

Research Article

Performance Assessment of 3D-Steel Structures Equipped with Single-Slip and Double-Slip Level Friction Damper with Self-Centering Capability

Vahid Reza Zeinalpoor Yazdi¹, Pasha Javadi^{2*}, Fayaz Rahimzadeh Rofuei³, Armin Aziminejad²

1- Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran



Citation: Zeinelpour Yazdi, V.R., Javadi Pasha, P., Rahimzadeh Rafoui, F., and Aziminejad, A. (2026), "Performance Assessment of 3D-Steel Structures Equipped with Single-Slip and Double-Slip Level Friction Damper with Self-Centering Capability", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.72-93. (In Persian).

doi [10.22034/jss.2026.581713.1036](https://doi.org/10.22034/jss.2026.581713.1036)

Article info:

Article History:

Received: 21 December 2025

Revised: 25 March 2026

Accepted: 3 April 2026

Published: 22 June 2026

Keywords:

Steel Moment-Resisting Frame

Friction Damper

Self-Centering

Nonlinear Time-History Analysis

Farfield and Nearfield Records

ABSTRACT

Background: Conventional friction dampers, despite their adequate energy dissipation capacity, can limit the seismic resilience of structures due to the residual deformations they induce. To address this limitation, this study proposes incorporating self-centering capability into a double-level friction damper with the aim of reducing residual drift and improving seismic performance, thereby facilitating the restoration of structural serviceability after an earthquake.

Methods: To evaluate the effectiveness of the self-centering double-level friction damper, its performance was numerically compared with those of the conventional single-level friction damper without self-centering capability and the self-centering single-level friction damper. For this purpose, three-dimensional 6-, 12-, and 18-story steel special moment-resisting frames equipped with each of the three damper types were designed in accordance with code provisions using the Application Programming Interface (API) of ETABS. Nonlinear time-history analyses were then conducted in OpenSeesPy using a set of earthquake records at two hazard levels: the Maximum Considered Earthquake (MCE) and the Design Basis Earthquake (DBE).

Results: The results showed that, although the conventional single-level friction damper exhibited mean acceleration responses that were 32.7% and 22.6% lower than those of the self-centering double-level and self-centering single-level friction dampers, respectively, its mean residual drift responses were 342.7% and 416.3% higher, respectively. More importantly, the proposed self-centering double-level friction damper exhibited performance comparable to that of the self-centering single-level friction damper, while requiring approximately half the self-centering force to achieve a similar self-centering capability. The reduction in the required self-centering force makes the double-level friction damper a highly suitable option for use in prestressed structures to provide self-centering behavior.

Conclusion: Overall, self-centering friction dampers provide superior seismic performance compared with friction dampers without self-centering capability and can improve the seismic resilience of structures by substantially reducing residual drift. The findings highlight the importance of employing self-centering systems to enhance structural safety and maintain serviceability following an earthquake.

* Corresponding Author's E-mail: javadi1403@iau.ac.ir



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

Introduction

Conventional seismic design primarily relies on inelastic deformation and structural ductility to dissipate earthquake energy and prevent collapse. Although this philosophy has proven effective for life safety, it often results in considerable residual deformations after severe earthquakes, leading to costly repairs or demolition of otherwise safe buildings. Consequently, self-centering structural systems have attracted increasing attention because they can substantially reduce residual drift while maintaining adequate energy dissipation.

Among passive energy dissipation devices, friction dampers have become widely used owing to their simplicity, low construction cost, stable hysteretic behavior, and ease of installation. Nevertheless, conventional friction dampers are generally designed with a single slip force and therefore exhibit limited adaptability to earthquakes with different intensity levels. To overcome this limitation, double-level friction dampers have been introduced to provide multiple slip forces under different displacement demands. In parallel, several researchers have incorporated self-centering mechanisms into friction dampers using post-tensioned tendons, disc springs, or shape memory alloys.

Despite these developments, limited research has investigated the combination of double-level friction mechanisms with complete self-centering capability. Therefore, this study proposes a novel self-centering double-level friction damper and evaluates its seismic performance in comparison with conventional single-level friction dampers and self-centering single-level friction dampers.

Methods

Three steel special moment-resisting frames with 6, 12, and 18 stories were designed according to ASCE 7-2022 using the ETABS application programming interface (API), allowing automatic model generation and design. Each building was equipped with

three different damper configurations: 1- Conventional single-level friction damper; 2- Self-centering single-level friction damper; 3-Proposed self-centering double-level friction damper.

Nonlinear numerical simulations were carried out using OpenSeesPy. Beams and columns were modeled using nonlinear beam-column elements with Steel01 material. Self-centering braces were modeled using the Self-Centering material model, while the proposed double-level friction damper was constructed by combining Steel01 and Gap materials to accurately reproduce the experimentally validated hysteretic behavior.

Eleven FEMA P-695 ground motions were used for structural design, and the complete FEMA P-695 record set was employed for performance evaluation under both Design Basis Earthquake (DBE) and Maximum Considered Earthquake (MCE) hazard levels. The damping ratio was assumed to be 5%, and nonlinear response-history analyses were performed for all structural configurations. Damper capacities and prestressing forces were iteratively adjusted until both drift and residual drift satisfied the prescribed performance limits.

Results

The numerical analyses demonstrate that all three damper systems provide comparable control of maximum inter-story drift. However, substantial differences are observed in residual drift and self-centering performance.

The conventional single-level friction damper consistently produces the smallest floor accelerations because more energy is dissipated through friction with fully rectangular hysteresis behavior. Nevertheless, this advantage is accompanied by significantly larger residual deformations after earthquakes. On average, its residual drift is approximately 343% larger than that of the proposed self-centering double-level friction damper and about 416% larger than that of the self-centering single-level friction damper.

The proposed self-centering double-level friction damper achieves structural responses that are nearly identical to those of the self-centering single-level damper in terms of drift, residual drift, and acceleration. More importantly, the required prestressing force for achieving self-centering behavior is nearly 50% lower. This reduction is achieved because the prestressing force only needs to exceed the first-level slip force, while the second-level friction capacity is responsible for controlling larger seismic demands.

The analyses also indicate that the advantages of self-centering systems become increasingly evident as building height increases. Furthermore, the proposed damper exhibits lower sensitivity to different earthquake records, resulting in more stable seismic performance under various hazard levels.

Conclusion

A novel self-centering double-level friction damper was proposed, and its seismic performance was evaluated against those of a conventional single-level friction damper and a self-centering single-level friction damper through nonlinear response-history analyses of steel moment-resisting frames equipped with each damper. The study demonstrates that:

- Both self-centering systems significantly reduce residual inter-story drift compared with conventional friction dampers.
- Conventional friction dampers provide slightly lower floor accelerations but at the expense of substantially larger permanent deformations.
- The proposed self-centering double-level friction damper achieves seismic performance comparable to that of the self-centering single-level system while requiring approximately half of the prestressing force.
- The reduced self-centering demand improves the practical implementation of post-tensioned self-centering

systems and enhances structural resilience following severe earthquakes.

Overall, the proposed damper represents an efficient and practical solution for resilient seismic design by simultaneously controlling drift, minimizing residual deformation, and reducing the required self-centering force.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the preparation of this manuscript.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, Methodology, Analysis, Investigation, Writing.

Second Author: Review and Editing, Supervision and Project Administration.

Third Author: Review and Editing.

Fourth Author: Review and Editing.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد سازه‌های فولادی سه‌بعدی مجهز به میراگرهای اصطکاکی یک‌سطحی و دوسطحی با قابلیت خودمرکزگرایی

وحیدرضا زینل‌پوری^۱، پاشا جوادی^{۲*}، فیاض رحیم‌زاده‌روفوئی^۳، آرمین عظیمی‌نژاد^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران



Citation: Zeinalpour Yazdi, V.R., Javadi, P., Rahimzadeh Rafoui, F., and Aziminejad, A. (2026), "Performance Assessment of 3D-Steel Structures Equipped with Single-Slip and Double-Slip Level Friction Damper with Self-Centering Capability", *Journal of Steel and Structures*, 20(52), pp.72-93. (In Persian).

doi 10.22034/jss.2026.581713.1036

چکیده

زمینه پژوهش: میراگرهای اصطکاکی متداول با وجود قابلیت استهلاک انرژی مناسب، به دلیل ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار، تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها را محدود می‌کنند. به منظور رفع این نقیصه، در این پژوهش استفاده از قابلیت خودمرکزگرایی برای میراگر اصطکاکی دوسطحی با هدف کاهش دررفت پسماند و ارتقای عملکرد لرزه‌ای پیشنهاد شده است که امکان بازگشت به قابلیت سرویس‌دهی پس از بروز زلزله را تسهیل می‌کند.

روش پژوهش: به منظور ارزیابی کارایی میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا، عملکرد آن به صورت عددی با میراگر اصطکاکی یک‌سطحی متداول فاقد خودمرکزگرایی و میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا مقایسه شد. برای این منظور، قاب‌های خمشی ویژه فولادی سه‌بعدی ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه مجهز به هریک از این سه نوع میراگر، مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ای و با استفاده از رابط برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Etabs طراحی شدند. سپس با استفاده از OpenSeesPy، تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی تحت مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله در دو سطح حداکثر زلزله محتمل (MCE) و زلزله سطح طراحی (DBE) انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که هرچند میراگر اصطکاکی یک‌سطحی متداول، دارای میانگین پاسخ شتاب به‌ترتیب ۳۲/۷ و ۲۲/۶ درصد کم‌تر نسبت به میراگرهای اصطکاکی دوسطحی و یک‌سطحی خودمرکزگرا است، اما دارای میانگین پاسخ دررفت پسماند ۳۴۲/۷ و ۴۱۶/۳ درصد بیش‌تر نسبت به آن‌ها است. مهم‌تر از آن، میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرایی پیشنهادی، عملکردی مشابه با میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا از خود نشان داد، درحالی‌که به حدود نیمی از نیروی خودمرکزگرایی برای تأمین قابلیت خودمرکزگرایی مشابه نیاز دارد. کاهش نیروی خودمرکزگرایی مورد نیاز، میراگر اصطکاکی دوسطحی را به یک گزینه بسیار مناسب برای استفاده در سازه‌های پس‌کشیده به‌منظور ایجاد رفتار خودمرکزگرایی تبدیل می‌کند.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، میراگرهای اصطکاکی خودمرکزگرا در مقایسه با میراگرهای اصطکاکی فاقد خودمرکزگرایی، عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری ارائه می‌دهند و با کاهش قابل‌ملاحظه دررفت پسماند، می‌توانند تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها را بهبود بخشند. نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از سیستم‌های خودمرکزگرا برای افزایش ایمنی سازه و حفظ قابلیت بهره‌برداری پس از زلزله تأکید دارد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ تیر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

قاب خمشی فولادی

میراگر اصطکاکی

خودمرکزگرایی

تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی

رکوردهای حوزه دور و نزدیک

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: javadi1403@iau.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیش‌تر، لطفاً به وبسایت <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> مربوطه مراجعه فرمایید.



۱- مقدمه

به‌طور سنتی، سازه‌ها عمدتاً به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که انرژی ناشی از زلزله را از طریق رفتار غیرارتجاعی و شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای مستهلک کنند؛ این رویکرد به سازه اجازه می‌دهد با تحمل تغییر شکل‌های بزرگ، از فروریزش جلوگیری نماید [۱ و ۲]. با این حال، پژوهش‌های سال‌های اخیر با هدف کاهش وابستگی به تغییر شکل‌های غیرارتجاعی، به حداقل رساندن تغییر مکان‌های ماندگار (دریفت پسماند) و افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای، به توسعه سیستم‌های نوین کنترل لرزه‌ای، به‌ویژه سیستم‌های خودمرکزگر، معطوف شده‌اند [۳]. اگرچه سیستم‌های جداساز پایه می‌توانند عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشند، هزینه اولیه، الزامات اجرایی و محدودیت‌های کاربرد در برخی پروژه‌ها، استفاده گسترده از آن‌ها را در بسیاری از ساختمان‌های متعارف محدود کرده است [۴ و ۵]. از این‌رو، سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال، به‌ویژه میراگرها، به‌عنوان راهکاری عملی و مقرون‌به‌صرفه برای کاهش تقاضای لرزه‌ای از طریق افزایش ظرفیت اتلاف انرژی سازه، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند [۶ و ۷].

میراگرهای لرزه‌ای به‌طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال [۸-۱۱]. در این میان، میراگرهای غیرفعال به‌دلیل سادگی، هزینه کم و عدم نیاز به منابع انرژی خارجی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱۲]. دستگاه‌های اتلاف انرژی غیرفعال را می‌توان به دو نوع وابسته به سرعت و وابسته به تغییر مکان تقسیم نمود. پاسخ میراگرهای وابسته به سرعت، مانند میراگرهای ویسکوز سیال، توسط سرعت نسبی بین دو سر آن‌ها کنترل می‌شود، درحالی‌که میراگرهای وابسته به تغییر مکان به تغییر مکان‌های نسبی بین دو سر خود پاسخ می‌دهند. نمونه‌های رایج از نوع دوم شامل میراگرهای تسلیمی فلزی و اصطکاکی هستند [۱۳].

میراگرهای اصطکاکی به‌دلیل هزینه پایین، ساختار ساده و سهولت در نصب، محبوبیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۱۴]. این دستگاه‌ها انرژی لرزه‌ای را از طریق اصطکاک جامد، مستهلک می‌کنند [۱۵]. میراگرهای اصطکاکی برای اولین بار توسط پال^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۰ معرفی شد [۱۶] و در آن زمان به‌طور گسترده از طریق آزمایش‌های تجربی [۱۷-۲۳] و شبیه‌سازی‌های عددی [۲۴-۳۲] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که همواره نشان‌دهنده اثربخشی آن‌ها در کنترل لرزه‌ای بوده است. با این حال، یک

محدودیت عمده میراگرهای اصطکاکی متداول این است که آن‌ها معمولاً برای یک سطح خطر واحد طراحی می‌شوند [۳۰].

برای رفع این محدودیت و بهبود عملکرد در برابر زلزله‌هایی با سطوح مختلف، پیکربندی‌های ارتقایافته گوناگونی پیشنهاد شده است. برخی از پژوهشگران میراگرهای اصطکاکی متغیری را توسعه داده‌اند که قادر به ارائه نیروهای لغزشی متفاوت در سطوح مختلف تغییر مکان هستند [۳۳-۳۵]. برخی دیگر، سیستم‌های ترکیبی را بررسی کردند که میراگرهای اصطکاکی را با انواع دیگر ابزار اتلاف انرژی [۳۶-۳۹] یا با میراگرهای اصطکاکی ثانویه با ظرفیت‌های متفاوت ترکیب می‌کنند تا امکان عملکرد در سطوح مختلف لرزه‌ای فراهم شود [۴۲-۴۹]. میراگر اصطکاکی دوسطحی، اولین بار توسط قربانی و رحیم‌زاده‌رفویی [۴۳] معرفی شد و نشان داده شد که میراگر اصطکاکی دوسطحی در برابر زلزله‌های شدید در مقایسه با میراگر اصطکاکی یک‌سطحی عملکرد مناسب‌تری دارد.

تحولات اخیر همچنین بر افزودن مکانیزم‌های خودمرکزگرایی به میراگرها برای ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای تمرکز داشته است. هاشمی و همکاران^۲ اتصالات اصطکاکی لغزشی تاب‌آور را با استفاده از فنرهای بشقابی برای تأمین نیروهای پیش‌تندگی و قابلیت خودمرکزگرایی در سطوح اصطکاکی گوه‌ای معرفی کردند [۴۴].

شو^۲ و همکاران از پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) برای ایجاد رفتار خودمرکزگر در دستگاه‌های اصطکاکی گوه‌ای استفاده کردند [۴۵].

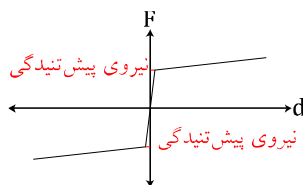
یانگ^۳ و همکاران یک میراگر اصطکاکی دوسطحی با قابلیت خودمرکزگرایی جزئی توسعه دادند [۴۶]؛ درحالی‌که وانگ^۴ و همکاران مهاربندهای خودمرکزگرایی مبتنی بر فنر بشقابی را پیشنهاد دادند که نیروی پیش‌تندگی را مستقیماً از طریق فنرهای بشقابی اعمال می‌کند [۴۷].

ژانگ^۵ و همکاران یک دستگاه لغزش اصطکاکی با سطوح شیب‌دار را برای قاب‌های پس‌کشیده معرفی نمودند [۴۸] و مطالعات دیگر نیز از تاندون‌های پیش‌تندیده برای دستیابی به رفتار خودمرکزگر استفاده کردند [۴۹-۵۲].

علاوه بر این، شو و همکاران مهاربندهایی را پیشنهاد کردند که میراگر اصطکاکی و تاندون‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی را ترکیب می‌کند [۵۳]؛ درحالی‌که وانگ و همکاران^۴ میراگر اصطکاکی متغیر خودمرکزگر را با استفاده از تاندون‌های پلیمر

² Qiu³ Shape Memory Alloy⁴ Yang⁵ Wang⁶ Zhang¹ Pall

مطابق با شکل (۲)، رفتار چرخه‌ای مهاربند خودمرکزگرا شامل دو مرحله متمایز است. زمانی که نیروی اعمال شده کم‌تر از نیروی پیش‌تنیدگی باشد، مهاربند خودمرکزگرا در حالت غیرفعال باقی می‌ماند. با فراتر رفتن نیروی اعمال شده از نیروی پیش‌تنیدگی، مهاربند خودمرکزگرا، فعال شده و شروع به حرکت می‌کند. در مطالعه اصلی [۳]، از یک میراگر اصطکاکی یک‌سطحی به‌عنوان مؤلفه اتلاف انرژی استفاده شده است.



شکل ۲- رفتار چرخه‌ای مهاربند خودمرکزگرا

در این پژوهش، ایده استفاده از میراگر اصطکاکی دوسطحی به‌عنوان المان اتلاف انرژی در مهاربند خودمرکزگرا مورد توجه قرار گرفته است (شکل (۴)) [۴۳]. با توجه به ماهیت دوسطحی نیروی لغزش در این نوع میراگر، می‌توان نیروی پیش‌تنیدگی مورد نیاز را بر اساس میزان نیروی سطح اول لغزش طراحی نمود که این امر منجر به کاهش میزان نیروی پیش‌تنیدگی مورد نیاز در سیستم می‌شود.

۲-۱- بررسی رفتار خودمرکزگرایی

در این بخش به‌منظور درک بهتر رفتار میراگرهای اصطکاکی یک‌سطحی و دوسطحی خودمرکزگرا، نسبت‌های مختلف نیروی پیش‌تنیدگی به ظرفیت میراگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱-۱- میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا

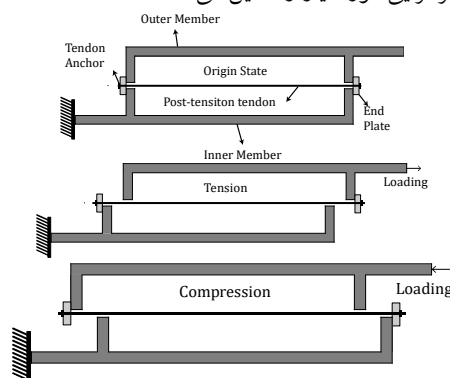
در میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا، برای نسبت نیروی پیش‌تنیدگی به ظرفیت میراگر اصطکاکی که با (β) نشان داده می‌شود، سه حالت را می‌توان در نظر گرفت. ۱- نیروی پیش‌تنیدگی برابر با ظرفیت میراگر. ۲- نیروی پیش‌تنیدگی کم‌تر از ظرفیت میراگر ۳- نیروی پیش‌تنیدگی بیش‌تر از ظرفیت میراگر. هر سه حالت رفتار میراگر در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی که میزان نیروی پیش‌تنیدگی کم‌تر از ظرفیت میراگر است ($\beta=0/5$)، رفتار مرکزگرایی کامل ایجاد نمی‌شود و ظرفیت میراگر هنگام عبور از مبدأ بسیار بیش‌تر از صفر است. در دو حالت دیگر، ظرفیت میراگر

تقویت شده با الیاف بازالت یکپارچه شده با میراگرهای اصطکاکی متغیر توسعه دادند [۵۴].

زارعیان و همکاران نیز زیرمجموعه‌های دیوار کوپله ترکیبی خودمرکزگرا شامل میراگرهای اصطکاکی را معرفی نمودند [۵۵]. در این مطالعه با توجه به عملکرد برتر سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی نسبت به یک‌سطحی، استفاده از قابلیت خودمرکزگرایی برای میراگر اصطکاکی دوسطحی پیشنهاد و عملکرد میراگر اصطکاکی یک‌سطحی و دوسطحی با قابلیت خودمرکزگرایی با همدیگر مقایسه شد. لازم به ذکر است در این روش قسمت خودمرکزگرایی به موازات میراگر اصطکاکی دوسطحی عمل کرده که امکان ایجاد رفتار کاملاً خودمرکزگرا را فراهم می‌نماید. درحالی‌که در نمونه دیگری از میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا که توسط **یانگ و همکاران** معرفی شده [۵۶]، یک میراگر اصطکاکی یک‌سطحی با ظرفیت پایین‌تر به‌صورت سری با یک میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا با ظرفیت بالاتر اتصال دارد که عملاً مفهوم خودمرکزگرایی زیر سوال می‌رود. چراکه میراگر اصطکاکی سطح اول فاقد قابلیت خودمرکزگرایی است و موجب بروز تغییر شکل ماندگار می‌شود.

۲- پیکربندی میراگر اصطکاکی خودمرکزگرا

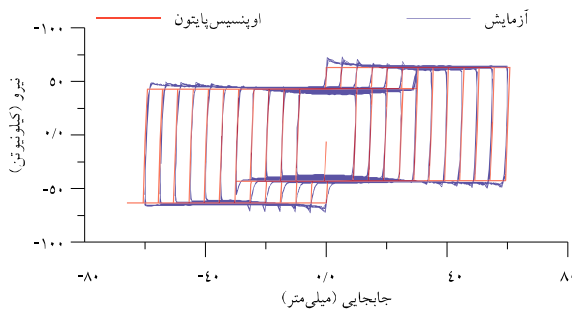
به‌منظور تأمین نیروی بازگرداننده برای میراگرهای خودمرکزگرا، مهاربندهای خودمرکزگرای (SC) پیشنهاد شده توسط **کریستوپولوس^۱ و همکاران** در نظر گرفته شده است (شکل (۱)) [۳]. مهاربندهای خودمرکزگرا از مقاطع هم‌مرکز تلسکوپی و صفحات مهار تشکیل شده‌اند که امکان ایجاد مکانیزم کشش در کابل پیش‌تنیدگی را تحت بارگذاری محوری فراهم می‌کنند. تاندون‌های پس کشیده، صرف‌نظر از شرایط بارگذاری مهاربند خودمرکزگرا، همواره تحت کشش قرار می‌گیرند و نیروی خودمرکزگرایی مورد نیاز را تأمین می‌کنند.



شکل ۱- مهاربند خودمرکزگرای کریستوپولوس و همکاران [۳]

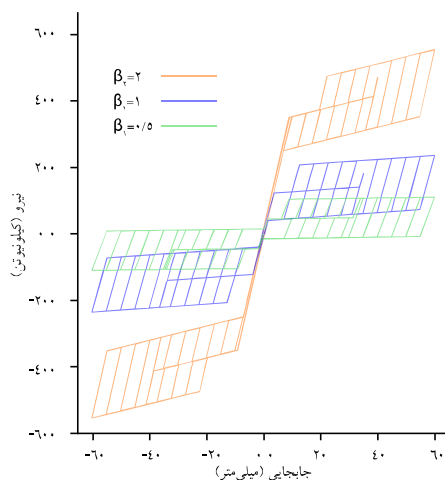
¹ Christopoulos

به‌هنگام عبور از مبدأ مختصات مقدار ناچیزی است که بیانگر رفتار کاملاً خودمرکزگرا می‌باشد.

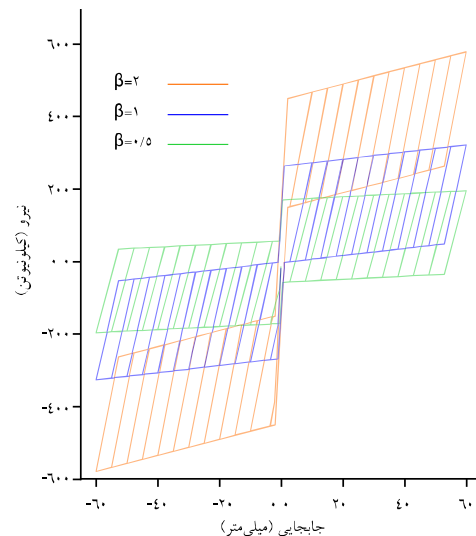


شکل ۴- صحت‌سنجی میراگر اصطکاکی دوسطحی

برای میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا، در حالتی که دامنه جابه‌جایی میراگر سطح اول، برابر یا بزرگ‌تر از دامنه جابه‌جایی میراگر سطح دوم باشد و در صورتی که نسبت نیروی پیش‌تنیدگی بیش‌تر از ظرفیت میراگر سطح اول باشد، کل میراگر دارای رفتار کاملاً خودمرکزگرا خواهد بود. در شکل (۵)، با فرض دامنه جابه‌جایی برابر برای هر دو سطح میراگر، حالات مختلف برای میزان نیروی پیش‌تنیدگی به ظرفیت میراگر سطح اول در نظر گرفته شده است. در صورتی که نیروی پیش‌تنیدگی کم‌تر از ظرفیت میراگر سطح اول باشد ($\beta_1=0/5$)، میزان نیروی میراگر به‌هنگام عبور از مبدأ برابر با صفر نیست که بیانگر عدم مرکزگرایی کامل است. اما در زمانی که میزان نیروی پیش‌تنیدگی برابر یا بیش‌تر از ظرفیت میراگر سطح اول باشد ($\beta_1=1$ یا $\beta_1=2$)، میراگر دارای رفتار مرکزگرایی کامل است که مزیت رویکرد معرفی‌شده است. در صورتی که میزان نیروی پیش‌تنیدگی بیش‌تر از ظرفیت میراگر سطح دوم باشد ($\beta_2=2$) میراگر دارای رفتار تماماً خودمرکزگرا است.



شکل ۵- میراگر دوسطحی خودمرکزگرا با دامنه جابه‌جایی برابر



شکل ۶- میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا

۲-۱-۲- میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا

ابتدا مدل‌سازی میراگر اصطکاکی دوسطحی در نرم‌افزار OpenSeesPy با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی صورت‌گرفته توسط چین^۱ و گوئو^۲ صحت‌سنجی شد [۵۷]. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار میراگر اصطکاکی دوسطحی، چندین مدل ماده در OpenSeesPy با یکدیگر ترکیب شدند. میراگرهای سطح اول و دوم با استفاده از ماده Steel01 مدل شدند. برای مدل‌سازی مکانیزم انتقال در میراگر دوسطحی، دو ماده Gap، یکی برای کشش و دیگری برای فشار، به‌صورت موازی به یکدیگر متصل شدند. میزان بازشدگی Gap برابر با دامنه لغزش متناظر تنظیم شد. سپس این دو ماده Gap به‌همراه مدل میراگر سطح اول، به‌صورت موازی با یکدیگر ترکیب شدند و در نهایت مجموعه حاصل به‌صورت سری به میراگر سطح دوم متصل شد. مقایسه نتایج نشان داده‌شده در شکل (۷) بیانگر دقت مناسب مدل‌سازی است.

¹ Chien
² Guo

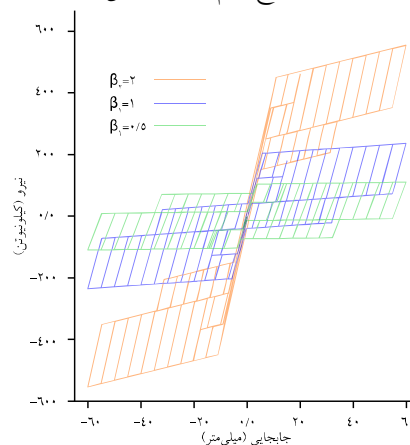
۱۱ رکورد زلزله از FEMA P-695 برای طراحی سازه‌ها انتخاب شد (رکوردهای پررنگ در جدول (۱)) [۶۰]. مجموعه رکوردهای طراحی مطابق استاندارد ASCE 7-22 برای خاک نوع D و برای سطح حداکثر زلزله محتمل (MCE) مقیاس شدند (جدول (۲)). سازه‌های طراحی شده همچنین تحت تمامی رکوردهای FEMA P-695 در دو سطح زلزله، یعنی حداکثر زلزله محتمل و زلزله سطح طراحی (DBE) (که برابر با دوسوم حداکثر زلزله محتمل در نظر گرفته می‌شود) تحلیل شدند.

شتاب طیفی سطح طراحی برای دوره‌های تناوب کوتاه (SDS) برابر با ۱/۸ و شتاب طیفی سطح طراحی برای تناوب ۱ ثانیه (SD1) برابر با ۰/۷۸ در نظر گرفته شد. بار مرده و بار زنده برای تمامی طبقات به ترتیب برابر با ۵۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض شد و وزن تیرها و ستون‌ها به صورت مستقل اعمال شد. نسبت میرایی نیز برای همه سازه‌ها ۵ درصد در نظر گرفته شد.

تمامی سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای (قاب‌های خمشی ویژه) برای ۱۰۰ درصد برش پایه لرزه‌ای با استفاده از روش نیروی جانبی معادل (ELF) مطابق با استاندارد ASCE 7-22 و آیین‌نامه AISC 360-22 طراحی شدند [۶۱].

طراحی قاب‌های خمشی در نرم‌افزار Etabs انجام شد. برای این منظور از رابط برنامه‌نویسی API نرم‌افزار Etabs در زبان برنامه‌نویسی پایتون^۵ استفاده شد. مدل‌های سازه‌ای به صورت کاملاً خودکار در Etabs ایجاد شدند و پس از اعمال ضوابط طراحی مربوط به قاب خمشی ویژه، مدل OpenSeesPy به صورت خودکار ایجاد شد. تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی در OpenSeesPy انجام پذیرفت و بر اساس میانگین نتایج تحلیل تحت رکوردهای طراحی، مشخصات میراگرها اصلاح شد. پس از هر دو مرتبه تحلیل تاریخچه‌زمانی، با توجه به تقاضای به دست آمده میراگرها، دهانه‌های شامل میراگر برای حداکثر ظرفیت میراگر به علاوه قسمت خودمرکزگرایی طراحی ظرفیتی شده و مدل OpenSeesPy بازتولید و ادامه تحلیل‌ها صورت پذیرفت. این چرخه تا طراحی نهایی تکرار شد. مشخصات سازه‌های طراحی شده در جدول‌های (۳) الی (۶) آورده شده است.

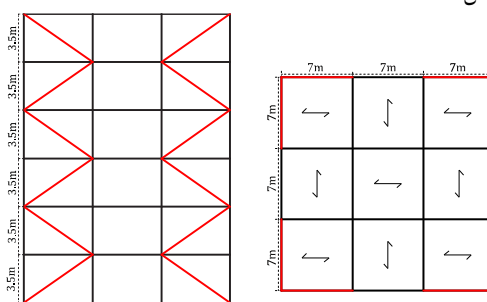
اما در حالتی که دامنه جابه‌جایی میراگر سطح اول کوچک‌تر از دامنه جابه‌جایی میراگر اصطکاکی سطح دوم باشد، کل میراگر در صورتی کاملاً خودمرکزگرا است که میزان نیروی پیش‌تنیدگی بیش‌تر از ظرفیت میراگر سطح دوم باشد (شکل (۶)).



شکل ۶- میراگر دوسطحی خودمرکزگرا با دامنه جابه‌جایی کوچک‌تر برای سطح اول

۳- ارزیابی عملکرد سازه‌ای

به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی یک‌سطحی و دوسطحی با قابلیت خودمرکزگرایی، تحلیل‌های عددی مقایسه‌ای با استفاده از OpenSeesPy انجام شد [۵۸]. سه قاب خمشی ویژه فولادی سه بعدی ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه به عنوان سیستم باربر جانبی لرزه‌ای مطابق با ASCE 7-22 در نظر گرفته شدند [۵۹]. هر سازه برای سه نوع میراگر طراحی شد: ۱- میراگر اصطکاکی یک‌سطحی، ۲- میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا و ۳- میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا. مشخصات میراگرهای به کاررفته برای هر طبقه و در هر دو جهت به صورت یکسان لحاظ شد. پلان تیپ طبقات و آرایش میراگرها در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- پلان و آرایش میراگر برای تمامی سازه‌ها

^۱ Maximum Considered Earthquake

^۲ Design Basis Earthquake

^۳ Spectral Design Acceleration at Short Periods

^۴ Equivalent Lateral Force

^۵ Python

۳-۱- نحوه طراحی مشخصات میراگرها

تقاضای میراگرها بر اساس نسبت دررفت طبقه و یا نسبت دررفت پسماند تعیین شد. حدود مجاز دررفت و دررفت پسماند به ترتیب برابر با ۲٪ و ۱٪ ارتفاع طبقه در نظر گرفته شد. ظرفیت میراگر در هر طبقه تا زمانی افزایش داده شد که نسبت دررفت و یا دررفت پسماند از حدود تعیین شده کم تر باقی بماند.

در سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی یک سطحی، برای تعیین ظرفیت میراگر، تنها نسبت دررفت در نظر گرفته شد. ظرفیت میراگر در هر طبقه تا زمانی افزایش یافت که نسبت دررفت در تمام طبقات کم تر از حد مجاز دررفت باقی بماند.

برای سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا، هر دو نسبت دررفت و دررفت پسماند در نظر گرفته شد. همچنین نیروی پیش‌تنیدگی برای تأمین مرکزگرایی ۱/۵ برابر ظرفیت میراگر اصطکاکی در نظر گرفته شد تا تشکیل مفصل

پلاستیک در تیرها و ستون‌ها جبران شود. لازم به ذکر است مقادیر کوچک‌تر از ۱/۵، قابلیت مرکزگرایی مناسبی در سازه ایجاد نمی‌کرد. ظرفیت میراگرهای اصطکاکی و در نتیجه نیروی پیش‌تنیدگی تا زمانی افزایش داده شد که در تمام طبقات، هم نسبت دررفت و هم نسبت دررفت پسماند کم تر از حدود مجاز خود باقی بمانند.

برای سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا، تقاضای سطح اول نیرویی، بر اساس نسبت دررفت پسماند و تقاضای سطح دوم نیرویی، بر اساس نسبت دررفت تعیین شد. نیروی پیش‌تنیدگی برای تأمین خودمرکزگرایی برابر با ۱/۵ برابر ظرفیت نیرویی سطح اول در نظر گرفته شد. ظرفیت جابه‌جایی میراگر اصطکاکی سطح اول هر جهت برابر با ۲/۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فلوچارت طراحی میراگرها در شکل (۸) و مشخصات میراگرهای طراحی شده در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۱- رکوردهای زلزله استفاده شده برای طراحی و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای

ردیف	PEER ID	نام زلزله	نام ایستگاه	نوع گسل	M	PGA (g)	PGV (cm/s)	کلاس	Vs30	فاصله (km)
رکوردهای حوزه دور										
۱	۹۵۳	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	معکوس	۶/۷	۰/۵۲	۶۳	D	۳۵۶	۱۳/۳
۲	۹۶۰	Northridge	Canyon Country-WLC	معکوس	۶/۷	۰/۴۸	۴۵	D	۳۰۹	۱۲/۴
۳	۱۶۰۲	Duzce, Turkey	Bolu	امتدادلغز	۷/۱	۰/۸۲	۶۲	D	۳۲۶	۴۱/۳
۴	۱۷۸۷	Hector Mine	Hector	امتدادلغز	۷/۱	۰/۳۴	۴۲	C	۶۸۵	۲۶/۵
۵	۱۶۹	Imperial Valley	Delta	امتدادلغز	۶/۵	۰/۳۵	۳۳	D	۲۷۵	۳۳/۷
۶	۱۷۴	Imperial Valley	El Centro Array #۱۱	امتدادلغز	۶/۵	۰/۳۸	۴۲	D	۱۹۶	۲۹/۴
۷	۱۱۱۱	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	امتدادلغز	۶/۹	۰/۵۱	۳۷	C	۶۰۹	۸/۷
۸	۱۱۱۶	Kobe, Japan	Shin-Osaka	امتدادلغز	۶/۹	۰/۲۴	۳۸	D	۲۵۶	۴۶
۹	۱۱۵۸	Kocaeli, Turkey	Duzce	امتدادلغز	۷/۵	۰/۳۶	۵۹	D	۲۷۶	۹۸/۲
۱۰	۱۱۴۸	Kocaeli, Turkey	Arcelik	امتدادلغز	۷/۵	۰/۲۲	۴۰	C	۵۲۳	۵۲۳
۱۱	۹۰۰	Landers	Yermo Fire Station	امتدادلغز	۷/۳	۰/۲۴	۵۲	D	۵۲۳	۵۳/۷
۱۲	۸۴۸	Landers	Coolwater	امتدادلغز	۷/۳	۰/۴۲	۴۲	D	۲۷۱	۸۲/۱
۱۳	۷۵۲	Loma Prieta	Capitola	امتدادلغز	۶/۹	۰/۵۳	۳۵	D	۲۸۹	۹/۸
۱۴	۷۶۷	Loma Prieta	Gilroy Array #۳	امتدادلغز	۶/۹	۰/۵۶	۴۵	D	۳۵۰	۳۱/۴
۱۵	۱۶۳۳	Manjil, Iran	Abbar	امتدادلغز	۷/۴	۰/۵۱	۵۴	C	۷۲۴	۴۰/۴
۱۶	۷۲۱	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	امتدادلغز	۶/۵	۰/۳۶	۴۶	D	۱۹۲	۳۵/۸
۱۷	۷۲۵	Superstition Hills	Poe Road (temp)	امتدادلغز	۶/۵	۰/۴۵	۳۶	D	۲۰۸	۱۱/۲
۱۸	۸۲۹	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	معکوس	۷	۰/۵۵	۴۴	D	۳۱۲	۲۲/۷
۱۹	۱۲۴۴	Chi-Chi, Taiwan	CHY۱۰۱	معکوس	۷/۶	۰/۴۴	۱۱۵	D	۲۵۹	۳۲
۲۰	۱۴۸۵	Chi-Chi, Taiwan	TCU۰۴۵	معکوس	۷/۶	۰/۵۱	۳۹	C	۷۰۵	۷۷/۵
۲۱	۶۸	San Fernando	LA - Hollywood Stor	معکوس	۶/۶	۰/۲۱	۱۹	D	۳۱۶	۳۹/۵
۲۲	۱۲۵	Friuli, Italy	Tolmezzo	معکوس	۶/۵	۰/۳۵	۳۱	C	۴۲۵	۲۰/۲

رکوردهای حوزه نزدیک (پالس دار)										
۲۷/۵	۲۰۳	D	۱۱۱/۹	۰/۴۴	۶/۵	امتدادلغز	El Centro Array #۶	Imperial Valley-06	۱۸۱	۱
۲۷/۶	۲۱۱	D	۱۰۸/۹	۰/۴۶	۶/۵	امتدادلغز	El Centro Array #۷	Imperial Valley-06	۱۸۲	۲
۳۰/۴	۱۰۰۰	B	۴۵/۵	۰/۳۱	۶/۹	نرمال	Sturno	Irpina, Italy-01	۲۹۲	۳
۱۶	۳۴۹	D	۱۰۶/۸	۰/۴۲	۶/۵	امتدادلغز	Parachute Test Site	Superstition Hills-02	۷۲۳	۴
۲۷/۲	۳۷۱	C	۵۵/۶	۰/۳۸	۶/۹	امتدادلغز	Saratoga - Aloha	Loma Prieta	۸۰۲	۵
۹	۲۷۵	D	۹۵/۵	۰/۴۹	۶/۷	امتدادلغز	Erzincan	Erzican, Turkey	۸۲۱	۶
۴/۵	۷۱۳	C	۸۲/۱	۰/۶۳	۷	معکوس	Petrolia	Cape Mendocino	۸۲۸	۷
۴۴	۶۸۵	C	۱۴۰/۳	۰/۷۹	۷/۳	امتدادلغز	Lucerne	Landers	۸۷۹	۸
۱۰/۹	۲۸۲	D	۱۶۷/۳	۰/۸۷	۶/۷	معکوس	Rinaldi Receiving Sta	Northridge-01	۱۰۶۳	۹
۱۶/۸	۴۴۱	C	۱۲۲/۸	۰/۷۳	۶/۷	معکوس	Sylmar - Olive View	Northridge-01	۱۰۸۶	۱۰
۵/۳	۸۱۱	B	۲۹/۸	۰/۲۲	۷/۵	امتدادلغز	Izmit	Kocaeli, Turkey	۱۱۶۵	۱۱
۲۶/۷	۳۰۶	D	۱۲۷/۷	۰/۸۲	۷/۶	معکوس	TCU۰۶۵	Chi-Chi, Taiwan	۱۵۰۳	۱۲
۴۵/۶	۷۱۴	C	۱۰۶/۶	۰/۲۹	۷/۶	معکوس	TCU۱۰۲	Chi-Chi, Taiwan	۱۵۲۹	۱۳
۱/۶	۲۷۶	D	۷۹/۳	۰/۵۲	۷/۱	امتدادلغز	Duzce	Duzce, Turkey	۱۶۰۵	۱۴

رکوردهای حوزه نزدیک (بدون پالس)										
۱۲/۸	۶۶۰	C	۷۱/۲	۰/۷۱	۶/۸	معکوس	Karakyr	Gazli, USSR	۱۲۶	۱
۶/۲	۲۲۳	D	۴۴/۳	۰/۷۶	۶/۵	امتدادلغز	Bonds Corner	Imperial Valley-06	۱۶۰	۲
۱۸/۹	۲۷۵	D	۳۰/۵	۰/۲۸	۶/۵	امتدادلغز	Chihuahua	Imperial Valley-06	۱۶۵	۳
۶/۸	۶۶۰	C	۴۳/۹	۱/۱۸	۶/۸	معکوس	Site ۱	Nahanni, Canada	۴۹۵	۴
۶/۵	۶۶۰	C	۳۴/۷	۰/۴۵	۶/۸	معکوس	Site ۲	Nahanni, Canada	۴۹۶	۵
۹	۳۷۶	C	۵۵/۹	۰/۶۴	۶/۹	امتدادلغز	BRAN	Loma Prieta	۷۴۱	۶
۷/۲	۴۶۲	C	۴۵/۵	۰/۵۱	۶/۹	امتدادلغز	Corralitos	Loma Prieta	۷۵۳	۷
۱۰/۴	۵۱۴	C	۱۱۹/۵	۱/۴۳	۷	معکوس	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۸۲۵	۸
۸/۵	۳۸۰	C	۷۰/۱	۰/۷۳	۶/۷	معکوس	LA - Sepulveda VA	Northridge-01	۱۰۰۴	۹
۳/۴	۲۸۱	D	۵۳/۲	۰/۴۲	۶/۷	معکوس	Northridge - Saticoy	Northridge-01	۱۰۴۸	۱۰
۱۹/۳	۲۹۷	D	۵۳/۲	۰/۴۲	۷/۵	امتدادلغز	Yarimca	Kocaeli, Turkey	۱۰۴۸	۱۱
۲۸/۷	۴۳۴	C	۹۱/۸	۰/۵۶	۷/۶	معکوس	TCU۰۶۷	Chi-Chi, Taiwan	۱۵۰۴	۱۲
۸/۹	۵۳۳	C	۱۱۵/۱	۱/۱۶	۷/۶	معکوس	TCU۰۸۴	Chi-Chi, Taiwan	۱۵۱۷	۱۳
۷	۵۳۳	C	۱۲۶/۴	۰/۳۳	۷/۹	امتدادلغز	TAPS Pump Sta. #۱۰	Denali, Alaska	۲۱۱۴	۱۴

جدول ۲- ضرایب مقیاس رکوردهای زلزله برای سطح MCE

نوع میراگر	میراگر یک سطحی		میراگر یک سطحی خودمرکزگر		میراگر دوسطحی خودمرکزگر	
گروه رکورد	طراحی	تمام فیما	طراحی	تمام فیما	طراحی	تمام فیما
۶ طبقه	۹/۲۴	۱۰/۰۹۵	۹/۳	۱۰/۱۴	۹/۳	۱۰/۱۴
۱۲ طبقه	۸/۷۱۵	۹/۲۸۵	۸/۶۴	۹/۲۴	۸/۷	۹/۲۷
۱۸ طبقه	۹/۵۴	۹/۶۹	۹/۵۴	۹/۶۶	۹/۴۹۵	۹/۶۶

جدول ۳- دوره تناوب قاب‌های خمشی

نوع میراگر	میراگر یک سطحی		میراگر یک سطحی خودمرکزگر		میراگر دوسطحی خودمرکزگر	
شماره مود	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۶ طبقه	۱/۲۵۳	۱/۲۵۳	۱/۰۵۹	۱/۱۵۶	۱/۱۵۶	۰/۹۷۲
۱۲ طبقه	۲/۱۲۶	۲/۱۲۶	۱/۷۵۶	۲/۰۷۵	۲/۰۷۵	۱/۷۱۵
۱۸ طبقه	۲/۶۳۶	۲/۶۳۵	۲/۱۹۰	۲/۶۱۳	۲/۶۱۲	۲/۱۶۶

جدول ۴- مشخصات ستون‌های با مقطع مربع (mm)

نوع میراگر	میراگر اصطکاکی یک سطحی		میراگر یک سطحی خودمرکزگرا		میراگر دوسطحی خودمرکزگرا	
	a*	b*	a*	b*	a*	b*
طبقه ۶	طبقه ۱-۳	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۴۵۰×۳۰
	طبقه ۴-۶	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰
	طبقه ۱-۳	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۵۵۰×۳۵
طبقه ۱۲	طبقه ۴-۶	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۴۵۰×۳۰
	طبقه ۷-۹	۳۰۰×۲۰	۳۰۰×۲۰	۳۵۰×۲۵	۳۰۰×۲۰	۳۰۰×۲۰
	طبقه ۱۰-۱۲	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰
طبقه ۱۸	طبقه ۱-۳	۵۵۰×۳۵	۵۵۰×۳۵	۵۵۰×۳۵	۵۵۰×۳۵	۶۵۰×۴۰
	طبقه ۴-۶	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۵۵۰×۳۵
	طبقه ۷-۹	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰	۴۵۰×۳۰
	طبقه ۱۰-۱۲	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵
	طبقه ۱۳-۱۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۵۰×۲۵	۳۰۰×۲۰
	طبقه ۱۶-۱۸	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰	۲۵۰×۲۰

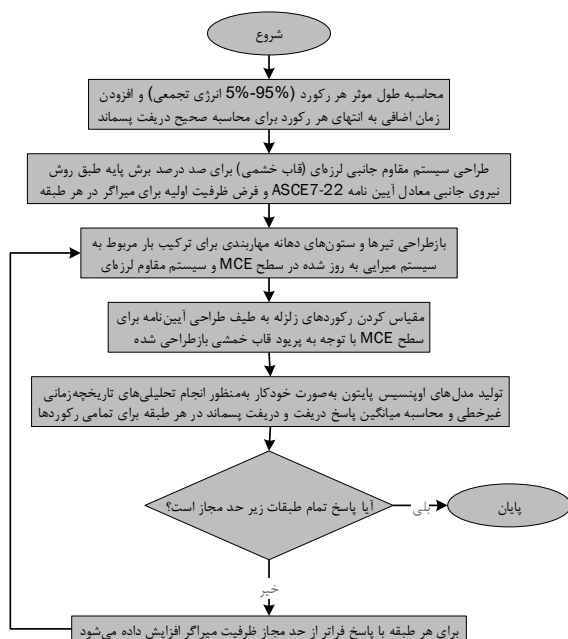
a* ستون‌های واقع در پیرامون سازه و b ستون‌های میانی است.

جدول ۵- مشخصات تیرها

محدوده	سازه ۶ طبقه	سازه ۱۲ طبقه	سازه ۱۸ طبقه
طبقه ۱-۲	IPE 450	IPE 450	IPE 500
طبقه ۳-۴	IPE 450	IPE 500	IPE 500
طبقه ۵-۶	IPE 450	IPE 500	IPE 550
طبقه ۷-۸	—	IPE 500	IPE 550
طبقه ۹-۱۰	—	IPE 450	IPE 550
طبقه ۱۱-۱۲	—	IPE 400	IPE 550
طبقه ۱۳-۱۴	—	—	IPE 500
طبقه ۱۵-۱۶	—	—	IPE 450
طبقه ۱۷-۱۸	—	—	IPE 400

جدول ۶- وزن سازه‌ها (Ton)

نوع میراگر	میراگر یک سطحی	میراگر یک سطحی خودمرکزگرا	میراگر دوسطحی خودمرکزگرا
طبقه ۶	۱۴۷/۱	۱۶۶/۶	۱۶۶/۶
طبقه ۱۲	۳۸۱/۷	۳۹۷/۰	۳۸۵/۴
طبقه ۱۸	۶۹۰/۴	۷۰۵/۷	۶۹۴/۲



شکل ۸- فلوچارت طراحی میراگر

جدول ۷- مشخصات میراگرهای طراحی شده (واحد ها بر حسب Ton و m هستند).

نوع میراگر	یک سطحی	یک سطحی خود مرکز گرا			دو سطحی خود مرکز گرا		
بارامتر	ظرفیت	ظرفیت	نیروی پیش تنیدگی خود مرکز گرای	سختی پس از فعال شدن مرکز گرای	ظرفیت	نیروی پیش تنیدگی خود مرکز گرای	سختی پس از فعال شدن مرکز گرای
سازه ۶ طبقه							
طبقه ۱	۵/۲	۱۲/۵	۱۸/۷	۱۷۸/۴	۴۸/۳	۱۰۸/۷	۷۲/۵
طبقه ۲	۸۶/۱	۳۸/۸	۵۸/۲	۵۵۳/۸	۱۶/۶	۳۷/۴	۲۵
طبقه ۳	۶۹/۵	۴۷/۶	۷۱/۴	۶۷۹/۵	۸/۹	۹۷/۷	۱۳/۳
طبقه ۴	۶۴/۸	۴۳/۶	۶۵/۴	۶۲۲/۵	۱۸/۹	۹۵	۲۸/۳
طبقه ۵	۱۷/۵	۲۵	۳۷/۴	۳۵۶/۵	۱۸	۴۰/۵	۲۶/۹
طبقه ۶	۵/۱	۱۱/۲	۱۶/۸	۱۵۹/۶	۸/۴	۱۸/۹	۱۲/۶
میانگین	۴۱/۴	۲۹/۸	۴۴/۷	۴۲۵/۱	۱۹/۹	۶۶/۴	۲۹/۸
سازه ۱۲ طبقه							
طبقه ۱	۵/۱	۲۵/۸	۳۸/۶	۳۸	۳۶/۳	۸۱/۷	۵۴/۵
طبقه ۲	۵/۹	۲۳/۹	۳۵/۸	۳۴۰/۶	۲۷/۴	۶۱/۶	۴۱/۱
طبقه ۳	۶۹/۵	۵۰/۹	۷۶/۳	۷۲۶/۷	۸/۶	۲۶/۱	۱۲/۹
طبقه ۴	۱۰۱/۴	۵۶/۵	۸۴/۷	۸۰۶/۸	۷/۸	۸۸	۱۱/۷
طبقه ۵	۷۴/۴	۴۸/۱	۷۲/۲	۶۸۷/۱	۱۳/۱	۱۱۰/۱	۱۹/۶
طبقه ۶	۵۲	۳۹/۳	۵۸/۹	۵۶۱/۱	۱۲/۵	۷۵	۱۸/۷
طبقه ۷	۹۷/۲	۴۴/۱	۶۶/۲	۶۳۰/۳	۲۰/۹	۶۳/۶	۳۱/۴
طبقه ۸	۴۱/۵	۳۲/۲	۴۸/۳	۴۵۹/۳	۲۳	۵۱/۷	۳۴/۵
طبقه ۹	۳۶/۲	۲۹/۲	۴۳/۸	۴۱۶/۹	۱۷	۳۸/۲	۲۵/۵
طبقه ۱۰	۲۰/۸	۲۵/۴	۳۸/۲	۳۶۳/۳	۱۳/۷	۳۰/۸	۲۰/۵
طبقه ۱۱	۵/۱	۱۴/۳	۲۱/۴	۲۰۳/۶	۸/۸	۱۹/۸	۱۳/۲
طبقه ۱۲	۵/۱	۵/۱	۷/۶	۷۲/۸	۲	۷/۱	۳/۱
میانگین	۴۲/۹	۳۲/۹	۴۹/۳	۴۶۹/۷	۱۵/۹	۵۴/۵	۲۳/۹
سازه ۱۸ طبقه							
طبقه ۱	۵/۱	۵/۱	۷/۶	۷۲/۸	۷/۹	۱۷/۸	۱۱/۸
طبقه ۲	۵/۱	۱۴/۹	۲۲/۴	۲۱۳/۳	۱۴/۲	۳۱/۸	۲۱/۲
طبقه ۳	۵/۱	۱۴/۱	۲۱/۲	۲۰۱/۳	۹/۷	۳۸/۱	۱۴/۵
طبقه ۴	۲۸/۲	۳۴/۶	۵۱/۹	۴۹۴/۵	۱۲/۱	۵۵/۷	۱۸/۱
طبقه ۵	۵۸/۶	۳۸/۴	۵۷/۶	۵۴۸/۰	۱۷/۱	۶۵/۶	۲۵/۷
طبقه ۶	۵۴/۴	۳۹/۵	۵۹/۲	۵۶۳/۷	۲۳/۴	۷۲/۷	۳۵/۲
طبقه ۷	۸۲/۴	۳۹/۶	۵۹/۵	۵۶۶/۲	۲۴/۹	۶۷/۶	۳۷/۴
طبقه ۸	۴۱/۵	۴۴/۱	۶۶/۱	۶۲۹/۱	۲۳/۳	۶۱/۱	۳۴/۹
طبقه ۹	۴۱/۸	۱۸/۴	۲۷/۶	۲۶۳/۰	۲۲/۵	۵۵/۷	۳۳/۷
طبقه ۱۰	۵۲/۵	۳۸/۸	۵۸/۱	۵۵۳/۷	۱۹/۸	۵۳/۳	۲۹/۷
طبقه ۱۱	۱۵/۲	۲۷/۳	۴۱/۰	۳۹۰/۰	۲۶/۳	۵۹/۳	۳۹/۵
طبقه ۱۲	۹/۸	۲۱/۱	۳۱/۶	۳۰۰/۹	۲۰/۴	۴۶/۰	۳۰/۷
طبقه ۱۳	۳۲/۴	۲۴/۵	۳۶/۸	۳۵۰/۴	۱۷/۷	۳۹/۸	۲۶/۵
طبقه ۱۴	۱۷/۵	۲۵/۸	۳۸/۸	۳۶۹/۰	۱۷/۰	۳۸/۳	۲۵/۵
طبقه ۱۵	۱۴/۲	۲۹/۴	۴۴/۱	۴۱۹/۴	۱۷/۷	۳۹/۸	۲۶/۵
طبقه ۱۶	۹/۴	۲۰/۴	۳۰/۶	۲۹۱/۳	۱۱/۶	۲۶/۱	۱۷/۴
طبقه ۱۷	۵/۱	۱۱/۵	۱۷/۲	۱۶۳/۸	۶/۰	۱۳/۶	۹/۱
طبقه ۱۸	۵/۱	۶/۲	۹/۳	۸۹/۰	۲/۰	۷/۱	۳/۱
میانگین	۲۶/۹	۲۵/۲	۳۷/۸	۳۶۰/۰	۱۶/۳	۴۲/۹	۲۴/۵

۳-۲- مدل سازی در OpenSeesPy

تیرها و ستون‌ها با استفاده از المان‌های غیرخطی «تیر-ستون» با پلاستیسیته گسترده (Distributed Plasticity) مدل سازی شدند. به تمامی طبقات دیافراگم صلب اختصاص داده شد و تکیه‌گاه تمامی ستون‌ها به زمین به صورت گیردار در نظر گرفته شد. برای تیرها از تبدیل هندسی خطی و برای ستون‌ها از تبدیل هندسی Co-Rotational استفاده شد. به منظور تعریف ویژگی‌های تیرها و ستون‌ها، ماده Steel01 با رفتار دوطبقی، تنش تسلیم $235/36$ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته $205/94$ گیگاپاسکال و نسبت سخت‌شوندگی کرنشی 3 درصد سختی اولیه، به کار گرفته شد. همچنین، میرایی رایلی با نسبت میرایی $2/5$ درصد برای دو مود اول در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی رفتار مهاربند خودمرکزگرا (SC)، از ماده Self-Centering استفاده شد. برای این مهاربندها، الیاف Technora با مدول کششی 75 گیگاپاسکال، مقاومت کششی $3/8$ گیگاپاسکال و ظرفیت کرنشی الاستیک حدود 4 درصد در نظر گرفته شد [۳]. برای این که مقادیر سختی پس از تسلیم میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا و میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا در حدود هم باشند، میزان کرنش پیش‌تندگی تاندون‌ها برای میراگر یک سطحی خودمرکزگرا برابر با $1/5$ درصد و برای میراگر دوسطحی خودمرکزگرا برابر با $1/3$ درصد لحاظ و سطح مقطع مورد نیاز تاندون‌ها با استفاده از روابط $\sigma = E\varepsilon$ و $\sigma = P/A$ محاسبه شد. برای این منظور، با توجه به سطح کرنش پیش‌تندگی مورد انتظار، میزان تنش تاندون با استفاده از رابطه $\sigma = E\varepsilon$ حساب شده و برای این سطح تنش، میزان سطح مقطع مورد نیاز تاندون جهت تأمین نیروی پیش‌تندگی مورد نیاز P با استفاده از رابطه $A = P/\sigma$ حساب می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی رفتار مهاربند خودمرکزگرا، شامل سختی قبل از فعال شدن، سختی پس از فعال شدن و نیروی پیش‌تندگی کابل است. سختی پس از فعال شدن تاندون‌ها با استفاده از رابطه $K = AE/L$ محاسبه می‌شود که در آن A سطح مقطع کابل، E مدول الاستیسیته کابل و L طول کابل است. همچنین سختی قبل از فعال شدن مهاربند برابر با مجموع سختی کابل و مقاطع داخلی و خارجی تلسکوپی است [۳].

۴- ارزیابی نتایج عملکرد لرزه‌ای

با توجه به شکل‌های (۹) الی (۱۱) و جدول (۸)، پاسخ سازه‌های شش طبقه تحت رکوردهای طراحی، نشان می‌دهد که هر سه نوع

میراگر، نسبت‌های دررفت مشابهی را به نمایش می‌گذارند. باین حال، مقادیر دررفت پسماند در مدل مجهز به میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا (میانگین دررفت پسماند طبقات برابر با $0/09$ درصد) و مدل مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا (میانگین دررفت پسماند طبقات برابر با $0/1$ درصد) به طور قابل توجهی کم‌تر از مدل مجهز به میراگر اصطکاکی یک سطحی است (میانگین دررفت پسماند طبقات برابر با $0/39$ درصد). در مقابل، پاسخ شتاب حداکثر طبقات در مدل بدون خودمرکزگرایی، کم‌تر از مدل‌های دارای خودمرکزگرایی است.

برای سازه‌های شش طبقه تحت تمامی رکوردهای FEMA P-695 در سطح MCE، برتری مدل‌های دارای خودمرکزگرایی در کنترل دررفت پسماند نسبت به مجموعه رکوردهای طراحی، بارزتر است (دررفت پسماند برای میراگرهای اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا برابر با $0/08$ ، اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا برابر با $0/08$ و یک سطحی برابر با $0/54$ است). این مشاهده نشان می‌دهد که عملکرد سازه‌های دارای خودمرکزگرایی در مقایسه با سازه‌های فاقد این خاصیت، حساسیت کم‌تری نسبت به نوع رکوردهای لرزه‌ای دارد. اما حداکثر نیاز میراگر (جدول (۷)) و متعاقب آن، وزن کل سازه (جدول (۶)) در مدل بدون خودمرکزگرایی، اندکی کم‌تر از مدل‌های دارای خودمرکزگرایی است. تحت تمامی رکوردهای FEMA P-695 در سطح DBE، مدل‌های دارای خودمرکزگرایی به وضوح در زمینه دررفت پسماند از مدل بدون خودمرکزگرایی بهتر عمل کرده‌اند؛ درحالی که مدل بدون خودمرکزگرایی، عملکرد بهتری در کنترل شتاب نشان می‌دهد. دلیل کم‌تر بودن پاسخ شتاب در مدل بدون خودمرکزگرایی، این است که المان خودمرکزگرایی بخشی از انرژی اعمالی به میراگر را به صورت انرژی کرنشی در خود ذخیره می‌کند و مانع از استهلاک آن می‌شود و این موضوع در مقایسه پاسخ چرخه‌ای میراگرها مشهود است. مطابق شکل (۱۲)، میراگرهای اصطکاکی یک سطحی و دوسطحی خودمرکزگرا در مقایسه با میراگر اصطکاکی یک سطحی بدون خودمرکزگرایی دارای مساحت کم‌تری هستند که بیانگر قابلیت جذب انرژی کم‌تر آن‌ها است.

روند مشابهی برای سازه‌های ۱۲ و ۱۸ طبقه نیز مشاهده می‌شود که شامل دو تفاوت عمده است: اولاً، با افزایش ارتفاع سازه، مزیت نسبی مدل بدون خودمرکزگرایی در کنترل پاسخ

شتاب کم‌رنگ‌تر می‌شود؛ ثانیاً، حداکثر نیازهای میراگر و وزن سازه برای هر سه نوع میراگر در محدوده قابل مقایسه‌ای باقی می‌ماند. در نتیجه سازه‌های دارای خودمرکزگرایی، عملکرد لرزه‌ای کلی بهتری را برای سازه‌های بلندتر فراهم می‌کنند.

نمودار تاریخیچه زمانی جابه‌جایی بام برای سازه‌های ۱۲ طبقه تحت برخی رکوردها در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این نمودارها بیانگر آن است که پاسخ جابه‌جایی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا، سریع‌تر از دو نوع دیگر مستهلک شده و نوسانات کم‌تری دارند؛ این موضوع نشان می‌دهد که میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا تقاضای نوسانی کم‌تری به سازه تحمیل می‌کند. با مقایسه میانگین نیازهای نیروی پیش‌تندگی بخش خودمرکزگرایی در دو نوع میراگر اصطکاکی یک‌سطحی و دوسطحی خودمرکزگرا (جدول (۷))، مشاهده می‌شود که نیروی پیش‌تندگی مورد نیاز برای میراگر پیشنهادی

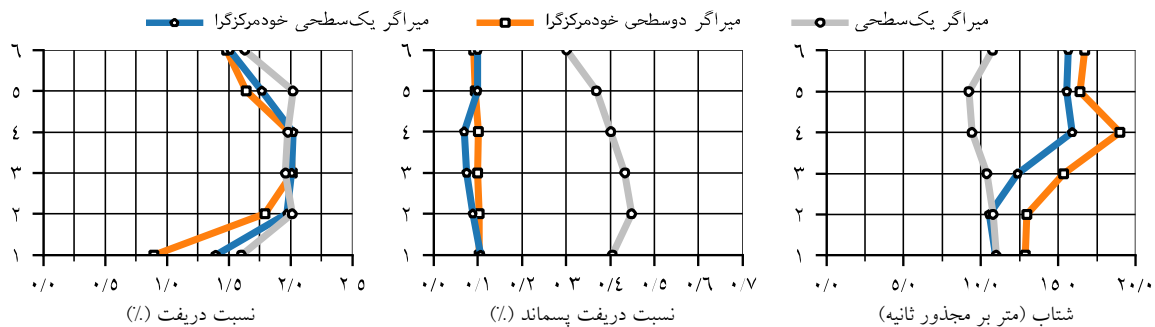
دوسطحی خودمرکزگرا تقریباً نصف نیروی مورد نیاز برای میراگر یک‌سطحی خودمرکزگرا است. با وجود این کاهش نیرو، هر دو میراگر عملکرد مشابهی بر روی پاسخ سازه از نظر دررفت، دررفت پسماند و شتاب دارند (جدول (۸)). همچنین شایان‌ذکر است که علیرغم کاهش نیروی پیش‌تندگی مورد نیاز برای میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا، ظرفیت سطح دوم میراگر نسبت به میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا تا دو برابر افزایش یافته است. برای فهم این موضوع لازم به یادآوری است که سطح دوم نیرویی برای کنترل دررفت تنظیم شده است و افزایش سطح دوم نیرویی تا دو برابر ظرفیت میراگر اصطکاکی یک‌سطحی خودمرکزگرا برای کنترل دررفت بوده است. در نتیجه، کاهش میزان نیروی پیش‌تندگی میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا به واسطه افزایش نیروی سطح دوم میراگر جبران شده است تا پاسخ دررفت کنترل شود.

جدول ۸- مقایسه میانگین پاسخ تمام طبقات

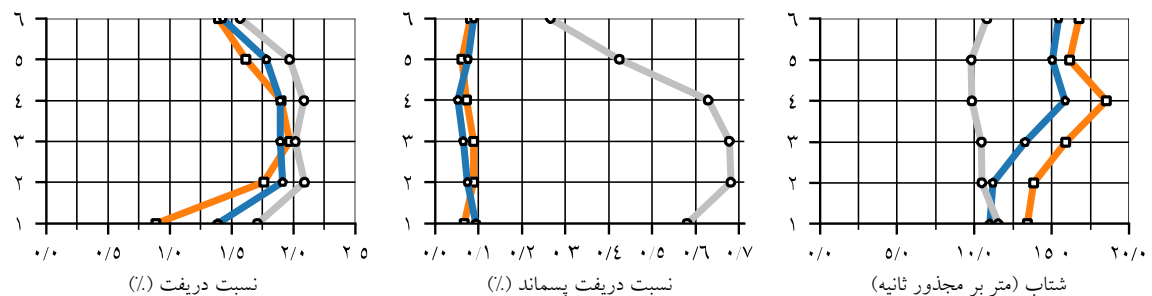
سازه	۶ طبقه	۱۲ طبقه	۱۸ طبقه			
نوع میراگر	میراگر یک‌سطحی خودمرکزگرا	میراگر دوسطحی خودمرکزگرا	میراگر یک‌سطحی خودمرکزگرا	میراگر یک‌سطحی خودمرکزگرا	میراگر یک‌سطحی خودمرکزگرا	میراگر دوسطحی خودمرکزگرا
تحت رکوردهای طراحی در سطح MCE						
دررفت (%)	۱/۸۷	۱/۷۸	۱/۶۳	۱/۷۵	۱/۷۷	۱/۶۶
دررفت پسماند (%)	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۱۰
شتاب (m/s^2)	۱۰/۲۶	۱۳/۵	۱۵/۵۵	۷/۳۳	۱۰/۰۶	۱۱/۲۸
تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح MCE						
دررفت (%)	۱/۹۱	۱/۷۲	۱/۵۹	۱/۶۵	۱/۶۹	۱/۶۱
دررفت پسماند (%)	۰/۵۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۴۲	۰/۰۶	۰/۰۹
شتاب (m/s^2)	۱۰/۴۹	۱۳/۶۳	۱۵/۷۷	۷/۳۲	۱۰/۴	۱۰/۸۹
تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح DBE						
دررفت (%)	۱/۱۴	۱/۰۸	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۰۹	۱/۰۶
دررفت پسماند (%)	۰/۲۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۶
شتاب (m/s^2)	۸/۱۹	۱۰/۵	۱۲/۰۳	۵/۴۴	۶/۹۳	۸/۴۸

ادامه جدول ۸- مقایسه میانگین پاسخ تمام طبقات

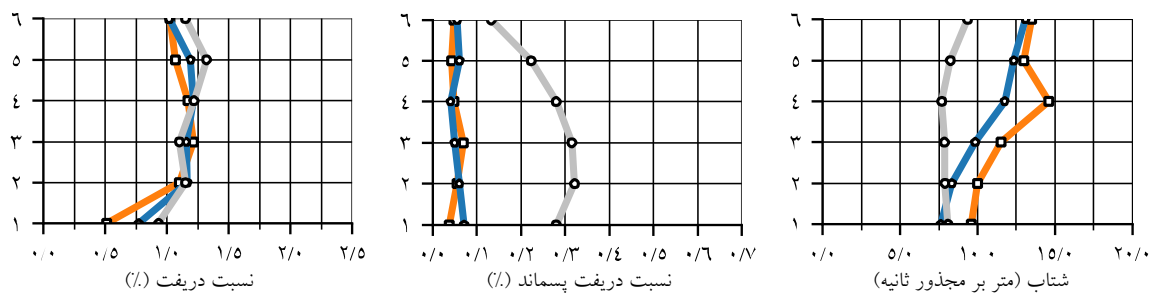
میانگین کل	تمام رکوردهای FEMA P-695 DBE	تمام رکوردهای FEMA P-695 MCE	رکورد طراحی MCE	مقدار	مقایسه (درصد)
+۱۰/۰	+۶/۸	+۱۱/۲	+۱۱/۹	دریفت	میراگر یک سطحی - میراگر دوسطحی مرکزگرا میراگر دوسطحی مرکزگرا
+۳۴۲/۷	+۳۰۶/۳	+۴۳۸/۴	+۲۸۳/۳	دریفت ماندگار	
-۳۲/۷	-۳۳/۰	-۳۱/۹	-۳۳/۱	شتاب	میراگر یک سطحی - میراگر یک سطحی مرکزگرا میراگر دوسطحی مرکزگرا
+۳/۶	+۱/۵	+۴/۸	+۴/۴	دریفت	
+۴۱۶/۳	+۳۳۳/۳	+۵۳۶/۴	+۳۷۹/۲	دریفت ماندگار	



(الف) تحت رکوردهای طراحی در سطح MCE

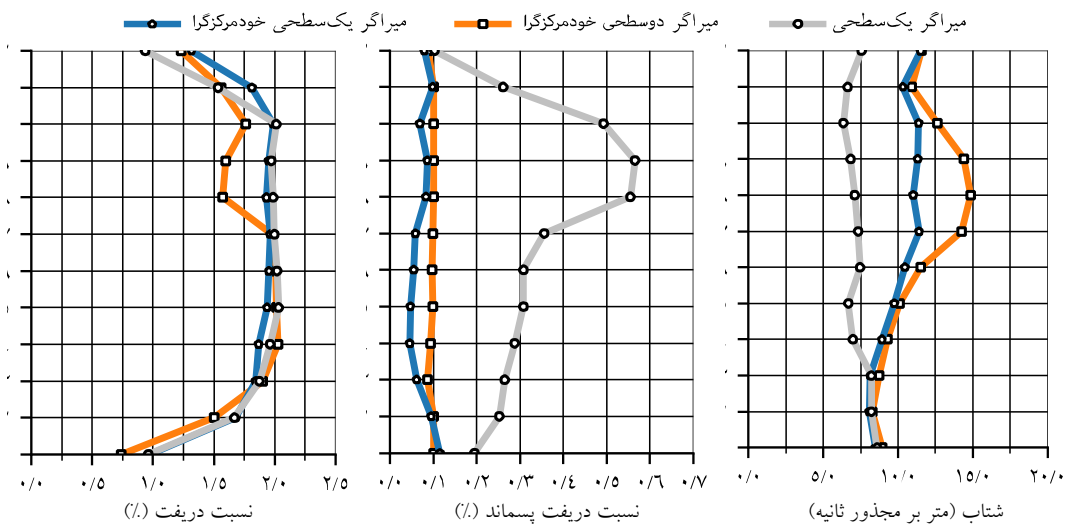


(ب) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح MCE

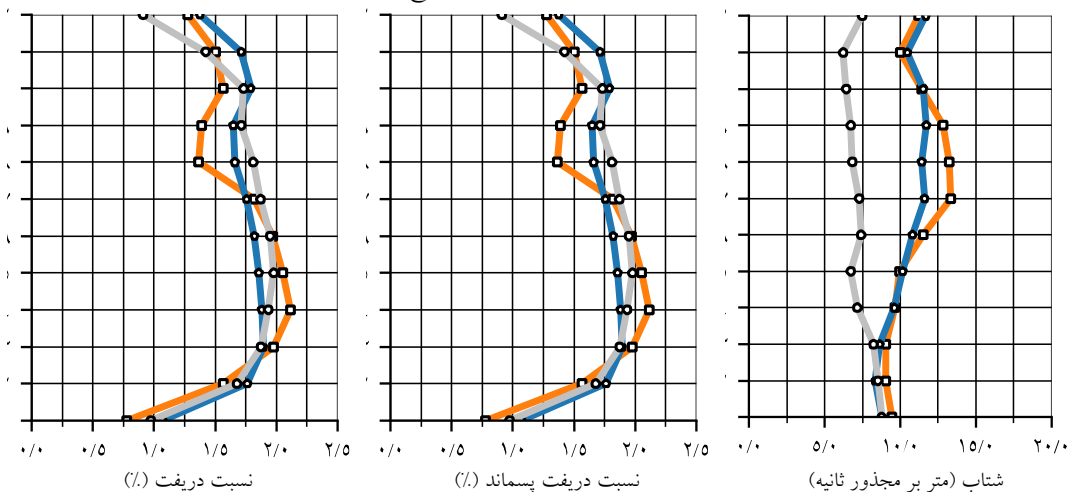


(ج) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح DBE

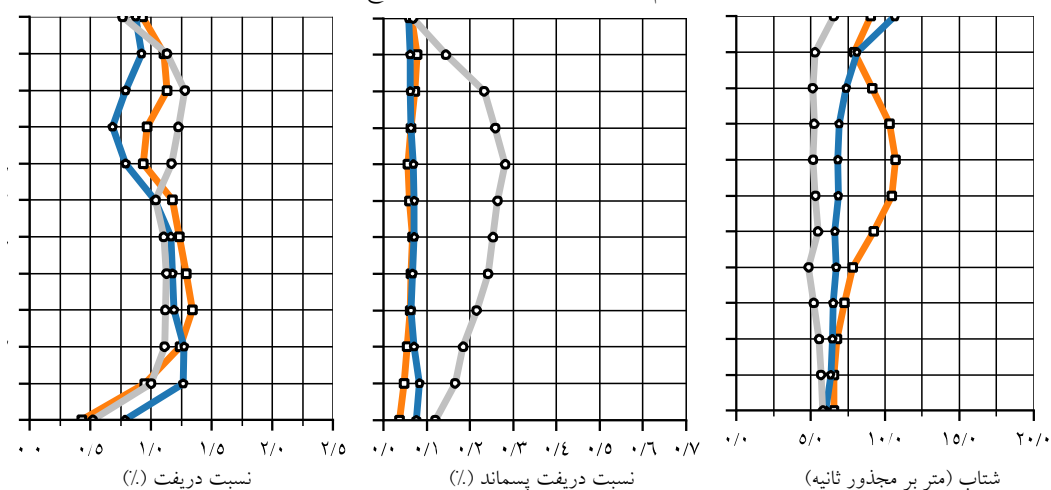
شکل ۹- پاسخ سازه‌های ۶ طبقه



(الف) تحت رکوردهای طراحی در سطح MCE

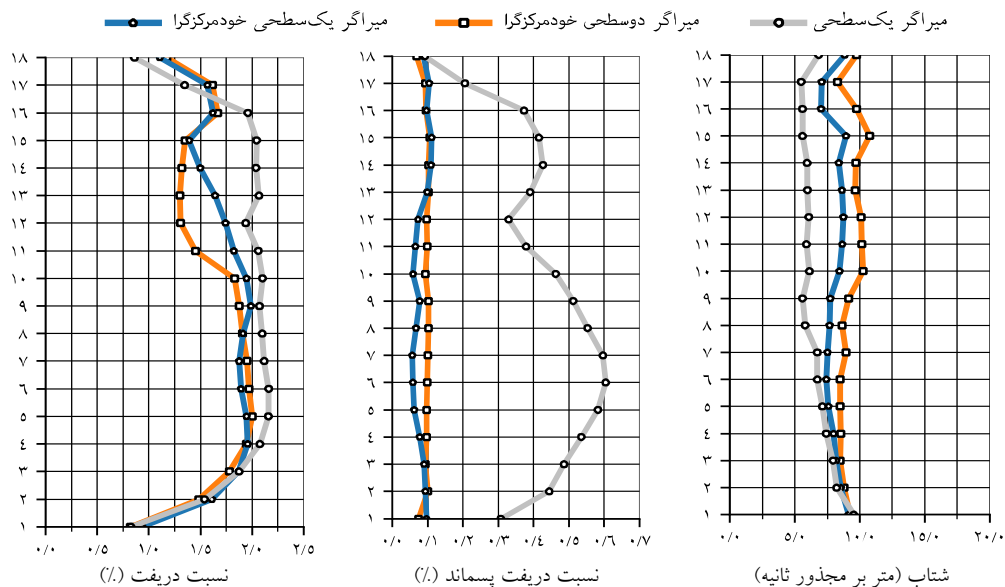


(ب) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح MCE

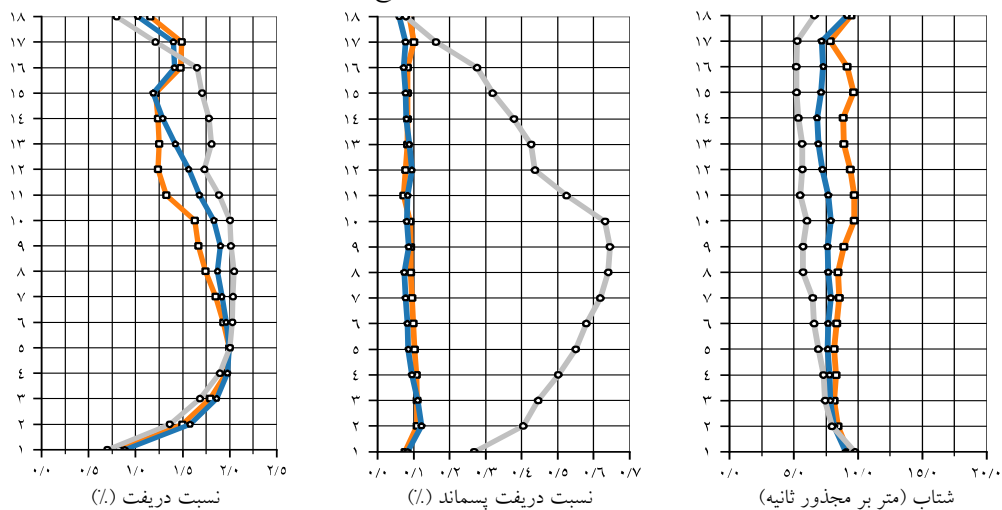


(ج) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح DBE

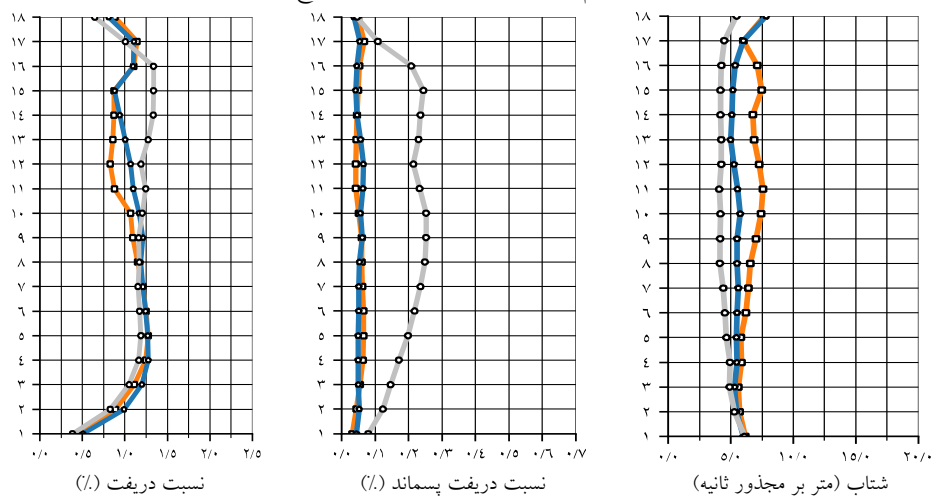
شکل ۱۰- پاسخ سازه‌های ۱۲ طبقه



(الف) تحت رکوردهای طراحی در سطح MCE

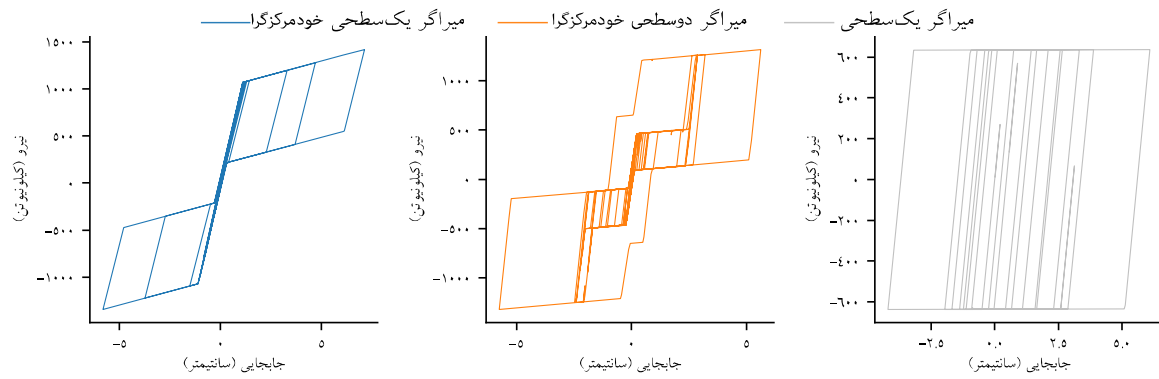


(ب) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح MCE

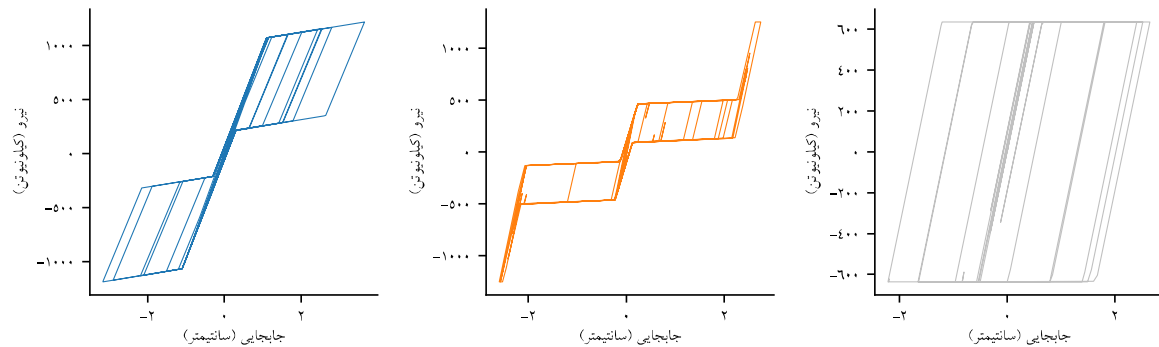


(ج) تحت تمام رکوردهای FEMA P-695 در سطح DBE

شکل ۱۱- پاسخ سازه‌های ۱۸ طبقه

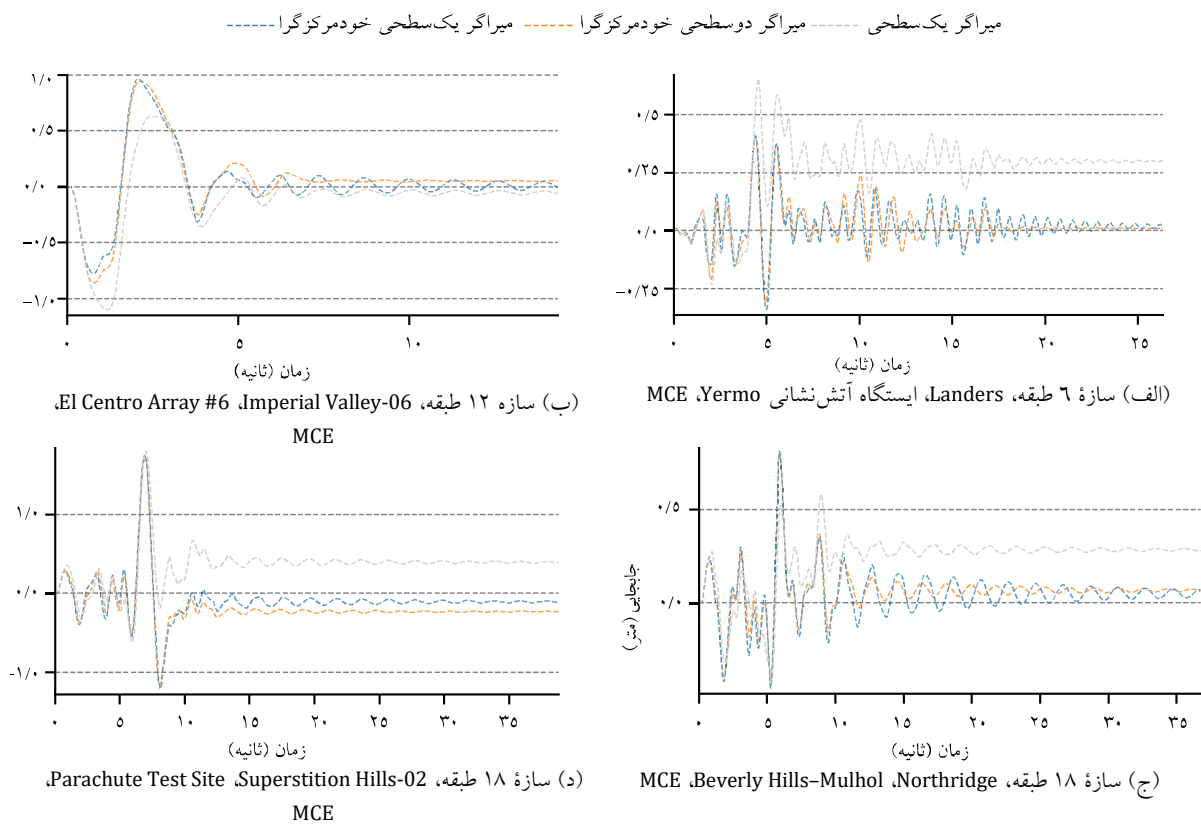


الف) Shin-Osaka, Japan, Kobe، سازه ۱۲ طبقه MCE



ب) Corralitos, Loma Prieta، سازه ۱۲ طبقه MCE

شکل ۱۲- رفتار چرخه‌ای میراگرها



شکل ۱۳- نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام

۵- نتیجه گیری

طراحی‌های لرزه‌ای عملی برای بهبود ایمنی سازه‌ای و حفظ عملکرد سازه پس از زلزله تأکید می‌کند.

در این مطالعه استفاده از قابلیت خودمرکزگرایی برای میراگر اصطکاکی دوسطحی پیشنهاد شد و عملکرد آن با میراگر اصطکاکی یک سطحی بدون خودمرکزگرایی و با خودمرکزگرایی مورد مقایسه قرار گرفت.

۱- تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مقایسه‌ای انجام شده در OpenSeesPy بر روی سازه‌های قاب خمشی فولادی سه بعدی ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه نشان داد که سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی و یا یک سطحی خودمرکزگرا در هر دو سطح خطر DBE و MCE، کاهش چشم‌گیری در دریافت‌های پسماند بین طبقاتی نسبت به سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی یک سطحی بدون خودمرکزگرایی تجربه می‌کنند. اگرچه سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی یک سطحی بدون خودمرکزگرایی ممکن است پاسخ شتاب کمی پایین‌تر نشان دهند (برای میانگین طبقات سازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه تحت رکوردهای طراحی و تمام رکوردهای FEMA P-695 در دو سطح MCE و DBE، ۳۲٪ درصد شتاب کم‌تر نسبت به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا و ۲۲٪ درصد شتاب کم‌تر نسبت به میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا)، اما سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی خودمرکزگرا دارای دریافت پسماند به مراتب کم‌تری هستند (برای میانگین طبقات سازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ طبقه تحت رکوردهای طراحی و تمام رکوردهای FEMA P-695 در دو سطح MCE و DBE، ۳۴٪ درصد دریافت پسماند کم‌تر نسبت به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا و ۴۱٪ درصد دریافت پسماند کم‌تر نسبت به میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا) و همچنین حساسیت کم‌تری نسبت به رکوردهای لرزه‌ای دارند.

۲- سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دوسطحی خودمرکزگرا عملکردی قابل مقایسه با سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی یک سطحی خودمرکزگرا از خود نشان می‌دهند؛ درحالی‌که به تقریباً نیمی از نیروی خودمرکزگرایی نیاز دارند. این ویژگی، میراگر پیشنهادی را برای پیاده‌سازی عملی با استفاده از فنرهای فشاری جهت تأمین قابلیت خودمرکزگرایی مورد نیاز، بسیار مناسب می‌سازد. همچنین تأمین قابلیت خودمرکزگرایی با استفاده مستقیم از کابل‌های پس کشیدگی در سازه را بسیار امکان‌پذیرتر می‌نماید.

۳- به‌طورکلی، میراگرهای اصطکاکی خودمرکزگرا در کنترل دریافت‌های پسماند و ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای، عملکرد بهتری نسبت به میراگرهای اصطکاکی متداول دارند. این یافته‌ها بر اهمیت به‌کارگیری سیستم‌های خودمرکزگرا در

- under Earthquake Excitation", Engineering Structures, 24(3), pp.365-371.
- [15] Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997), "Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering", John Wiley & Sons.
- [16] Pall, A.S., Marsh, C., and Fazio, P. (1980), "Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures", PCI Journal, 25(6), pp.38-61.
- [17] Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., Mokha, A., and Watson, R. (1991), "Displacement Control Device for Base-Isolated Bridges", Earthquake Spectra, 7(2), pp.179-200.
- [18] Aiken, I.D. (1990), "Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems for Multistory Structures", Berkeley, CA: University of California, Berkeley.
- [19] Fitzgerald, T.F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T. (1989), "Slotted Bolted Connections in Aseismic Design for Concentrically Braced Connections", Earthquake Spectra, 5(2), pp.383-391.
- [20] Nims, D.K., Richter, P.J., and Bachman, R.E. (1993), "The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation", Earthquake Spectra, 9(3), pp.467-489.
- [21] Filiatrault, A., and Cherry, S. (1990), "Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures", Journal of Structural Engineering, 116(5), pp.1334-1355.
- [22] Colajanni, P., and Papia, M. (1997), "Hysteretic Behavior Characterization of Friction-Damped Braced Frames", Journal of Structural Engineering, 123(8), pp.1020-1028.
- [23] Grigorian, C.E., Yang, T.S., and Popov, E.P. (1993), "Slotted Bolted Connection Energy Dissipators", Earthquake Spectra, 9(3), pp.491-504.
- [24] Mualla, I.H. (2000), "Experimental Evaluation of New Friction Damper Device", in Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- [25] Sano, T., Shirai, K., Suzui, Y., and Utsumi, Y. (2019), "Loading Tests of a Brace-Type Multi-Unit Friction Damper Using Coned Disc Springs and Numerical Assessment of Its Seismic Response Control Effects", Bulletin of Earthquake Engineering, 17(9), pp.5365-5391.
- [26] Jarrahi, H., Asadi, A., Khatibinia, M., and Etedali, S. (2020), "Optimal Design of Rotational Friction Dampers for Improving Seismic Performance of Inelastic Structures", Journal of Building Engineering, 27, pp.100960.
- [27] Kim, J., and An, S. (2017), "Optimal Distribution of Friction Dampers for Seismic Retrofit of a Reinforced Concrete Moment Frame", Advances in Structural Engineering, 20(10), pp.1523-1539.
- [28] Shirkhani, A., Azar, B.F., and Basim, M.C. (2021), "Seismic Loss Assessment of Steel Structures Equipped with Rotational Friction Dampers
- [1] Paulay, T., and Priestley, M.N. (1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", 768, New York: Wiley.
- [2] Calvi, G.M., Priestley, M.J.N., and Kowalsky, M.J. (2007), "Displacement-Based Seismic Design of Structures", in New Zealand Conference on Earthquake Engineering. Pavia: IUSS Press.
- [3] Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.J., and Lacerte, M. (2008), "Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation", Journal of Structural Engineering, 134(1), pp.96-107.
- [4] Kelly, J.M. (1993), "Earthquake-Resistant Design with Rubber", London: Springer-Verlag.
- [5] Kelly, J.M., and Naeim, F. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", Chichester: John Wiley & Sons.
- [6] Constantinou, M.C., Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1998), "Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [7] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and McNamara, R.J. (2008), "Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments", Journal of Structural Engineering, 134(1), pp.3-21.
- [8] Christopoulos, C., and Filiatrault, A. (2006), "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation", IUSS Press, Pavia, Italy.
- [9] Spencer Jr, B.F., and Nagarajaiah, S. (2003), "State of the Art of Structural Control", Journal of Structural Engineering, 129(7), pp.845-856.
- [10] Saeed, T.E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.E., and Hedlund, H. (2015), "A State-of-the-Art Review of Structural Control Systems", Journal of Vibration & Control, 21(5), pp.919-937.
- [11] Constantinou, M.C., Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1998), "Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit", Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [12] Jarrahi, H., Asadi, A., Khatibinia, M., Etedali, S., and Samadi, A. (2020), "Simultaneous Optimization of Placement and Parameters of Rotational Friction Dampers for Seismic-Excited Steel Moment-Resisting Frames", Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 136, pp.106193.
- [13] Castaldo, P. (2014), "Integrated Seismic Design of Structure and Control Systems", Cham: Springer International Publishing.
- [14] Mualla, I.H., and Belev, B. (2002), "Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device

- Level Friction Damping System", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(11), pp.3565–3587.
- [41] Yang, Y., Xue, J., and Liu, R. (2024), "Experimental and Numerical Study on Hysteresis Behaviour of a Novel Dual-Stage Friction Damper", *Structures*, 70, pp.107911.
- [42] Huang, Z., Huang, W., Zhang, C., Yu, T., Lin, Z., Lie, W., and Zhao, F. (2024), "Design and Experiment of an Innovative Rotational Two-Level Friction Damper", *Engineering Structures*, 308, pp.118030.
- [43] Ghorbani, H.R., and Rofooei, F.R. (2020), "A Novel Double Slip Loads Friction Damper to Control the Seismic Response of Structures", *Engineering Structures*, 225, pp.111273.
- [44] Hashemi, A., Zarnani, P., Masoudnia, R., and Quenneville, P. (2017), "Seismic Resistant Rocking Coupled Walls with Innovative Resilient Slip Friction (RSF) Joints", *Journal of Constructional Steel Research*, 129, pp.215–226.
- [45] Qiu, C., Yang, Y., Liu, J., and Jiang, T. (2023), "Test of a Novel Self-Centering Brace Using SMA Slip Friction Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, 204, pp.107872.
- [46] Yang, Y., Xue, J., Luo, Z., and Liu, R. (2025), "Experimental and Numerical Investigation on a Novel Dual-Stage Friction Self-Centering Damper", *Engineering Structures*, 326, pp.119606.
- [47] Wang, W., Fang, C., Shen, D., Zhang, R., Ding, J., and Wu, H. (2021), "Performance Assessment of Disc Spring-Based Self-Centering Braces for Seismic Hazard Mitigation", *Engineering Structures*, 242, pp.112527.
- [48] Zhang, Y., De Risi, R., and Alexander, N.A. (2021), "A Frictional Sliding on a Sprung Slope (FSSS) Device That Axiomatically Confers Energy Dissipation with Re-Centring to Post-Tensioned (PT) Frames: A Conceptual Study", *Engineering Structures*, 244, pp.112794.
- [49] Nobahar, E., Asgarian, B., and Mercan, O. (2021), "Development And Experimental Investigation Of A Post-Tensioned Self-Centering Yielding Brace System", *Engineering Structures*, 241, pp.112440.
- [50] Chou, C.C., Chung, P.T., and Cheng, Y.T. (2016), "Experimental Evaluation Of Large-Scale Dual-Core Self-Centering Braces And Sandwiched Buckling-Restrained Braces", *Engineering Structures*, 116, pp.12-25.
- [51] Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.J., and Lacerte, M. (2008), "Self-Centering Energy Dissipative Bracing System For The Seismic Resistance Of Structures: Development And Validation", *Journal of Structural Engineering*, 134(1), pp.96-107.
- [52] Xie, Q., Zhou, Z., and Meng, S.P. (2020), "Experimental Investigation Of The Hysteretic Performance Of Self-Centering Buckling-Restrained Braces With Friction Fuses", *Engineering Structures*, 203, pp.109865.
- Subjected to Intensifying Dynamic Excitations", *Engineering Structures*, 238, pp.112233.
- [29] Shirkhani, A., Mualla, I.H., Shabakhty, N., and Mousavi, S.R. (2015), "Behavior of Steel Frames with Rotational Friction Dampers by Endurance Time Method", *Journal of Constructional Steel Research*, 107, pp.211–222.
- [30] Moghaddam, H., Afzalnia, F., and Hajirasouliha, I. (2022), "Optimal Distribution of Friction Dampers to Improve the Seismic Performance of Steel Moment-Resisting Frames", *Structures*, 37, pp.624–644.
- [31] Jarrahi, H., Asadi, A., Khatibinia, M., Etedali, S., and Paknehad, S. (2022), "Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Performance of Steel Moment-Resisting Frames Equipped with Optimal Rotational Friction Dampers", *Structures*, 43, pp.449–464.
- [32] Kiadardbandsari, S., Nezamabadi, M.F., Abbasi, H., and Vayeghan, F.Y. (2022), "Analytical and Experimental Investigation of Steel Friction Dampers and Horizontal Brake Pads in Chevron Frames under Cyclic Loads", *Structures*, 40, pp.256–272.
- [33] Shirai, K., Sano, T., and Suzui, Y. (2013), "Development of a Passive Variable Friction Damper with Displacement-Dependent Damping Force Characteristics", in *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-13)*, pp.A-1.
- [34] Shirai, K., Sano, T., and Suzui, Y. (2022), "Energy Response of a Passive Variable Friction Damper and Numerical Simulation on the Control Effects for High-Rise Buildings", *Structural Control & Health Monitoring*, 29(12), pp.e3124.
- [35] Downey, A., Theisen, C., Murphy, H., Anastasi, N., and Laflamme, S. (2019), "Cam-Based Passive Variable Friction Device for Structural Control", *Engineering Structures*, 188, pp.430–439.
- [36] Avestaeifar, P., and Khezzadeh, H. (2021), "Experimental and Numerical Assessment of Piston Hybrid Frictional Metallic Damper (PHFMD)", *Engineering Structures*, 243, pp.112669.
- [37] Lee, C.H., Kim, J., Kim, D.H., Ryu, J., and Ju, Y.K. (2016), "Numerical and Experimental Analysis of Combined Behavior of Shear-Type Friction Damper and Non-Uniform Strip Damper for Multi-Level Seismic Protection", *Engineering Structures*, 114, pp.75–92.
- [38] Sun, T., Liu, Y., Dai, K., Camara, A., Lu, Y., and Wang, L. (2024), "Experimental and Analytical Studies on a Novel Double-Stage Coupling Damper", *Thin-Walled Structures*, 195, pp.111324.
- [39] Golmoghany, M.Z., and Zahrai, S.M. (2021), "Improving Seismic Behavior Using a Hybrid Control System of Friction Damper and Vertical Shear Panel in Series", *Structures*, 31, pp.369–379.
- [40] Chien, C.S.C., and Guo, M.T. (2024), "Theoretical Analysis and Experimental Validation of Multi-

- [53] Qiu, C., Liu, J., Teng, J., Li, Z., and Du, X. (2021), "Seismic Performance Evaluation Of Multi-Story CBFs Equipped With SMA-Friction Damping Braces", *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 32(15), pp.1725-1743.
- [54] Wang, Y., Zhou, Z., Xie, Q., and Huang, L. (2020), "Theoretical Analysis And Experimental Investigation Of Hysteretic Performance Of Self-Centering Variable Friction Damper Braces", *Engineering Structures*, 217, pp.110779.
- [55] Zareian, M.S., Esfahani, M.R., and Hosseini, A. (2020), "Experimental Evaluation Of Self-Centering Hybrid Coupled Wall Subassemblies With Friction Dampers", *Engineering Structures*, 214, pp.110644.
- [56] Yang, Y., Xue, J., Luo, Z., and Liu, R. (2025), "Experimental And Numerical Investigation On A Novel Dual-Stage Friction Self-Centering Damper", *Engineering Structures*, 326, pp.119606.
- [57] Chien, C.S., and Guo, M.T. (2024), "Theoretical Analysis And Experimental Validation Of Multi-Level Friction Damping System", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(11), pp.3565-3587.
- [58] Zhu, M., McKenna, F., and Scott, M.H. (2018), "OpenSeesPy: Python Library For The OpenSees Finite Element Framework", *SoftwareX*, 7, pp.6-11.
- [59] American Society of Civil Engineers (2022), "Minimum Design Loads And Associated Criteria For Buildings And Other Structures (ASCE/SEI 7-22)", ASCE, Reston, VA.
- [60] Federal Emergency Management Agency (2009), "Quantification Of Building Seismic Performance Factors", FEMA P695, Washington, D.C.
- [61] American Institute of Steel Construction (2022), "Specification For Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22)", Chicago, IL.