

Reliability Study of Identification-based Active Control

Amin Gholizad*^{ID}, Mona Shoaeei-parchin^{ID}

Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

ABSTRACT: The reliability of vibration control systems is influenced by uncertainties in dynamic parameters of structure, the characteristics of controller, and external excitations. When designing controllers for structures with unspecified or unavailable specifications, identification methods for estimating dynamic parameters and controller design offer a practical solution. However, controllers based on identification methods are subject to two main sources of error: modeling inaccuracies and identification errors. By comparing the performance of controllers designed using identification methods with those based on assumed models, it is possible to evaluate the impact of identification accuracy on control effectiveness. This approach minimizes the negative effects of uncertainties in structural parameters while reducing the costs associated with intelligentization. In this study, uncertainties considered in structural parameters and external excitations. Initially, a primary control system was designed, and the structure was identified using the stochastic subspace identification based on recorded responses. Subsequently, a secondary controller was designed based on identification. The failure function was defined as maximum difference in displacement response of the upper story of structure between two controllers. Using this metric, the reliability of control system was estimated. The results showed that the identification-based controller achieved a success rate of 99.75% compared to original controller. However, the statistical distributions of the performance indexes for the identification-based controller exhibited a lower mean and higher standard deviation than those of assumed-model-based controller. This improvement is likely influenced by the lower accuracy and higher estimated damping ratios of the identified structures, which contribute to increased reliability of identification-based controller.

Review History:

Received: Sep. 29, 2024
Revised: Dec. 29, 2024
Accepted: Jun. 25, 2025
Available Online: Jul. 03, 2025

Keywords:

Stochastic Subspace Identification
Monte Carlo Simulation
System Identification
Reliability
Active control

1- Introduction

The reliability of vibration control, is studied by considering uncertainties in excitations and structure and controller parameters. The reliability becomes critical due to parameter errors affecting force magnitude/direction and structural stability. While system identification methods help estimate dynamic parameters for structures with unknown properties [1], modeling errors and intertwined uncertainties continue to challenge exact system characterization. Recent advances include high-dimensional reliability analysis [2], Monte Carlo simulations with neural networks [3], and fault-tolerant semi-active control using MR dampers [4]. Integration of health monitoring and Vibration control has shown particular promise, with continuous monitoring improving dynamic property estimation and enabling adaptive control through sensor fusion [5], as demonstrated in combining damage identification with semi-active control [6] and real-time stiffness adjustment methods [7].

In light of the emerging trend of integrating system

identification with control strategies, a novel framework is developed in this study. An active control system is first designed based on the LQR method, assuming nominal system parameters. The structural model is then identified using the Stochastic Subspace Identification (SSI) algorithm, based on displacement responses under external excitation. A new control system is subsequently designed using the identified parameters. By defining a failure function that quantifies the discrepancy between the original and identified control systems, the reliability of the control strategy is assessed through Monte Carlo simulation.

2- Technical Methodology

In the modeling phase, an 11-DOF, 2D model of the primary structure [8] first develop (nominal system). Then 1,200 models generate for Monte Carlo simulation assigning appropriate probability density functions to the structure's dynamic parameters. These models then identify based on their displacement responses to random Gaussian white

*Corresponding author's email: gholizad@uma.ac.ir

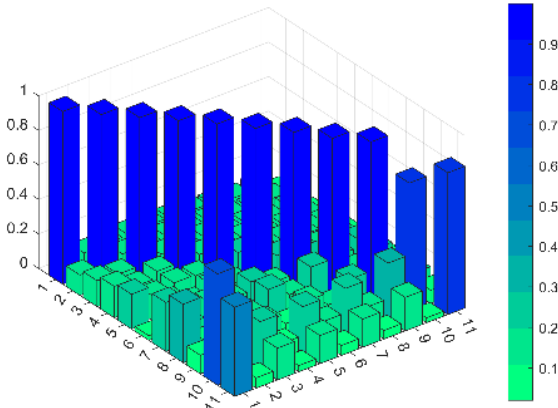


Fig. 1. 3D MAC diagram for modeshapes between identified and original system

Table 1. Identified structural properties based on displacement responses to generated GWN by SSI.

Mode No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ω error (%)	1	0	0	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	0.8	0.5
ζ error (%)	32.70	29.20	15.20	0.40	2.70	4.50	22.40	6.90	2.30	0.40	16.90

noise excitation. after coordinate transform and discrete to continuous system transformation, the vibration control performance of both the original and random models evaluates under the El Centro earthquake excitation. benchmark indexes based on RMS and maximum response of original and identified structures use for reliability evaluation.

$$J_2 = \left(\max_{t,i} |x_i^c(t)| \right) / \left(\max_{t,i} |x_i^{uc}(t)| \right) \quad (1)$$

$$J_6 = \left(\max_{t,i} \|x_i^c(t)\| \right) / \left(\max_{t,i} \|x_i^{uc}(t)\| \right) \quad (2)$$

3- Results and Discussion

To provide an overview of identification accuracy, the main structural properties were identified based on displacement response data, with the results and MAC diagrams between modeshapes of identified and original system presented in Figure 1. The findings (See Table 1) indicate high accuracy in identifying natural frequencies, while damping ratios were estimated with greater error.

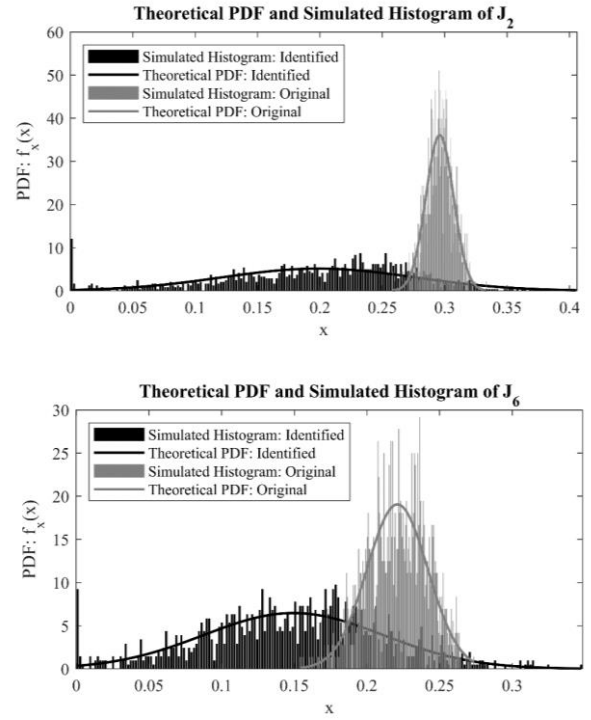


Fig. 2. The probability density function of the performance indexes for the original and identified structures.

$$MAC_{\phi_i, \phi_o} = (\phi_i^T \phi_o) / \left(\sqrt{\phi_i^T \phi_o \phi_o^T \phi_i} \right) \quad (3)$$

Following system identification and transformation to physical coordinates, vibration control was implemented on both the original and identified structural models, with benchmark performance indices evaluated for original controller are $J_2=0.302$ and $J_6=0.222$ and for identified controller are $J_2=0.225$ and $J_6=0.158$. The results demonstrate that the identification-based controller achieved superior performance by not only reducing structural responses compared to the uncontrolled case, but also outperforming the controller designed for the original structure in meeting control objectives. The successful performance of the identification-based controller across all evaluation metrics confirms the potential of this methodology for structural vibration control under uncertain conditions.

In Figure 2, the results obtained for the two groups of systems are presented in the form of probability density distribution diagrams assuming a normal distribution for the performance indicators.

The results indicate that the identification-based controller demonstrates superior performance with a 25% reduction in mean performance indices compared to the original controller, though with greater variability in outcomes as evidenced by higher standard deviations. Reliability analysis of the system (by choosing the limit state function as the difference

between maximum of displacement response of the top stories of two controlled systems) reveals a remarkably low failure probability of just 0.25%, corresponding to a 99.75% success rate, validating the robustness of the identification-based control methodology.

4- Conclusion

This study demonstrates that identification-based controllers achieve superior average performance (with lower mean values) compared to conventional approaches, despite showing greater outcome variability. The developed probabilistic methodology enables reliable control design for structures with uncertain properties, successfully establishing performance thresholds for key response parameters while quantifying operational reliability under uncertainty. Notably, the stochastic subspace identification process - though producing seemingly inaccurate damping ratio estimates - paradoxically enhances controller robustness. For real-world structures lacking precise parameters, the proposed identification-based approach using health monitoring data not only meets but frequently exceeds deterministic methods' performance, offering a practical and often superior vibration control solution.

References

- [1] S.-M. Kim, S.-Y. Ok, J. Song, Multi-scale dynamic system reliability analysis of actively-controlled structures under random stationary ground motions, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(3) (2019) 1259–1270.
- [2] L. Li, M. Fang, G. Chen, D. Yang, Reliability-based stochastic optimal control of frame building under near-fault ground motions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163 (2022) 108098.
- [3] N. Fathiazar, M. Mohebbi, Optimal design of passive mass damper based on reliability, in: *International Conference on Civil Engineering, Architecture and urban infrastructure*, undefined, 2015 (in Persian).
- [4] C. Zhang, W. Li, D. Liu, J. Xu, X. Feng, R. Wang, B. Wang, Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control, *Structural Safety*, 102 (2023) 102322.
- [5] S. Hosseinaei, M.R. Ghasemi, S. Etedali, T.H. Chan, Sensitivity and reliability analyses in to actively controlled structures under earthquake, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 22(12) (2022) 2250124.
- [6] M. Moradmand, F. Amini, P. Ghaderi, Simultaneous Online Damage Detection and Vibration Control of Structures Using Synchronization and Semi-Active Control, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, (2021) 2150038.
- [7] S. Azizi, K. Karami, S. Nagarajaiah, Developing a semi-active adjustable stiffness device using integrated damage tracking and adaptive stiffness mechanism, *Engineering Structures*, 238 (2021) 112036.
- [8] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, *Journal of vibration and control*, 24(13) (2018) 2938–2953.



مطالعه قابلیت اعتماد کنترل ارتعاشات مبتنی بر شناسایی سیستم

امین قلی‌زاد*^{id}، مونا شعاعی پرچین^{id}

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

زیرفضای تصادفی

شبیه‌سازی مونت کارلو

شناسایی سیستم

قابلیت اعتماد

کنترل فعال

خلاصه: قابلیت اعتماد سامانه‌های کنترل ارتعاشات تحت تاثیر عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای دینامیکی سازه، مشخصات کنترلر و تحریکات خارجی قرار می‌گیرد. در مواردی که هدف، طرح کنترل برای سازه‌هایی است که مشخصات آن‌ها در اختیار نمی‌باشد، استفاده از روش‌های شناسایی در تخمین پارامترهای دینامیکی و طراحی کنترلر راهگشا است. کنترلر طراحی شده بر مبنای شناسایی از طرفی خطای ذاتی مدل‌سازی را به همراه دارد و از سویی تحت تاثیر خطای روش‌های شناسایی قرار می‌گیرد. می‌توان از مقایسه عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی با کنترلر مبتنی بر مدل فرضی، تخمینی از تاثیر دقت شناسایی در کنترل ارتعاشات به دست آورد. این رویکرد ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌های هوشمندسازی، نقش منفی عدم قطعیت‌ها در پارامترهای سازه را کم‌رنگ نموده و می‌تواند با استخراج مشخصات سازه به طراحی کنترلر بپردازد. در این مطالعه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازه و تحریک خروجی، نخست سیستم کنترل اولیه طراحی شده و در ادامه بر اساس پاسخ‌های ثبت شده، سازه با روش زیرفضای تصادفی شناسایی شده است تا کنترلر دیگری بر مبنای شناسایی طراحی گردد. در نهایت با تعریف تابع خرابی به صورت اختلاف بیشینه پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی سازه برای دو کنترلر، تخمینی از قابلیت اعتماد سیستم کنترل به دست آمده است. مطابق نتایج درصد موفقیت برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی ۹۹/۷۵ بوده و توزیع‌های آماری برای شاخص‌های عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی از میانگین پایین‌تر و انحراف معیار بالاتری نسبت به کنترلر فرضی برخوردار هستند؛ این امر می‌تواند متاثر از دقت پایین و برآورد بالاتر نسبت‌های میرایی در سازه‌های شناسایی شده باشد که قابلیت اعتماد بالاتری برای کنترلر مبتنی بر شناسایی سبب شده است.

۱- مقدمه

یا تغییرات به وجود آمده در طول عمر مفید سازه نظیر رخداد آسیب نیز قابلیت اعتماد سازه‌ی مجهز به ابزار کنترل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مواردی که هدف، طرح کنترل برای سازه‌هایی است که مشخصات آن‌ها در اختیار نمی‌باشد، استفاده از روش‌های شناسایی در تخمین پارامترهای دینامیکی و طراحی کنترلر راهگشا است. گرچه در واقعیت، دستیابی و دسترسی به ویژگی‌های سیستمی که تحت تاثیر درهم‌تنیدگی عدم قطعیت‌ها و خطاهای مدل‌سازی قرار دارد، دست‌نیافتنی به نظر می‌رسد؛ لیکن با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مدل سازه و تحریکات خارجی می‌توان از اثرات نامطلوب خطاهای این پارامترها جلوگیری کرد و از طرفی با استفاده از پارامترهای شناسایی شده‌ی مدل، دقت طرح کنترل را افزایش داد. در طراحی سیستم‌های کنترل ارتعاشات به عنوان کارآمدترین تجهیزات نوین بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، اطلاع از مشخصات دینامیکی نظیر جرم، سختی و میرایی طبقات ضروری است. مسائل مختلفی پیش روی اندازه‌گیری و تعیین

قابلیت اعتماد سیستم‌های کنترل با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در تحریکات خارجی، مشخصات سازه و کنترلر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سیستم‌های فعال کنترل ارتعاشات که معمولاً اعمال نیروهای نسبتاً بزرگی به سازه مورد انتظار است، اهمیت مطالعه‌ی مساله قابلیت اعتماد از جهت تاثیر خطای پارامترها در محاسبه‌ی جهت و بزرگی نیروی کنترل اعمالی و تحت‌الشعاع قرار گرفتن پایداری و ایمنی سازه دو چندان می‌شود. الگوریتم‌های بهنگام کنترل نظیر روش کنترل بهینه‌ی لحظه‌ای و کنترل پیش‌بین مدل با اندازه‌گیری و اعمال مقادیر لحظه‌ای تحریک خارجی در طرح کنترل می‌توانند اثر عدم قطعیت موجود در بارهای جانبی را در طراحی سیستم کنترل فعال به حداقل برسانند. از طرفی وجود عدم قطعیت در پارامترهای سازه و کنترلر شامل عدم قطعیت در مقادیر پارامترها و ابعاد

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gholizad@uma.ac.ir



قرار دادند. یک روش یادگیری ماشین تحت عنوان جنگل تصادفی با هدف بررسی امکان سنجی اعمال و ارزیابی عملکرد آن در مدل سازی و پیش بینی قابلیت اعتماد سازه در حالت کنترل غیرفعال توسط یو^۵ و همکاران [۶] مطالعه شده است. در پژوهشی لی^۶ و همکاران [۷] کنترل بهینه تصادفی مبتنی بر قابلیت اعتماد را از طریق روش انتگرال احتمالاتی مستقیم^۷ برای سازه ساختمانی پیشنهاد نموده اند که در طراحی مبتنی بر عملکرد سیستم های کنترل سازه های خطی تحت تحریکات تصادفی غیرایستا و غیرسفید قابل اجرا است. روش تلفیقی شناسایی آسیب در کنار کنترل فعال براساس پاسخ شتاب سازه توسط کیم^۸ و همکاران [۸] ارائه گردیده است. در این پژوهش با تخمین پاسخ شتاب در گام های زمانی آینده مقدار خطا بین دو داده ی رخ داده و پیش بینی شده کمینه می گردد. با حل این مساله ی بهینه سازی مقادیر سختی و میرایی محاسبه شده و براساس این مقادیر که به صورت لحظه ای آپدیت می شوند، خرابی شناسایی شده و الگوریتم کنترل بهینه ی لحظه ای، نیروی کنترل را محاسبه نموده و فرمان کنترلی را به محرک ها صادر می نماید. فتحی آذر و محبی [۹] اثر عدم قطعیت در پارامترهای سازه و سیستم کنترل را با ترکیب شبیه سازی مونت کارلو و شبکه عصبی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان می دهد رفتار قابلیت اعتماد برای دو حالت طراحی بر مبنای قابلیت اعتماد و طراحی یقین اندیشانه وابسته به توابع هدف طراحی می باشد. شعاعی و همکاران [۱۰] تحلیل قابلیت اعتماد سازه های مجهز به میراگر مایع تنظیم شده را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در شدت زلزله، جرم، سختی و میرایی سازه و مشخصات تسلیم مصالح مورد مطالعه قرار دادند که معیار شکست و خرابی بر مبنای دریافت طبقه تعریف شده است. دبارما^۹ و همکاران [۱۱] مطالعه ی پارامترهای بهینه میراگر مایع تنظیم شده^{۱۰} تحت تحریک تصادفی زلزله را هدف مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند هرچه میزان عدم قطعیت بیش تر می شود مزیت استفاده از TLCD کاهش یافته و مقرون به صرفه بودن استفاده از آن در کاهش ارتعاشات سازه پابرجا می ماند. هم چنین در نظر نگرفتن عدم قطعیت ها سبب می شود عملکرد TLCD دست بالا برآورد شده و طرح نایمنی حاصل گردد. جرم، سختی، ضریب میرایی، جابجایی تسلیم، نسبت سختی بعد از تسلیم به سختی پیش از تسلیم، طول مخزن، ارتفاع مایع درون مخزن و PGA زلزله به عنوان

دقیق این پارامترها وجود دارد که سبب می شود کنترلر طراحی شده بر مبنای این مشخصات نیز عدم قطعیت هایی داشته باشد. در ادامه پیشینه ی مطالعات انجام شده در زمینه ی قابلیت اعتماد سیستم های کنترل و ترکیب، ادغام و همگام سازی سیستم های پایش سلامت و کنترل ارتعاشات مرور می گردد. طراحی بر مبنای قابلیت اعتماد جهت کاربردهای کنترل غیرفعال سازه ها توسط پاپادیمتریو^۱ و همکاران [۱] برای نخستین بار ارائه شده است. جنسن^۲ و سپالودا^۳ [۲] در سال ۲۰۱۲ طرح بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سازه های تحت کنترل غیرفعال را مطالعه نمودند. منابع عدم قطعیت در این پژوهش شامل عدم قطعیت در مدل سازه (ظرفیت باربری) به همراه عدم قطعیت در زلزله های وارده به سازه (بارگذاری) بودند. دو قاب بتنی سه بعدی مجهز به میراگر فلزی U شکل به عنوان مثال های عددی مورد بررسی قرار گرفتند. در مطالعه ای که در سال ۲۰۱۴ توسط جنسن و کوسانویک^۴ [۳] انجام گرفته اثرات تحریکات نزدیک به گسل بر عملکرد و طراحی بهینه ی سیستم های جداساز پایه ای بر مبنای قابلیت اعتماد بررسی شده است. تحریک های وارده به صورت احتمالاتی تعریف گردیده و از جداسازهای تشکیل یافته از المان های لاستیکی بهره گرفته شده است. دو قاب ساختمانی سه بعدی بزرگ مقیاس برای بررسی های عددی تحلیل شده و نتایج نشان داده اند که تاثیر زلزله های نزدیک گسل بر هزینه، عملکرد و قابلیت اعتماد سیستم های جداساز چشمگیر بوده و باید در طراحی این سیستم ها در نظر گرفته شود. هم چنین باید عملکرد سازه و سیستم جداساز به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد. فرهمندآذر و همکاران [۴] یک روش تحلیل قابلیت اعتماد بر مبنای قابلیت اعتماد مرتبه ی اول و روش سطح پاسخ برای مسائل با ابعاد بالا ارائه دادند که شاخص قابلیت اعتماد، محتمل ترین نقطه و احتمال خرابی سیستم های نامشخص را با کارایی و دقت بیش تری نسبت به شبیه سازی مونت کارلو، قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش سطح پاسخ محاسبه می کند. سازه ی مجهز به سیستم کنترل غیرفعال (سیستم جداسازی پایه به همراه میراگر ستون مایع) تحت اثر زلزله های غیرقطعی نزدیک گسل با منشا، نوع و میزان عدم قطعیت متفاوت جهت بررسی تاثیر روش پیشنهادی بر عملکرد و قابلیت اعتماد سیستم های کنترل سازه و سازه های کنترل شده مورد مطالعه قرار گرفته است. بابایی پور و خسروی [۵] یک قاب بتنی ۴ طبقه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک را ابتدا با نرم افزار OpenSEES مدل کرده و سپس با قابلیت اعتماد مورد بررسی

5. You

6. Li

7. DPIM

8. Kim

9. Debbarma

10. Tuned Liquid Column Damper (TLCD)

1. Papadimitriou

2. Jensen

3. Sepúlveda

4. Kusanovic

در مدل سازه و شتاب زمین تمرکز کرده‌اند. آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص Borgonovo برای اندازه‌گیری اثرات منابع دارای عدم قطعیت بر پاسخ‌های سازه اصلی انجام شده است. تحلیل قابلیت اعتماد با استفاده از MCs و نمونه‌برداری اهمیت احتمالات شکست را در مناطق مختلف خطر لرزه‌ای، ظرفیت محرک‌ها و سطوح عملکرد لرزه‌ای تخمین زده‌اند. این مطالعه نشان داده است که عدم قطعیت در PGA شتاب زمین و سختی طبقه به‌طور قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد و تأثیر ناچیزی بر حداکثر نیروی کنترل تقاضا دارد. جلالی و شریعتمدار [۲۰۲۳] [۲۰] تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های کنترل شده با استفاده از یک کنترلر منطق فازی احتمالاتی (PFLC) و LQR را مطالعه نمودند. در این پژوهش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های یک و چند طبقه با آرایش مختلف تاندون‌ها استفاده شده است.

مساله‌ی پایش سلامت و شناسایی سیستم هم‌اکنون مرحله‌ی مطالعات تکمیلی را در جهان طی می‌نماید و با بهبود دقت روش‌های شناسایی، طراحی سیستم‌های جاذب انرژی و مستهلک‌کننده ارتعاشات مطمئن‌تر و با خطای کم‌تری صورت خواهد پذیرفت. با الحاق ابزار مانیتورینگ به سازه امکان رصد مستمر وضعیت سازه و ثبت تغییرات در مشخصات دینامیکی آن که می‌تواند نشانی از آسیب باشد میسر شده و سطح هوشمندسازی سازه‌ها ارتقا یافته است. شناسایی دقیق و پیوسته سیستم سازه‌ای تحت ارتعاشات اجباری یا محیطی می‌تواند کاربردهای بسیاری در کنار کشف خرابی داشته باشد. یکی از این کاربردها تدقیق و همگام‌سازی سیستم کنترل ارتعاشات با روش‌های شناسایی است. حسگرهای مورد نیاز برای پایش سلامت و کنترل ارتعاشات می‌توانند ادغام شده و ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌ی هوشمندسازی سازه، مشکل حضور عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازه را نیز تا حدی پوشش دهند.

در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی بازوی مکانیکی با پیوند انعطاف‌پذیر [۲۱] الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تابع انتقال و طرح یک کنترلر براساس تابع انتقال شناسایی شده استفاده شده است. بهینه‌سازی تمام پارامترهای کنترل‌کننده با کمینه‌سازی نرُم حلقه بسته H_{∞} به کمک الگوریتم ژنتیک انجام یافته و در نهایت اثربخشی کنترلر طراحی شده جهت کاهش ارتعاش با استفاده از دو مود سیستم شناسایی شده براساس نتایج آزمایشگاهی تایید شده است. مرادمند و همکاران [۲۲] تلفیقی از روش شناسایی آسیب با کنترل نیمه‌فعال ارائه دادند. سازه‌ی مجهز به سنسورهای تغییر مکان و سرعت و میراگر MR با پارامترهای دینامیکی مشخص در دسترس بوده و سازه‌ی

متغیرهای دارای عدم قطعیت در این پژوهش تعریف شده‌اند. خان‌سفید و واعظ‌زاده [۱۲] جهت تعیین مشخصات بهینه میراگرهای ویسکوز با روش احتمالاتی نمونه‌گیری، یک ساختمان فولادی ۶ طبقه با رفتار غیرخطی را به ازای شاخص‌های عملکرد متنوع که ترکیبی از شتاب و گریز طبقات است برای سطوح مختلفی از ریسک‌پذیری به‌صورت بهینه طراحی نمودند. در این مطالعه شاخص قابلیت اعتماد به‌عنوان معیاری از میزان ریسک‌پذیری استفاده شده و در نهایت روشی مبتنی بر آنالیز قابلیت اعتماد جهت طراحی میراگر ویسکوز ارائه گردیده است. آنالیز قابلیت اعتماد قاب فولادی ۵ طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی و شاخص قابلیت اعتماد برای دو حالت با و بدون میراگر توسط دهنوی و خسروی [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته است. محبی و همکاران [۱۴] یک قاب برشی ده طبقه با میراگر جرمی تنظیم‌شده در طبقه‌ی فوقانی تحت زلزله‌ی ال‌سنترو را به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه نموده و آنالیز حساسیت قابلیت اعتماد را بر روی آن انجام دادند. تمامی پارامترهای سازه و میراگر متغیر تصادفی دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته است. شریعتمدار و بهنام‌راد [۱۵] از روشی موسوم به شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای برای محاسبه احتمال گسیختگی و قابلیت اعتماد سه سازه‌ی برشی سه طبقه و یک دهانه با پارامترهای دارای عدم قطعیت مجهز به آرایش‌های مختلفی از مکانیزم تاندون فعال استفاده نموده‌اند. عسکری و شیرازی [۱۶] قابلیت اعتماد سیستم‌های کنترل فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال را تحت تاثیر عامل فاصله از گسل (عدم قطعیت بار خارجی) مورد مطالعه قرار دادند. اثر عدم قطعیت‌های طراحی و قابلیت اعتماد پل‌های مجهز به میراگر توسط پویان و همای [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۸] طرح کنترل نیمه‌فعال را با در نظر گرفتن رواداری خرابی برای ابزار نیمه‌فعال (میراگر MR) توسعه دادند. این کنترلر هنگام خرابی میراگر، جبران‌ساز خروجی را وارد معادلات می‌نماید تا شرایط عدم عملکرد میراگر را در نظر بگیرد. مدل پل پیوسته مجهز به مکانیزم MR تحت رکوردهای مصنوعی زلزله با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال برای پارامترهای آن کنترل شده و قابلیت اعتماد مجموعه‌ی کنترل محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که طرح کنترل نیمه‌فعال با در نظر گرفتن آسیب میراگر هم‌چنان می‌تواند باعث شود که سازه پل در سیستم کنترل دارای خطا به اهداف مورد انتظار دست یابد. حسینیایی و همکاران ۲۰۲۲ [۱۹] بر ارزیابی احتمالاتی کنترل فعال سازه با در نظر گرفتن عدم قطعیت

1. Zhang

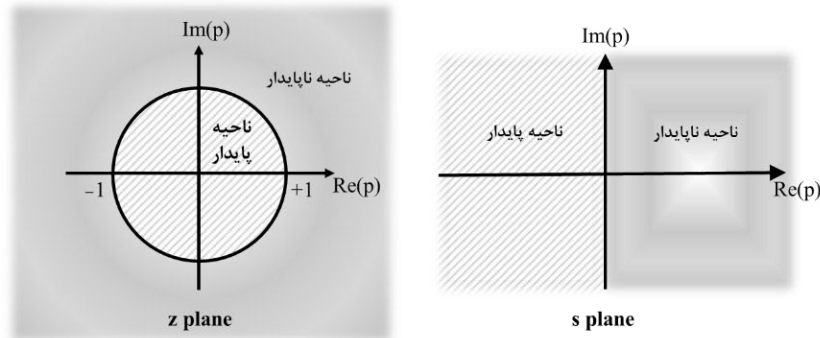
ایده اصلی این مطالعه استفاده از یک مجموعه حسگر مشترک برای شبکه مانیتورینگ سیستم و کنترل ارتعاشات است. با این عمل می‌توان ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌های هوشمندسازی سازه‌ها با تدقیق روش‌های شناسایی، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازه را مرتفع نمود و به‌طور مستمر مشخصات سازه را تحت ارتعاشات محیطی استخراج کرده و در طرح کنترل به کار گرفت. دقت کنترل‌کننده مبتنی بر شناسایی با دقت شناسایی ارتباط مستقیم دارد. در این مطالعه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازه و تحریک خروجی، نخست سیستم کنترل اولیه طراحی شده و در ادامه براساس پاسخ‌های ثبت‌شده، سازه با روش زیرفضای تصادفی شناسایی می‌شود تا کنترل دیگری بر مبنای شناسایی طراحی گردد. با تعریف تابع خرابی بین پارامترهای دو کنترلر، تخمینی از قابلیت‌اعتماد سیستم کنترل با شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌دست می‌آید. در این راستا ابتدا اصول شناسایی سیستم با روش زیرفضای تصادفی ارائه شده و در ادامه فرآیند استخراج پارامترهای سیستم مرتبه‌ی دو از معادلات مرتبه‌ی اول فضای حالت و انتقال سیستم شناسایی شده به مختصات فیزیکی مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش بعد اصول کنترل فعال ارتعاشات سازه با روش LQR بیان شده و معیارهایی جهت ارزیابی عملکرد سیستم کنترل معرفی می‌گردد. مفاهیم شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مطالعه‌ی قابلیت‌اعتماد بخش بعدی پژوهش را تشکیل می‌دهد. اتصال دو سیستم شناسایی و کنترل ارتعاشات در ادامه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با تعریف یک مدل عددی از قاب برشی نتایج شبیه‌سازی‌ها گزارش می‌شود و مقاله با تفسیر و جمع‌بندی نتایج خاتمه می‌پذیرد.

۲- شناسایی سیستم‌های سازه‌ای

شناسایی؛ تعیین مشخصات دینامیکی سیستم به‌ویژه فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و نسبت‌های میرایی است که عموماً براساس اندازه‌گیری‌های مبتنی بر شبکه‌ی حسگرهای پایش سلامت انجام می‌پذیرد. براساس اطلاعات مودال محاسبه‌شده می‌توان وضعیت سلامت، خسارات احتمالی و درجه ایمنی سازه را ارزیابی نمود. ثبت داده‌های ارتعاشی سیستم مبنای دسته‌ای از روش‌های شناسایی را شکل می‌دهد که روش‌های خروجی-تنها نامیده می‌شوند. در این میان استفاده از پاسخ سازه به ارتعاشات محیطی به سبب عدم نیاز به ابزار پیچیده جهت تحریک سازه و عدم توقف سرویس‌دهی سازه محبوبیت بیش‌تری یافته است. توسعه‌ی یک روش خروجی-محور به‌صورت آفلاین علاوه بر کاربردهای شناسایی آسیب

دیگری با دریافت مقادیر تغییرمکان و سرعت سازه‌ی اولیه در مدت زمان کوتاهی با آن هماهنگ می‌شود. هدف مساله تعیین سختی، میرایی و نیروی کنترل سازه‌ی ثانویه است تا پاسخ دو سازه با یکدیگر هماهنگ گردد. با نوشتن معادله‌ی پایداری لیاپانوف و اعمال شرط پایداری، مقادیر سه پارامتر مجهول محاسبه شده و جهت شناسایی آسیب و صدور فرمان کنترلی رصد می‌شوند. عزیزی و همکاران [۲۳] عملیات کنترل هم‌زمان با شناسایی آسیب را در قالب مساله‌ی کنترل نیمه‌فعال با سختی متغیر ارائه داده‌اند که سختی میراگر به‌صورت لحظه‌ای براساس پارامترهای سازه و به‌عبارتی آسیب رخ داده تنظیم می‌شود. نادری و همکاران [۲۴] با در دست داشتن تحریک اعمالی به سازه، مشخصات دینامیکی سازه و پاسخ دریافتی از حسگرها یک روش کنترل تطبیقی مبتنی بر مدل ارائه دادند که اختلاف مدل ریاضی (که دارای نیروی کنترلی متناسب با سختی و میرایی سازه است) و مدل سازه‌ی سالم را از طریق تخمین سختی و میرایی حداقل نماید. نسترویچ^۱ و همکاران [۲۵] سیستم شناسایی مدل مبتنی بر زیرفضا و طراحی کنترل‌کننده‌ی فعال را بر روی تیر کنسول هوشمند پیزوالکتریک پیاده‌سازی نمودند. کارایی روش ارائه شده براساس نتایج آزمایشات تایید شده و نشان می‌دهد کاهش ارتعاشات به میزان بسیار بالایی نه تنها در مقایسه با حالت کنترل‌نشده، بلکه نسبت به نتایج مطالعات قبلی رخ داده است. الگوریتم‌های کنترلی، مانند تخصیص قطب، PID و LQR، با فرض شرایط ایده‌آل، معمولاً بر ویژگی‌های دینامیکی اولیه سازه‌های سالم تکیه می‌کنند. با این حال، بارهای طبیعی و رخداد آسیب‌ها می‌تواند این ویژگی‌ها را در طول عمر سازه تغییر دهد و به‌طور بالقوه منجر به نیروهای کنترلی نادرست شود. برای پرداختن به این چالش، یک تکنیک شناسایی متناوب مبتنی بر مویک در ترکیب با روش تخصیص قطب [۲۶] معرفی شده است. ابراهیمی و همکاران ۲۰۲۳ [۲۷] چارچوبی برای شناسایی قاب‌ها در حضور عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری و پارامترها ارائه نمودند. روش‌های EKF^2 و UKF^3 برای ارزیابی معادلات سیستم غیرخطی و تخمین پارامترهای مجهول استفاده شده است. به کمک آنتروپی اطلاعات عدم قطعیت پارامترهای مدل بررسی شده و روش‌ها بر روی یک قاب خمشی ۴ طبقه با عدم قطعیت‌های ذاتی ارزیابی شدند. نتایج همسو برای الگوریتم‌های UKF و EKF گزارش شده است. UKF در شناسایی سیستم‌های غیرخطی و تخمین پارامترهای ناشناخته، بهتر از EKF عمل کرده است.

1. Nestorović
2. Extended Kalman Filter
3. Unscented Kalman Filter



شکل ۱. ناحیه‌ی پایداری در سیستم‌های گسسته (z-plane) و پیوسته زمانی (s-plane)

Fig. 1. The stability range for discrete (z-plane) and continuous-time (s-plane) systems

و بردار حالت، n تعداد درجات آزادی و A_c ، B_c و E_c ماتریس سیستم پیوسته، ماتریس تاثیر کنترل (با $r \leq n$ محرک که) و ماتریس تاثیر تحریک هستند. بردار خروجی $Y(t)$ و C_c و D_c به ترتیب ماتریس خروجی سنسور و ماتریس‌های موقعیت شتاب‌سنج‌ها و دیگر انواع سنسورها هستند.

در نمایش فضای حالت سیستم، قطب‌ها $(p_{1,2})_i$ برابر مقادیر ویژه ماتریس سیستم هستند و هر دو مقدار فرکانس طبیعی (ω_{d_i}) و نسبت میرایی (ζ_i) را طبق رابطه‌ی (۳) در خود جای می‌دهند. جهت پایداری سیستم قطب‌ها باید در مکان مشخصی از دستگاه مختصات مختلط قرار بگیرند. این مکان برای سیستم‌های پیوسته در سمت چپ محور مختلط قرار دارد و برای سیستم‌های گسسته دایره‌ای به مرکزیت مبدا مختصات و شعاع واحد است (شکل ۱). نرخ میرایی مودال و فرکانس‌های طبیعی میرا شده طبق رابطه (۴) از بخش‌های حقیقی $(\Re)$ و موهومی $(\Im)$ قطب‌های سازه محاسبه می‌شوند.

$$(p_{1,2})_i = -\zeta_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}, \quad j = \sqrt{-1} \quad (3)$$

$$\omega_{d_i} = \sqrt{(\Re(p_i))^2 + (\Im(p_i))^2}, \quad \zeta_i = (\Re(p_i)) / \left(\sqrt{(\Re(p_i))^2 + (\Im(p_i))^2} \right) \quad (4)$$

هدف از شناسایی، توسعه مدل سیستم براساس پاسخ‌های آن است.

می‌تواند در مسائل مربوط به کنترل ارتعاشات نیز مورد استفاده قرار گیرد. ارتباط میان این دو حوزه از علم دینامیک می‌تواند در طراحی سیستم کنترل مبتنی بر اطلاعات دریافتی از چهارچوب‌های شناسایی برای سازه‌های موجود که تخمین صحیحی از پارامترهای دینامیکی آن‌ها در دسترس نیست موثر باشد. اگر معادلات دینامیکی حرکت سازه در فضای پیوسته زمانی به صورت رابطه‌ی (۱) بیان شود [۲۸]، رابطه‌ی (۲) بیان فضای حالت این معادلات است [۲۹].

$$M_{n \times n} \ddot{X}_{n \times 1}(t) + C_{n \times n} \dot{X}_{n \times 1}(t) + K_{n \times n} X_{n \times 1}(t) = B_{n \times r} U_{r \times 1}(t) + E_{n \times 1} \ddot{x}_{g \times 1}(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{X}(t) \\ \ddot{X}(t) \end{Bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}}_{A_c} \underbrace{\begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}}_{Z(t)} \\ &+ \underbrace{\begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{Bmatrix}}_{B_c} U(t) + \underbrace{\begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{Bmatrix}}_{E_c} \ddot{x}_g(t) \quad (2) \\ \dot{Z}(t) &= A_c Z(t) + B_c U(t) + E_c \ddot{x}_g(t) \\ Y(t) &= C_c Z(t) + D_c U(t) \end{aligned}$$

M ، C و K ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، $X(t)$ ، $\dot{X}(t)$ و $\ddot{X}(t)$ نشانگر بردارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب، $\ddot{x}_g(t)$ ، $U(t)$ و $\{Z(t)\}_{2n \times 1}$ به ترتیب بردارهای شتاب زمین، نیروی کنترل

مناسبی در مهار نویزهای موجود در پاسخ‌های ثبت شده از خود نشان می‌دهد و از معایب این روش آن است که برای شناسایی مودهای کامل سازه نیاز به نصب حسگر در تمام درجات آزادی سیستم می‌باشد. محدوده‌ی خطی برای رفتار سازه، تغییرناپذیری مشخصات دینامیکی سازه با زمان (سیستم LTI) و عدم وجود همبستگی میان پاسخ سازه و نیروهای ورودی سه فرض حاکم بر معادلات روش SSI را شکل می‌دهند. خروجی SSI، ماتریس سیستم کمینه مستخرج از پارامترهای مارکوف سیستم شامل تمام ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی است. پاسخ ناشی از ارتعاشات محیطی، تحریکات واداشته یا تحریکات محیطی شدید می‌تواند بدین منظور به کار گرفته شود.

فرمول‌بندی روش SSI مبتنی بر معادلات دیفرانسیل مرتبه اول فضای حالت است. با توجه به داده‌برداری گسسته در مسائل عملی، معادلات به فضای گسسته زمانی نگاشت می‌شوند. اگر معادلات فضای حالت سیستم پیوسته (رابطه (۲)) گسسته‌سازی شوند:

$$Z_{k+1} = A_d Z_k + B_d U_k + w_k, \quad Z_k = Z(k\Delta t) \quad (5)$$

$$A_d = e^{A_c \Delta t}, \quad B_d = \left(\int_0^T e^{A_c \tau} d\tau \right) B_c \quad (6)$$

$$Y_k = C_d Z_k + D_d U_k + v_k \quad (7)$$

A_d ، B_d ، C_d و D_d معرف فرم گسسته ماتریس‌های فضای حالت و $\Delta t = T/k$ طول گام زمانی داده‌برداری می‌باشند. Z_k ، U_k و Y_k به ترتیب مقادیر نیروی کنترل، حالت‌ها و خروجی‌ها در گام k -ام هستند. ورودی‌ها به سبب ناشناخته بودن به‌عنوان نویز فرآیند (w_k) و نویز اندازه‌گیری (v_k) در معادلات اعمال می‌شوند. مراحل انجام شناسایی با SSI را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه نمود:

۱. جمع‌آوری داده‌ها از شبکه‌ی حسگرهای پایش سلامت، تشکیل ماتریس هنکل (Y_H) و تقسیم آن به دو بلوک آینده (future) و گذشته (past).

روش‌های حوزه‌ی زمان همچون SSI توانایی رصد تغییرات در پاسخ ارتعاشی و استخراج ویژگی‌های موثر بر پاسخ را براساس داده‌های از پیش ثبت‌شده دارند و می‌توانند یک چهارچوب موثر جهت شناسایی و کاربردهای دیگر نظیر طراحی کنترلرهای ارتعاشی فراهم کنند [۳۰]. در ادامه مبانی روش زیرفضای تصادفی بیان می‌گردد.

۲-۱- روش زیرفضای تصادفی (SSI)

روش زیرفضای تصادفی یکی از روش‌های استخراج اطلاعات مودال سازه است و به دنبال راهی برای شناسایی مدل فضای حالت تنها بر مبنای داده‌های خروجی می‌باشد. این روش نخستین بار در سال ۱۹۹۶ توسط ون اورشی و همکاران [۳۱، ۳۲] جهت شناسایی ماتریس‌های سیستم مرتبه اول در فضای حالت ارائه شده است. اساس SSI بر تشکیل ماتریس‌های مختلف هنکل از پاسخ‌های برداشت‌شده از سازه که تعدادی از سطر و ستون‌های آن حذف یا جابجا گردیده‌اند، در حوزه‌ی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس‌های هنکل از پاسخ‌های سازه، تحقق‌های مختلف از سیستم شناسایی شده و براساس تئوری اساسی تحقق، کمینه‌ترین تحقق متناظر با حداقل مرتبه سیستم شناسایی می‌شود. مطابق تئوری تحقق و اصل تحقق کمینه بی‌شمار تحقق با پاسخ یکسان وجود دارد و تنها تحقق‌هایی می‌توانند پاسخ مساله باشند که قابل افراز به زیرماتریس و کاهش مرتبه نباشند. مزیت SSI نسبت به روش‌های دیگر پارامتریک بودن آن است و نیازی به تشخیص شکل مودها و سایر مشخصات مودال طی آنالیز نیست. در سال ۲۰۰۰ پیترز [۳۳] در رساله‌ی دکتری خود از SSI برای کاربردهای مهندسی عمران بهره گرفته است. نسخه‌ی SSI-COV که از کوواریانس‌های پاسخ زمانی استفاده می‌کند اکنون توسعه یافته و کوواریانس دویه‌دوی تعداد محدودی از پاسخ‌ها را محاسبه می‌کند [۳۳، ۳۴]. مول و همکاران [۳۵] از SSI در شناسایی آسیب سازه‌ی پل بهره گرفته و کارایی روش پیشنهادی را تحت دو سناریوی خرابی اثبات نمودند.

روش‌های شناسایی زیرفضا در شناسایی سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان کارا می‌باشند. در این روش لازم است که سیستم به صورت مدلی با چندین مرتبه شناسایی شود؛ تا با استفاده از دیاگرام‌های تثبیت‌کننده بتوان مودهای سازه‌ای واقعی را از مودهای نادرست تشخیص داد. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از پارامترهای مارکوف در فرآیند شناسایی سیستم شباهت‌های زیادی با الگوریتم تحقق ویژه (ERA) دارد. SSI عملکرد

$$\hat{\Gamma} = US^{\frac{1}{2}} \quad (۱۲)$$

$$\hat{X}_0 = S^{\frac{1}{2}} V^T \quad (۱۳)$$

ماتریس‌های محاسبه‌شده مشاهده‌پذیری $\hat{\Gamma}$ و حالت‌های کالمن $\hat{X}_0$ منحصر به فرد نیستند. لذا تحقق‌های مختلفی از A_d و D_d وجود دارند که یک ماتریس مشاهده‌پذیری را تشکیل می‌دهند و در رابطه‌ی $O = \Gamma X_0$ صدق می‌کنند.

۷. محاسبه‌ی ماتریس‌های A_d و D_d . D_d به صورت مستقیم و A_d از رابطه‌ی $\hat{\Gamma} A_d = \hat{\Gamma}$ به دست می‌آید. $\hat{\Gamma}$ و $\hat{\Gamma}$ ماتریس‌های ستونی هستند که به ترتیب یک بلوک از پایین و بالای آن حذف شده است. پس از محاسبه‌ی A_d و D_d در فضای گسسته، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه سیستم پیوسته زمانی (با میرایی زیر بحرانی) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\left. \begin{aligned} A_d &= \Psi_d \Lambda_d \Psi_d^{-1} \\ A_c &= \Psi_c \Lambda_c \Psi_c^{-1} \end{aligned} \right\} \& \Psi_c = D_d \Psi_d \quad (۱۴)$$

عناصر قطری Λ_c و Λ_d به ترتیب حاوی مقادیر ویژه در حالت پیوسته و گسسته‌ی زمانی هستند و ماتریس‌های Ψ_c و Ψ_d اشکال مودی را دربردارند. روش‌های زیرفضا در تخمین فرکانس‌های سازه دقت قابل قبولی دارند ولی در شناسایی مقادیر نسبت میرایی قابلیت اعتماد پایینی از خود نشان می‌دهند. برای شناسایی مرتبه سیستم از نمودار تثبیت (پایداری) استفاده می‌شود. تعداد فرکانس‌هایی که در تمام مرتبه‌های سیستم تکرار شده باشند فرکانس‌های سازه بوده و مرتبه‌ی سیستم دو برابر تعداد فرکانس‌های شناسایی شده است. گزینش و انتخاب پارامترهای مناسب روش SSI جهت افزایش دقت نتایج شناسایی در مرجع [۳۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش مشخصات مودال سازه مورد مطالعه با روش زیرفضای تصادفی تعیین شده و با تبدیل سیستم گسسته شناسایی شده به سیستم پیوسته معادل، ماتریس‌های دینامیکی سازه استخراج می‌شود.

۳- گسسته‌سازی سیستم‌های پیوسته‌ی زمانی

توسعه تکنولوژی دیجیتال در چند دهه اخیر عملکرد سیستم‌ها را با

$$Y_H = \begin{bmatrix} Y_{Hp} \\ Y_{Hf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{s-2i+1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_{s-2i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{s-i} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{s-i+1} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{s-i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_s \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \text{past} \\ \text{future} \\ \downarrow \end{matrix} \quad (۸)$$

$$Y_H((k-1) \times l + 1 : k \times l, :) = Y(:, k : k + j - 1) \\ \text{for } k = 1 : i \\ s = j + 2i - 1$$

۳. انتخاب تعداد سطرهای ماتریس هنکل ($2i$) توسط کاربر انجام می‌گیرد و باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. تعداد ستون‌های ماتریس هنکل ($j = s - 2i + 1$) نیز برابر با طول داده‌ها است.

۴. محاسبه‌ی ماتریس تصویر (O) که میانگین شرطی از ماتریس بلوکی هنکل گذشته و آینده است.

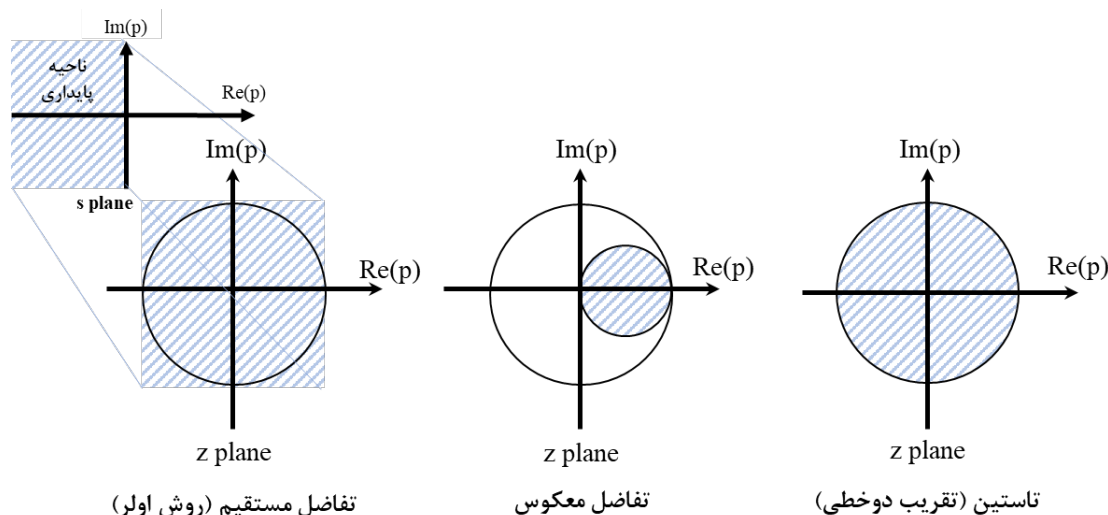
$$O = E(Y_{Hf} | Y_{Hp}) = Y_{Hf} Y_{Hp}^T (Y_{Hp} Y_{Hp}^T)^{-1} Y_{Hp} \quad (۹)$$

۵. استخراج ماتریس مشاهده‌پذیری (Γ) از ماتریس تصویر. X_0 حالت‌های کالمن در گام زمانی صفر هستند.

$$O = \Gamma X_0, \\ \Gamma = [D_d \quad D_d A_d \quad D_d A_d^2 \quad \cdots \quad D_d A_d^{i-1}]^T \quad (۱۰)$$

۶. محاسبه‌ی ماتریس مشاهده‌پذیری ($\hat{\Gamma}$) براساس تجزیه‌ی مقادیر تکین ماتریس تصویر (O).

$$O = USV^T \quad (۱۱)$$



شکل ۲. نگاشت ناحیه پایدار فضای پیوسته‌ی زمانی به فضای گسسته با روش‌های مختلف گسسته‌سازی

Fig. 2. Mapping continuous-time to discrete-time stable region using various discretization methods

(شکل ۲). به همین دلیل این دو روش امروزه برای گسسته‌سازی از محبوبیت کمتری برخوردارند. جدول ۱ روابط تبدیل سیستم پیوسته به گسسته را با روش‌های مختلف ارائه می‌دهد. T_s گام زمانی نمونه‌برداری است.

بنابراین می‌توان گفت نحوه گسسته‌سازی سیستم پیوسته یا دستیابی به سیستم پیوسته پس از شناسایی سیستم گسسته به‌ویژه زمان کار با سیستم‌های دیجیتال بسیار موثر می‌باشد. با توجه به شکل ۲ برای تبدیل سیستم زمان پیوسته به زمان گسسته و بالعکس تقریب تاستین گزینه مناسبی است؛ زیرا دقت مناسبی ارائه می‌کند. لذا در این مطالعه پس از شناسایی ماتریس سیستم گسسته از روش تاستین برای محاسبه‌ی ماتریس سیستم پیوسته جهت کاربرد در اهداف کنترل سازه استفاده می‌شود.

۴- استخراج ماتریس‌های مشخصات دینامیکی سازه از ماتریس‌های فضای حالت

در مدل فضای حالت داده‌های ورودی و خروجی از طریق یک دسته کمیت واسطه به نام حالت‌های سیستم به هم مرتبط می‌گردند. در صورتی که حالت‌های سیستم مشتمل بر تغییر مکان‌ها و سرعت‌های درجات آزادی مختلف باشد، مدل فضای حالت تشکیل شده، مدل فضای حالت در مختصات فیزیکی نامیده می‌شود و المان‌های این مدل از ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی که با روابط نسبتاً ساده جبری با هم در ارتباط هستند، تشکیل می‌گردد. اما در حالت کلی بردار حالت بدون اینکه روابط ورودی-خروجی

مزایای بسیاری مواجه کرده است. از جمله مزایای سیستم‌های دیجیتال در برابر کنترل‌های آنالوگ می‌توان به ارتقای عملکرد، انعطاف‌پذیری بهبودیافته و توانایی مانیتورینگ سیستم اشاره کرد. شیه^۱ و همکاران [۳۷] روش‌هایی را برای تبدیل مدل فضای حالت زمان پیوسته به مدل فضای حالت زمان گسسته ارائه نمودند. در این مطالعه یک روش مبتنی بر سری هندسی بهبودیافته برای تبدیل مدل پیوسته به مدل گسسته معادل ارائه شده است و با روش‌های برش مستقیم و کسر مسلسل ماتریسی مورد مقایسه قرار گرفته است.

روش‌های تبدیل با هدف نگاشت فضای پایدار در حالت پیوسته به فضای پایدار حالت گسسته فرمول‌بندی می‌شوند. روش تاستین به‌عنوان پرکاربردترین روش گسسته‌سازی به‌ویژه در مباحث کنترل و شناسایی سیستم می‌باشد؛ زیرا سیستم گسسته‌سازی شده با این روش تا فرکانس‌های بالاتری رفتار مشابه تابع پیوسته از خود نشان می‌دهد. این روش نیم‌صفحه‌ی سمت چپ صفحه لاپلاس (s-plane) را به درون دایره‌ی واحد در فضای مختلط (z-plane) نگاشت می‌کند. تفاضل مستقیم و معکوس نیز دو روش گسسته‌سازی هستند که اصول آن‌ها مشابه یکدیگر و براساس اصل انتگرال‌گیری است. روش تفاضل مستقیم یا اولر ممکن است در برخی سیستم‌ها باعث ناپایداری شود و روش تفاضل معکوس در فرکانس‌های پایین کاربردی است و تمام فضای پایدار را در اختیار سیستم قرار نمی‌دهد

جدول ۱. ارتباط میان پارامترهای سیستم گسسته و پیوسته زمانی براساس روش‌های مختلف گسسته‌سازی

Table 1. The relationship between the continuous- and discrete-time system parameters using various discretization methods

ماتریس	تفاضل مستقیم (اولر)	تفاضل معکوس	تاستین (تقریب دوخطی)
A_d	$I + A_c T_s$	$(I + A_c T_s)^{-1}$	$(I - A_c T_s / 2)^{-1} (I + A_c T_s / 2)$
B_d	$B_c T_s$	$(I + A_c T_s)^{-1} B_c T_s$	$(I - A_c T_s / 2)^{-1} B_c T_s$
C_d	C_c	$C_c (I + A_c T_s)^{-1}$	$C_c (I - A_c T_s / 2)^{-1}$
D_d	D_c	$D_c + C_c (I + A_c T_s)^{-1} B_c T_s$	$D_c + C_c (I - A_c T_s / 2)^{-1} B_c T_s / 2$

استخراج نماید. جهت یکتایی پاسخ به‌دست آمده نیاز است تمام درجات آزادی به سنسور مجهز باشند و هر ترکیبی از اندازه‌گیری تغییرمکان، سرعت و شتاب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگر سنسورهای تغییرمکان، سرعت و شتاب در تمام درجات آزادی مستقر باشند، رابطه‌ی (۱۵) معرف خروجی‌ها خواهد بود. در مختصات فیزیکی، ماتریس‌های C_p ، C_v و C_a (ماتریس ضرایب مربوط به اندازه‌گیری پاسخ‌های تغییرمکان، سرعت و شتاب) معلوم بوده و طبق تئوری کنترل مدرن معادلات فضای حالت سیستم به شکل رابطه (۱۶) می‌باشد که شکل مناسب ماتریس‌های C_c و D_c بسته به نوع حسگرها اختیار می‌شود.

$$y(t) = \begin{bmatrix} C_p X(t) \\ C_v \dot{X}(t) \\ C_a \ddot{X}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= A_{c_{2m \times 2n}} Z_{2n \times 1}(t) + B_{c_{2n \times r}} U(t) \\ y(t) &= C_{c_{m \times 2n}} Z(t) + D_{c_{m \times r}} U(t) \end{aligned} \quad (16)$$

در حالت در دسترس بودن کامل مجموعه‌ی تغییرمکان‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها به ترتیب داریم:

$$C_c = [C_p \quad 0_{n \times n}], \quad D_c = 0_{n \times r} \quad (17)$$

$$C_c = [0_{n \times n} \quad C_v], \quad D_c = 0_{n \times r} \quad (18)$$

را تحت‌الشعاع قرار دهد می‌تواند در هر سیستم مختصات دلخواهی بیان شود. این مساله در هنگام شناسایی سیستم رخ می‌دهد. تحقق فضای حالت شناسایی شده لزوماً در مختصات فیزیکی مساله نبوده و مدل شناسایی شده اغلب سیستمی در مختصات تبدیل‌یافته را ارائه می‌دهد که ماتریس‌های مشخصات سازه در حالت پیچیده‌ای درهم‌تنیده شده‌اند. در این حالت جهت دستیابی به پارامترهای فیزیکی سیستم، نخست باید مدل فضای حالت به مختصات فیزیکی معنی‌دار انتقال یابد. اغلب روش‌های موجود در این زمینه برای دسترسی به مختصات فیزیکی از حل مساله‌ی مقدار ویژه بهره می‌گیرند. بنابراین یافتن راهکاری که به‌صورت خطی و مستقیم نیل به این هدف را تسهیل نماید و حل غیرخطی مساله مقدار ویژه را از فرآیند محاسبات حذف نماید مطلوب است. در صورت استفاده از نتایج روش‌های شناسایی سیستم، مساله‌ی دستیابی به ماتریس‌های دینامیکی در دو گام انجام می‌پذیرد؛ ابتدا ماتریس‌های فضای حالت به مختصات فیزیکی انتقال داده می‌شوند و سپس مشخصات دینامیکی از ماتریس‌های سیستم در مختصات فیزیکی استخراج می‌گردند. که^۱ و همکاران و فان و لانگمن^۲ [۳۸، ۳۹] یک راه‌حل خطی برای مساله‌ی استخراج ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی یک سیستم از مدل فضای حالت آن ارائه دادند که برخلاف رویکردهای غیرخطی موجود، به حل مساله‌ی مقدار ویژه نیاز ندارد. راه‌کار خطی ارائه شده از ضرب کرونکر و عملگر Stack بهره می‌گیرد و طی فرآیندی دو مرحله‌ای ابتدا ماتریس تبدیلی محاسبه می‌شود تا مدل فضای حالت را از مختصات دلخواه به مختصات فیزیکی مساله ببرد و سپس در گام بعدی پارامترهای فیزیکی سیستم را از مدل فضای حالت در مختصات فیزیکی

1. Koh
2. Phan and Longman

X^*, Y^*, Z^* بخش‌هایی از ماتریس‌های A_c و B_c بوده و معلوم هستند. B نیز موقعیت محرک‌ها را نمایش می‌دهد و جزو معلومات مساله است. اگر سیستم به مجموعه‌ی کاملی از حسگرها مجهز باشد، B مربعی بوده و رتبه‌ی کامل دارد؛ لذا:

$$M = BZ^{-1} \quad (25)$$

$$K = BZ^{-1}X^* \quad (26)$$

$$C = BZ^{-1}Y^* \quad (27)$$

در صورتی که مجموعه‌ی سنسورها کامل نباشد، مجموعه معادلات فوق به تنهایی کافی نبوده و شرایط تقارن ماتریس‌های سازه نقش مهمی ایفا خواهد کرد. به کمک عملگر Stack [۴۰] (رابطه (۲۸))، رابطه‌ی (۲۹) برای هر ماتریس P, S و R با ابعاد سازگار برقرار است و داریم:

$$\left(\Theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1\tau} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{\rho 1} & \cdots & \theta_{\rho\tau} \end{bmatrix}_{\rho \times \tau} \right)^s = \Theta(\cdot) = \quad (28)$$

$$\left(\begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1\tau} & \cdots & \theta_{\rho 1} & \cdots & \theta_{\rho\tau} \end{bmatrix}^T \right)_{\rho\tau \times 1}$$

$$(PSR)^s = (R^T \otimes P)S^s \quad (29)$$

$$\begin{aligned} K^s &= (X^{*T} \otimes I)M^s \\ C^s &= (Y^{*T} \otimes I)M^s \\ B^s &= (Z^{*T} \otimes I)M^s \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} (X^{*T} \otimes I)M^s &= (I \otimes X^{*T})M^s \\ (Y^{*T} \otimes I)M^s &= (I \otimes Y^{*T})M^s \end{aligned}$$

$\otimes$ عملگر ضرب خارجی دو ماتریس و $I_{n \times n}$ ماتریس یکه بوده و

$$C_c = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C], \quad D_c = C_a M^{-1}B \quad (19)$$

در حالت کلی بردار خروجی $y(t)$ ترکیبی از اندازه‌گیری‌های تغییرمکان، سرعت و شتاب سازه است. معادلات فوق در حالت پیوسته تشکیل یافته‌اند. اما در مساله‌ی شناسایی با داده‌های گسسته سروکار داریم. لذا معادلات فضای حالت گسسته باید توسعه یابند:

$$\begin{aligned} Z_{k+1} &= A_d Z_k + B_d U_k, \quad k=0,1,2,\dots \\ y_k &= C_d Z_k + D_d U_k \end{aligned} \quad (20)$$

پارامترهای استفاده شده در رابطه‌ی (۲۰) پیش‌تر در روابط (۵) تا (۷) معرفی شده‌اند.

با توجه به این که نمایش فضای حالت یک سیستم یکتا نیست، پس از شناسایی مدل فضای حالت در فرم گسسته و تبدیل آن به فرم پیوسته، مدل فضای حالت حاصل غالباً در مختصات فیزیکی نخواهد بود. در صورت تبدیل مختصات با ماتریس تبدیل معکوس‌پذیر T ، رابطه‌ی زیر بین ماتریس‌های فضای حالت در دو مختصات فیزیکی (ماتریس‌های $(A \sim D)_c$) و تبدیل‌یافته (ماتریس‌های $(A \sim D)_r$) برقرار است.

$$\underbrace{(A_c, B_c, C_c, D_c)}_{\text{Physical Coordinates}} \rightleftharpoons \underbrace{(A_r, B_r, C_r, D_r)}_{\text{Arbitrary Coordinates}} = (TA_c T^{-1}, TB_c, C_c T^{-1}, D_c) \quad (21)$$

براساس مقادیر A_c و B_c (رابطه (۲))، استخراج پارامترهای فیزیکی به‌دست آوردن ماتریس‌های M, C و K از مجموعه معادلات (۲۲) تا (۲۴) است:

$$X^* = M^{-1}K \quad (22)$$

$$Y^* = M^{-1}C \quad (23)$$

$$Z^* = M^{-1}B \quad (24)$$

معادلات فوق در رابطه (۳۱) قابل ادغام‌اند. ماتریس P'' شرایط تقارن ماتریس میرایی C را در خود دارد و اگر ماتریس میرایی متقارن نباشد سطر آخر P'' و P''' باید از معادلات کنار گذاشته شود.

$$P'P'' = P''' \rightarrow P' = \begin{bmatrix} X^{*T} \otimes I & 0 & -I \\ Y^{*T} \otimes I & -I & 0 \\ Z^{*T} \otimes I & 0 & 0 \\ (X^{*T} \otimes I) - (I \otimes X^{*T}) & 0 & 0 \\ (Y^{*T} \otimes I) - (I \otimes Y^{*T}) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$P'' = \begin{bmatrix} M^s \\ C^s \\ K^s \end{bmatrix}, P''' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

۴-۱- انتقال مدل فضای حالت شناسایی شده به مختصات فیزیکی

در این بخش در مورد شرایطی که اندازه‌گیری‌های تغییرمکان در دسترس باشند سخن گفته می‌شود. جزئیات بیش‌تر برای دیگر حالت‌ها را می‌توان در مراجع [۳۹، ۴۱، ۴۲] یافت. با فرض داشتن مجموعه‌ی کامل از اندازه‌گیری‌های تغییرمکان ($C_p = I_{n \times n}$):

$$C_c = [C_p = I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}], \quad D_c = 0_{n \times r} \quad (32)$$

می‌توان گفت اگر رتبه‌ی C_r کامل باشد، هر تحقق (A_r, B_r, C_r) از سیستم اصلی می‌تواند به کمک ماتریس Q به (A^*, B^*, C^*) تبدیل شود که:

$$A^* = Q A_r Q^{-1} \quad (33)$$

$$B^* = Q(B_r) \quad (34)$$

$$C^* = (C_r)Q^{-1} = [I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}] = C_c \quad (35)$$

ماتریس تبدیل مشابهت Q برابر است با $Q = [C_r \quad \bar{Q}]^T$ که $\bar{Q}$

ماتریسی دلخواه است به‌طوری‌که Q^{-1} موجود باشد. با این تبدیل C^* به فرم مطلوب تبدیل شده اما A^* و B^* به مختصات فیزیکی انتقال نمی‌یابند. لذا انتقال ثانویه‌ای نظیر T نیاز است که C^* را تغییر ندهد ولی A_c را به مختصات فیزیکی ببرد.

$$A_c = T A^* T^{-1} \quad (36)$$

$$B_c = T(B^*) \quad (37)$$

$$C = (C^*)T^{-1} \quad (38)$$

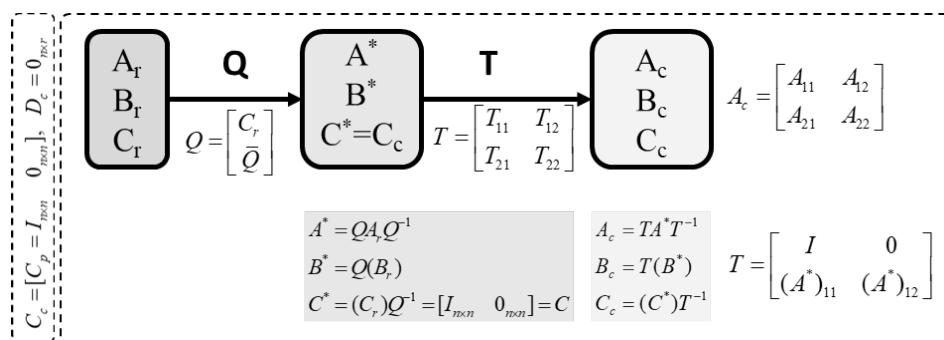
روابط (۳۶) تا (۳۸) الزام $T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ (A^*)_{11} & (A^*)_{12} \end{bmatrix}$ را برای ماتریس تبدیل T ضروری می‌نماید. پس از این تبدیل X^*, Y^* و Z^* که بخش‌های مختلف ماتریس‌های A_c و B_c هستند و ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی محاسبه خواهند شد. شکل ۳ روند کلی استخراج ماتریس‌های سیستم در مختصات فیزیکی از تحقق فضای حالت شناسایی شده در شرایط دسترسی کامل به اندازه‌گیری‌های تغییرمکان را نمایش می‌دهد.

۵- کنترل ارتعاشات سازه

ایده استفاده از سیستم‌های کنترل پسخوراندی برای سازه‌های مهندسی عمران اولین بار توسط یائو در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید. اساسی‌ترین مساله در تئوری سیستم‌های کنترل پسخوراندی، پایداری است تا ضامن عدم واگرایی خروجی سیستم باشد. در این مطالعه جهت جلوگیری از ناپایداری سیستم، تبدیل سیستم گسسته‌ی شناسایی‌شده به سیستم پیوسته‌ی معادل با روش تاستین انجام می‌یابد. بدیهی است که برای نیل به این هدف بایستی خروجی در هر لحظه اندازه‌گیری شود که نیازمند شبکه‌ای از حسگرها می‌باشد. در این مطالعه جهت اهداف کنترل از شبکه حسگرهایی استفاده می‌شود که برای اهداف پایش سلامت در سازه مستقر شده‌اند.

۵-۱- پاسخ دینامیکی سازه به تحریک خارجی

اگر فرم ماتریسی معادله‌ی دینامیکی حرکت سازه مجهز به تجهیزات کنترل فعال به‌صورت رابطه‌ی (۱) باشد، ماتریس جرم یک قاب برشی براساس جرم طبقات (m_i) از رابطه (۳۹) و ماتریس‌های سختی و میرایی



شکل ۳. روند کلی استخراج ماتریس‌های سیستم در مختصات فیزیکی از تحقق فضای حالت شناسایی شده در شرایط دسترسی کامل به اندازه‌گیری‌های تغییر مکان

Fig. 3. The process of extracting system matrices in physical coordinates from identified state-space realizations under the assumption of complete access to displacement measurements

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (Z^T \tilde{Q}Z + U^T \tilde{R}U) dt \quad (41)$$

آن براساس سختی و میرایی طبقات $(k, c)_i$ از رابطه (۴۰) محاسبه می‌شوند:

$$U(t)_{n \times 1} = -K_{G_{n \times 2n}} Z_{2n \times 1}(t) = - \underbrace{[\Delta K_{n \times n} \quad \Delta C_{n \times n}]}_{K_G} \underbrace{\begin{Bmatrix} X(t)_{n \times 1} \\ \dot{X}(t)_{n \times 1} \end{Bmatrix}}_{Z(t)_{2n \times 1}} \quad (42)$$

$$M = \text{diag}([m_i]) \quad (39)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{ij} \end{bmatrix}_{\substack{Y=K \text{ or } C \\ \gamma=k \text{ or } c}} \quad Y_{ij} = \begin{cases} \gamma_i + \gamma_{i+1} & i = j \neq n \\ \gamma_n & i = j = n \\ -\gamma_i & i - j = 1 \\ -\gamma_{i+1} & j - i = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (\P \cdot)$$

در رابطه‌ی (۴۱)، $\tilde{Q}$ و $\tilde{R}$ به ترتیب ماتریس‌های وزنی مربوط به پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی هستند و اهمیت نسبی کاهش پاسخ یا نیروی کنترل را نمایش می‌دهند. در عمل انتخاب ماتریس‌های وزنی به کمک سعی و خطا و به کمک تجربه‌ی طراح صورت می‌گیرد. $\tilde{Q}$ ماتریس وزنی مربعی مثبت نیمه‌معین ($\det(\tilde{Q}) \geq 0$) با بعد $2n$ (تعداد حالات سیستم) و $\tilde{R}$ ماتریس وزنی مربعی مثبت معین ($\det(\tilde{R}) > 0$) با بعد r است که r تعداد محرک‌ها می‌باشد. در کاربردهای عملی $\tilde{R}$ و $\tilde{Q}$ معمولاً قطری در نظر گرفته می‌شوند. بهینه‌سازی شاخص عملکرد J با رویکرد حساب تغییرات انجام می‌یابد که در نتیجه‌ی آن ماتریس بهره K_G (رابطه (۴۳)) محاسبه می‌گردد. P ماتریسی متقارن و پاسخ معادله جبری ریکاتی (رابطه (۴۴)) است.

$$K_G = \tilde{R}^{-1} B_c^T P \quad (43)$$

$$A_c^T P + P A_c - P B_c \tilde{R}^{-1} B_c^T P + \tilde{Q} = -\dot{P}(t) \quad (44)$$

تبدیل با استفاده از بردار حالت $Z = [X, \dot{X}]^T$ معادلات حرکت مرتبه‌ی دوم را به فرم مرتبه‌ی اول فضای حالت تبدیل می‌کند [۴۳]. این انتقال روند حل معادلات حرکت را ساده‌تر می‌نماید، اما تعداد مجهولات معادله را دو برابر می‌سازد. معادلات فضای حالت به‌طور مستقیم قابل حل نیستند؛ زیرا به ازای $2n$ معادله، $2n+1$ مجهول وجود دارد که 1 تعداد محرک‌ها می‌باشد. 1 معادله‌ی اضافی مورد نیاز قانون کنترل پس‌خور نامیده می‌شوند. در کنترل بهینه ثابت می‌شود که می‌توان با مینیمم کردن یک شاخص مرتبه‌ی دوم، نیروی کنترل بهینه را با رابطه‌ای خطی از حالت‌های سیستم به‌دست آورد. الگوریتم LQR از پرکاربردترین روش‌های کنترل فعال سازه می‌باشد که در آن شاخص عملکرد مرتبه دوم J به عنوان نماد انرژی سیستم کمینه می‌شود (رابطه‌ی (۴۱)). با اتخاذ قانون کنترل فیدبک، معادلات از نظر ریاضی قابل حل بوده و نیروهای کنترل، محاسبه می‌گردند (رابطه‌ی (۴۲)).

جدول ۲. فرمول‌های محاسبه‌ی شاخص‌های پنج‌مارک

Table 2. Formulas for benchmark performance indexes

نسبت دریفت بین طبقه‌ای	تغییر مکان سازه	شتاب سازه	برش پایه
$J_1 = \frac{\max_{t,i} \left(\left d_i^c(t) \right / h_i \right)}{\max_{t,i} \left(\left d_i^{uc}(t) \right / h_i \right)}$	$J_2 = \frac{\max_{t,i} \left x_i^c(t) \right }{\max_{t,i} \left x_i^{uc}(t) \right }$	$J_3 = \frac{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^c(t) \right }{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$	$J_4 = \frac{\max_t \left \sum_i m_i \dot{x}_{ai}^c(t) \right }{\max_t \left \sum_i m_i \dot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$
RMS دریفت بین طبقه‌ای	RMS تغییر مکان سازه	RMS شتاب سازه	RMS برش پایه
$J_5 = \frac{\max_{t,i} \left(\left\ d_i^c(t) \right\ / h_i \right)}{\max_{t,i} \left(\left\ d_i^{uc}(t) \right\ / h_i \right)}$	$J_6 = \frac{\max_{t,i} \left\ x_i^c(t) \right\ }{\max_{t,i} \left\ x_i^{uc}(t) \right\ }$	$J_7 = \frac{\max_{t,i} \left\ \ddot{x}_{ai}^c(t) \right\ }{\max_{t,i} \left\ \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\ }$	$J_8 = \frac{\max_t \left\ \sum_i m_i \dot{x}_{ai}^c(t) \right\ }{\max_t \left\ \sum_i m_i \dot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\ }$

۵-۲- ارزیابی عملکرد کنترلر

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی، مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد پنج‌مارک برای مقایسه‌ی پاسخ‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده براساس ماکزیمم و نُرم پاسخ‌ها تعریف شده‌اند [۴۴]. فرمول‌های محاسبه‌ی این شاخص‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

این شاخص‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. $d_i(t)$ ، h_i ، $x_i(t)$ ، $\ddot{x}_i(t)$ و m_i به ترتیب دریفت، ارتفاع، تغییر مکان، شتاب و جرم طبقه‌ی i ام هستند و حروف c و uc به حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده اشاره دارند. عبارت $\max$ ، اپراتور ماکزیمم، علامت $\|*\|$ عملگر قدرمطلق و $\|*\|$ نماد عملگر میانگین جذر مربعات (RMS) بر روی $*$ است. شاخص J_1 جهت بررسی توانمندی کنترلر در کاهش ماکزیمم دریفت نسبت به حالت کنترل‌نشده تعریف می‌گردد. شاخص‌های J_2 تا J_4 به ترتیب نماینده‌ی کاهش بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان، شتاب و برش پایه‌ی سازه نسبت به حالت کنترل‌نشده هستند و J_5 تا J_8 میزان کاهش RMS دریفت، تغییر مکان، شتاب و برش پایه طبقات را نمایش می‌دهند.

۶- شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)

مبانی روش مونت کارلو برای نخستین بار در سال ۱۹۴۹ توسط نیومن و اولام ارائه شد. بهره‌گیری از قابلیت‌های این روش جهت مطالعه احتمالاتی مسائل تحلیل سازه با ظهور رایانه‌های دیجیتال به صورت یک روش پر کاربرد رواج یافت و به سرعت پیشرفت کرد. فرآیند شبیه‌سازی توسط مونت کارلو را

می‌توان در قالب مراحل زیر انجام داد:

۱. تعریف مساله شامل تعیین متغیرهای تصادفی دارای عدم قطعیت و تفکیک آن‌ها از پارامترهای قطعی و تعریف تابع حالت حدی خرابی g بر مبنای این دو گروه متغیرها $g(X_1, X_2, \dots, X_{n'}) = 0$. n' مجموع تعداد پارامترهای تصادفی (n_v) و قطعی می‌باشد.
۲. در نظر گرفتن اطلاعات توزیع آماری لازم برای متغیرهای تصادفی.
۳. تعیین تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی شده از معادله‌ی حالت حدی مطابق فرمول تقریبی $N \approx 100 / P_f$.
۴. تولید J نمونه تصادفی از n_v متغیر تصادفی ($X_{ij} (i=1, \dots, n_v)$) براساس توزیع احتمالاتی مشخص.
۵. انجام محاسبات شبیه‌سازی برای هر مجموعه از مقادیر تصادفی تولیدشده.
۶. تجمع نتایج و محاسبه آماره‌های میانگین، واریانس و دیگر کمیت‌های آماری و تعیین توزیع‌های آماری برای نتایج شبیه‌سازی.
۷. شمارش تعداد عبور مقادیر تابع حدی از صفر (N_f). N_f مبین تعداد آزمون‌های آماری است که $g = 0$ نقض گردیده است.
۸. محاسبه‌ی احتمال خرابی تخمینی مطابق فرمول $P_f \approx N_f / N$.
۹. ارزیابی دقت تخمین به دست آمده با تکنیک‌های ارزیابی. اگر P_{true} احتمال دقیق تئوریک باشد، دقت احتمال تخمین زده شده ($\hat{P}_f$) (میانگین) ($\mu_{\hat{P}_f}$)، انحراف معیار ($\sigma_{\hat{P}_f}$) و ضریب تغییرات ($V_{\hat{P}_f}$) برابر است با ([۴۵]):

۸- مدل سازی

مدل سازی، تحلیل سازه، تولید نمونه های تصادفی برای شبیه سازی مونت کارلو، شناسایی سیستم و کنترل ارتعاشات در نرم افزار متلب انجام شده است. در مرحله ی مدل سازی ابتدا مدل المان محدود سازه ی اصلی تشکیل شده و برای تشکیل مدل های تصادفی روش مونت کارلو (۱۲۰۰ مدل) تابع چگالی احتمال مناسب به پارامترهای دینامیکی سازه اختصاص می یابد. در ادامه این سازه ها براساس پاسخ شان به نویزهای سفید گاوسی تصادفی شناسایی شده و ارتعاشات هر دو گروه تحت تحریک زلزله ال سترو مورد کنترل قرار می گیرد. در ادامه مشخصات سازه ی و تحریکات مورد استفاده معرفی می گردند.

۸-۱- قاب برشی دوبعدی مورد مطالعه

سازه مورد مطالعه قاب برشی ۱۱ درجه آزادی با مشخصات دینامیکی مندرج در جدول ۳ است [۴۶]. مشخصات مودال سازه در جدول ۴ ارائه شده است.

نسبت میرایی برای تمامی مودها برابر $\zeta = 2\%$ در نظر گرفته می شود. پریود اصلی سازه برابر 0.89s است. برای اهداف شناسایی سیستم از نویز سفید گاوسی با میانگین صفر و انحراف معیار یک استفاده شده است. تاریخچه زمانی یک نمونه از ۱۲۰۰ نویز سفید تولید شده در شکل ۴ ارائه شده است.

پس از شبیه سازی تصادفی سازه ها در فرآیند مونت کارلو، در بخش کنترل ارتعاشات رفتار کنترل نشده و کنترل شده ی سازه ها تحت تحریک شتاب نگاشت مربوط به زلزله ال سترو با مشخصات مندرج در شکل ۵ و جدول ۵ محاسبه و ارائه می گردد.

جهت دستیابی به یک دید کلی از دقت شناسایی، به عنوان نمونه مشخصات سازه ی اصلی براساس پاسخ تغییر مکان سازه، شناسایی شده و نتایج و خطای شناسایی در جدول ۶ گزارش شده است. مطابق نتایج دقت شناسایی فرکانس های سازه بالا بوده و نسبت های میرایی با خطای بیش تری شناسایی شده اند. در مرحله ی شناسایی، مرتبه ی سیستم بدون استفاده از نمودار تثبیت و مساوی دو برابر تعداد درجات آزادی قاب برشی (2n) و تعداد سطرهای ماتریس بلوکی هنکل برابر (4n) در نظر گرفته شده است.

شکل ۶ مقایسه ای میان اشکال مودی سیستم اصلی و شناسایی شده است و شکل ۷ نمودار MAC دوبعدی و سه بعدی تشکیل یافته از اشکال مودی دو سیستم بوده که همبستگی مناسبی بین شکل های مودی دو

$$\begin{aligned}\mu_{\hat{P}_f} &= P_{true}, \\ \sigma_{\hat{P}_f} &= \sqrt{\frac{P_{true}(1-P_{true})}{N}}, \\ V_{\hat{P}_f} &= \sqrt{\frac{1-P_{true}}{P_{true}N}}\end{aligned}\quad (45)$$

۱۰. تکرار مراحل ۳ تا ۹ با مقادیر $\bar{J}$ متفاوت تا زمان دستیابی به دقت تخمین قابل قبول و مطلوب.

۷- کنترل ارتعاشات سازه مبتنی بر شناسایی سیستم

در این مطالعه از داده های حاصل از شناسایی برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده می شود. ابتدا مشخصات سازه تحت ارتعاشات محیطی یا واداشته محاسبه می گردد. در این مقاله نویز سفید گاوسی به عنوان تحریک واداشته به سازه اعمال شده و پاسخ های تغییر مکان و سرعت سازه که در شرایط واقعی توسط حسگرها اندازه گیری می شوند، از طریق حل معادلات دینامیکی محاسبه می گردند تا به عنوان ورودی شناسایی سیستم مورد استفاده قرار گیرند. پس از مرحله ی شناسایی، به دلیل این که روش شناسایی زیرفضای تصادفی با سیستم های گسسته سروکار دارد، از روش تاستین جهت تبدیل سیستم گسسته ی شناسایی شده به سیستم پیوسته استفاده می شود. سیستم پیوسته ی حاصل تحت تحریک زلزله قرار گرفته و پاسخ های آن با کمک محرک های مستقر در تمامی طبقات سازه توسط الگوریتم LQR کنترل می گردد. در نهایت مقایسه ای بین سازه ی اصلی و سازه ی شناسایی شده در حالت کنترل شده انجام می پذیرد تا کارایی کنترلر طراحی شده بر مبنای شناسایی سیستم مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به این که چشم انداز و افق دید روش های کنترل ارتعاشات بر محدود ماندن رفتار سازه و سیستم کنترل در حوزه خطی و عدم نیاز به استفاده از ظرفیت سازه در ناحیه ی غیرخطی است، در این مطالعه نیز رفتار سازه و سیستم کنترل خطی فرض می شود. مدل سازی ها بر روی مدل دوبعدی قاب برشی انجام می شود و تاثیر فرضیات و ساده سازی های فرمول بندی بر قابلیت اعتماد مجموعه بررسی نخواهد شد. عدم قطعیت های ذاتی تحریکات خارجی با استفاده از نویز سفید گاوسی در مطالعه در نظر گرفته می شود. با توجه به این که روش زیرفضای تصادفی که در این مطالعه برای شناسایی سیستم به کار می رود جزو روش های پارامتریک محسوب می شود، لیکن پارامترهای این روش فاقد عدم قطعیت فرض می شوند.

جدول ۳. مشخصات دینامیکی سازه‌ی ۱۱ درجه آزادی (11-DoF)

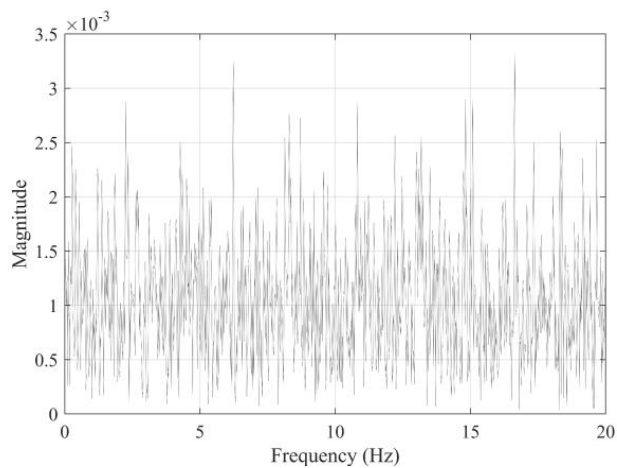
Table 3. Dynamic properties of studied 11-DoF shear frame structure

طبقه	جرم طبقه (kg)	سختی طبقه (kN/m)
۱	۲۱۵۳۷۰	$4/68 \times 10^5$
۲	۲۰۱۷۵۰	$4/76 \times 10^5$
۳	۲۰۱۷۵۰	$4/68 \times 10^5$
۴-۶	۲۰۰۹۳۰	$4/5 \times 10^5$
۷	۲۰۳۱۸۰	$4/5 \times 10^5$
۸-۹	۲۰۲۹۱۰	$4/37 \times 10^5$
۱۰	۱۷۶۱۰۰	$4/3 \times 10^5$
۱۱	۶۶۲۳۰	$3/12 \times 10^5$

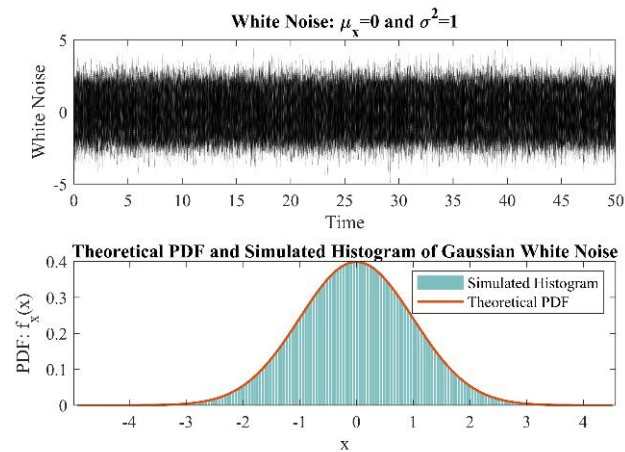
جدول ۴. مشخصات مودال سازه‌ی ۱۱ درجه آزادی (11-DoF)

Table 4. Modal characteristics of studied 11-DoF shear frame structure

شماره مود	زمان تناوب (s)	فرکانس (Hz)	نسبت میرایی (%)	فرکانس طبیعی (rad/s)	قطب (s^{-1})
۱	۰/۸۹۸۶	۱/۱۱۲۸	۰/۰۲	۶/۹۹۱۹	$-0/1398 \pm 6/9905i$
۲	۰/۳۰۴۷	۳/۲۸۲۲	۰/۰۲	۲۰/۶۲۲۵	$-0/4124 \pm 20/6184i$
۳	۰/۱۸۷۱	۵/۳۴۵۰	۰/۰۲	۳۳/۵۸۳۹	$-0/6717 \pm 33/5772i$
۴	۰/۱۳۷۱	۷/۲۹۴۰	۰/۰۲	۴۵/۸۲۹۴	$-0/9166 \pm 45/8202i$
۵	۰/۱۱۰۴	۹/۰۵۶۴	۰/۰۲	۵۶/۹۰۳۳	$-1/1381 \pm 56/8919i$
۶	۰/۰۹۴۲	۱۰/۶۱۶۷	۰/۰۲	۶۶/۷۰۶۹	$-1/3341 \pm 66/6936i$
۷	۰/۰۸۳۴	۱۱/۹۸۹۱	۰/۰۲	۷۵/۳۲۹۸	$-1/5066 \pm 75/3148i$
۸	۰/۰۷۶۱	۱۳/۱۳۴۹	۰/۰۲	۸۲/۵۲۸۸	$-1/6506 \pm 82/5123i$
۹	۰/۰۷۱۰	۱۴/۰۹۱۱	۰/۰۲	۸۸/۵۳۶۹	$-1/7707 \pm 88/5192i$
۱۰	۰/۰۶۸۲	۱۴/۶۵۸۶	۰/۰۲	۹۲/۱۰۲۸	$-1/8421 \pm 92/0843i$
۱۱	۰/۰۶۷۰	۱۴/۹۲۷۴	۰/۰۲	۹۳/۷۹۱۳	$-1/8758 \pm 93/7725i$



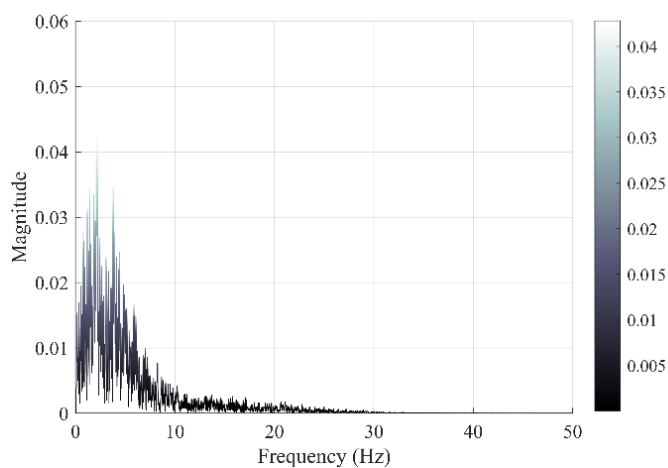
(ب/ب)



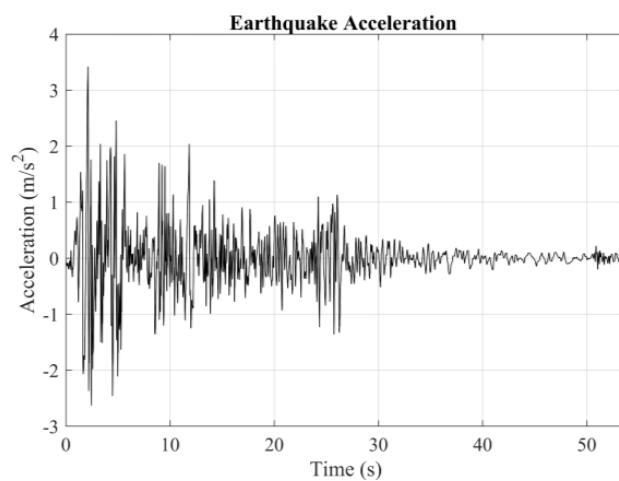
(الف/الف)

شکل ۴. الف. تاریخچه زمانی و تابع چگالی احتمال، ب. محتوای فرکانسی یک نمونه از نویزهای سفید تولیدشده

Fig. 4. The a. time history and PDF, b. frequency content of one of the generated GWNs



(ب/ب)



(الف/الف)

شکل ۵. الف. تاریخچه زمانی، ب. محتوای فرکانسی زلزله ال سنتر و ۱۹۴۰ (PGA= 3.41m/s²)

Fig. 5. The a. time history, b. frequency content of El Centro 1940 earthquake acceleration (PGA= 3.41m/s²)

جدول ۵. مشخصات زلزله‌ی ال‌سنترو؛ تحریک مورد استفاده در بخش طراحی کنترلر.

Table 5. Input Earthquake (El Centro 1940) parameters; the excitation used in controller design section.

منطقه تاثیر	تاریخ رخداد	مدت زمان	بزرگی	عمق	زمان نمونه‌برداری	PGA
آمریکا	۱۹ مه ۱۹۴۰	۵۳/۷۳ ثانیه	۷/۱Ms	۱۵ کیلومتر	۰/۰۱	۰/۳۵g

جدول ۶. نتایج شناسایی سازه مورد مطالعه براساس پاسخ تغییرمکان آن به تحریک نویز سفید گاوسی تولیدشده با روش زیرفضای تصادفی

Table 6. Identified structural properties based on displacement responses to generated GWN by SSI

سیگنال شماره ورودی	فرکانس شناسایی شده (Hz)	خطای شناسایی فرکانس (%)	نسبت میرایی شناسایی شده (%)	خطای شناسایی نسبت میرایی (%)	قطب‌های سیستم اصلی (s^{-1})	قطب‌های سیستم شناسایی شده (s^{-1})
۱	۱/۱۰۱۷	۱	۰/۰۲۶۵	۳۲/۷۰	-۰/۱۳۹۸±۶/۹۹۰۵i	-۰/۱۸۳۷±۶/۹۱۹۷i
۲	۳/۲۸۳۰	۰	۰/۰۱۴۱	۲۹/۲۰	-۰/۴۱۲۴±۲۰/۶۱۸۴i	-۰/۲۹۱۹±۲۰/۶۲۵۸i
۳	۵/۳۴۷۷	۰	۰/۰۱۷۰	۱۵/۲۰	-۰/۶۷۱۷±۳۳/۵۷۷۲i	-۰/۵۷۰۱±۳۳/۵۹۵۸i
۴	۷/۳۰۷۷	۰/۲	۰/۰۲۰۱	۰/۴۰	-۰/۹۱۶۶±۴۵/۸۲۰۲i	-۰/۹۲۱۸±۴۵/۹۰۶۶i
۵	۹/۰۶۳۵	۰/۱	۰/۰۱۹۵	۲/۷۰	-۱/۱۳۸۱±۵۶/۸۹۱۹i	-۱/۱۰۸۷±۵۶/۹۳۶۸i
۶	۱۰/۶۴۲۰	۰/۲	۰/۰۲۰۹	۴/۵۰	-۱/۳۳۴۱±۶۶/۶۹۳۶i	-۱/۳۹۸۰±۶۶/۸۵۱۴i
۷	۱۲/۰۲۹۷	۰/۳	۰/۰۲۴۵	۲۲/۴۰	-۱/۵۰۶۶±۷۵/۳۱۴۸i	-۱/۸۴۹۶±۷۵/۵۶۲۱i
۸	۱۳/۰۷۹۲	۰/۴	۰/۰۲۱۴	۶/۹۰	-۱/۶۵۰۶±۸۲/۵۱۲۳i	-۱/۷۵۶۵±۸۲/۱۶۰۱i
۹	۱۳/۹۸۹۰	۰/۷	۰/۰۱۹۵	۲/۳۰	-۱/۷۷۰۷±۸۸/۵۱۹۲i	-۱/۷۱۶۷±۸۷/۸۷۸۹i
۱۰	۱۴/۷۷۳۹	۰/۸	۰/۰۲۰۱	۰/۴۰	-۱/۸۴۲۱±۹۲/۰۸۴۳i	-۱/۸۶۳۸±۹۲/۸۰۸۳i
۱۱	۱۴/۸۴۷۹	۰/۵	۰/۰۱۶۶	۱۶/۹۰	-۱/۸۷۵۸±۹۳/۷۷۲۵i	-۱/۵۵۱۲±۹۳/۲۷۹۴i

تغییر مکان طبقات

مشخصات دینامیکی، عملیات کنترل ارتعاشات بر روی هر دو سازه انجام شده و شاخص‌های پنج‌مارک مطابق جدول ۷ و شکل ۸ برای دو سیستم اصلی و شناسایی‌شده استخراج می‌گردد. در مرحله‌ی کنترل ارتعاشات، ماتریس‌های وزنی LQR برای هر دو کنترلر یکسان و به شکل زیر در نظر گرفته می‌شوند:

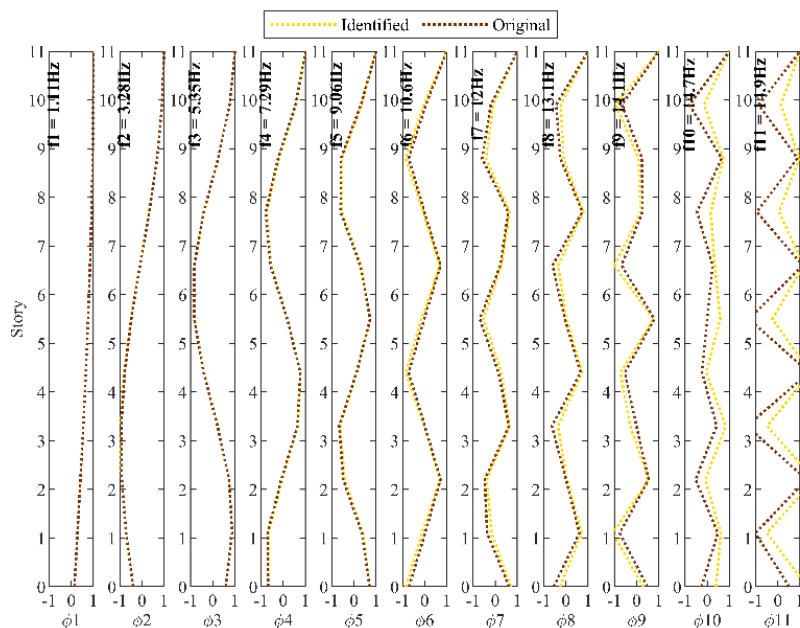
$$\tilde{Q} = \text{diag}[Q_d \quad Q_v]_{2n \times 2n}, \quad Q_d = 1, Q_v = 0.1 \quad (46)$$

سیستم را نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۶ تطابق مناسبی بین اشکال مودی دو سیستم تا مود نهم وجود دارد و اشکال مودی موده‌های ۱۰ و ۱۱ با اختلاف بیش‌تری تعیین شده‌اند.

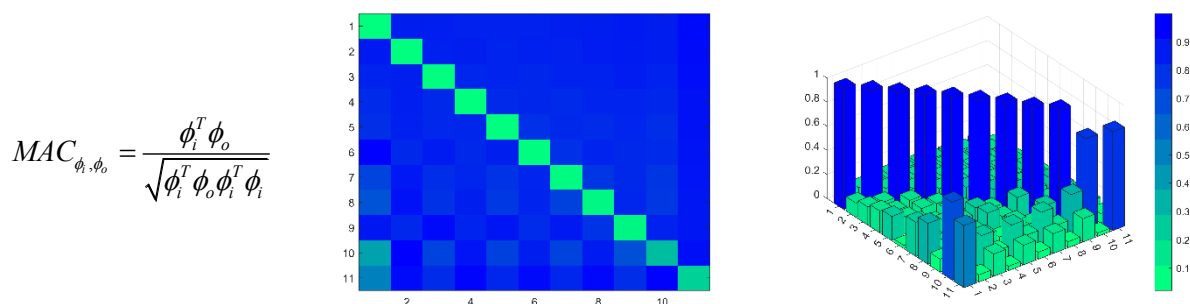
در شکل ۷ نیز مشابه شکل ۶ همبستگی کامل میان دو دسته اشکال مودی برای سیستم اصلی و سیستم شناسایی شده از مود ۱ تا ۹ و وجود خطا در تخمین اشکال مودی موده‌های ۱۰ و ۱۱ مشهود است.

پس از شناسایی سیستم، انتقال آن به مختصات فیزیکی و استخراج



شکل ۶. اشکال مودی سیستم اصلی و سیستم شناسایی شده.

Fig. 6. The modeshapes of the identified and original system



شکل ۷. نمودار MAC دوبعدی و سه بعدی تشکیل یافته از اشکال مودی دو سیستم اصلی و شناسایی شده.

Fig. 7. 2D and 3D MAC diagrams for modeshapes between identified and original system.

شاخص‌های عملکرد پایین‌تری داشته و علاوه بر کاهش پاسخ سازه نسبت به حالت کنترل نشده (دستیابی به مقادیر کوچک‌تر از یک برای شاخص‌ها) در دستیابی به اهداف کنترل نسبت به کنترلر سازه‌ی اصلی موفق‌تر عمل نموده است. شکل ۸ این نتیجه را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد.

مقادیر RMS تغییرمکان و نیروی کنترل موردنیاز در طبقات اول و فوقانی سازه‌های اصلی و شناسایی‌شده در شکل ۹ ارائه شده‌اند که نتایج

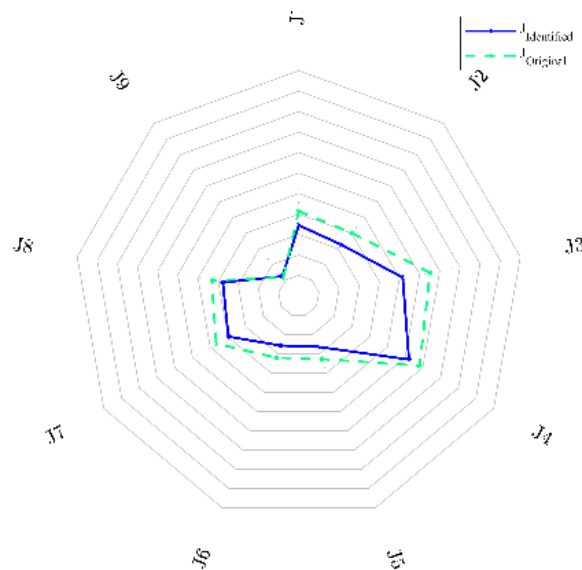
$$\tilde{R} = 10^{-6.5} I_{r \times r} \quad (47)$$

هر چه مقادیر شاخص‌های عملکرد از عدد یک فاصله بگیرد عملکرد کنترلر در کنترل ارتعاشات مناسب‌تر بوده و پاسخ‌های سازه بیش‌تر کاهش می‌یابند. براساس نتایج مدل‌سازی مشاهده می‌شود کنترلر مبتنی بر شناسایی

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های پنج‌مارک کنترلر طراحی‌شده برای دو سیستم اصلی و شناسایی شده تحت تحریک زلزله ال‌سنترو.

Table 7. Values of benchmark indexes for identified and original model under El Centro earthquake excitation.

سازه	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈
سیستم اصلی	۰/۳۱۴	۰/۳۰۲	۰/۵۵۱	۰/۵۸۲	۰/۲۲۹	۰/۲۲۲	۰/۳۶۶	۰/۳۳۲
سیستم شناسایی‌شده	۰/۲۴۵	۰/۲۲۵	۰/۴۱۶	۰/۵۲۲	۰/۱۶۴	۰/۱۵۸	۰/۲۹۷	۰/۲۷۷

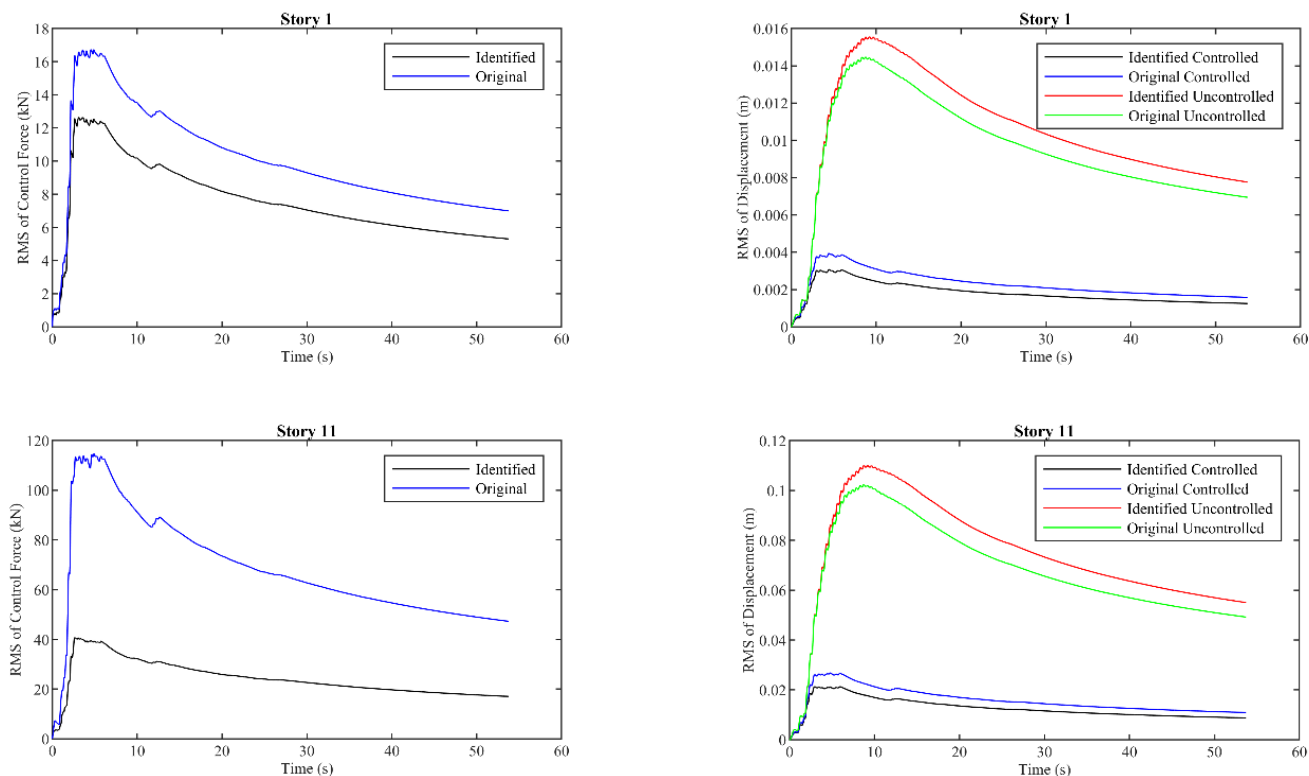


شکل ۸. نمودار شاخص‌های پنج‌مارک برای دو سیستم اصلی و شناسایی شده.

Fig. 8. Benchmark indexes for identified and original model under El Centro earthquake excitation.

گزارش شده در جدول ۷ را تایید می‌نماید. مطابق شکل ۹ RMS تغییرمکان و نیروی کنترل مورد نیاز در طبقات اول و فوقانی سازه‌ی شناسایی شده از مقادیر متناظر برای سازه‌ی اصلی کمتر بوده و تاثیر استفاده از داده‌های شناسایی در طراحی کنترلر مثبت ارزیابی می‌شود. براساس نتایج شبیه‌سازی یک سازه با روند پیشنهادی و طراحی کنترل مبتنی بر شناسایی سیستم برای این سازه مشاهده گردید ماهیت آماری و احتمالاتی مساله ایجاب می‌کند مدل‌های متعددی جهت در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن ایجاد شده و مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ۱۲۰۰ سازه تولید شده و تحت نویزهای سفید گاوسی تصادفی برای تخمین قابلیت‌اعتماد کنترلر ارتعاشات مبتنی بر شناسایی سازه مورد آزمایش آماری قرار می‌گیرند. در نهایت میزان اطمینان و کارایی کنترلر مبتنی بر شناسایی سیستم ارزیابی می‌گردد. به دلیل اهمیت مساله بهتر است شیوه‌ای که برای محاسبه قابلیت‌اعتماد انتخاب می‌گردد از دقت بالایی برخوردار باشد؛ از این رو در این پژوهش از روش نمونه‌گیری مونت‌کارلو استفاده شده است. بدین صورت که متغیرهایی تحت عنوان عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده و به تعداد کافی نمونه‌ی تصادفی ایجاد می‌شود. مشخصات پارامترهای دارای عدم‌قطعیت در شبیه‌سازی مونت‌کارلو در جدول ۸ ارائه شده‌اند. تابع حالت حدی می‌تواند به‌صورت اختلاف معیارهای کنترلی دو سازه‌ی اصلی و شناسایی‌شده تعریف گردد.

براساس نتایج شبیه‌سازی یک سازه با روند پیشنهادی و طراحی کنترل مبتنی بر شناسایی سیستم برای این سازه مشاهده گردید ماهیت آماری و احتمالاتی مساله ایجاب می‌کند مدل‌های متعددی جهت در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن ایجاد شده و مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ۱۲۰۰ سازه تولید شده و تحت نویزهای سفید گاوسی تصادفی برای تخمین



شکل ۹. RMS تغییرمکان و نیروی کنترل مورد نیاز در طبقات اول و فوقانی سازه‌های اصلی و شناسایی شده.

Fig. 9. RMS of displacement and control force in the first and top floors of the main and identified structures.

جدول ۸. مشخصات آماری پارامترهای دارای عدم قطعیت.

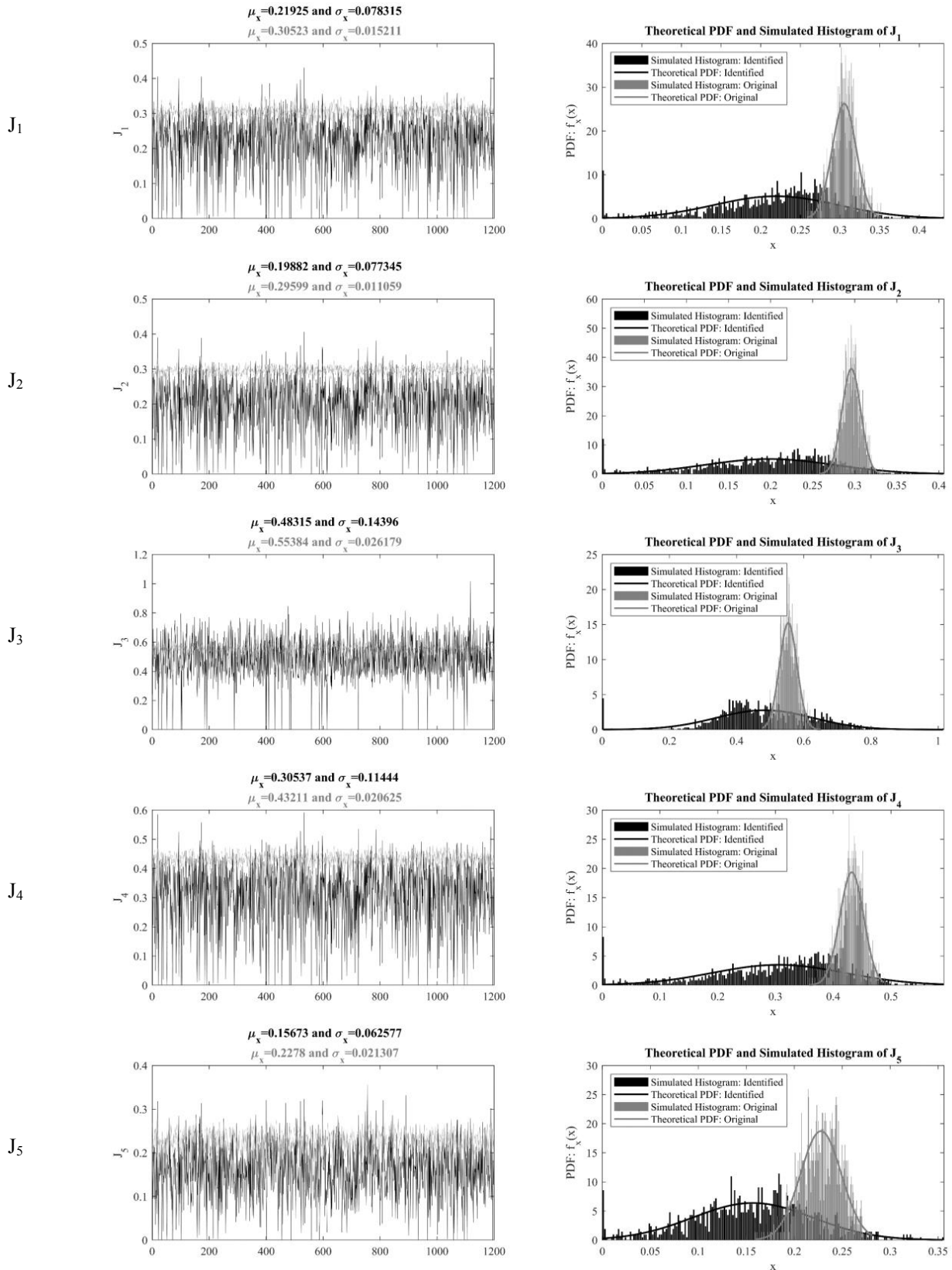
Table 8. Statistical characteristics of uncertain parameters.

پارامتر	میانگین	ضریب تغییرات (%)	توزیع آماری
جرم طبقات	برابر با مقادیر اسمی سازه اصلی	۵	گوسی
سختی طبقات		۵	گوسی
نسبت میرایی		۱۰	گوسی

۹- نتایج

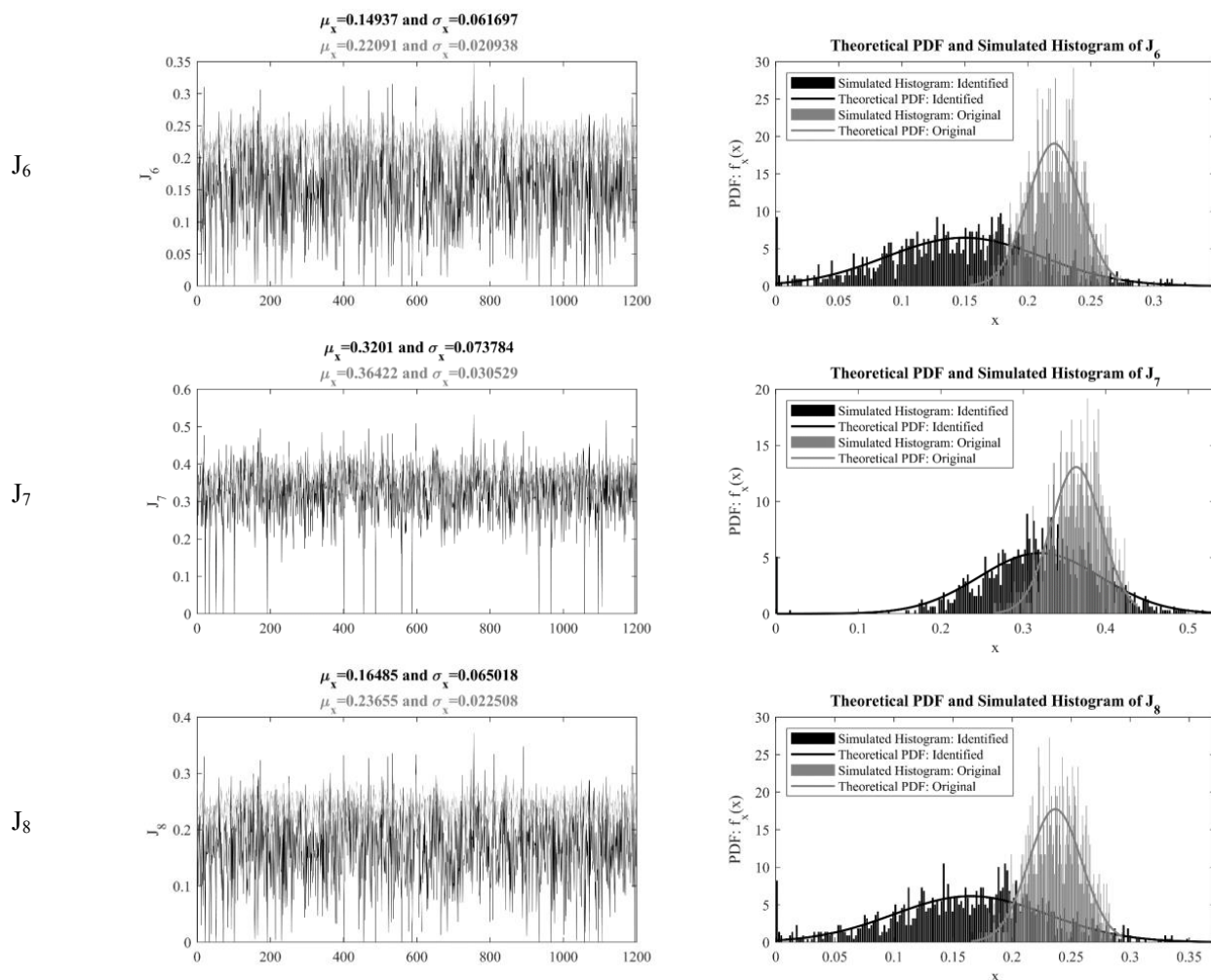
در این بخش ارتعاشات سازه‌های تصادفی و سازه‌های شناسایی‌شده‌ی معادل آن‌ها کنترل شده و شاخص‌های عملکرد کنترلر نیز برای هر دو دسته از سیستم‌ها محاسبه شده است. مطابق تحلیل‌ها و از مقایسه‌ی نتایج کنترل ارتعاشات این دو گروه سازه نتیجه گرفته می‌شود هر چه دقت شناسایی فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی افزایش یابد، نیاز سیستم شناسایی‌شده به نیروی کنترل کمتر بوده و پاسخ‌های آن بیش‌تر کنترل گردیده‌اند. کنترل

مناسب‌تر ارتعاشات سازه شناسایی‌شده می‌تواند به ضعف روش زیرفضای تصادفی در برآورد بالاتر از مقدار واقعی نسبت‌هایی میرایی مربوط باشد. البته در مساله‌ی مورد مطالعه‌ی این پژوهش این امر منجر به کنترل بهتر پاسخ‌های سازه گردیده است. در ادامه نتایج به‌دست آمده برای دو گروه سیستم در قالب نمودارهای توزیع چگالی احتمال با فرض توزیع نرمال برای شاخص‌های عملکرد ارائه شده است. مطابق نتایج مشاهده می‌شود توزیع‌های چگالی برای شاخص عملکرد



شکل ۱۰. تابع چگالی احتمال شاخص‌های عملکرد سازه‌های اصلی و شناسایی‌شده (ادامه دارد).

Fig. 10. The probability density function of the performance indexes for the original and identified structures(Continued).



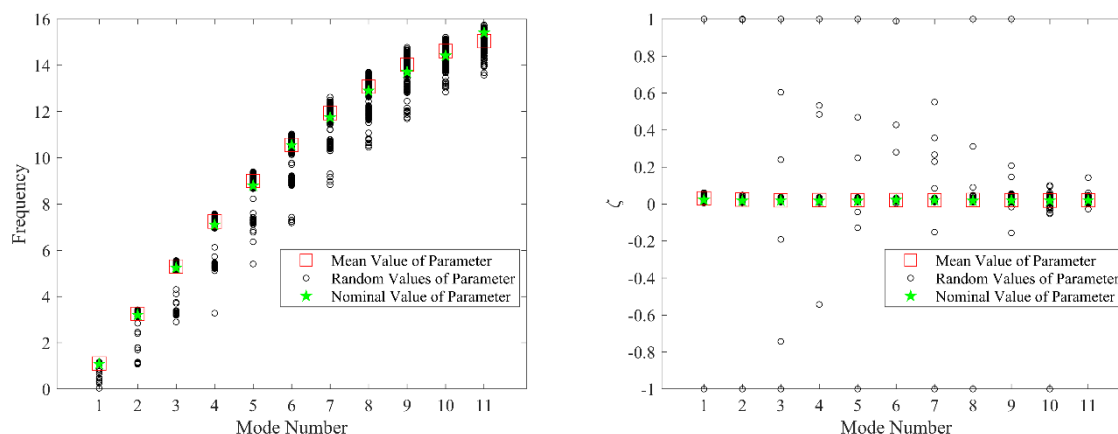
شکل ۱۰. تابع چگالی احتمال شاخص‌های عملکرد سازه‌های اصلی و شناسایی شده.

Fig. 10. The probability density function of the performance indexes for the original and identified structures.

سازه و استفاده از فرمول $P_f \approx N_f / N$ جهت محاسبه‌ی احتمال خرابی تخمینی، مقدار احتمال خرابی برابر 0.25% به‌دست آمده است که مقدار قابل قبولی بوده و برابر با درصد موفقیت $99/75$ برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی است. مطابق روابط (۴۵) در صورتیکه هدف، پیش‌بینی احتمال با ضریب تغییرات 0.1 باشد، با در نظر گرفتن 1200 مدل می‌توان احتمال خرابی را تا 8 درصد تخمین زد.

به‌منظور بررسی عملکرد کنترلر طراحی شده در برابر زلزله‌های مختلف، علاوه بر زلزله‌ی ال‌سنتر، شبیه‌سازی‌ها در برابر دو زلزله‌ی کوبه و پارکفیلد نیز انجام شد که درصد موفقیت براساس تابع خرابی فوق برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی با ماتریس‌های وزنی مطابق روابط (۴۶) و (۴۷) به ترتیب برابر $98/50$ و $99/83$ به‌دست آمد. این مساله موفقیت

کنترلر مبتنی بر شناسایی از میانگین پایین‌تری نسبت به شاخص‌های عملکرد کنترلرهای تصادفی اصلی برخوردار هستند؛ گرچه مقادیر انحراف معیار بالاتر برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی پراکندگی بیش‌تر نتایج را نسبت به عملکرد کنترلر اصلی نتیجه می‌دهد. مقادیر میانگین‌ها برای شاخص‌های مرتبط با RMS خروجی‌ها نسبت به میانگین‌های شاخص‌های مرتبط با ماکزیمم خروجی‌ها به هم نزدیک‌تر هستند. از این مساله می‌توان دریافت شناسایی سیستم ماکزیمم پاسخ‌ها را در مقایسه با میانگین آن‌ها بیش‌تر تحت تاثیر قرار داده است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان قابلیت‌اعتماد، تابع حدی خرابی است. میزان قابلیت‌اعتماد از نوع تابع خرابی تاثیر می‌پذیرد. به عنوان مثال در مساله‌ی مورد مطالعه با انتخاب تابع حالت حدی به‌صورت اختلاف بیشینه پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی فوقانی



شکل ۱۱. نتایج شناسایی پارامترهای مودال ۱۲۰۰ سازه تولید شده طی شبیه‌سازی مونت کارلو.

Fig. 11. Results of identifying modal parameters of 1200 generated structures during the Monte Carlo simulation.

سیستم کنترلی و بررسی و محاسبه‌ی میزان اعتماد به این طرح کنترل مورد مطالعه قرار گرفت. ماهیت آماری و احتمالاتی پارامترهای دینامیکی مدل سازه در قالب توابع چگالی یا توزیع احتمال تعریف شده و در عملکرد کل سیستم لحاظ گردید. با ثبت عکس‌العمل تغییرمکان سازه به تحریکات تصادفی نویز سفید گاوسی، ورودی‌های سیستم شناسایی تامین شده و عملیات شناسایی با روش زیرفضای تصادفی انجام گردید. با کنترل دامنه‌ی ارتعاشات دو گروه از سازه‌های اصلی و شناسایی‌شده کفایت عملکرد سازه براساس اهداف کنترل مورد بررسی قرار گرفت و با تفکیک واضح بین دو حالت خرابی و سلامت سازه، قابلیت‌اعتماد طرح ارزیابی گردید. مطابق نتایج مشاهده شد توزیع‌های چگالی برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی از میانگین پایین‌تری نسبت به شاخص‌های عملکرد کنترلرهای تصادفی اصلی برخوردار هستند؛ گرچه مقادیر انحراف معیار بالاتر برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی پراکندگی بالاتر نتایج را نسبت به عملکرد کنترلر اصلی نتیجه می‌دهد. یکی از دستاوردهای این مطالعه استفاده از نتایج در طراحی کنترلر برای سازه‌هایی است که مشخصات دقیق آن‌ها در دسترس نمی‌باشد و در فقدان قوانین آیین‌نامه‌ای طراحی احتمالاتی کنترلر برای آن‌ها انجام می‌پذیرد و احتمال عملکرد درست کنترلر در شرایط وجود عدم قطعیت تعیین می‌شود. حدود خرابی برای ماکزیمم پاسخ‌های تغییرمکان، سرعت، شتاب و تغییرمکان نسبی بسته به هدف طراح از طرح سیستم کنترل می‌تواند تعیین گردد. در این مطالعه نگاه آماری به شاخص‌های عملکرد کنترلرها دید مناسبی از میزان قابلیت‌اعتماد به کنترلرهای مبتنی بر شناسایی سیستم ارائه داده است. براساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده استفاده

رویکرد اتخاذ شده برای طراحی کنترلر را در برابر تحریک‌های مختلف زلزله نشان می‌دهد.

براساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده استفاده از داده‌های شناسایی سیستم در طرح کنترل فعال سبب کاهش بیش‌تر پاسخ‌های سازه می‌شود. این امر می‌تواند متأثر از دقت پایین و به عبارتی برآورد بالاتر نسبت‌های میرایی در سازه‌های شناسایی شده توسط روش زیرفضای تصادفی باشد. گرچه همین دقت پایین شناسایی قابلیت‌اعتماد بالایی برای کنترلر مبتنی بر شناسایی ایجاد می‌نماید. لذا می‌توان بیان نمود در سازه‌های موجود که مشخصات دقیقی از آن‌ها جهت طرح کنترلر در اختیار نمی‌باشد، استفاده از داده‌های شناسایی سیستم که با اتکا به شبکه‌ی سنسور سیستم پایش سلامت قرار می‌گیرد، کنترلی می‌توان طراحی نمود که پاسخگوی نیازهای یک طرح قابل قبول کنترل بوده و چه بسا غالباً عملکرد مناسب‌تری نسبت به طرح یقین‌اندیشانه خواهد داشت. شکل ۱۱ دربرگیرنده‌ی نتایج شناسایی پارامترهای مودال ۱۲۰۰ سازه تولید شده طی شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از روش SSI است. همانطور که انتظار می‌رفت، مطابق با ویژگی‌های حاکم بر روش SSI، دقت شناسایی نسبت‌های میرایی در مقایسه با شناسایی فرکانس‌ها کم‌تر و پراکندگی نتایج آن بیش‌تر است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد عموماً تخمین مقادیر میرایی بیش‌تر از مقدار واقعی نسبت‌های میرایی بوده و عکس این اتفاق برای فرکانس‌های طبیعی رخ داده است.

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه ایده‌ی استفاده از داده‌های شناسایی سیستم در طراحی

structures through Random Forest, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 01023.

- [7] L. Li, M. Fang, G. Chen, D. Yang, Reliability-based stochastic optimal control of frame building under near-fault ground motions, Mechanical Systems and Signal Processing, 163 (2022) 108098.
- [8] S.-M. Kim, S.-Y. Ok, J. Song, Multi-scale dynamic system reliability analysis of actively-controlled structures under random stationary ground motions, KSCE Journal of Civil Engineering, 23(3) (2019) 1259–1270.
- [9] N. Fathiazar, M. Mohebbi, Optimal design of passive mass damper based on reliability, in: International Conference on Civil Engineering, Architecture and urban infrastructure, undefined, 2015 (in Persian).
- [10] P. Shoaie, R. Karami-Mohammadi, N. Hoseini, Reliability analysis of structures equipped with adjusted liquid dampers considering uncertainty in model specifications and earthquake intensity, in: 2nd National Conference on Applied Researches in Structural Engineering and Construction Management, undefined, 2016 (in Persian).
- [11] R. Debbarma, S. Chakraborty, S.K. Ghosh, Optimum design of tuned liquid column dampers under stochastic earthquake load considering uncertain bounded system parameters, International journal of mechanical sciences, 52(10) (2010) 1385–1393.
- [12] A. Khansefid, A. Vaezzadeh, Probabilistic optimization of viscous damper system in nonlinear structure, in: 5th International Conference on Acoustics and Vibration, University of Tehran, Tehran, Iran, 2015 (in Persian).
- [13] Z. Dehnavi, H. Khosravi, Investigation of reliability in steel eccentrically-braced frames with friction damper, in: The first national conference on sustainable urban development, undefined, 2013 (in Persian).
- [14] M. Mohebbi, D. Valinezhad, N. Alesh-Nabidoust, Reliability sensitivity analysis of single passive mass damper parameters, in: International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Sustainable

از داده‌های شناسایی سیستم در طرح کنترل فعال سبب کاهش بیش‌تر پاسخ‌های سازه می‌شود. این امر می‌تواند متاثر از دقت پایین و به عبارتی برآورد بالاتر نسبت‌های میرایی در سازه‌های شناسایی‌شده توسط روش زیرفضای تصادفی باشد. گرچه همین دقت پایین شناسایی، قابلیت‌اعتماد بالایی برای کنترلر مبتنی بر شناسایی ایجاد می‌نماید. لذا می‌توان بیان نمود در سازه‌های موجود که مشخصات دقیقی از آن‌ها جهت طرح کنترلر در اختیار نمی‌باشد، استفاده از داده‌های شناسایی سیستم که با اتکا به شبکه‌ی حسگرهای سیستم پایش سلامت قرار می‌گیرد، کنترلری می‌توان طراحی نمود که پاسخگوی نیازهای یک طرح قابل قبول کنترل بوده و چه بسا غالباً عملکرد مناسب‌تری نسبت به طرح یقین‌اندیشانه خواهد داشت. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در چهارچوب فرضیات در نظر گرفته شده صادق بوده و جهت تعمیم به تمام مسائل انجام شبیه‌سازی‌هایی که تمام ویژگی‌های مساله را دربرگیرد الزامی است.

منابع

- [1] C. Papadimitriou, L. Katafygiotis, S.K. Au, Effects of structural uncertainties on TMD design: A reliability-based approach, Journal of structural control, 4(1) (1997) 65–88.
- [2] H.A. Jensen, J.G. Sepúlveda, On the reliability-based design of structures including passive energy dissipation systems, Structural safety, 34(1) (2012) 390–400.
- [3] H.A. Jensen, D. Kusanovic, On the effect of near-field excitations on the reliability-based performance and design of base-isolated structures, Probabilistic Engineering Mechanics, 36 (2014) 28–44.
- [4] B. Farahmandazar, A. Hadidi, A. Rafiee, An efficient simulation method for reliability analysis of systems with expensive-to-evaluate performance functions, Structural engineering and mechanics: An international journal, 55(5) (2015) 979–999.
- [5] E. Babaeipour, H. Khosravi, Investigation of reliability in eccentrically-braced concrete frame with viscoelastic damper, in: National Congress Numerical Methods in Civil Engineering 2015, undefined, 2015 (in Persian).
- [6] W. You, S. Alexandre, M. Ichchou, Z. Abdel, X. Zhong, Reliability modeling and prediction of passive controlled

- [24] S. Naderi, K. Karami, Y. Batmani, Real-time identification of damage in structures based on model-based adaptive identification, in: 12th National Congress of Civil Engineering, 2020 (in Persian).
- [25] T. Nestorović, N. Durrani, M. Trajkov, Experimental model identification and vibration control of a smart cantilever beam using piezoelectric actuators and sensors, *Journal of Electroceramics*, 29 (2012) 42–55.
- [26] S. Golestaneh Zadeh, M. Amin Afshar, Seismic control of damaged structure by pole assignment and intermittent wavelet-based identification, *Journal of Vibration and Control*, 29(3-4) (2023) 528–542.
- [27] M. Ebrahimi, E. Nobahar, R.K. Mohammadi, E.N. Farsangi, M. Noori, S. Li, The influence of model and measurement uncertainties on damage detection of experimental structures through recursive algorithms, *Reliability Engineering & System Safety*, 239 (2023) 109531.
- [28] F.Y. Cheng, H. Jiang, K. Lou, Smart structures: innovative systems for seismic response control, CRC press, 2008.
- [29] J. Katebi, M. Shoaie-parchin, M. Shariati, N.T. Trung, M. Khorami, Developed comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for optimal active control of structures, *Engineering with Computers*, 36 (2020) 1539–1558.
- [30] D. Skolnik, Y. Lei, E. Yu, J.W. Wallace, Identification, model updating, and response prediction of an instrumented 15-story steel-frame building, *Earthquake Spectra*, 22(3) (2006) 781–802.
- [31] P. Van Overschee, B. De Moor, Continuous-time frequency domain subspace system identification, *Signal Processing*, 52(2) (1996) 179–194.
- [32] P. Van Overschee, B. De Moor, W. Dehandschutter, J. Swevers, A subspace algorithm for the identification of discrete time frequency domain power spectra, *Automatica*, 33(12) (1997) 2147–2157.
- [33] B. Peeters, System identification and damage detection in civil engineering, (2000).
- Development, undefined, 2013 (in Persian).
- [15] H. Shariatmadar, G. Behnam-Rad, Reliability evaluation of active controlled structures using subset simulation method, in: 8th National Congress On Civil Engineering, undefined, 2014 (in Persian).
- [16] S. Askari, A. Sirazi-Mamoureh, Reliability of semi-active seismic isolation in near-fault earthquakes, in: Sixth National Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, undefined, 2019 (in Persian).
- [17] S. Pooyan, P. Homami, Seismic reliability analysis of bridges equipped with dampers, in: 2nd Conference on Seismology & Earthquake Engineering, undefined, 2015 (in Persian).
- [18] C. Zhang, W. Li, D. Liu, J. Xu, X. Feng, R. Wang, B. Wang, Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control, *Structural Safety*, 102 (2023) 102322.
- [19] S. Hosseinaei, M.R. Ghasemi, S. Etedali, T.H. Chan, Sensitivity and reliability analyses in to actively controlled structures under earthquake, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 22(12) (2022) 2250124.
- [20] A. Jalali, H. Shariatmadar, Reliability analysis of controlled structures based on probabilistic active controller, in: *Structures*, Elsevier, 2023, pp. 106–116.
- [21] R.R. Orszulik, J. Shan, Active vibration control using genetic algorithm-based system identification and positive position feedback, *Smart Materials and Structures*, 21(5) (2012) 055002.
- [22] M. Moradmand, F. Amini, P. Ghaderi, Simultaneous Online Damage Detection and Vibration Control of Structures Using Synchronization and Semi-Active Control, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, (2021) 2150038.
- [23] S. Azizi, K. Karami, S. Nagarajaiah, Developing a semi-active adjustable stiffness device using integrated damage tracking and adaptive stiffness mechanism, *Engineering Structures*, 238 (2021) 112036.

- and Exhibit, 2004, pp. 5415.
- [40] A. Graham, Kronecker Products and Matrix Calculus with Applications, Courier Dover Publications, 1981.
- [41] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Reconstructing structural changes in a dynamic system from experimentally identified state-space models, Journal of mechanical science and technology, 22 (2008) 103–112.
- [42] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Direct identification of structural damage through kronecker product method, Journal of Mechanical Science and Technology, 22(01) (2008) 103–112.
- [43] W.K. Gawronski, Advanced structural dynamics and active control of structures, Springer, 2004.
- [44] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, Journal of engineering mechanics, 130(4) (2004) 366–385.
- [45] A.S. Nowak, K.R. Collins, Reliability of structures, CRC press, 2012.
- [46] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, Journal of vibration and control, 24(13) (2018) 2938–2953.
- [34] M.R. Ashory, Investigation of the accuracy of SSI-COV method in estimation of Modal Parameters: numerical and experimental case studies, Modares Mechanical Engineering, 13(10) (2014) 127–139.
- [35] L. Mevel, M. Goursat, M. Basseville, Stochastic subspace-based structural identification and damage detection and localisation—application to the Z24 bridge benchmark, Mechanical Systems and Signal Processing, 17(1) (2003) 143–151.
- [36] C. Priori, M. De Angelis, R. Betti, On the selection of user-defined parameters in data-driven stochastic subspace identification, Mechanical Systems and Signal Processing, 100 (2018) 501–523.
- [37] L. Shieh, H. Wang, R. Yates, Discrete-continuous model conversion, Applied Mathematical Modelling, 4(6) (1980) 449–455.
- [38] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Reconstructing structural changes in a dynamic system from experimentally identified state-space models, Journal of mechanical science and technology, 22(1) (2008) 103–112.
- [39] M. Phan, R. Longman, Extracting mass, stiffness, and damping matrices from identified state-space models, in: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Gholizad, M. Shoaee-parchin, Reliability Study of Identification-based Active Control, Amirkabir J. Civil Eng., 57(5) (2025) 821-850.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23565.8182](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23565.8182)



