

## EXTENDED ABSTRACT

# Seismic Control of Structures Based on the Controllability and Stability of the Controlling System Criteria

Ali Ejtemaee, Hedayat Veladi<sup>\*</sup>, Bahman Farahmand Azar, Hosein Ghaffarzadeh, Siamak Talatahari

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

**Received:** 11 June 2024; **Reviewed:** 22 September 2024; **Accepted:** 05 October 2024

### Keywords:

State space, Controllability, Linear quadratic regulator, Stable control system, Unstable control system.

## 1. Introduction

In the present paper, the effect of controllability and control system stability was investigated. For this purpose, three, six, ten, and twenty-one-story structural models equipped with Chevron braces, viscous fluid dampers, and active regulators were selected in uncontrolled, passive-controlled, and hybrid-controlled structures. In order to stabilize the hybrid control system, the linear quadratic regulator algorithm was utilized to calculate the state feedback gain matrix and actuator response. Broadly, the results revealed that if a sufficient number of braces, dampers, and actuators are utilized in the stabilized hybrid control system, the response of braces and dampers is converged and the seismic displacement of braces and floors is decreased properly.

## 2. Dynamics and control methodology

This paper begins by elucidating the equation of motion for structures with  $n$  degrees of freedom, followed by introducing the state-space model as a mathematical framework for dynamic systems depiction. Structural buildings are represented as time-invariant linear systems within this model, with state equations defined by distinct parameters. Matrices for characterizing the state space are computed based on mechanical attributes, then applied in seismic control methodologies. The state feedback gain matrix derivation utilizes the Linear Quadratic Regulator (LQR) algorithm. Controllability denotes a structure's ability to confine seismic responses and revert post-earthquake. Its assessment involves scrutinizing matrices and strategically deploying control forces across floors. Stability relies on minor fluctuations in ground motion or structural variables not inducing significant system dynamics shifts.

### 2.1. Simulation and stability analysis

This study undertook a systematic evaluation of the seismic response within a controlled system. Initially, the structural model was developed without any control measures. Subsequently, key parameters and equations governing motion were incorporated into the model. Using MATLAB, essential matrices were computed for simulation purposes. Simultaneously, an analysis of the structure's controllability was conducted, alongside an exploration of diverse seismic control methodologies. Ensuring structural safety and post-earthquake functionality were prioritized, assuming linear structural behavior and negligible axial

stiffness of dampers. The study culminated in a comprehensive simulation, integrating provided data and assumptions, to assess the stability of the dynamic system facilitated by seismic response mitigation tools.

## 2.2. Structural models

In assessing the seismic response of building structures regarding controllability and stability within the control system framework, employing diverse models is essential. These models should include controllable nominal models as well as those with stable and unstable control systems, encompassing both inactive and semi-active control states. For this investigation, the Chevron brace system equipped with a viscous fluid damper served as the inactive control mechanism, while the hybrid configuration incorporated an active controller or actuator into the structural seismic control system. Structural models of varying heights (3, 6, 10, and 21 stories) were analyzed in three states: uncontrolled primary structure, structure with inactive control, and structure with hybrid or combined control. Control mechanisms were positioned differently across various levels of the structure. The study aimed to explore structural controllability and stability concepts within control systems, assessing their impact on seismic responses such as displacement time histories and forces exerted by control mechanisms on structure floors. MATLAB software facilitated the simulation of selected models, following the specification of assumptions, boundary conditions, and mechanical and geometrical details. Fig. 1 provides an illustrative overview of the selected models.

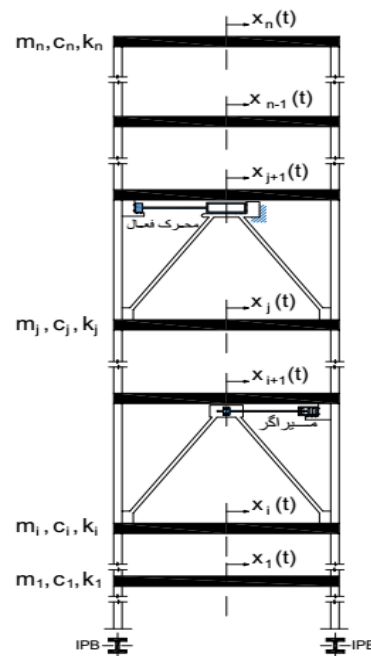


Fig. 1. Overview of structural models

## 3. Results and discussion

### 3.1. Seismic responses of three-story models

This section analyzes the seismic response history of three-story structures (Models 1 through 4), encompassing various parameters such as floor displacements, brace displacements, brace forces, and active control forces. The assessment begins with Model 1's controllability and stability, followed by an examination of its seismic response. Similar evaluations are then conducted for models equipped with control mechanisms, revealing that passive control of brace displacements and forces led to instability during earthquakes, which was mitigated by employing active control, resulting in reduced responses. Noteworthy reductions in floor displacements were observed in controlled states compared to uncontrolled ones. However, Model 4, utilizing hybrid control, exhibited divergent responses, indicating inefficiency. Numerical data is provided to elucidate the performance of different control strategies on three-story structures.

### 3.2. Seismic responses of six-story models

This segment extends the investigation to six-story structures (Models 5 through 8), following the evaluation framework applied to three-story models regarding controllability and stability. Seismic responses, particularly concerning floor displacements, are analyzed for Models 5, 6, and 7, highlighting the predominant impact of passive control on first-floor displacement, while hybrid control led to reductions across all floors. Model 8, relocating the actuator to the third floor, emphasizes the importance of consolidating control mechanisms on a single floor for effective seismic response management. Additionally, the influence of control mechanism placement on displacement is discussed, along with illustrations depicting seismic responses of various control components, emphasizing the impact of the actuator's positioning on response dynamics. Comprehensive numerical data is provided for comparative analysis of seismic responses for six-story models.

### 3.3. Seismic responses of ten-story models

This section investigates the efficacy of stable passive control systems and compares them with unstable passive and stable hybrid control systems in ten-story structures (Models 9 through 12). Seismic response analyses are conducted, initially evaluating the controllability and nominal stability of the uncontrolled structure. Models 10 and 11, configured with unstable passive and stable hybrid control systems, respectively, demonstrate significant reductions in floor displacement responses under stable hybrid control compared to the uncontrolled structure. Model 12 introduces variations in brace and damper placements, resulting in stability as indicated by the negative real parts of the structure's system matrix, particularly with a brace installed on the sixth floor. Illustrations depict seismic responses of control components, emphasizing discrepancies in first-floor brace and damper forces under unstable passive control. Furthermore, response time history plots for the ten-story models are provided, accompanied by corresponding numerical values for detailed analysis.

### 3.4. Seismic responses of twenty-one-story models

Concluding the discussion, a 21-story structure is selected in accordance with Models 13, 14, and 15, deploying various control mechanisms on different floors to mitigate seismic responses. The assessment begins with evaluating the controllability and nominal stability of the uncontrolled structure, followed by addressing instability through the establishment of a stabilized hybrid control system. The significant reduction in seismic responses with the stable hybrid control system is demonstrated through comparisons with the inactive control system. Illustrations and analyses of seismic responses highlight the effectiveness of both active and inactive control mechanisms within the hybrid system. Finally, an analysis of seismic responses of the 21-story models underscores the substantial reduction achieved with the stable hybrid control system.

## 4. Conclusions

In seismic control strategies, the initial configuration significantly influences the efficacy of passive, semi-active, and active control methods. To ensure effectiveness, structural parameters and control device placement, such as mass, stiffness, and damping, must be carefully considered. Initial steps involve expressing controllability concepts and forming matrices for nominal models. Given the impact of control device number and placement on system behavior, ensuring the effective performance of selected control systems is paramount. This research emphasizes stability as a key descriptor of control system performance. It investigates models with stable and unstable control systems, particularly focusing on the secondary dynamic system resulting from integrating primary structures with seismic control devices. Key findings are highlighted.

The study's conclusions underscore the critical influence of control device number and placement on the dynamic behavior of secondary systems, highlighting the imperative to address stability and instability separately in each structure according to its intended control system. Stability in the control system is identified as crucial for facilitating the proper performance of energy absorption and dissipation devices, resulting in significant reductions in seismic responses, thus emphasizing the necessity of ensuring stability in each structure's control system. Furthermore, the study advocates for avoiding the utilization of unstable control systems due to the notable increase in seismic responses observed in certain floors. Additionally, in structures employing inactive control systems, careful positioning of restraint and energy absorption devices is essential to maintain system stability. Lastly, the simultaneous installation of actuators and control devices on the same floor is recommended to mitigate increased shear force and displacement, which may occur when the actuator is separated from the inactive control device.

## کنترل لرزه‌ای سازه‌ها بر مبنای معیارهای کنترل پذیری و پایداری سیستم کنترلی

علی اجتماعی<sup>1</sup>، هدایت ولادی<sup>2\*</sup>، بهمن فرهمندآذر<sup>3</sup>، حسین غفارزاده<sup>4</sup>، سیامک طلعت‌اهری<sup>5</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>3</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>4</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>5</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1403/3/22، بازنگری: 1403/7/1، پذیرش: 1403/7/14، نشر آنلاین: 1403/7/14

### چکیده

استفاده از سیستم‌های کنترل ارتعاش مناسب و کارآمد به منظور تقلیل پاسخ‌های لرزه‌ای، از اهم مباحث طراحی سازه‌ها می‌باشد که همواره مورد توجه و علاقه محققان بوده است. در این پژوهش، جهت بررسی تأثیر کنترل‌پذیری و پایداری (Stability) سیستم کنترلی بر پاسخ‌های لرزه‌ای، مدل‌های سازه‌ای سه، شش، ده و بیستویک طبقه مجهز به مهاربند شورون (Chevron)، میراگر سیال ویسکوز و محرک فعال، در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال و کنترل ترکیبی (Hybrid) انتخاب شدند. سپس معادلات حرکت به فرم فضای حالت توصیف شد و کنترل‌پذیری، پایداری یا ناپایداری سیستم‌های کنترلی ارزیابی گردید. جهت پایداری‌سازی سیستم کنترل هیبریدی، الگوریتم تنظیم‌کننده مرتبه دوم خطی (LQR (Linear Quadratic Regulator)) برای محاسبه ماتریس بهره بازخورد حالت و نیروی محرک تنظیم‌کننده فعال مورد استفاده قرار گرفت. با شبیه‌سازی مدل فضای حالت (State space) معادلات حرکت و شتاب حرکت زمین در متلب، پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌ها استخراج گردید. بررسی تاریخچه زمانی پاسخ‌ها از قبیل جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی مهاربندها، نیروی میراگر و نیروی محرک فعال، نشان داد که در سیستم‌های کنترلی ناپایدار دامنه پاسخ مهاربندها و میراگرها در طول رخداد زمین‌لرزه واگرا شدند. تأثیر پایداری‌سازی با مهاربند شورون بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، تنها در برخی طبقات مشاهده گردید؛ درحالی‌که پایداری‌سازی با محرک فعال، تا حدودی بر کاهش جابه‌جایی لرزه‌ای تمام طبقات اثر گذاشت. ارزیابی کلی نتایج نشان داد که اگر از مهاربند، میراگر و محرک فعال، به‌طور هم‌زمان در یک طبقه، به تعداد کافی و در مکان مناسب، استفاده گردد، به شرط تأمین پایداری سیستم کنترلی، پاسخ مهاربندها و میراگرها همگرا شده و جابه‌جایی لرزه‌ای مهاربندها و طبقات به‌شدت کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** فضای حالت، کنترل‌پذیری، تنظیم‌کننده مرتبه دوم خطی، سیستم کنترلی پایدار، سیستم کنترلی ناپایدار.

### 1- مقدمه

سنتی همیشه برای مهار جانبی کافی نبوده و ممکن است سازه در طول عمر بهره‌برداری دچار آسیب گردد، استفاده از ابزارهای کنترل لرزه‌ای ضرورت می‌یابد که در نتیجه آن، سختی و میرایی سازه تغییر می‌کند. سازه کنترل نشده، دارای ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی اولیه‌ای است که بر اساس آن‌ها معادله حرکت تشکیل می‌گردد؛ افزودن هر نوع ابزار کنترل پاسخ لرزه‌ای موجب

یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی در سازه‌های ساختمانی، محدود نمودن جابه‌جایی جانبی طبقات آن در اثر بارهای جانبی باد و زلزله می‌باشد که به روش‌های متعددی از قبیل استفاده از سیستم‌های درجا مانند انواع مهاربندها، کنترل غیرفعال<sup>1</sup>، کنترل نیمه‌فعال<sup>2</sup> و کنترل فعال<sup>3</sup> انجام می‌پذیرد. از آنجا که روش‌های

3. Active

1. Passive

2. Semi-active



شاپا الکترونیکی: 2717-4077

ناشر: دانشگاه تبریز

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.2024.62032.2363>

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 041-33354100

\* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0002-5499-7438

آدرس ایمیل: allejtemaei@tabrizu.ac.ir (ع. اجتماعی)، hveladi@tabrizu.ac.ir (م. ولادی)، b-farahmand@tabrizu.ac.ir (ب. فرهمندآذر)،

ghaffar@tabrizu.ac.ir (ح. غفارزاده)، talatahari@tabrizu.ac.ir (س. طلعت‌اهری).

در طراحی سیستم‌های کنترلی فعال و نیمه‌فعال، طرح شامل بهینه‌سازی یکپارچه در مقایسه با طرح دارای معیار برمبنای احتمال، اثر بخشی بهتری دارد و این در حالی است که طرح معیار بر مبنای احتمال از نظر قابلیت اطمینان نتایج بهتری را برمی‌تابد. Pourzeynali و همکاران (2007) با ادغام روش‌های شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک و منطق فازی اقدام به طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف کنترل کننده جرم تنظیم‌شونده فعال<sup>3</sup> نمودند و روش پیشنهادی را در یک ساختمان 11 طبقه اعمال نمودند که در نتیجه آن کارایی مناسب روش مذکور در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان مشاهده گردید.

Jian و همکاران (2020) شبیه‌سازی کنترل نیمه‌فعال در سازه‌های مهندسی عمران را با استفاده از کنترل‌کننده PID<sup>4</sup> بر مبنای بهینه‌سازی سیستم کنترل به روش شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی کردند که نتایج حاکی از پایداری مناسب در سیستم کنترلی مدنظر بوده است.

Gu و همکاران (2021) فناوری کنترل ارتعاش لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی را با استفاده از میراگرهای مغناطیسی و روش کنترل غیرمتمرکز بررسی کردند و نشان دادند که سازگاری رفتار زیرسازه‌ها با همدیگر در سیستم کنترل غیرمتمرکز برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های کنترل‌شده ضروری می‌باشد. یکی از نکات حائز اهمیت در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه می‌باشد که Modiri و Darvishan (2021) بدان پرداخته‌اند که نتایج حاکی از تأثیر محسوس خاک بستر نرم در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه کنترل شده می‌باشد و این در حالی است که اثرات اندرکنش سازه و خاک بستر سخت، قابل اغماض است.

استفاده از میراگرهای سیال ویسکوز برای کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های برشی توسط Cetin و همکاران (2019) مورد توجه قرار گرفت که در آن به طراحی، توزیع و تأثیر مناسب ابزار کنترل غیرفعال مذکور در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته شده است. همچنین Ajay و همکاران (2021) از میراگرهای ویسکوز سیال برای کنترل پیچش ناشی از زلزله استفاده کرده و تأثیر آن بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پیچشی را مورد تأکید قرار دادند.

Hazaveh و همکاران (2020، 2021) از میراگرهای سیال ویسکوز برای کنترل لرزه‌ای سازه استفاده کرده و به صورت نظری و آزمایشگاهی تأثیر مناسب میراگر مذکور در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان را اثبات نمودند. همچنین He و همکاران (2022) از میراگر سیال ویسکوز در قاب پیش‌ساخته استفاده کرده و پاسخ نتایج آزمایشگاهی را در حالات قاب با و بدون میراگر

ایجاد تغییرات در خواص سیستم دینامیکی سازه می‌شود و بر کیفیت و کمیت پاسخ‌های لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد.

یکی از روش‌های حل معادلات حرکت سازه مجهز به ابزارهای جذب و استهلاک انرژی، توصیف معادلات حرکت سیستم دینامیکی به فرم فضای حالت می‌باشد که در آن تغییرات خواص مکانیکی سیستم دینامیکی، در ماتریس سیستم [A] و موقعیت ابزارهای کنترل لرزه‌ای در ماتریس موقعیت [B]، خود را نمایان می‌سازد.

Saad و همکاران (2015) و El ouni و همکاران (2022) مروری بر فناوری‌های نوین در سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه‌ای انجام داده‌اند و آن‌ها را بر اساس عملکردشان به چهار گروه اصلی غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی طبقه‌بندی نموده‌اند. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند و تلاش در جهت مرتفع نمودن معایب و ارتقای محاسن آن‌ها آینده مهندسی کنترل سیستم‌های سازه‌ای را تحت تأثیر قرار خواهد داد. یکی از بحث‌های جالب توجه در مهندسی کنترل سازه‌های ساختمانی، بررسی قابلیت اطمینان می‌باشد که Kobori و Kurata (2003) با طرح احتمال وجود مشکلات و خطاها در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال و با آزمایش اعمال بار دینامیکی و ارتعاش اجباری، تحقیقات لازم را انجام داده و رضایت‌بخش بودن قابلیت اطمینان در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال سازه‌های ساختمانی را تأیید کردند.

Kinay و Turan (2012) پایداری کنترل غیرفعال و امکان ناپایداری کنترل فعال را در سیستم‌های کنترلی سازه‌های ساختمانی مطرح کرده و با به‌کارگیری میراگر مغناطیسی<sup>1</sup> به‌عنوان ابزار کنترل نیمه‌فعال و جداساز پایه<sup>2</sup> با توانایی کنترل غیرفعال در یک قاب ساختمانی سه طبقه، با استفاده از روش کنترل تنظیم‌کننده مرتبه دوم خطی شبیه‌سازی نموده و کارآمدی بالای روش کنترل ترکیبی را در مقایسه با سایر روش‌های کنترل منفرد تأیید کردند.

Grrido و همکاران (2018) اهمیت پایداری سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال را مطرح کردند و کلیات فرض پایداری ذاتی سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال را تا حدی درست دانسته و اذعان نمودند که برای تضمین پایداری دائمی و دستیابی به یک عملکرد مناسب، باید تمهیدات مناسبی در میرایی، سختی و اینرسی مستقل و متغیر در سیستم‌های کنترلی اندیشید.

Zhang و Peng (2019) بهینه‌سازی کنترل لرزه‌ای بر مبنای مفهوم قابلیت اطمینان را در سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال سازه‌های ساختمانی بررسی نمودند. آن‌ها ضمن بهینه‌سازی یکپارچه ماتریس‌های وزنی در کنترل نیمه‌فعال و فعال، معیارهای بر مبنای احتمال را نیز در دستور کار خود قرار داده و دریافتند که

3. ATMD (Active Tuned Mass Damper)

4. Proportional-Integral-Derivative controller

1. MR (Magneto-Rheological) damper

2. Base isolator

$$N = 2(n + m + r) + s \quad (1)$$

## 2-1- معادله حرکت سازه و توصیف فضای حالت

پاسخ طبقات یک سازه با  $n$  درجه آزادی با تعریف  $n$  مختصه بیان می‌شود. با تعیین ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و با تعریف بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی طبقات و سپس انتخاب و اعمال شتاب‌نگاشت زلزله، معادله حرکت دینامیکی سازه در اثر زمین‌لرزه به شرح زیر بیان می‌شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{t\}\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

که در آن  $M$  ماتریس قطری جرم،  $C$  ماتریس میرایی و  $K$  ماتریس سختی سازه می‌باشد.  $\ddot{x}_g(t)$  تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین و  $t$  بردار ستونی با مؤلفه‌های واحد از مرتبه  $n \times 1$  است (Xu و همکاران، 2016). اگر سازه به ابزارهای کنترل لرزه‌ای فعال و غیرفعال تجهیز گردد، معادله حرکت دینامیکی آن به شرح زیر بازنویسی می‌شود:

$$[M_u]\{\ddot{x}\} + [C_u]\{\dot{x}\} + [K_u]\{x\} = -[M_u]\{t\}\ddot{x}_g(t) + \{f_a(t)\} + \{f_d(t)\} \quad (3)$$

که در آن  $x$  بردار جابه‌جایی طبقات سازه و مهاربندها،  $M_u$  ماتریس جرم نهایی سیستم،  $C_u$  ماتریس میرایی نهایی سیستم،  $K_u$  ماتریس سختی نهایی سیستم،  $f_a(t)$  بردار نیروی کنترل کننده فعال،  $f_d(t)$  بردار نیروی ابزار غیرفعال می‌باشند و به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$\{x(t)\}_{(n+m) \times (n+m)} = [x_s(t) \quad ; \quad x_b(t)]^T \quad (4)$$

$$[M_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ 0 & [M_b] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[C_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [C_s] + [C_{bsb}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_b] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [K_s] + [K_{bsb}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_b] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{f_a(t)\}_{(n \times 1)} = [\theta_a]_{(n \times r)} \{f_a(t)\}_{(r \times 1)} \quad (8)$$

$$\{f_d(t)\}_{(n \times 1)} = [\theta_d]_{(n \times s)} \{f_d(t)\}_{(s \times 1)} \quad (9)$$

در روابط مذکور  $x_s(t)$  بردار جابه‌جایی طبقات سازه،  $x_b(t)$  بردار جابه‌جایی مهاربندها،  $M_s$  ماتریس قطری جرم سازه،  $M_b$  ماتریس قطری مهاربندهای طبقات،  $C_s$  ماتریس میرایی سازه،  $C_b$  ماتریس میرایی مهاربندها،  $K_s$  ماتریس سختی سازه،  $K_b$  ماتریس سختی مهاربندها،  $\theta_a$  ماتریس موقعیت عامل‌های پایدارساز فعال

گزارش نمودند که در آن تأثیر مناسب میراگر سیال ویسکوز در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مشاهده گردید.

Babaei و همکاران (2022) کنترل لرزه‌ای دو مدل 7 و 12 طبقه را با استفاده از میراگر سیال ویسکوز، به صورت نظری مورد ارزیابی قرار دادند و تأثیر ابزار کنترل غیرفعال در کاهش جابه‌جایی و شتاب طبقات را گزارش کردند. جهت کنترل لرزه‌ای نیمه‌فعال و هیبریدی سازه‌ها، الگوریتم کنترل تنظیم‌کننده خطی مرتبه دوم LQR همواره مورد استقبال پژوهشگران بوده است.

Lopez-Queija و همکاران (2022) با استفاده از الگوریتم مذکور، پاسخ توربین‌های بادی شناور را مهار نموده و خروجی مطلوب آن را گزارش دادند. همچنین Velagic و همکاران (2022) کارآمدی الگوریتم کنترل مذکور در صنعت هوا و فضا را نشان دادند که در آن توصیف معادلات سیستم مکانیکی به فرم فضای حالت بوده و شبیه‌سازی در متلب انجام گرفته است. سیستم مکانیکی پاندول معکوس<sup>1</sup> توسط Chacko و همکاران (2022) با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردید و در آن پایدارسازی سیستم کنترلی مدنظر، با کنترل‌کننده فعال طراحی شده بر مبنای الگوریتم LQR انجام گرفت و نتایج مطلوب روش کنترل اتخاذی ارائه شد. هدف از این پژوهش استفاده از میراگر سیال ویسکوز، کنترل‌کننده فعال و مهاربند شورون برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی می‌باشد که در آن با توصیف معادلات حرکت به فرم فضای حالت و شبیه‌سازی در متلب، کنترل‌پذیری سازه کنترل نشده و پایداری نامی سیستم مکانیکی سازه در حالت کنترل غیرفعال بررسی گردیده و پاسخ‌های لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار باشد جهت پایدارسازی آن از کنترل‌کننده فعال طراحی شده بر مبنای الگوریتم LQR استفاده می‌گردد، سپس نتایج پاسخ‌های لرزه‌ای استخراج شده و با نتایج حالات کنترل نشده و کنترل غیرفعال مقایسه شده و مناسب‌ترین روش کنترل مدل‌های اتخاذی گزارش می‌گردد.

## 2- تحلیل سیستم دینامیکی

برای بررسی رفتار یک سیستم دینامیکی باید بتوان مدلی از آن تهیه کرد تا امکان شبیه‌سازی و تحلیل آن فراهم گردد. توصیف فضای حالت معادله حرکت سیستم با  $n$  درجه آزادی و  $m$  طبقه دارای مهاربند، با  $r$  تعداد عامل پایدارساز فعال و  $s$  تعداد میراگر ویسکوز، با توجه به پیکربندی سازه، روش مناسبی برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای می‌باشد که امکان شبیه‌سازی آن در محیط نرم‌افزار متلب وجود دارد که ماتریس چنین سیستمی از درجه  $N$  برخوردار است و مرتبه آن به شرح زیر می‌باشد:

$$[A]_{(N \times N)} = \begin{bmatrix} [0] & [I] & [0] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[\gamma_p] \\ [0] & P_1 & P_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در آن  $\gamma_p$  ماتریس مربوط به موقعیت میراگر و مهاربند می‌باشد و به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$[\gamma_p]_{(n+m) \times s} = \begin{bmatrix} [I]_{n \times n} [\theta_a]_{n \times s} \\ -[\theta_b]_{m \times n}^T [I]_{n \times n} [\theta_a]_{n \times s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن  $\theta_b$  ماتریس موقعیت مهاربندها و  $\theta_a$  ماتریس موقعیت میراگرها در سازه می‌باشد. همچنین عناصر غیرصفر ماتریس  $P_1$  و ماتریس قطری  $P_2$  با توجه به رفتار دینامیکی میراگر ویسکوز براساس مدل ماکسول با ضریب میرایی  $C_k$  و زمان درنگ  $\lambda_k$  به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} P_1(k, l) = -C_k / \lambda_k \\ P_1(k, j + n) = C_k / \lambda_k \\ P_2(k, k) = -1 / \lambda_k \end{cases} \quad (13)$$

اکنون با توجه به فرم توصیف شده معادلات حالت سیستم دینامیکی سازه ساختمانی، می‌توان تابع تبدیل<sup>2</sup> آن را تعیین کرد که برای سیستم‌های دارای چند ورودی و چند خروجی، ماتریسی از توابع تبدیل حاصل می‌شود، این توابع تبدیل که از روی ماتریس‌های  $A, B, C$  و  $D$  محاسبه می‌گردند، منحصر به فرد هستند (Cheng و همکاران، 2008).

## 2-2- ماتریس بهره بازخورد حالت<sup>3</sup>

کنترل هیبریدی یعنی کنترل سازه با ترکیب ابزارهای فعال و غیرفعال جذب و مستهلک کننده انرژی ناشی از زلزله با هدف کاهش جابه‌جایی جانبی لرزه‌ای طبقات ساختمان می‌باشد که ممکن است در آن از انواع سیستم‌های مهاربندی جانبی و یا قاب‌های خمشی نیز استفاده گردد. بر اساس توصیف معادله حرکت سازه به فرم فضای حالت، برای محاسبه نیروی ابزار تنظیم‌کننده فعال، سیستم مکانیکی مدنظر مطابق شکل (1) تعریف می‌گردد، که در آن ماتریس بهره بازخورد حالت  $G$  بردار نیروی کنترل‌کننده فعال را به شرح زیر به دست می‌دهد (Xu و همکاران، 2016):

$$u(t) = -Gz(t) \quad (14)$$

و برای محاسبه ماتریس بهره بازخورد حالت، از الگوریتم کنترل LQR استفاده می‌گردد. با توجه به معادله (10) و با در دست داشتن ماتریس‌های  $A, B, C$  و  $D$  برای سیستم مکانیکی سازه

و  $\theta_a$  ماتریس موقعیت میراگرها می‌باشند. روش محاسبه سایر مؤلفه‌های درگیر ماتریس‌های میرایی و سختی سیستم دینامیکی مذکور در مرجع اصلی به تفصیل بیان شده است (Cheng و همکاران، 2008).

هرکدام از بردارهای نیرویی مذکور تابعی از ماتریس‌های موقعیت ابزارهای کنترلی متناظر بوده و ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه کنترل شده، از طریق اعمال مشخصه‌های جرم، سختی و میرایی کنترل‌کننده‌ها در ماتریس‌های سازه اولیه تصحیح می‌گردند.

مدل فضای حالت، در واقع نوعی نمایش ریاضی سیستم دینامیکی است که شرط لازم و کافی برای تعیین رفتار یگانه سیستم در تمام زمان‌های آینده، داشتن سه ویژگی از قبیل مشخصات مکانیکی سیستم، تعیین مقدار متغیرهای حالت سیستم در زمان اولیه و تعیین ورودی‌های سیستم در تمام زمان‌های آینده می‌باشد. در این سیستم سازه‌ای معادلات حالت از نوع زمان پیوسته خطی بوده و مختصه‌های جرم، میرایی و سختی طبقات دارای مقادیر عددی نامتغیر با زمان است. بنابراین مدل حالت سیستم دینامیکی سازه ساختمانی از نوع خطی نامتغیر با زمان<sup>1</sup> می‌باشد که در آن معادلات حالت با پارامترهای مجزا و نامتغیر با زمان تعریف می‌شوند و در نهایت شکل برداری معادلات حالت مذکور برای سیستم با  $r$  ورودی،  $n$  متغیر حالت و  $m$  خروجی به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = [A]z(t) + [B]u(t) \\ y(t) = [C]z(t) + [D]u(t) \\ z(t) = [\{x(t)\}, \{\dot{x}(t)\}, \{f_a(t)\}, \{f_d(t)\}]^T \end{cases} \quad (10)$$

که در آن  $z(t) \in R^n$  بردار حالت،  $u(t) \in R^r$  بردار نیروی فعال،  $y(t) \in R^m$  بردار خروجی سیستم بوده و  $B_{n \times r} = R^{n \times r}$  ماتریس وابسته به موقعیت نیروی محرک  $u(t)$  بوده و در آن مختصه‌های مربوط به طبقه دارای محرک پایدارساز فعال یک و مابقی صفر می‌باشد. همچنین  $C_{m \times n} \in R^{m \times n}$  ماتریس وابسته به خروجی بوده و درایه‌های مربوط به خروجی‌های مد نظر یک و مابقی صفر است. به علاوه  $D_{m \times r} \in R^{m \times r}$  ماتریس انتقال سیستم است که در این پژوهش تمامی عناصر آن صفر می‌باشد (Xu و همکاران، 2016).

برای سازه مجهز به مهاربند شورون و میراگر ویسکوز،  $A_{N \times N} = R^{n \times n}$  ماتریس سیستم نام دارد و با توجه به ماتریس‌های پارامتری  $P_1$  و  $P_2$  به شرح زیر بیان می‌گردد:

سیستم حلقه بسته با کنترل بازخورد متغیرهای حالت طراحی شود، همانند سیستم حلقه باز کنترل پذیر خواهد شد. اکنون با توجه به مفهوم ارائه شده، ماتریس کنترل پذیری سیستم دینامیکی سازه ساختمانی مجهز به ابزارهای کنترلی به شرح زیر بیان می‌گردد:

$$P_{n \times nr} = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (18)$$

که در آن معیار کنترل پذیر بودن سیستم آن است که مرتبه<sup>1</sup> ماتریس کنترل پذیری برابر با مرتبه سطری ماتریس سیستم باشد (Xu و همکاران، 2016). این فرآیند در متلب با توجه به ماتریس‌های A و B و با استفاده از دستور ctrb(A,B) قابل محاسبه و ارزیابی است.

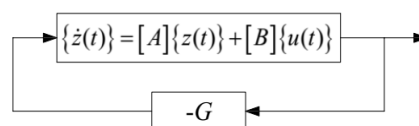
### 2-3-2- پایداری

سیستم کنترلی پایدار سیستمی است که در آن، کاهش جابه‌جایی لرزه‌ای طبقات همگرا باشد و به سمت نقطه تعادل اولیه یعنی حالت قبل از وقوع زلزله میل نماید. پایداری یک سیستم دینامیکی تحت کنترل به زبان ساده بیان می‌نماید که آیا تغییرات اندک در شتاب حرکت زمین به‌عنوان ورودی و یا تغییرات در برخی از متغیرهای حالت سیستم سازه‌ای، منجر به ایجاد تغییرات بزرگ در رفتار یا خروجی نهایی سیستم سازه‌ای می‌گردد یا خیر. در سیستم سازه ساختمانی وضعیت قبل از تأثیر زلزله یعنی سازه در شرایط ایستا، نقطه تعادل اولیه نام دارد و تحلیل پایداری کنترلی نیز حول این نقطه انجام می‌یابد. در شرایط تعادل اولیه رفتار مصالح سازه در محدوده ارتجاعی می‌باشد و هیچ‌گونه تسلیم یا تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای رخ نداده است. در صورت تشکیل مفاصل پلاستیک در برخی مفاصل پلاستیک در سازه، ممکن است تعداد نقاط تعادل ازدیاد پیدا کند که در این صورت بررسی و تشخیص پایداری کنترلی سیستم پیچیده‌تر می‌شود. بنابراین در این پژوهش حفظ رفتار خطی در مصالح سازه در حین وقوع زلزله فرض مناسبی است و این بدان مفهوم است که نیروهای عکس‌العمل ابزارهای کنترلی، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را طوری مهار می‌نمایند که در طول رخداد زمین لرزه کاهش جابه‌جایی طبقات به‌خوبی مشاهده گردد، در این صورت سازه از لحاظ کنترلی پایدار تلقی می‌شود و پاسخ طبقات آن حول نقطه تعادل اولیه نوسان می‌نماید و سرانجام به وضعیت نقطه تعادل اولیه یعنی وضعیت قبل از تأثیر زلزله میل می‌کند. یکی دیگر از روش‌های نمایش مدل سیستم دینامیکی سازه‌های ساختمانی، تابع تبدیل می‌تواند باشد که در آن قطب‌ها یا ریشه‌های مخرج تابع تبدیل پایداری سیستم را مشخص می‌نماید. اگر تابع تبدیل از معادلات حالت سیستم

کنترل شده، ماتریس بهره بازخورد حالت با دستور lqr در متلب و به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$G = lqr(A,B,C,D) \quad (15)$$

به طوری که شاخص عملکرد زیر حداقل گردد (Xu و همکاران، 2016):



شکل 1- نمایش سیستم مکانیکی با پایدارساز فعال دارای ماتریس بهره G (Xu و همکاران، 2017)

$$PFI = \int_{t_0}^{\infty} [\{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\}] dt \quad (16)$$

که در آن Q و R ماتریس‌های وزنی هستند و به ترتیب ماتریس‌های نیمه‌متعین مثبت و متعین مثبت می‌باشند. مقادیر ماتریس‌های وزنی برای سازه‌های ساختمانی را می‌توان به شرح زیر اختیار نمود (Ghaffarzadeh و همکاران، 2015):

$$Q = [I]_{N \times N}, R = 10^{-12} [I]_{r \times 1} \quad (17)$$

### 2-3-2- مفهوم و معیار کنترل پذیری و پایداری

#### 2-3-2-1- کنترل پذیری

اگر پیکربندی سازه طوری باشد که ابزارهای کنترلی بتوانند در حین رخداد زلزله، پاسخ‌های لرزه‌ای را در زمان محدود کاهش داده و سرانجام به وضعیت اولیه یعنی حالت قبل از وقوع زلزله برسانند، چنین سازه‌ای را کنترل پذیر نامند؛ در غیر این صورت سازه کنترل ناپذیر است و در خصوص پیکربندی آن باید تجدید نظر شود. متغیرهای حالت سیستم دینامیکی سازه‌های ساختمانی، جابه‌جایی، سرعت و شتاب طبقات آن می‌باشند که تحت اثر شتاب حرکت زمین به‌عنوان ورودی سیستم، دچار تغییرات می‌گردند و قبل از اعمال روش‌های کنترلی سازه، باید از مؤثر واقع شدن نیروی انواع ابزارهای کنترلی کننده در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای اطمینان حاصل کرد. بنابراین موقعیت نیروهای کنترلی کننده پاسخ‌های لرزه‌ای در طبقات سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و پاسخ به این سوال از طریق ارزیابی معیار کنترل پذیری صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که کنترل پذیری در سیستم‌های حلقه باز مورد بررسی قرار می‌گیرد و اگر سیستم حلقه باز کنترل پذیر باشد سیستم حلقه بسته نیز کنترل پذیر خواهد شد. همچنین اگر

این حالت ماتریس سیستم A بدون هرگونه ابزارهای کنترلی تشکیل شده و با استفاده از دستور Isim در متلب، تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقات سازه در حالت کنترل نشده استخراج می‌شود. پس از تحلیل مدل نامی، کنترل‌پذیری آن مطابق رابطه (18) با استفاده از دستور ctrfb در متلب ارزیابی می‌گردد. لازم به ذکر است که مدل نامی در سیستم دینامیکی سازه ساختمانی به دلیل کفایت تعداد و آرایش صحیح عناصر سازه‌ای، کنترل‌پذیر می‌باشد. در صورت افزودن ابزارهای کنترل غیرفعال، امکان عدم تأمین کنترل‌پذیری وجود دارد که آن‌هم با تغییر آرایش ابزارهای مذکور امکان تأمین شرط کنترل‌پذیری مهیا می‌شود. در این پژوهش، فرضیات و اطلاعات مربوط به خواص هندسی و مکانیکی مورد نیاز مدل‌های سازه‌ای مطابق جدول (1) انتخاب گردیده است. با توجه به این‌که اساس استراتژی در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، عدم تجربه خرابی اعضای سازه‌ای و ضرورت حفظ ایمنی و امکان بهره‌برداری پس از وقوع زلزله می‌باشد، رفتار مصالح سازه‌ای خطی در نظر گرفته شد. همچنین از تأثیر سختی محوری اعضای تشکیل‌دهنده میراگر در ماتریس سختی سازه صرف نظر گردید.

جدول 1- فرضیات، خواص هندسی و مکانیکی مدل‌ها

ردیف	خواص سازه‌ای	توصیف یا مقدار (واحد)
1	نوع فولاد	St52
2	شرایط و مقاطع ستون‌ها	دوسر گیردار، IPB متوسط، خمش حول محور ضعیف مقطع
3	جرم هر طبقه	با در نظر گرفتن ظرفیت کماتش ستون‌ها، 55 تن
4	دیافراگم طبقات	صلب
5	سختی هر طبقه	با فرض رفتار ستون دوسر گیردار تعیین می‌شود
6	معیار محاسبه میرایی	فرمول رایلی
7	نسبت میرایی اعضای سازه و مهاربندها	5 درصد
8	نوع مهاربندی سازه	بادبند شورون
9	جرم مهاربند	0/3 تن
10	سختی مهاربند	0/20 تن بر متر
11	ضریب میرایی میراگر ویسکوز	0/0553 تن بر ثانیه
12	زمان درنگ <sup>2</sup> میراگر ویسکوز	0/025 ثانیه
13	تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین	زلزله طبس- ایران، RSN=137 (2022, PEER)
14	مدل تحلیل میراگر	مدل ماکسول
15	رفتار مصالح سازه	خطی
16	الگوریتم پایدارسازی فعال	تنظیم‌کننده خطی درجه دوم (LQR)

استخراج شود و مرتبه آن با مرتبه معادلات حالت برابر باشد، در این صورت هیچ حذف صفر یا قطب رخ نداده است و چنین سیستمی نیز کنترل‌پذیر می‌باشد که در آن تعداد قطب‌ها با تعداد مقادیر ویژه برابر است و مقادیر قطب‌ها نیز با مقادیر ویژه برابر هستند. نظریه نامتغیر با زمان<sup>1</sup> بودن معادله حالت سیستم دینامیکی خطی سازه ساختمانی و فرم ماتریسی رابطه (19)، مخرج تابع تبدیل با رابطه (20) بیان می‌شود (Xu و همکاران، 2016):

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (19)$$

$$\det(sI - A)^{-1} = 0 \quad (20)$$

که در آن I ماتریس واحد، s متغیر مختلط در تبدیل لاپلاس و G(s) تابع تبدیل سیستم است. همچنین معادله (20) مقادیر ویژه ماتریس سیستم را بر می‌تابد که همان قطب‌های سیستم می‌باشد. حال اگر در سیستم حذف صفر و قطب رخ دهد مرتبه تابع تبدیل کمتر از مرتبه معادلات حالت سیستم می‌شود و برخی از مقادیر ویژه ماتریس سیستم در تابع تبدیل نمایان نمی‌شوند. بنابراین هر قطب تابع تبدیل یکی از مقادیر ویژه ماتریس سیستم در معادلات حالت است و این درحالی است که همه مقادیر ویژه الزاماً قطب نیستند. اکنون با توجه به مفاهیم ارائه شده قضیه زیر در مورد سازه‌های ساختمانی بازنویسی می‌شود:

قضیه پایداری: اگر نمایش ریاضی سیستم‌های دینامیکی خطی زمان پیوسته و ایستای سازه‌های ساختمانی با تابع تبدیل بیان شود، در این صورت شرایط پایداری آن است که همه قطب‌های سیستم مذکور در سمت چپ محور موهومی قرار بگیرد، یعنی همه قطب‌های حقیقی و قسمت حقیقی قطب‌های مختلط منفی باشند. بنابراین با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم دینامیکی سازه ساختمانی، می‌توان در مورد پایداری اظهار نظر نمود.

## 2-4- شبیه‌سازی در متلب

در فرآیند شبیه‌سازی، برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای، ابتدا مدل نامی یا اصلی تعریف می‌گردد. مدل نامی همان سازه اولیه کنترل نشده می‌باشد که تعداد طبقات و مؤلفه‌های جرم و سختی طبقات مطابق جدول (1) معلوم است. براساس این مؤلفه‌ها ماتریس‌های جرم و سختی سازه اولیه تعیین می‌شود، سپس به روش رایلی ماتریس میرایی محاسبه می‌گردد. در نهایت با اعمال تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین معادله حرکت (2) برای سازه نامی تشکیل گردیده و به فرم فضای حالت توصیف می‌شود. در

هیبریدی حاصل می‌شود که در این صورت بردار نیروی فعال به معادله حرکت سازه و متعاقباً به فرم توصیف فضای حالت اضافه می‌گردد. با استفاده از روابط (10) تا (13) مدل حاصل تحلیل شده و پایداری آن با استفاده از روابط (19) و (20) ارزیابی می‌شود، سپس پاسخ‌های لرزه‌ای سازه با سیستم کنترل هیبریدی از قبیل جابه‌جایی طبقات سازه و مهاربندها و نیز نیروی عکس‌العمل میراگرها با استفاده از دستور Isim در متلب استخراج می‌گردد. همچنین نیروی محرک فعال پایدارساز نیز با استفاده از دستور Iqr در متلب حاصل شده و با سایر مدل‌ها مقایسه می‌شود.

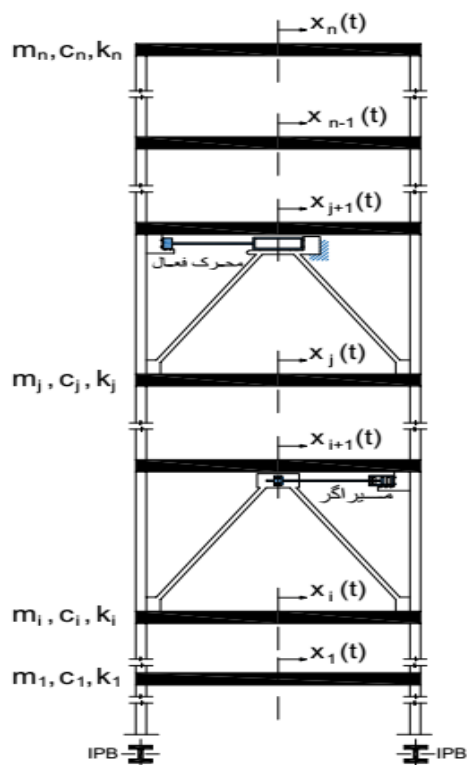
### 3- مدل‌های سازه‌ای

برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مبتنی بر مفهوم کنترل‌پذیری و پایداری سیستم کنترلی، مدل‌هایی از قبیل مدل نامی کنترل‌پذیر و سایر مدل‌های دارای سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار در حالات کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال مورد نیاز است. در این پژوهش، سیستم مهاربند شورون مجهزه میراگر سیال ویسکوز به‌عنوان ابزار کنترل‌کننده غیرفعال انتخاب شد و در حالت کنترل هیبریدی، کنترل‌کننده یا محرک فعال به سیستم کنترل لرزه‌ای سازه اضافه گردید. بدین‌منظور مدل‌های سازه‌ای 3، 6، 10 و 21 طبقه در حالات سازه اصلی بدون کنترل، سازه با کنترل غیرفعال و سازه با کنترل هیبریدی مطابق جدول (2) انتخاب شدند که در آن‌ها ماتریس‌های موقعیت مهاربندهای شورون و ابزارهای کنترل غیرفعال و فعال در ارتفاع سازه متفاوت اتخاذ گردید.

پس از اطمینان از کنترل‌پذیری سیستم نامی، روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه اتخاذ شده و با توجه به اطلاعات و فرضیات مندرج در جدول (1) از قبیل مقاطع ستون‌ها، جرم طبقات و مهاربندها، سختی طبقات و مهاربندها، میرایی طبقات و مهاربندها، ضریب میرایی و زمان درنگ میراگر ویسکوز با رفتار مدل ماکسول، مدل مجهزه ابزارهای کنترل غیرفعال تشکیل شده و مطابق روابط (5) تا (7) ماتریس‌های نهایی جرم، سختی و میرایی محاسبه شده و با تعریف تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقات و بردار نیروهای خروجی ابزارهای کنترل براساس روابط (4)، (8) و (9)، مطابق رابطه (3)، معادله حرکت سیستم دینامیکی حاصل شکل می‌گیرد. در این گام ماتریس‌های موقعیت مهاربندها و ابزارهای کنترل لرزه‌ای در پاسخ‌های لرزه‌ای خروجی سیستم دینامیکی مطابق روابط (8) و (9) تأثیر داده می‌شود. در ادامه، مدل فضای حالت سیستم در حالت کنترل غیرفعال طبق رابطه (10) توصیف شده و ماتریس سیستم دینامیکی A مطابق روابط (11) تا (13) تشکیل می‌شود، درنهایت با استفاده از دستور Isim در متلب می‌توان پاسخ‌های لرزه‌ای خروجی از قبیل جابه‌جایی طبقات و مهاربندها و نیز نیروی میراگرها را استخراج نمود. نکته قابل توجه تعیین ماتریس موقعیت مهاربند  $\theta$  و ماتریس موقعیت میراگر ویسکوز  $\theta_a$  است که با توجه به مرتبه ماتریس‌های موقعیت مذکور در رابطه (12)، درایه‌های مربوط به طبقات دارای مهاربند یا میراگر یک و سایر درایه‌ها صفر می‌باشد. به‌عنوان مثال اگر یک سازه شش طبقه دارای 2 عدد مهاربند و میراگر در طبقات یک و سه باشد، مرتبه ماتریس موقعیت  $6 \times 2$  بوده که در آن  $\theta(1,1)$  و  $\theta(3,2)$  برابر یک و مابقی درایه‌ها صفر خواهد بود. به طریق مشابه، با افزودن محرک فعال پایدارساز به سازه دارای ابزار کنترل غیرفعال، سیستم کنترل

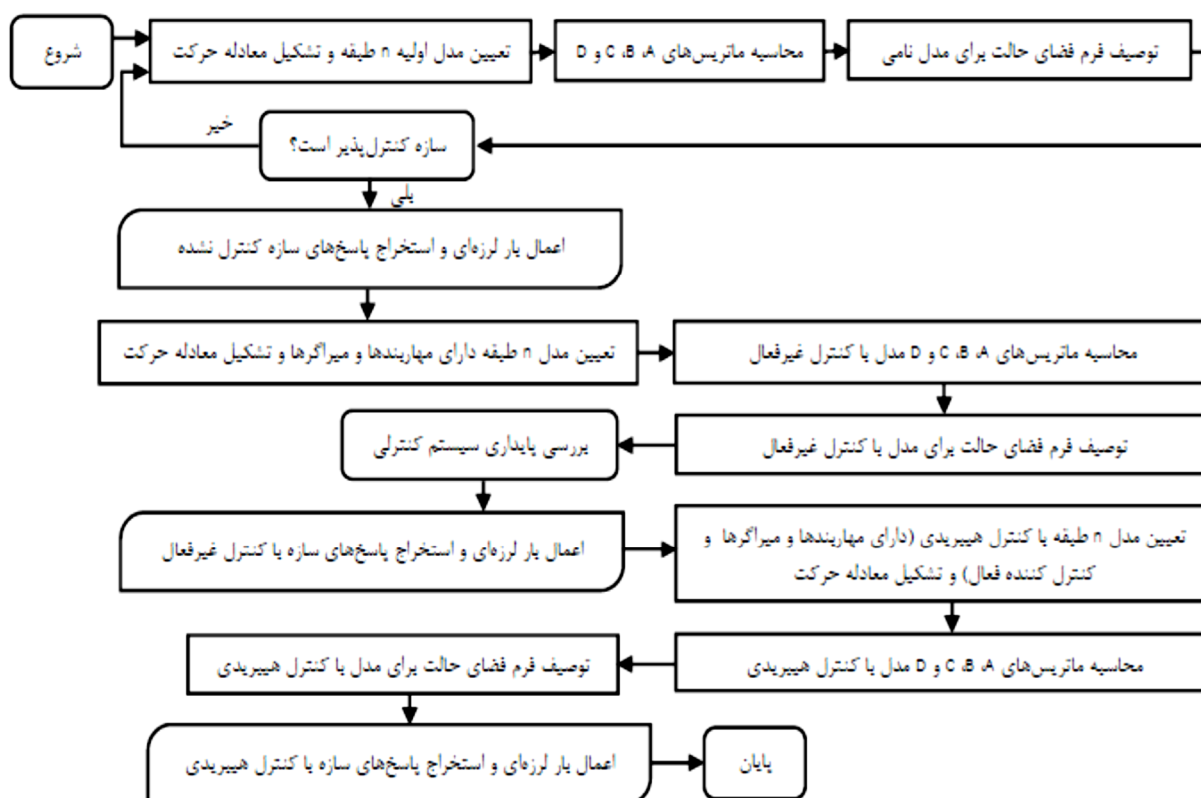
جدول 2- مشخصات مدل‌های سازه‌ای کنترل‌شده و توصیف سیستم‌های کنترلی

شماره مدل	تعداد طبقه	سیستم کنترلی	مکان مهاربند شورون	مکان میراگر سیال ویسکوز	مکان محرک فعال پایدارساز	مقاطع ستون‌ها از طبقه یک به بالا (IPB)
1	3	کنترل نشده				
2	3	کنترل غیرفعال	طبقه 1	طبقه 1	-	IPB160, 140, 120
3	3	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه 1	طبقه 1	طبقه 1	
4	3	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات 1 و 3	طبقه 1	طبقه 3	
5	6	کنترل نشده				
6	6	کنترل غیرفعال	طبقه 1	طبقه 1	-	IPB200, 200, 180, 160, 140, 120
7	6	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه 1	طبقه 1	طبقه 1	
8	6	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات 1 و 3	طبقه 1	طبقه 3	
9	10	کنترل نشده				
10	10	کنترل غیرفعال	طبقه 1	طبقه 1	-	IPB240, 240, 220, 220, 200, 200, 180, 160, 140, 120
11	10	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه 1	طبقه 1	طبقه 1	
12	10	کنترل غیرفعال	طبقات 5، 6 و 7	طبقات 5 و 7	-	
13	21	کنترل نشده				IPB450, 400, 360, 340, 320, 320, 300, 300, 280, 280, 260, 240, 240, 220, 220, 200, 200, 180, 160, 140, 120
14	21	کنترل غیرفعال	طبقات 1، 11 و 21	طبقات 1، 11 و 21	-	
15	21	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات 1، 11 و 21	طبقات 1، 11 و 21	طبقات 1، 11 و 21	



شکل 2- نمایش مدل سازه‌ای n طبقه

هدف از ایجاد تنوع در روش‌های کنترل، بررسی مفاهیم کنترل‌پذیری سازه اصلی و پایداری سیستم‌های کنترلی و نیز تأثیر این دو بر پاسخ‌های لرزه‌ای طبقات سازه مانند تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌ها و نیروی عکس‌العمل ابزارهای کنترلی بوده است. در تمامی مدل‌ها، مطابق فرآیند شبیه‌سازی توصیف شده، ابتدا کنترل‌پذیری مدل نامی یا اصلی ارزیابی گردید، سپس روش‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال و هیبریدی اتخاذ شد و با توجه به اطلاعات و فرضیات مندرج در جدول (1)، شبیه‌سازی شده و ماتریس‌های مورد نیاز محاسبه گردید که در آن‌ها با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم A، در مورد پایداری سیستم کنترل لرزه‌ای اظهار نظر گردید. شکل (2) نمایش مدل سازه n طبقه مجهز به مهاربندها و ابزارهای کنترل لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (3) نمودار روند شبیه‌سازی مدل‌های سازه‌ای ارائه شده است.



شکل 3- نمودار روند شبیه‌سازی مدل سازه‌ای

## 4- نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا فرضیات و سیستم‌های کنترلی مدل‌ها در متلب پیاده‌سازی شده و مفاهیم کنترل‌پذیری و پایداری بررسی گردیدند، سپس پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های یک تا پانزده استخراج و ترسیم شدند. بررسی مفهوم کنترل‌پذیری و پایداری داخلی با توجه به مشخصات هندسی و مکانیکی در سازه اصلی یا اولیه انجام شد که در آن با محاسبه ماتریس کنترل‌پذیری و با توجه به کامل بودن مرتبه آن، کنترل‌پذیر بودن سیستم تأیید گردید. لازم به ذکر است که در صورت کنترل‌پذیر نبودن، تجدید نظر در سیستم سازه‌ای اولیه ضرورت پیدا می‌کند. مفهوم پایداری مربوط به سازه کنترل نشده و سیستم نامی سازه‌های کنترل شده با انواع ابزارهای فعال و غیرفعال می‌باشد.

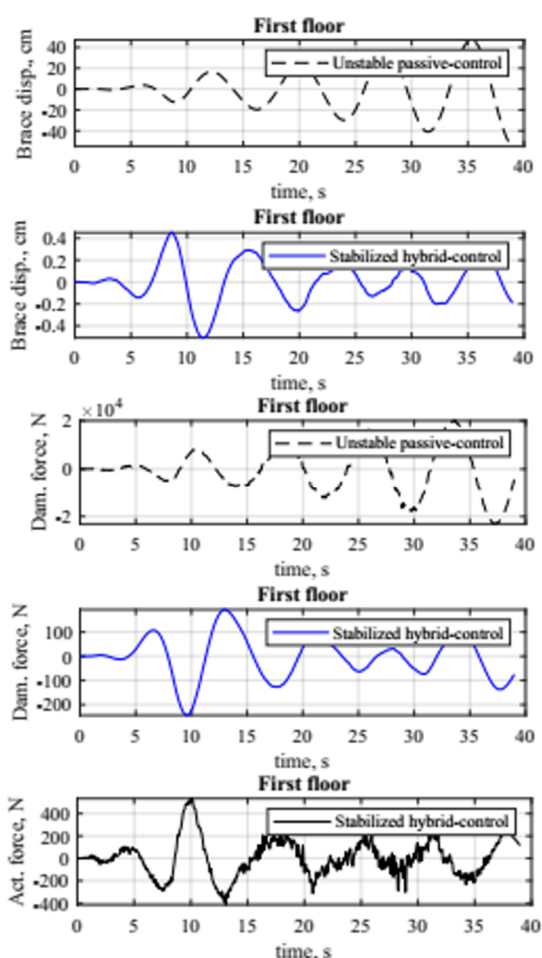
سیستم نامی هر مدل کنترل‌شده، همان سیستم مکانیکی سازه‌ای می‌باشد که در آن خواص مکانیکی ابزارهای کنترل فعال و غیرفعال به‌خواص مکانیکی سازه و متعاقباً به ماتریس سیستم سازه‌ای تأثیر می‌گذارند. با این توصیف اضافه نمودن میراگر، مهاربند شورون و محرک فعال به سیستم سازه‌ای منجر به افزوده شدن خواص هندسی و مکانیکی آن‌ها به خواص هندسی و مکانیکی سازه اصلی شد و منجر به تغییر یافتن ماتریس سیستم گردید و بدین طریق مدل نامی متناظر با سیستم کنترلی حاصل گشت که کارآمدی و اثرگذاری آن در کنترل لرزه‌ای سازه حائز اهمیت است. برای بررسی اثرات روش کنترل اتخاذی باید با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم، از پایدار بودن سیستم کنترلی مطمئن بود، در جدول (3) نتایج کنترل‌پذیری و پایداری مدل‌ها ارائه شده است.

## جدول 3- نتایج تحلیل کنترل‌پذیری و پایداری

شماره مدل	روش کنترل	نتیجه تحلیل
1	کنترل نشده	کنترل‌پذیر و پایدار نامی
2	کنترل غیرفعال	ناپایدار
3	کنترل هیبریدی	پایدار
4	کنترل هیبریدی	پایدار
5	کنترل نشده	کنترل‌پذیر و پایدار نامی
6	کنترل غیرفعال	ناپایدار
7	کنترل هیبریدی	پایدار
8	کنترل هیبریدی	پایدار
9	کنترل نشده	کنترل‌پذیر و پایدار نامی
10	کنترل غیرفعال	ناپایدار
11	کنترل هیبریدی	پایدار
12	کنترل غیرفعال	پایدار
13	کنترل نشده	کنترل‌پذیر و پایدار نامی
14	کنترل غیرفعال	ناپایدار
15	کنترل هیبریدی	پایدار

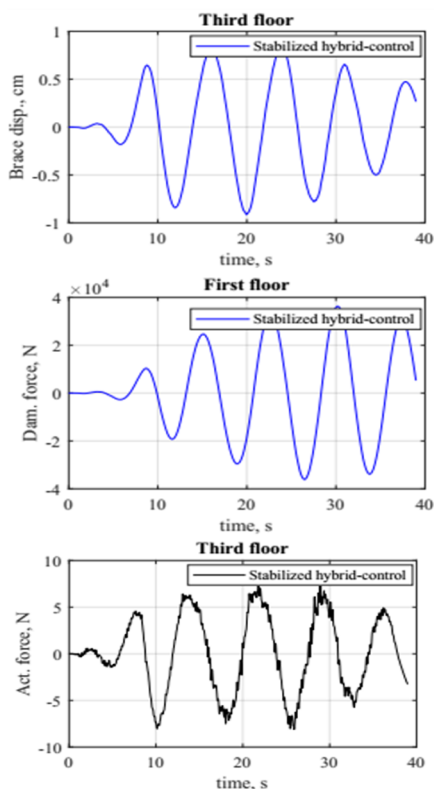
## 4-1- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه‌طبقه

تاریخچه زمانی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های سه‌طبقه از قبیل جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی مهاربند، نیروی میراگر و نیروی کنترل‌کننده فعال مربوط به مدل‌های 1 تا 4 به ترتیب در شکل‌های (4)، (5)، (6) و (7) نمایش داده شده است. ابتدا مدل 1 تعریف شد و کنترل‌پذیری و پایداری اولیه آن با توجه به مرتبه و مقادیر ویژه ماتریس سیستم ارزیابی گردید، سپس مدل مذکور تحت نیروی زلزله تحلیل شد و پاسخ آن جهت مقایسه با پاسخ سایر مدل‌های سه‌طبقه استخراج گردید. مشابه مدل اولیه، ماتریس سیستم در مدل‌های دارای ابزارهای کنترلی بررسی شد و ضمن ارزیابی کنترل‌پذیری و پایداری سایر مدل‌های سه‌طبقه منتخب، نتایج حاصل در جدول (3) درج گردید. در شکل (4) پاسخ مدل‌های سه‌طبقه، در حالات کنترل‌نشده، کنترل غیرفعال با میراگر و مهاربند در طبقه اول و کنترل هیبریدی با میراگر و مهاربند و محرک فعال در طبقه اول نشان داده شده است.



شکل 4- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های 1، 2 و 3 (سه‌طبقه)، شامل

تاریخچه زمانی جابه‌جایی مهاربند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل‌کننده فعال در حالات سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار

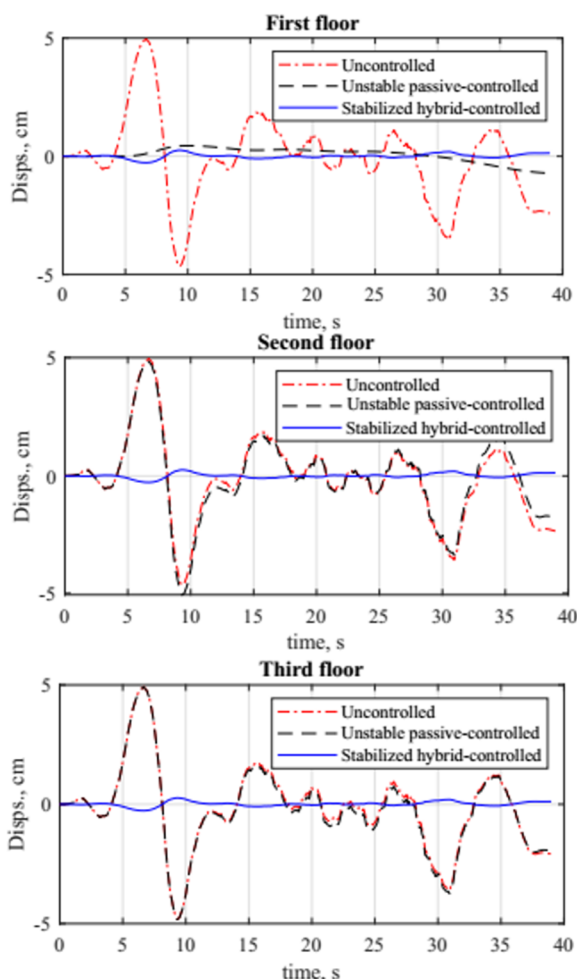


شکل 6- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل 4 (سه طبقه) شامل جابه‌جایی مهابند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل‌کننده فعال در حالت سیستم کنترل مرکب پایدار

در ادامه بررسی‌های سازه سه طبقه، مدل 4 با حالات کنترل غیرفعال با یک مهابند و میراگر در طبقه اول و کنترل هیبریدی با یک مهابند و محرک فعال در طبقه سوم و یک مهابند و میراگر در طبقه اول اتخاذ گردید. در شکل‌های (6) و (7) نتایج شبیه‌سازی این مدل ترسیم شده است. در این روش کنترل هیبریدی، دامنه بزرگ پاسخ میراگر و دامنه کوچک پاسخ محرک فعال، در مقایسه با پاسخ‌های متناظر در شکل (4)، نشان داد که دور کردن محرک فعال پایدارساز از بزار کنترل غیرفعال در سیستم کنترل هیبریدی، سبب واگرایی پاسخ و افزایش شدید نیروی میراگر گردید، همچنین در اثر تغییر مکان محرک، نیروی کنترل کننده فعال مقدار بسیار اندک 4/8 نیوتن را تجربه کرد که نشان‌دهنده عدم استفاده از کارایی کنترل‌کننده فعال حالت مذکور می‌باشد. مقادیر عددی پاسخ‌ها در جدول (4) درج شده است.

مطابق شکل (7)، سیستم کنترل هیبریدی مربوط به مدل 4 در کنترل جابه‌جایی طبقه سوم عملکرد مناسبی نشان نداد، چرا که حداکثر دامنه پاسخ طبقه سوم در مقایسه با سازه کنترل نشده، بیشتر شده است. در جدول (4) جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه درج شده است.

مطابق شکل (4)، در طول رخداد زمین‌لرزه پاسخ‌های جابه‌جایی مهابند و نیروی میراگر در حالت کنترل غیرفعال ناپایدار واگرا شد، در صورتی که استفاده از محرک فعال و تبدیل سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار به سیستم کنترل هیبریدی پایدار موجب کاهش دامنه پاسخ جابه‌جایی مهابند و نیروی میراگر و همگرایی آن‌ها گردید. پاسخ نیروی کنترل‌کننده فعال نیز در انتهای شکل (6) نشان داده شده است. در شکل (5) جابه‌جایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل هیبریدی پایدار نشان داده شده است. در این مدل، در حالت کنترل غیرفعال، ابزار کنترلی فقط برای کاهش جابه‌جایی طبقه اول تأثیر گذاشت درحالی‌که در حالت کنترل هیبریدی پایدار، جابه‌جایی تمام طبقات 94 درصد کاهش یافت. مقادیر عددی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه در جدول (4) ارائه شده است.



شکل 5- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های 1، 2 و 3 (سه طبقه) شامل تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار

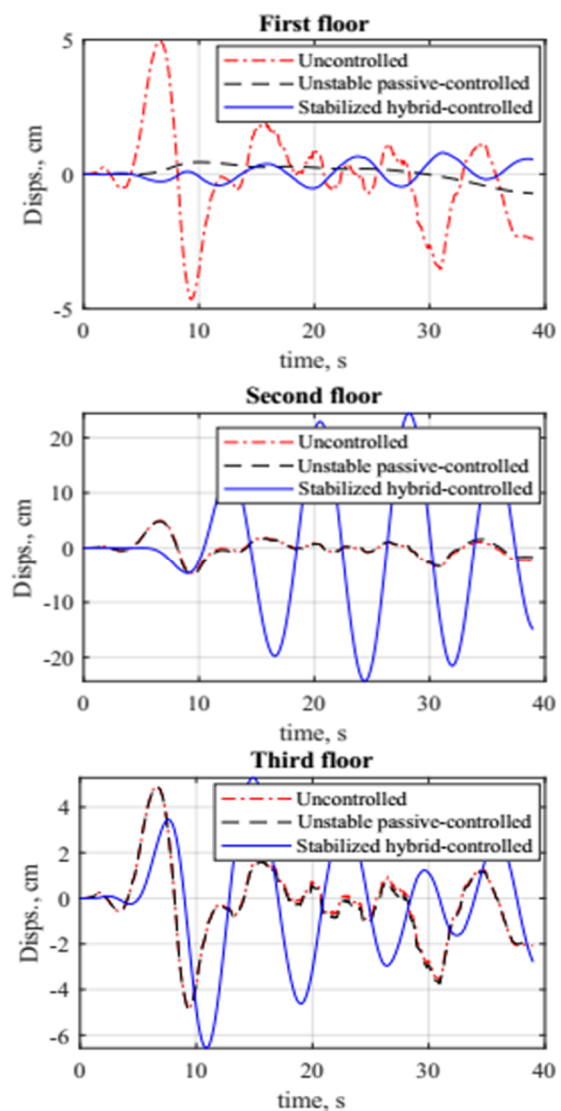
جدول 4- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه‌طبقه کنترل شده

مدل	طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابه‌جایی طبقات (سانتی‌متر)			جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				جذر میانگین مربعات جابه‌جایی	جذر میانگین مربعات نیروی میراگر (نیوتن)	جذر میانگین	
2	1	مهاربند و میراگر	پایدار	0/3024	83 کاهش	واگرا	9527/5
	2	-	ناپایدار	1/7670	بدون تغییر	-	-
	3	-	ناپایدار	1/7862	بدون تغییر	-	-
3	1	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	0/0978	94 کاهش	0/1857	89
	2	-	پایدار	0/0977	94/5 کاهش	-	-
	3	-	پایدار	0/0975	94/5 کاهش	-	-
4	1	مهاربند و میراگر	پایدار	0/3408	81 کاهش	0/4724	99/75
	2	-	پایدار	12/4947	703 افزایش	-	-
	3	مهاربند و محرک فعال	پایدار	2/5967	146 افزایش	واگرا	4/8

#### 2-4- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های شش طبقه

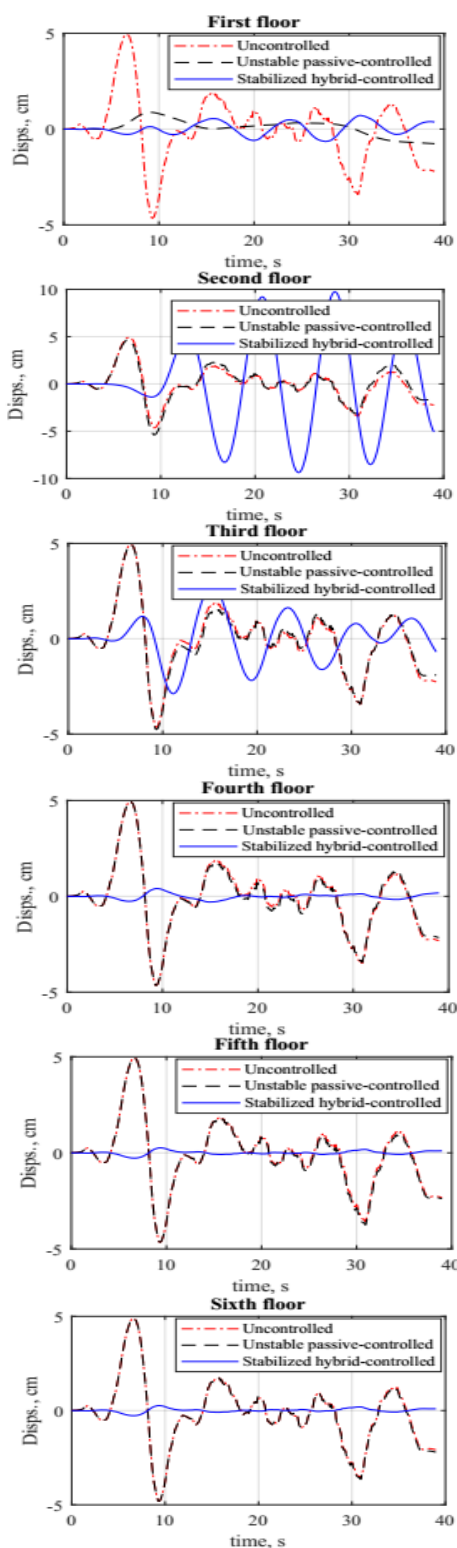
به‌منظور بررسی بیشتر موضوع، سازه‌های شش طبقه مطابق مدل‌های 5، 6، 7 و 8 اتخاذ گردید. مشابه مدل‌های سه طبقه، کنترل‌پذیری، پایداری نامی و نیز پایداری سیستم‌های کنترلی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل در جدول (3) درج شد. سپس ضمن تحلیل لرزه‌ای، پاسخ جابه‌جایی طبقات مدل‌های 5، 6 و 7 مطابق شکل (8) استخراج گردید. بررسی پاسخ جابه‌جایی طبقات در شکل (8) نشان داد که سیستم کنترل لرزه‌ای غیرفعال ناپایدار، تنها در کاهش جابه‌جایی طبقه اول تأثیر گذاشت، درحالی‌که در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار، جابه‌جایی تمام طبقات سازه کاهش پیدا کرد.

برای نشان دادن اهمیت مکان کنترل‌کننده فعال، مدل 8 تعریف گردید که در آن محرک فعال به طبقه سوم انتقال داده شد. تغییر دادن مکان محرک، موجب افزایش جابه‌جایی طبقات دوم و سوم در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار گردید و نشان داد که قرار دادن ابزارهای کنترل فعال و غیرفعال در طبقه یکسان حائز اهمیت است و در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای تأثیر بسزایی دارد. در شکل (9) پاسخ این مدل ارائه شده است که در آن جابه‌جایی طبقه دوم حتی در مقایسه با سازه کنترل‌نشده افزایش یافته است. همچنین در شکل (10) پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربند، میراگر و محرک فعال مربوط به مدل‌های 5، 6، 7 و 8 ارائه شده است که در آن تأثیر مکان محرک فعال در تغییر تاریخچه زمانی پاسخ‌های مهاربند، میراگر و محرک فعال مشهود است. مطابق شکل (10-الف)، نصب هم‌زمان میراگر و محرک فعال در سیستم کنترل هیبریدی در یک طبقه، پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربند، میراگر و محرک فعال را همگرا نموده و کاهش داد، اما با توجه به شکل (10-ب)، دور بودن محرک فعال از میراگر، سبب افزایش نیروی میراگر شده و کاهش اندرکنش محرک فعال

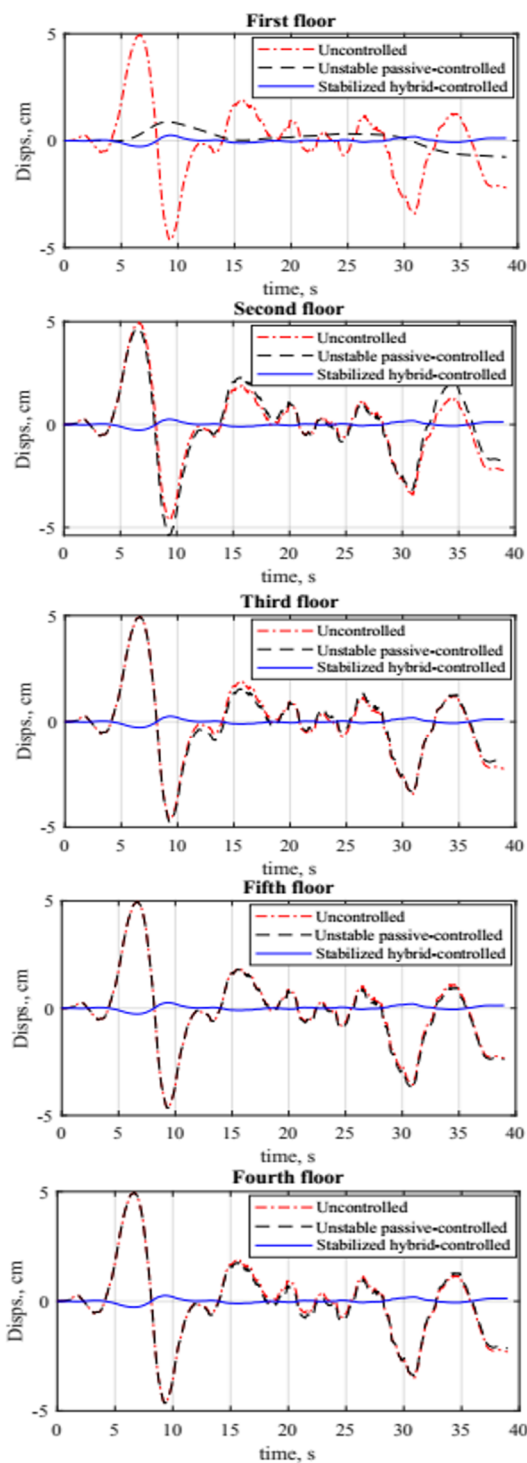


شکل 7- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل 4 (سه طبقه) شامل جابه‌جایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار

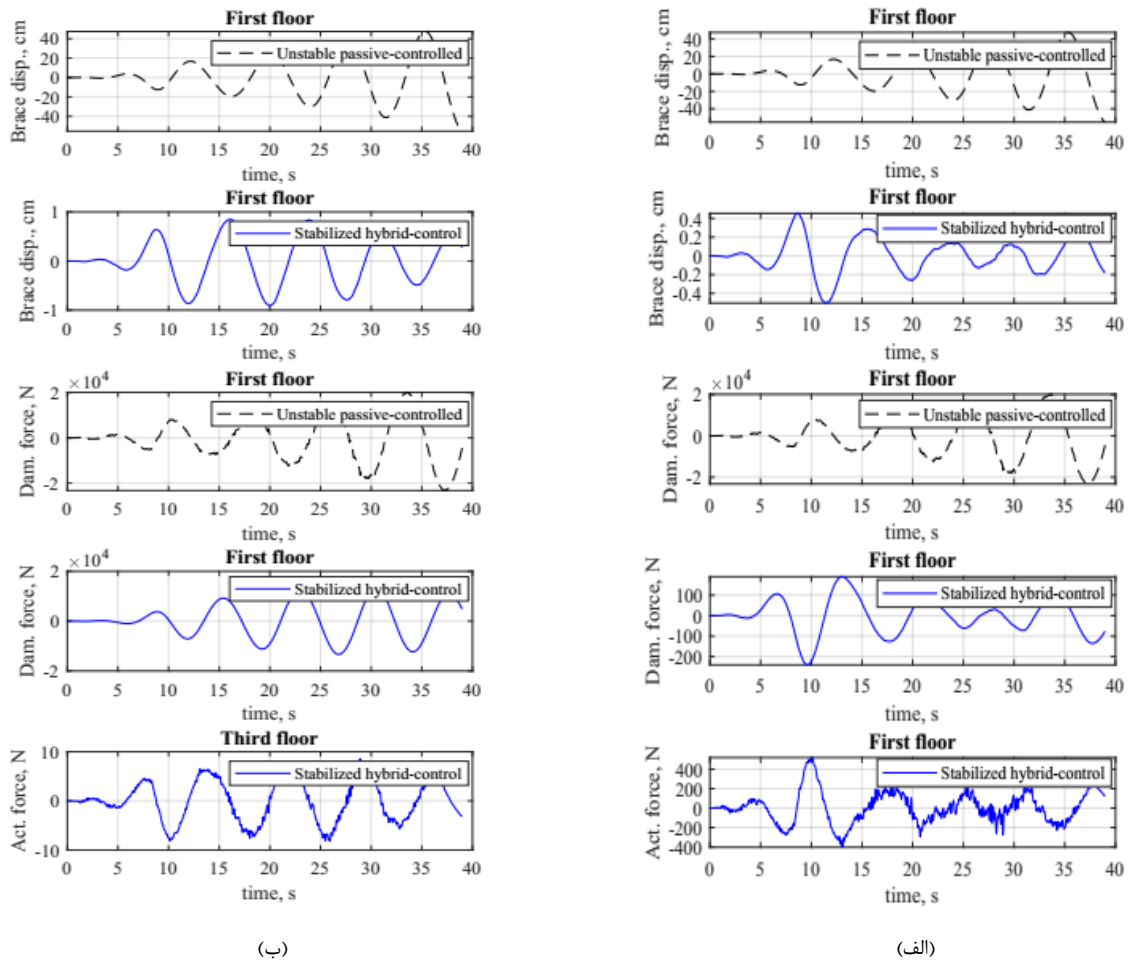
مشاهده شد. در جدول (5) مقادیر عددی پاسخهای لرزهای مدل‌های شش طبقه درج شده است که می‌توان پاسخهای لرزهای مدل‌های مذکور را با همدیگر مقایسه کرد. در ادامه، شکل‌های (9) و (10) و جدول (5) ملاحظه می‌گردد.



شکل 9- جابه‌جایی طبقات مدل 8 (شش طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار



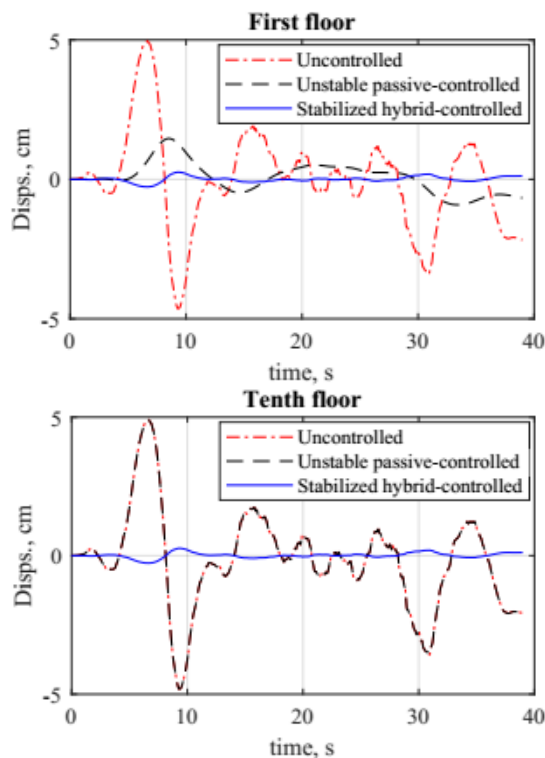
شکل 8- جابه‌جایی طبقات مدل‌های 5، 6 و 7 (شش طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار



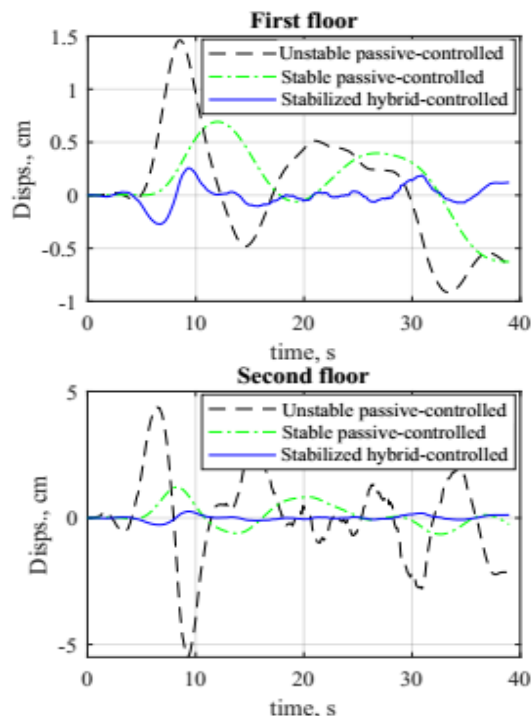
شکل 10- جابه‌جایی مهاربند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل‌کننده فعال در مدل‌های 5، 6، 7 و 8 (شش طبقه): (الف) حالت کنترل با میراگر، مهاربند و محرک فعال در طبقه اول، (ب) حالت کنترل با میراگر و مهاربند در طبقه اول و محرک فعال در طبقه سوم

جدول 5- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های شش طبقه کنترل‌شده

مدل	طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابه‌جایی طبقات (سانتی‌متر) (جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)		جذر میانگین مربعات جابه‌جایی مهاربند (سانتی‌متر)	جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				RMS	درصد تغییر		
6	1	مهاربند و میراگر	ناپایدار	0/4078	77 کاهش	واگرا	9600/88
	3	-		1/7423	1 کاهش	-	-
	6	-		1/7847	1 افزایش	-	-
7	1	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	0/0965	94 کاهش	0/1849	87/9
	3	-		0/0967	95 کاهش	-	-
	6	-		0/0974	95 کاهش	-	-
8	1	مهاربند و میراگر	پایدار	0/3309	81 کاهش	0/4785	104/4
	3	مهاربند و محرک فعال		1/2139	31 کاهش	واگرا	6/2
	6	-		0/0967	95 کاهش	-	-



شکل 11- جابه‌جایی طبقات اول و دهم مدل‌های 9، 10 و 11 (10 طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار



شکل 12- جابه‌جایی طبقات اول و دوم مدل‌های 10، 11 و 12 (10 طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال پایدار و کنترل غیرفعال ناپایدار

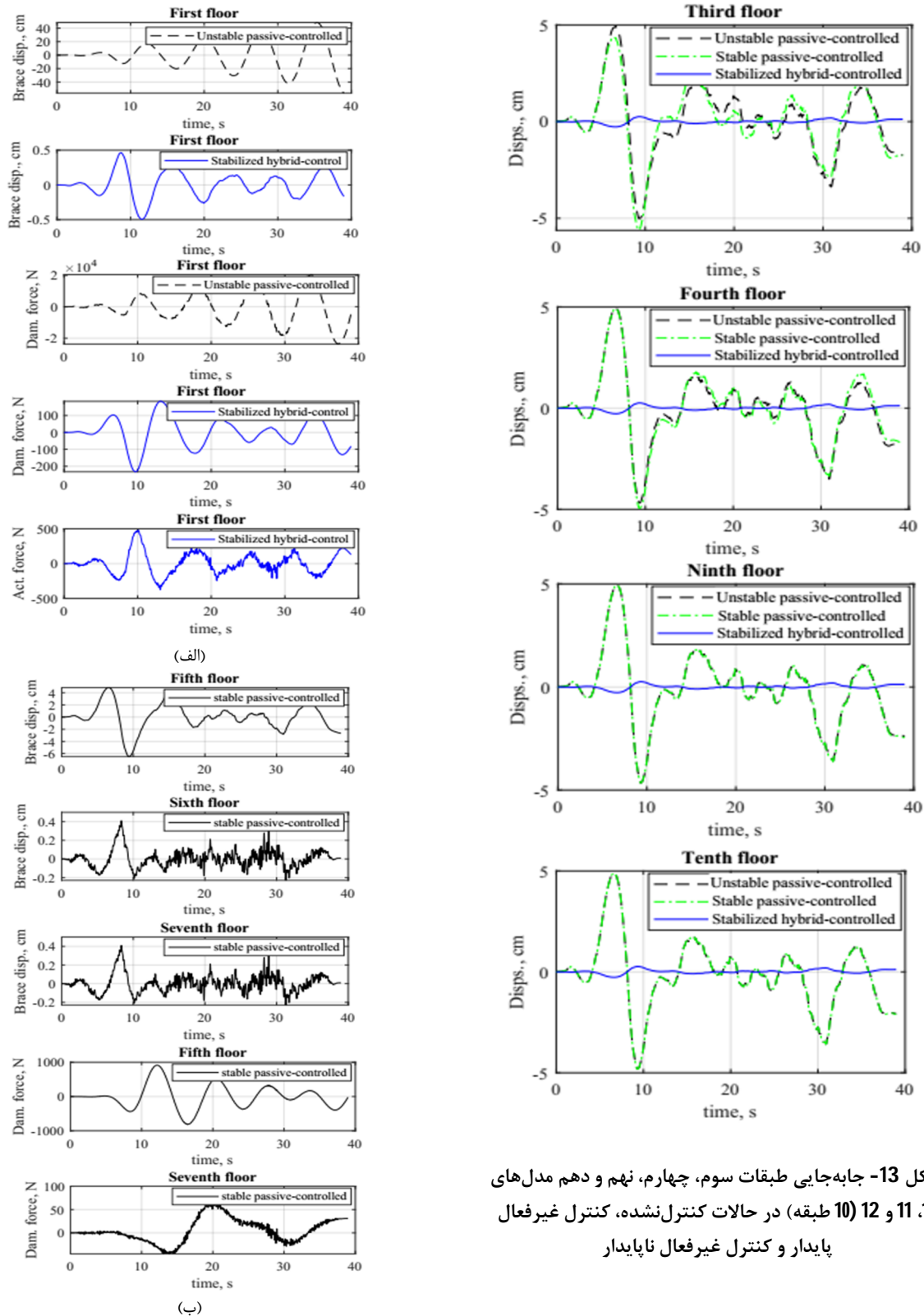
#### 3-4- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده طبقه

مطابق مدل‌های 9، 10، 11 و 12 بررسی تأثیر سیستم کنترلی غیرفعال پایدار و مقایسه آن با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار و هیبریدی پایدار، در سازه ده طبقه انجام گردید که پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل در شکل‌های (11)، (12) و (13) ارائه شده است. ابتدا کنترل‌پذیری و پایداری نامی سازه کنترل‌نشده مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (3) مشهود است. سپس مدل‌های 10 و 11 به ترتیب دارای سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار و هیبریدی پایدار، با تجهیز سازه به میراگر و مهاربند و محرک فعال در طبقه اول تعریف گردید.

در مدل 11، پاسخ جابه‌جایی طبقات اول و دهم سازه، مطابق شکل (11) و جدول (6)، در حالت کنترل هیبریدی پایدار، به ترتیب 92 و 94/3 درصد کاهش یافت. با تغییر دادن مکان و تعداد مهاربندها و میراگرها به شرح مدل 12، سیستم کنترلی سازه مورد ارزیابی قرار گرفت که در آن مقادیر ویژه ماتریس سیستم با سه مهاربند در طبقات 5، 6 و 7 و دو میراگر در طبقات 5 و 7 بررسی گردید. نتایج نشان داد که قسمت حقیقی مقادیر ویژه ماتریس سازه با سیستم کنترلی غیرفعال، همگی منفی شد. بنابراین سیستم کنترلی غیرفعال با نصب یک مهاربند در طبقه 6 پایداری خود را به دست آورد که خروجی این سیستم با نتایج سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار مربوط به مدل 11 در جدول (6) قابل مقایسه می‌باشد.

در شکل‌های (12) و (13)، پاسخ طبقات سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار (مدل 10) و سیستم کنترل غیرفعال پایدار (مدل 12) و نیز سیستم کنترل هیبریدی پایدار (مدل 11) نشان داده شده است که در آن عدم کفایت سیستم کنترل غیرفعال پایدار در کاهش پاسخ تمامی طبقات منتخب مشهود است.

در شکل (14-الف)، پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربندها، میراگرها و محرک فعال مدل‌های 10، 11 و 12 ارائه شده است که در آن در سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار، واگرایی مهاربند و نیروی میراگر طبقه اول نمایان است. شکل (14-ب) نیز پاسخ‌های سازه با سیستم کنترلی غیرفعال پایدار را نشان داده است که در آن جابه‌جایی مهاربندها و نیروی میراگرها همگرا شده و کاهش یافته اند. در شکل (14) نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده طبقه و در جدول (6) مقادیر عددی پاسخ‌ها نشان داده شده است.

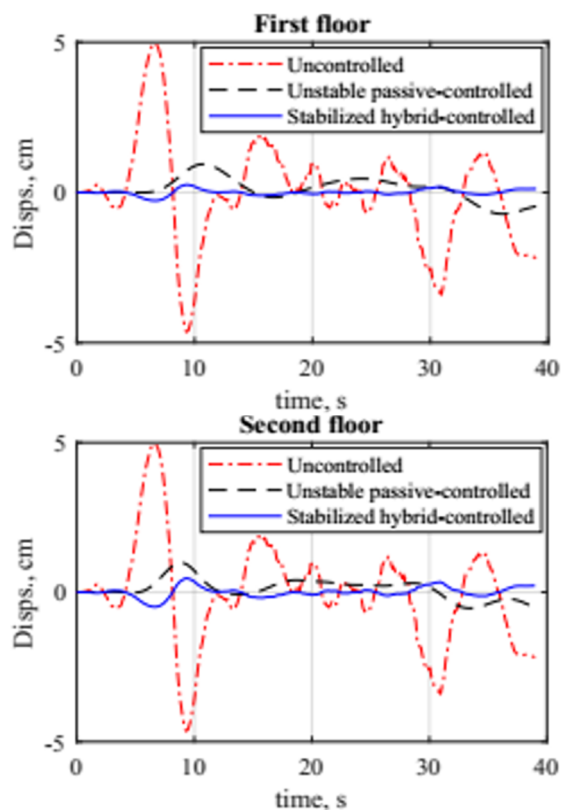


شکل 13- جابه‌جایی طبقات سوم، چهارم، نهم و دهم مدل‌های 10، 11 و 12 (طبقه 10) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال پایدار و کنترل غیرفعال ناپایدار

شکل 14- جابه‌جایی مهاربند، پاسخ میراگر و محرک فعال مدل‌های 10، 11 و 12 (طبقه 10): (الف) حالت کنترل غیرفعال ناپایدار (مدل 10) و کنترل مرکب پایدار (مدل 11)، (ب) حالت کنترل غیرفعال پایدار (مدل 12)

جدول 6- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده‌طبقه کنترل‌شده

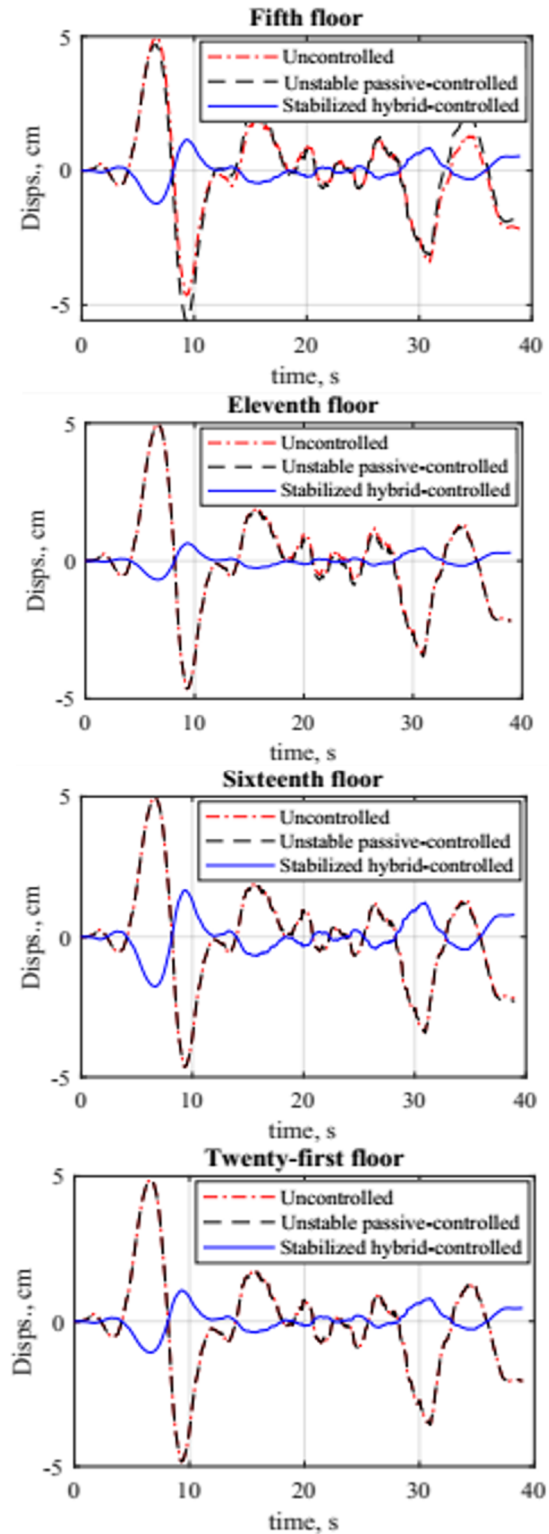
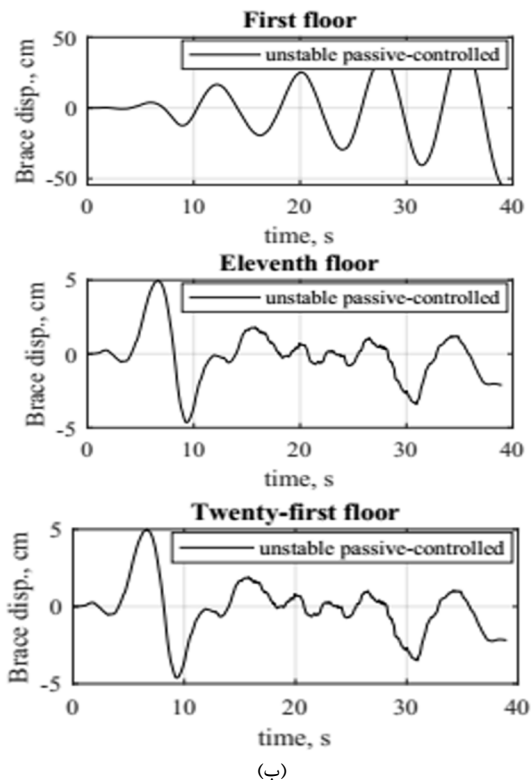
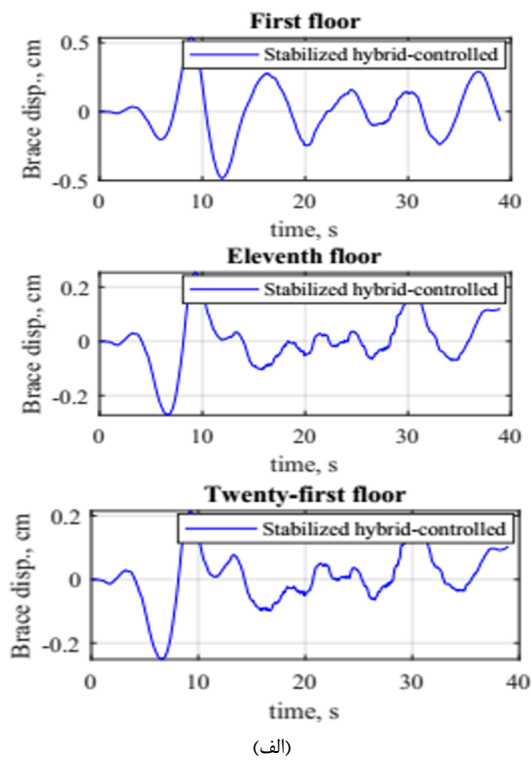
شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابه‌جایی طبقات (سانتی‌متر)		جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				(جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)	RMS	
10	1	مهاربند و میراگر	ناپایدار	65 کاهش	0/6172	10764/5
	2	-	-	1 کاهش	1/7523	-
	5	-	-	1 کاهش	1/7447	-
	6	-	-	1 کاهش	1/7451	-
	7	-	-	0/5 کاهش	1/7519	-
	10	-	-	0/5 کاهش	1/7482	-
11	1	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	92 کاهش	0/1265	226/4
	2	-	-	94 کاهش	0/0987	-
	5	-	-	95 کاهش	0/0964	-
	6	-	-	95 کاهش	0/0968	-
	7	-	-	94/5 کاهش	0/0957	-
	10	-	-	94/3 کاهش	0/0972	-
12	1	-	-	59 کاهش	0/3709	-
	2	-	-	78 کاهش	0/1852	-
	5	مهاربند و میراگر	پایدار	13 کاهش	1/5241	380/6
	6	مهاربند	-	10 کاهش	1/5638	-
	7	مهاربند و میراگر	-	6 کاهش	1/6411	46/2
	10	-	-	0/5 کاهش	1/7510	-



شکل 15- جابه‌جایی طبقات کنترل‌شده مدل‌های 13، 14 و 15 (21 طبقه) در حالات کنترل‌نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار

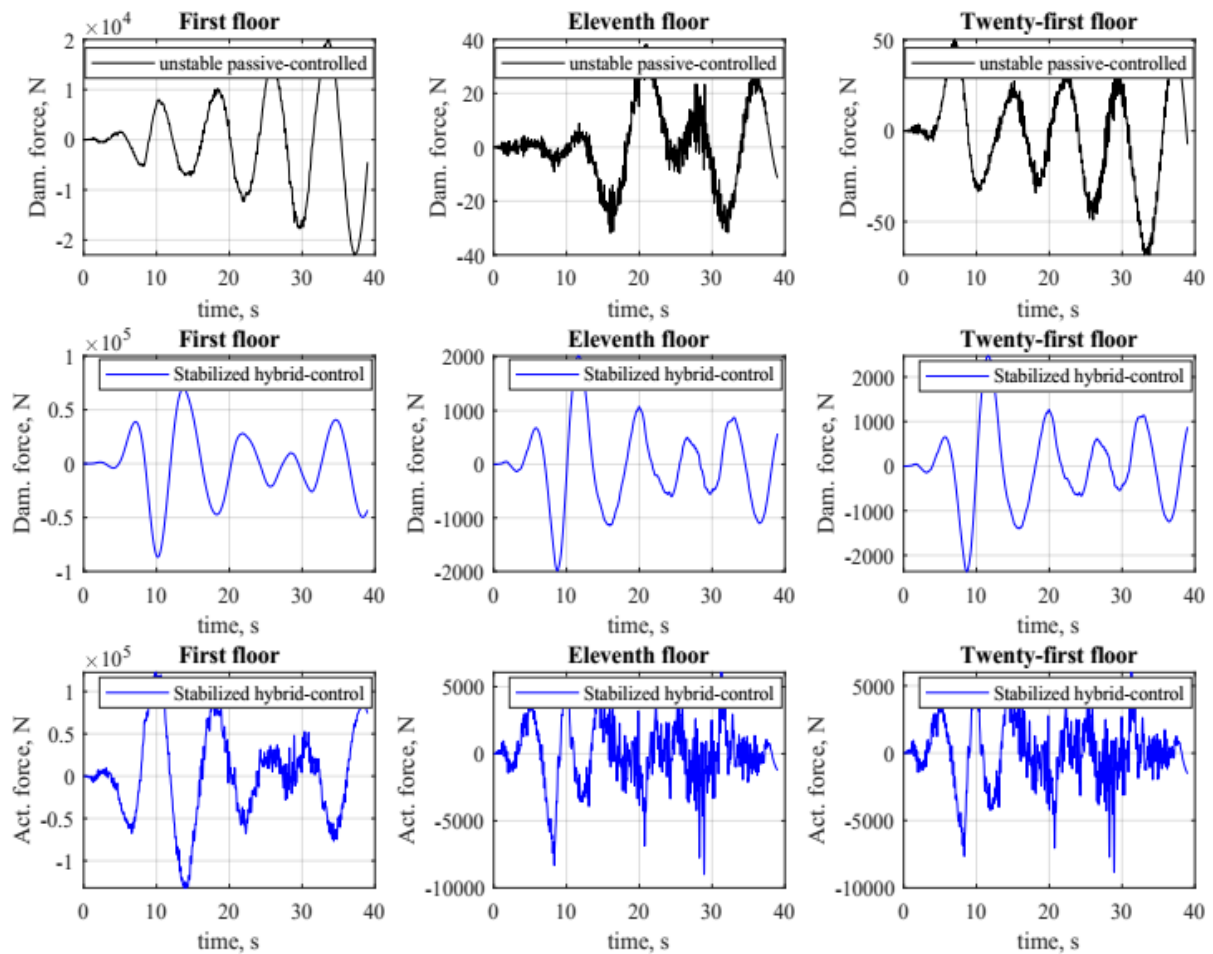
#### 4-4- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های بیست و یک‌طبقه

برای تکمیل بحث، یک سازه 21 طبقه مطابق مدل‌های 13، 14 و 15 اتخاذ گردید و در آن از مهاربند و میراگر و محرک فعال به‌طور هم‌زمان در طبقات 1، 11 و 21 جهت کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای استفاده شد. ابتدا کنترل‌پذیری و پایداری نامی سازه کنترل‌نشده مورد ارزیابی قرار گرفت، سپس مقادیر ویژه ماتریس سازه با سیستم کنترلی غیرفعال (مدل 14) استخراج گردید و در آن ناپایداری سیستم کنترلی غیرفعال مشاهده شد. جهت پایداری‌سازی سیستم کنترلی از سه محرک فعال در طبقات دارای میراگر و مهاربند استفاده شد و سیستم کنترل هیبریدی پایدار حاصل گشت. در شکل‌های (15) و (16) پاسخ طبقات 1، 2، 5، 11، 16 و 21 ارائه شده که در آن تأثیر سیستم کنترل هیبریدی پایدار در کاهش پاسخ لرزه‌ای طبقات مشهود است. شکل (17) نیز پاسخ مهاربندهای طبقات 1، 11 و 21 را در حالات کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل هیبریدی پایدار نشان می‌دهد که در آن مطابق شکل (17-الف) پاسخ مهاربندها در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار به‌طور چشمگیر کاهش یافته است. شکل (17-ب) نیز واگرایی پاسخ مهاربند در طبقه اول و شباهت پاسخ سایر مهاربندها به پاسخ سازه کنترل‌نشده در مدل با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار را نشان داده است.



شکل 17- جابه‌جایی مهاربندهای مدل‌های 13، 14 و 15 (21) (طبقه: الف) حالت کنترل مرکب پایدار، (ب) حالت کنترل غیرفعال ناپایدار

شکل 16- جابه‌جایی طبقات کنترل شده پنجم، یازدهم، شانزدهم و بیست و یکم مدل‌های 13، 14 و 15 (21 طبقه)، در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار



شکل 18- پاسخ میراگرها و محرک‌های فعال مدل‌های 14 و 15 (21 طبقه) در حالات کنترل غیرفعال ناپایدار و مرکب پایدار

جدول 7- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های بیست و یک طبقه کنترل شده

شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابه‌جایی طبقات (سانتی‌متر)		جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				(جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)	RMS	
14	1	مهاربند و میراگر	ناپایدار	64 کاهش	0/6051	11531/2
	2	-		61 کاهش	0/6841	-
	5	-		1/3 کاهش	1/7311	-
	11	مهاربند و میراگر		1 کاهش	1/7433	16/4
	16	-		0/4 کاهش	1/7509	-
15	21	مهاربند و میراگر	پایدار	0/5 کاهش	1/7581	22/3
	1	مهاربند، میراگر و محرک فعال		94 کاهش	0/0965	44326/8
	2	-		95 کاهش	0/0973	-
	5	-		78 کاهش	0/3844	-
	11	مهاربند، میراگر و محرک فعال		86/5 کاهش	0/2356	675/3
21	16	-	مهاربند، میراگر و محرک فعال	72 کاهش	0/4932	-
	21	مهاربند، میراگر و محرک فعال		79/2 کاهش	0/3621	742/2

1) تعداد و موقعیت ابزارهای کنترل، رفتار دینامیکی سیستم ثانویه حاصل از ترکیب مدل اولیه سازه با ابزارهای کنترلی را تغییر داد، بنابراین پایداری و ناپایداری هر سازه با سیستم کنترلی مدنظر به‌عنوان سیستم دینامیکی ثانویه باید مجزا انجام شود.

2) پایداری سیستم کنترلی موجب عملکرد مناسب ابزارهای جذب و استهلاک انرژی گردید و در نهایت پاسخهای لرزه‌ای به‌شدت کاهش یافت، لذا سیستم کنترلی در هر سازه باید پایدار باشد.

3) با توجه به این‌که استفاده از سیستم‌های کنترلی ناپایدار منجر به ازدیاد شدید پاسخهای لرزه‌ای در برخی طبقات گردید، بنابراین در حالت کلی باید از به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی ناپایدار اجتناب نمود.

4) در سازه‌های با سیستم کنترل غیرفعال، موقعیت مهاربندها و ابزارهای جذب و استهلاک انرژی بر پایداری سیستم کنترلی غیرفعال مؤثر واقع گردید، بر این اساس موقعیت آن‌ها در ارتفاع سازه باید طوری باشد که پایداری سیستم کنترلی تضمین گردد.

5) دورکردن محرک فعال از ابزار کنترل غیرفعال موجب افزایش نیروی میراگر و جابه‌جایی برخی طبقات شد، بنابراین بهتر است محرک و میراگر به‌طور هم‌زمان در طبقه یکسان نصب شوند.

## 6- مراجع

- Babaei M, Moradi M, "Multi-objective optimization of steel frames with added viscous dampers using imperialist competitive algorithm", *Computational Engineering and Physical Modeling*, 2022, 5 (1), 69-88.  
[https://doi.org/10.22115/cepm.2022.345345.121\\_2](https://doi.org/10.22115/cepm.2022.345345.121_2)
- Cetin H, Ersin A, Baki O, "Optimal design and distribution of viscous dampers for shear building structures under seismic excitations", *Frontiers in Built Environment*, 2019, 5, 90.  
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00090>
- Chacko, Sanjay J, Rajesh Joseph A, "On LQR controller design for an inverted pendulum stabilization: SJ Chacko, RJ Abraham", *International Journal of Dynamics and Control*, 2023, 11 (4), 1584-1592.  
<https://doi.org/10.1007/s40435-022-01079-0>
- Cheng FY, Jiang H, Lou K, *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control (1st ed.)*. CRC Press, 2008.  
<https://doi.org/10.1201/9781420008173>
- El Ouni MH, Abdeddaim M, Elias S, Kahla NB, "Review of vibration control strategies of high-rise buildings", *Sensors*, 2022, 22 (21), 8581.  
<https://doi.org/10.3390/s22218581>
- Garrido H, Curadelli O, Ambrosini D, "On the assumed inherent stability of semi-active control systems", *Engineering Structures*, 2018, 159, 286-298.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.009>
- Ghaffarzadeh H, Alizadeh Dehrod E, Aghayi Par H, "Semi-active fuzzy control of structures subjected to near-fault ground motions having forward

تاریخچه زمانی پاسخ میراگرها و محرک‌های فعال مدل‌های 14 و 15 در شکل (18) نمایش داده شده است. بررسی رفتار میراگرها نشان داد که نیروی میراگرهای طبقات 11 و 21 در سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار در مقایسه با نیروی میراگر طبقه اول کاهش یافت که دلیل آن عدم تأثیر میراگر در کاهش پاسخهای لرزه‌ای بود. پاسخ میراگر و محرک فعال سازه با سیستم کنترل هیبریدی در سطر دوم و سوم شکل (18) نمایان شده است که در آن مقادیر نیروهای میراگر و محرک فعال در طبقات قابل توجه بوده و نشان دادند که در سیستم کنترل هیبریدی، ابزارهای کنترل غیرفعال و فعال در کاهش پاسخهای لرزه‌ای مؤثر واقع شدند. در ادامه در جدول (7) مقادیر عددی پاسخهای لرزه‌ای مدل‌های 21 طبقه ارائه شده است که مقایسه پاسخها نشان می‌دهد سیستم کنترل هیبریدی پایدار (مدل 15) در مقایسه با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار (مدل 14) در کاهش پاسخهای لرزه‌ای طبقات سازه تأثیر بسزایی داشته است.

در پایان، شایان ذکر است با توجه به تأثیر پایداری و ناپایداری سیستم کنترلی در پاسخهای لرزه‌ای سازه، با شناسایی متغیرهای هندسی و مکانیکی سایر روش‌های کنترل غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی، ارزیابی پایداری سایر سیستم‌های کنترلی امکان‌پذیر می‌باشد؛ بنابراین توسعه پژوهش مشابه پیشنهاد می‌گردد.

## 5- نتیجه‌گیری

در فرآیند کنترل لرزه‌ای سازه، پیکربندی اولیه یا اصلی قبل از اعمال روش‌های کنترل باید به‌گونه‌ای باشد که عملکرد روش‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال، نیمه‌فعال و فعال به‌طور شایسته مفید و مؤثر واقع گردد. با توجه به این‌که پیکربندی یک سازه از پارامترهایی از قبیل جرم، سختی و میرایی اعضای سازه‌ای و ابزارهای کنترلی تأثیر می‌پذیرد، ضرورت کفایت سیستم دینامیکی سازه اولیه قبل از اعمال روش‌های کنترل لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین بیان مفهوم و معیار کنترل‌پذیری و تشکیل ماتریس متناظر مدل نامی و اثبات کنترل‌پذیری آن از نخستین اقدامات در مسائل کنترل لرزه‌ای می‌تواند به‌شمار رود. از آنجاکه تعداد و موقعیت ابزارهای کنترل بر رفتار سیستم دینامیکی حاصل تأثیر می‌گذارد، اطمینان از عملکرد مفید و مؤثر سیستم کنترلی منتخب ضرورت دارد. عملکرد سیستم کنترلی منتخب با توجه به بررسی مفهوم پایداری قابل توصیف می‌باشد که در این پژوهش توجه به سیستم دینامیکی ثانویه حاصل از ترکیب سازه اولیه و ابزارهای کنترل لرزه‌ای، مدل‌هایی با سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت که اهم نتایج حاصل به‌شرح زیر ارائه می‌گردد:

- Pourzeynali, S, Lavasani HH, Modarayi AH, "Active control of high-rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Engineering Structures*, 2007, 29 (3), 346-357.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.015>
- Saad, Tarek Edrees, George Nikolakopoulos, Jan-Erik Jonasson, Hans Hedlund. "A state-of-the-art review of structural control systems", *Journal of Vibration and Control*, 2015 21 (5), 919-937.  
<https://doi.org/10.1177/1077546313478294>
- Velagić J, Osmić N, Klovo V, Lačević H, "Design of LQR controller for 3D trajectory tracking of octocopter unmanned aerial vehicle", In 2022 8<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), IEEE 2022, 1, 63-68.  
<https://doi.org/10.1109/CoDIT55151.2022.9803884>
- Xu YL, He J, "Smart civil structures", CRC Press, 2017.  
<https://doi.org/10.1117/12.50178>
- Xu ZD, Guo YQ, Zhu JT, Xu FH, "Intelligent vibration control in civil engineering structures", Academic Press, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-00334-1>
- Zhenkai Z, Yongbo P, "Reliability based optimization for semi-actively controlled seismic structures", 13<sup>th</sup> International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13), Seoul, South Korea, May 26-30, 2019.  
<https://doi.org/10.22725/ICASP13.144>
- directivity and fling step using friction damping system with amplifying braces (fdsab)", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2015, 39 (C2), 299-317.  
<https://doi.org/10.22099/ijeee.2015.3136>
- Ground, Simulating Near-Fault Long-Period, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2011.
- Hazaveh NK, Chase JG, Rodgers GW, Pampanin S, Kordani R, "Seismic behavior of a self-centering system with 2-4 viscous damper", *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 24 (3), 470-484.  
<https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453415>
- Hazaveh NK, Rad A, Chase G, Pampanin S, "Seismic behaviour of a non-linear structure with passive D3 viscous damper", 2021.  
<https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453415>
- He W, Kang J, Yang S, Liu W, Liu W, "Experimental research on the seismic characteristics of a precast frame structure with a viscous damper", *Journal of Earthquake Engineering*, 2023, 27 (4), 959-980.  
<https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2078516>
- Hongyan G, Liang H, Tong G, Liu F, Liu Y, Liu X, Jia Z, Paul J, "Research on vibration mechanism and control technology of building structure under earthquake action", *Journal of Vibroengineering*, 2021, 23 (6), 1395-1406.  
<https://doi.org/10.21595/jve.2021.22090>
- Jian L, Song F, Huang Y, "Research on semiactive control of civil engineering structure based on neural network", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, (1), 8842031.  
<https://doi.org/10.1155/2020/8842031>
- Kınay G, Turan G, "A hybrid control of seismic response by passive and semi-active control strategies", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2012, 2 (1), 27-36.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.12.016>
- Kurata N, Takuji K, "Reliability of applied semiactive structural control system", *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129 (7), 914-921.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(914))
- Lingala A, Anil Kumar M, "Torsional vibration control of a structure using fluid viscous dampers", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1197 (1), IOP Publishing.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1197/1/012046>
- López-Queija J, Robles E, Jugo J, Alonso-Quesada S, "Review of control technologies for floating offshore wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167, 112787.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112787>
- Modiri F, Darvishan E, "Active structural control by backstepping design considering soil-structure interaction effects", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2022, 10 (4), 97-108.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-2033>
- PEER C, "PEER ground motion database, Pacific Earthquake Engineering Research Center", University of California, Berkeley, CA, <http://ngawest2.berkeley.edu>, 2013