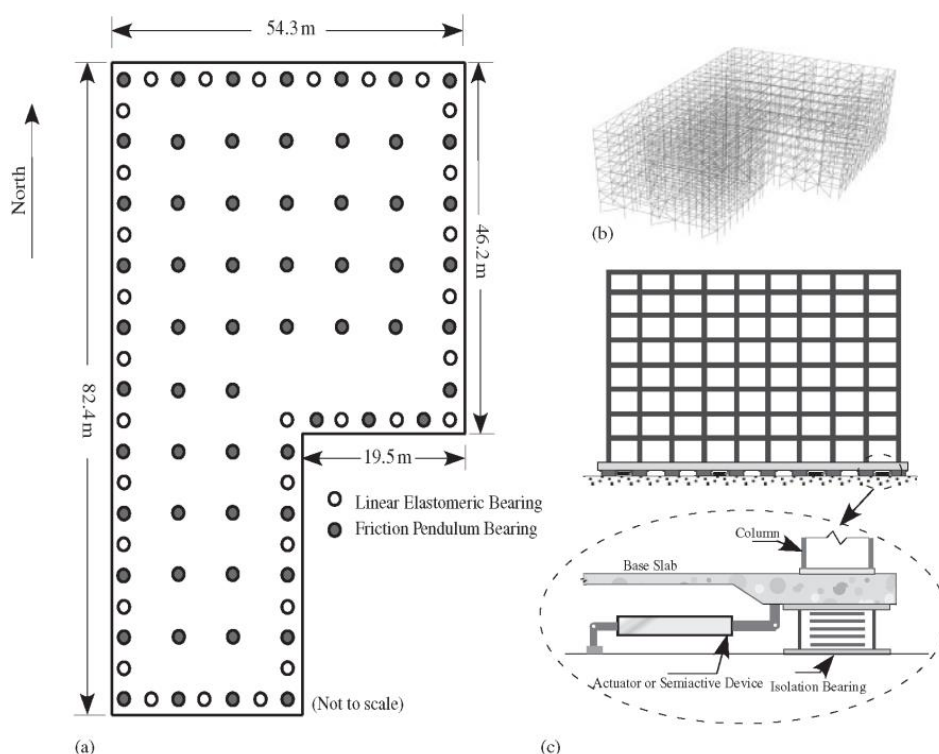
شکل ۵. نمودار پایداری در سازه ۳ درجه آزاد در حالت مدل فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی

Fig. 5. Stability diagram in the three- DOFs structure in a compressed model under random vibration



شکل ۶. میزان خطای شناسایی سختی تراز جداساز در سازه سه درجه آزاد تحت اثر ارتعاش تصادفی

Fig. 6. The identification error ratio of isolator level stiffness in the three-degree free structure due to random vibration



شکل ۷. پلان سازه مبنا و محل قرارگیری جداسازها در آن [۴۲]

Fig. 7. Plan of the benchmark structure and location of the isolators [42]

نوع سیگنال گوسین سفید در شکل ۸ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، رفتار پاسخ طبقه بام در دو مدل تا حد نه چندان زیادی منطبق می‌باشند. دلیل این مسئله، وجود ارتعاش با فرکانس بالا در پاسخ سازه اصلی است که می‌تواند به دلیل تأثیر مدهای بالاتر باشد؛ زیرا سازه کاهش یافته فقط بر مبنای مد اول فشرده شده است. اما با این وجود، بررسی نمودار تاریخچه زمانی پاسخ تراز جداساز در سازه مبنا در هر دو مدل حاکی از آن است که رفتار پاسخ سازه کاهش یافته روند کلی پاسخ سازه اصلی را دنبال می‌کند. در اینجا می‌توان دید که اثرات ناشی از مدهای بالاتر بر پاسخ تراز جداساز کم‌تر می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل کاهش یافته نماینده مناسبی برای مدل اصلی در پاسخ تراز جداگر پایه است.

مانند مثال قبل، در اینجا نیز همبستگی بین پاسخ‌های سازه فشرده شده و اصلی با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد؛ تا دقت روش ارائه شده بررسی شود. مقادیر محاسبه شده همبستگی به ترتیب برای تراز جداساز و طبقه بام برابر با $۸۳/۸۲$ درصد و $۱۵/۲$ درصد می‌باشد. پاسخ سازه فشرده

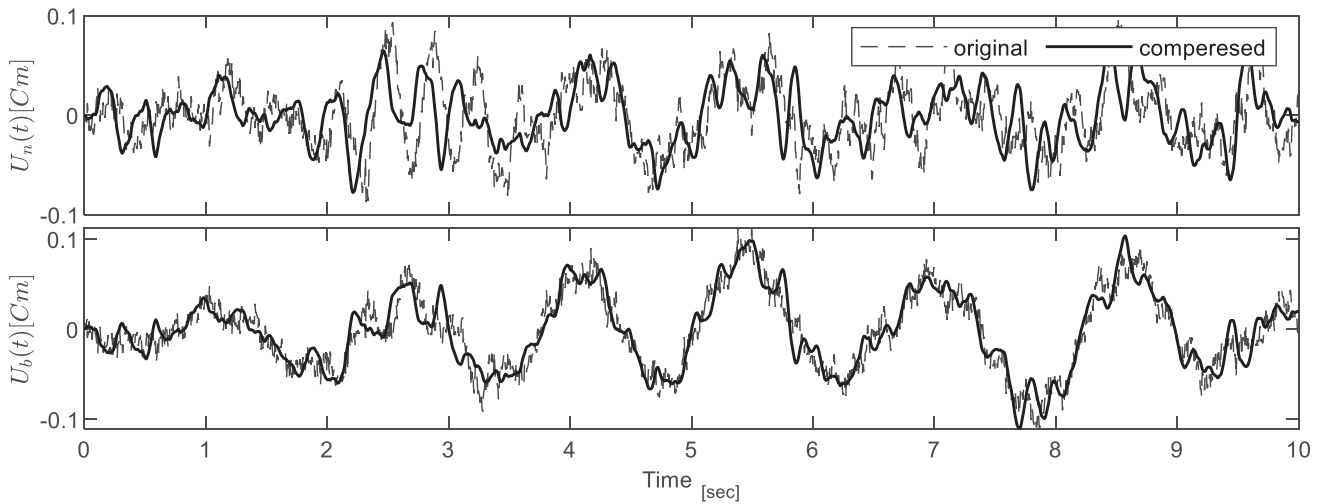
صورت مدل جرم متمرکز و با عملکرد برشی مدل‌سازی شده است. سازه فولادی بر روی یک پی بتن مسلح قرار گرفته که جداسازها به کتیبه‌های سرستون و شالوده متصل هستند. سیستم جداساز اسمی شامل ۶۱ تکیه‌گاه پاندولی اصطکاکی و ۳۱ تکیه‌گاه لاستیکی خطی است که می‌تواند به عنوان یک سیستم جداساز خطی شامل ۹۲ تکیه‌گاه لاستیکی خطی با میرایی ۱۰ درصد و ۶۱ میراگر اصطکاکی غیرفعال تعریف شود. ضریب میرایی سازه اصلی $\xi_s = 0.05$ می‌باشد. طرح سازه و محل قرارگیری جداسازها در شکل ۷ نشان داده شده است. طبق ویژگی‌های سازه زمان تناوب مد اول آن $T = 1.45(\text{sec})$ می‌باشد.

در جدول ۲ مشخصات مکانیکی سازه مبنا هشت طبقه و جداساز، شامل جرم و سختی ارائه شده است. جرم تراز جداساز از طبقات سازه کمتر می‌باشد و سختی آن بسیار کمتر از سختی طبقات سازه است. مقایسه پاسخ دینامیکی جابه‌جایی در تراز بام و تراز جداساز پایه در سازه مبنا، در دو حالت مدل اولیه و مدل فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی از

جدول ۲. مشخصات جرم و سختی سازه مینا با جداساز [۴۲]

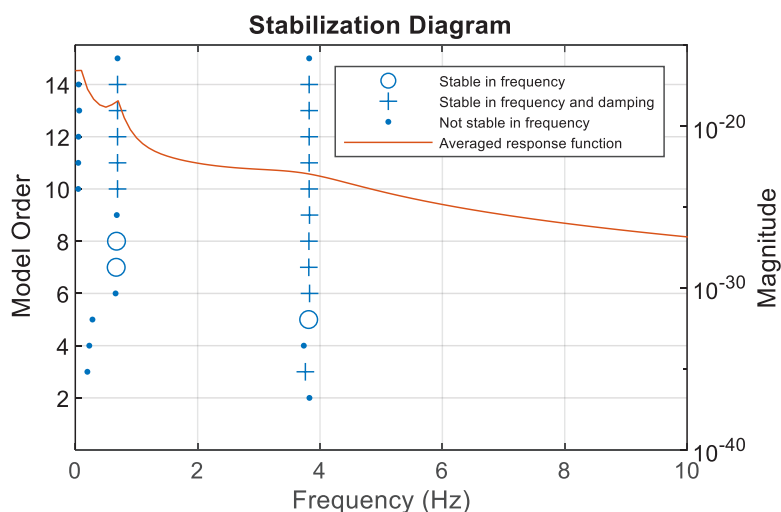
Table 2. The mechanical properties of the benchmark structure equipped with base isolation.

شماره طبقه	جرم طبقات سازه (ton)	سختی طبقات سازه (kN / m)
جداساز	۱۴۶۴/۱	۵۰۶۰۰۰
۱	۲۹۲۸/۳	۵۵۷۹۹۲۰/۴
۲	۲۹۲۸/۴	۵۳۹۰۴۸۴/۶
۳	۲۹۲۸/۳	۴۵۷۸۳۶۷/۷
۴	۲۹۲۸/۴	۴۸۸۸۵۸۰/۷
۵	۲۹۲۸/۳	۳۴۲۱۸۵۹/۱
۶	۲۱۱۳/۳	۳۵۳۵۹۰۶/۴
۷	۱۹۲۱/۶	۳۰۰۰۳۶۳/۱
۸	۱۹۲۱/۸	۳۱۶۲۷۱۴/۱



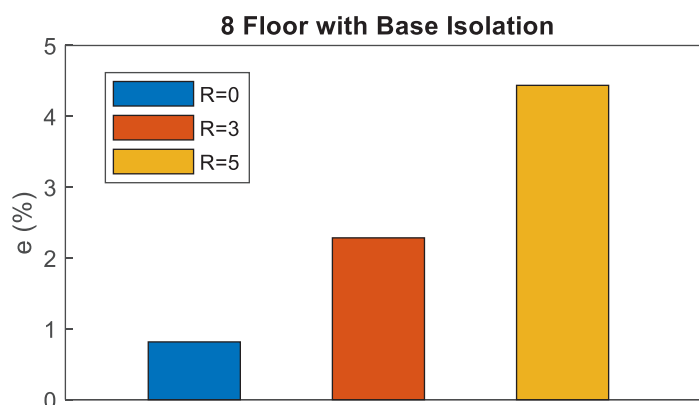
شکل ۸. مقایسه پاسخ جابه جایی طبقه بام و تراز جداساز در سازه مینا در دو حالت مدل اصلی و مدل فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی

Fig. 8. Comparison of roof displacement response and isolator level in the benchmark structure in the two cases of the main model and the compressed model under the effect of random vibration



شکل ۹. نمودار پایداری در سازه ۹ درجه آزاد در حالت مدل فشرده شده تحت اثر ارتعاش تصادفی

Fig. 9. Stability diagram in the nine- DOFs structure in compressed case model under random vibration



شکل ۱۰. میزان خطای شناسایی سختی تراز جداساز در سازه مبنا هشت درجه آزاد تحت نویز صفر، سه و پنج درصد.

Fig. 10. The Identification error ratio of the isolator level stiffness in the benchmark structure of nine degrees free under zero, three and five percent noise.

فرکانس مود اول سازه اولیه که مقدار آن برابر با $0/689$ هرتز است؛ می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی به طور موثر و کارایی فرکانس مود اول را با دقت $98/4$ درصد شناسایی کرده است. شکل ۱۰ خطای شناسایی سختی تراز جداساز در سازه مبنا را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که روش شناسایی پیشنهادی با مقدار خطای کمتر از یک درصد، سختی تراز جداگر پایه را در حالت بدون نویز شناسایی کرده است. با آلوده شدن پاسخ های سازه

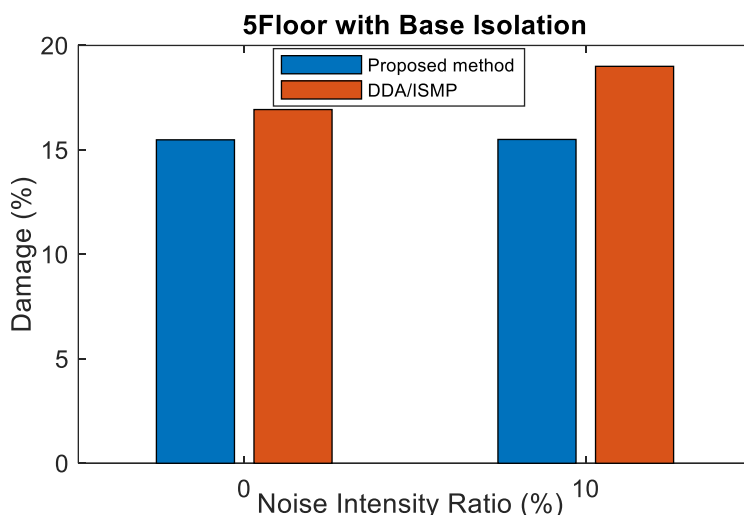
شده در طبقه بام با اینکه از الگوی پاسخ سازه اصلی پیروی می کند اما در نقاط بیشینه و کمینه های محلی با سازه اصلی انطباق نداشته و این امر موجب کاهش مقدار همبستگی پاسخ ها در تراز بام شده است.

نمودار پایداری مدل فشرده شده سازه ۹ درجه آزاد تحت اثر ارتعاش تصادفی در شکل ۹ رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود مقدار فرکانس شناسایی شده در مود اول برابر با $0/7$ هرتز است. در مقایسه با

جدول ۳. مشخصات جرم و سختی سازه پنج درجه آزاد دارای جداساز [۴۳]

Table 3. The mechanical properties of the five-DOFs structure equipped with base isolation.

شماره طبقه	جرم طبقات سازه (ton)	سختی طبقات سازه (kN / m)
جداساز	۶/۸۰۰	۱۳۸۹
۱	۵/۸۹۷	۳۳۷۳۲
۲	۵/۸۹۷	۲۹۰۹۳
۳	۵/۸۹۷	۲۸۶۲۱
۴	۵/۸۹۷	۲۴۹۵۴
۵	۵/۸۹۷	۱۹۰۵۹



شکل ۱۱. مقایسه بین روش پیشنهادی با روش DDA/ISMP در شناسایی آسیب در سختی تراز جداساز در سازه پنج درجه آزاد.

Fig. 11. Comparison between the proposed method and the DDA / ISMP method in identifying damage at the isolator level stiffness in the five-DOFs structure.

ISMP و قرار دادن حسگر در تمام درجات آزادی اقدام به شناسایی آسیب در تراز جداساز نمودند که نتایج آن‌ها با روش پیشنهادی مقایسه می‌گردد. مشخصات سازه پنج درجه آزاد دارای جداساز در جدول ۳ آمده است. ضریب میرایی سازه $\zeta_s = 0.05$ و تراز جداساز $\zeta_b = 0.1$ فرض شده است.

در این مثال به منظور بررسی کارایی روش پیشنهاد شده برای شناسایی آسیب در تراز جداساز پایه، یک سناریوی آسیب از پیش تعریف شده در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که سختی تراز جداساز پایه به مقدار ۱۵ درصد در اثر آسیب کاهش داشته است. شکل ۱۱ مقایسه بین روش پیشنهادی با روش DDA/ISMP در شناسایی آسیب در سختی تراز جداساز در سازه

به نویز، مشاهده می‌شود که درصد خطای شناسایی با افزایش مقدار شدت نویز، روند افزایشی دارد و تا مقدار نزدیک به پنج درصد می‌رسد. این سطح از خطا برای چنین سازه‌ای با این شدت نویز بالا قابل قبول و نشان دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی است.

۴-۳ سازه پنج درجه آزاد مجهز به جداساز

در اینجا، به منظور مقایسه روش پیشنهادی با یک روش شناسایی دیگر از سازه ۵ درجه آزاد مجهز به جداساز پایه که توسط امینی و همکاران [۴۳] به کار گرفته شده است استفاده می‌گردد. آن‌ها با استفاده از روش DDA/

دهنده انطباق خوب و مناسب پاسخ تراز جداساز در دو مدل اصلی و فشرده شده می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده از بررسی نمودارهای پایداری نشان داد که روش پیشنهادی فرکانس مود اول سازه مجهز به جداساز پایه را با دقت قابل قبول، تقریباً ۹۸ درصد، حتی در شرایط وجود نویز شناسایی کرده است. به دلیل کاهش تعداد پاسخ‌های اندازی‌گیری شده، زمان مورد نیاز برای شناسایی سازه در حالت فشرده شده تقریباً نصف سازه اصلی می‌باشد؛ که این نشان دهنده کارایی و موثر بودن روش پیشنهادی در بحث هزینه و زمان است.

منابع

- [1] F. Amini, K. Karami, Capacity design by developed pole placement structural control, *Structural Engineering and Mechanics*, 39(1) (2011) 147-168.
- [2] K. Karami, F. Amini, Decreasing the damage in smart structures using integrated online DDA/ISMP and semi-active control, *Smart Materials and Structures*, 21(10) (2012) 105017.
- [3] K. Karami, S. Nagarajaiah, F. Amini, Developing a smart structure using integrated DDA/ISMP and semi-active variable stiffness device, *SMART STRUCTURES AND SYSTEMS*, 18(5) (2016) 955-982.
- [4] K. Karami, S. Manie, K. Ghafouri, S. Nagarajaiah, Nonlinear structural control using integrated DDA/ISMP and semi-active tuned mass damper, *Engineering Structures*, 181 (2019) 589-604.
- [5] B. Basu, O.S. Bursi, F. Casciati, S. Casciati, A.E. Del Grosso, M. Domaneschi, L. Faravelli, J. Holnicki-Szulc, H. Irschik, M. Krommer, A European Association for the Control of Structures joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(12) (2014) 1414-1436.
- [6] P. Clemente, Seismic isolation: past, present and the importance of SHM for the future, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2) (2017) 217-231.
- [7] F. Zhou, P. Tan, Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(1) (2018) 19-27.

پنج درجه آزاد را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در حالت عدم وجود نویز، مقدار آسیب شناسایی شده در روش DDA/ISMP بیشتر از میزان آسیب اعمالی می‌باشد. با مقایسه دقت شناسایی در حالت وجود نویز با شدت زیاد (در اینجا ۱۰ درصد) می‌توان مشاهده کرد که در روش پیشنهادی مقدار آسیب شناسایی شده تقریباً برابر حالت بدون نویز می‌باشد. این در حالی است که در روش DDA/ISMP با افزایش نویز موجود مقدار خطا در شناسایی به مرتب افزایش یافته است. میزان دقت شناسایی در روش ارائه شده برای دو حالت با و بدون نویز برابر ۹۶/۸ و ۹۵ درصد می‌باشد، که این مقادیر برای روش DDA/ISMP به ترتیب برابر با ۸۷/۱۳ و ۷۳/۳۳ درصد است؛ که نشان دهنده حساس بودن روش DDA/ISMP به نویز است. همچنین، در روش DDA/ISMP پاسخ‌های سازه در تمامی درجات آزادی سازه اندازه‌گیری و استفاده شده است که از لحاظ اقتصادی و اجرایی مطلوب نمی‌باشد. در حالی که در روش پیشنهادی تنها پاسخ‌ها در تراز جداساز و بام به عنوان خروجی استفاده شده است. به دلیل حجم زیاد داده‌ها در روش DDA/ISMP زمان محاسبات نیز نسبت به روش پیشنهادی افزایش می‌یابد. در این جا زمان مورد نیاز برای شناسایی سختی در تراز جداساز پایه سازه ۵ طبقه در روش ارائه شده و روش DDA/ISMP به ترتیب برابر ۲/۳۲ و ۴/۲۲ ثانیه می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با کاهش تعداد پاسخ‌های مورد بررسی در روش ارائه شده میزان زمان محاسبه به طور تقریباً نصف شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با تعداد حسگرهای کمتر در زمان کوتاه‌تر و با دقت بیشتر مقدار آسیب را شناسایی نموده و این نشان دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش شناسایی بر مبنای زیرفضا برای شناسایی سختی تراز جداگر در سازه‌های مجهز به جداگر پایه ارائه گردید. در این پژوهش، با فرض رفتار خطی سازه و تراز جداگر با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی، سازه مجهز به جداساز با تعداد درجات آزادی زیاد به یک سازه دو درجه آزاد تبدیل شد؛ به طوری که سختی مرتبط با اولین درجه آزادی در سیستم کاهش یافته متناظر با سختی تراز جداساز در سازه است. نتایج به دست آمده نشان داد که روش پیشنهادی با به کارگیری تعداد حسگرهای کمتر، مقدار سختی در تراز جداگر پایه را با دقت مناسب و در زمان کوتاه حتی با وجود شدن نویز بالا شناسایی می‌کند. همبستگی میان پاسخ‌ها در تراز جداساز به مراتب از طبقه بام بیشتر بوده و تقریباً بالای ۹۰ درصد است و این نشان

- Structural Control and Health Monitoring, 19(8) (2012) 686-700.
- [18] C.G. Koh, L.M. See, T. Balendra, Estimation of structural parameters in time domain: a substructure approach, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(8) (1991) 787-801.
- [19] C. Koh, B. Hong, C. Liaw, Substructural and progressive structural identification methods, *Engineering structures*, 25(12) (2003) 1551-1563.
- [20] K. Tee, C. Koh, S. Quek, Substructural first-and second-order model identification for structural damage assessment, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(15) (2005) 1755-1775.
- [21] R. Li, L. Zhou, J.N. Yang, Experimental verifications of a structural damage identification technique using reduced order finite-element model, in: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*, International Society for Optics and Photonics, 2010, pp. 76470A.
- [22] S. Law, D. Yong, Substructure methods for structural condition assessment, *Journal of Sound and Vibration*, 330(15) (2011) 3606-3619.
- [23] S. Weng, Y. Xia, Y.-L. Xu, H.-P. Zhu, Substructure based approach to finite element model updating, *Computers & structures*, 89(9-10) (2011) 772-782.
- [24] R. Yoshimoto, A. Mita, K. Okada, Damage detection of base-isolated buildings using multi-input multi-output subspace identification, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(3) (2005) 307-324.
- [25] G.J. Yun, K.A. Ogorzalek, S.J. Dyke, W. Song, A parameter subset selection method using residual force vector for detecting multiple damage locations, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 17(1) (2010) 48-67.
- [26] H. Fang, T.J. Wang, X. Chen, Model updating of lattice structures: a substructure energy approach, *Mechanical systems and signal processing*, 25(5) (2011) 1469-1484.
- [27] J. Li, S. Law, Y. Ding, Substructure damage identification [8] M.G. Soto, H. Adeli, Vibration control of smart base-isolated irregular buildings using neural dynamic optimization model and replicator dynamics, *Engineering Structures*, 156 (2018) 322-336.
- [9] T.A. Rawlinson, J.D. Marshall, K.L. Ryan, H. Zargar, Development and experimental evaluation of a passive gap damper device to prevent pounding in base-isolated structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11) (2015) 1661-1675.
- [10] E.A. Mavronicola, P.C. Polycarpou, P. Komodromos, Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(7) (2017) 1161-1179.
- [11] F. Amini, K. Karami, Damage detection algorithm based on identified system Markov parameters (DDA/ISMP) in building structures with limited sensors, *Smart Materials and Structures*, 21(5) (2012) 055010.
- [12] M. Nigro, S.N. Pakzad, S. Dorvash, Localized structural damage detection: a change point analysis, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(6) (2014) 416-432.
- [13] H. Qarib, H. Adeli, Recent advances in health monitoring of civil structures, *Scientia Iranica*, 21(6) (2014) 1733-1742.
- [14] K. Karami, S. Akbarabadi, Developing a Smart Structure Using Integrated Subspace-Based Damage Detection and Semi-Active Control, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(11) (2016) 887-903.
- [15] S. Manie, K. Karami, P. Fatehi, Real time system identification in smart structures using wavelet transform based sparse component analysis, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019) -.
- [16] K. Karami, P. Fatehi, A. Yazdani, On-line system identification of structures using wavelet-Hilbert transform and sparse component analysis, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2020).
- [17] T.N. Trinh, C.G. Koh, An improved substructural identification strategy for large structural systems,

- shear structures II: Controlled substructure identification, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5) (2013) 821-834.
- [37] D. Zhang, E.A. Johnson, Controlled loop substructure identification for shear structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(6) (2014) 979-995.
- [38] D. Zhang, Y. Yang, T. Wang, H. Li, Improving substructure identification accuracy of shear structures using virtual control system, *Smart Materials and Structures*, 27(2) (2018) 025013.
- [39] P.I. Komodromos, *Seismic isolation for earthquake-resistant structures*, Wit Press, 2000.
- [40] C.-S. Lin, D.-Y. Chiang, Modal identification from nonstationary ambient response data using extended random decrement algorithm, *Computers & Structures*, 119 (2013) 104-114.
- [41] J.-N. Juang, M. Phan, L.G. Horta, R.W. Longman, Identification of observer/Kalman filter Markov parameters-Theory and experiments, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16(2) (1993) 320-329.
- [42] S. Narasimhan, S. Nagarajaiah, E.A. Johnson, H.P. Gavin, Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 13(2-3) (2006) 573-588.
- [43] F. Amini, S.A. Mohajeri, M. Javanbakht, Semi-active control of isolated and damaged structures using online damage detection, *Smart Materials and Structures*, 24(10) (2015) 105002.
- based on response reconstruction in frequency domain and model updating, *Engineering Structures*, 41 (2012) 270-284.
- [28] G. Zhang, B. Tang, G. Tang, An improved stochastic subspace identification for operational modal analysis, *Measurement*, 45(5) (2012) 1246-1256.
- [29] A.L. Hong, F. Ubertini, R. Betti, New stochastic subspace approach for system identification and its application to long-span bridges, *Journal of Engineering Mechanics*, 139(6) (2013) 724-736.
- [30] L. Yan, A. Elgamal, G.W. Cottrell, Substructure vibration NARX neural network approach for statistical damage inference, *Journal of Engineering Mechanics*, 139(6) (2013) 737-747.
- [31] J. Hou, Ł. Jankowski, J. Ou, An online substructure identification method for local structural health monitoring, *Smart materials and structures*, 22(9) (2013) 095017.
- [32] S. Law, K. Zhang, Z. Duan, Structural damage detection from coupling forces between substructures under support excitation, *Engineering Structures*, 32(8) (2010) 2221-2228.
- [33] J. Hou, Ł. Jankowski, J. Ou, A substructure isolation method for local structural health monitoring, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(6) (2011) 601-618.
- [34] D. Zhang, E.A. Johnson, Substructure identification for shear structures: cross-power spectral density method, *Smart Materials and Structures*, 21(5) (2012) 055006.
- [35] D. Zhang, E.A. Johnson, Substructure identification for shear structures I: Substructure identification method, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5) (2013) 804-820.
- [36] D. Zhang, E.A. Johnson, Substructure identification for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Karami, P. Fatehi, A. Hosseini, *Subspace based identification of structural parameters of the base isolation level*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 5307-5324.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18784.6961



