

## تحلیل مقایسه‌ای جانمایی‌های مختلف میراگرهای TADAS در ساختمان فولادی ۵ طبقه

حسین احمدوند<sup>۱</sup>، سید مهدی زهرائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> ایران، تهران، میدان انقلاب-خیابان ۱۶ آذر، دانشگاه تهران، دانشکده عمران، ۱۴۱۷۹۵۳۱۱۱، دانشجوی سازه

<sup>۲</sup> ایران، تهران، میدان انقلاب-خیابان ۱۶ آذر، دانشگاه تهران، دانشکده عمران، ۱۴۱۷۹۵۳۱۱۱، استاد

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mzahrai@ut.ac.ir](mailto:mzahrai@ut.ac.ir)

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از میراگرهای هیستریزیس، به ویژه میراگرهای TADAS، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود رفتار لرزهای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی و مقایسه تأثیر جانمایی‌های مختلف میراگرهای TADAS بر کاهش تغییرمکان نسبی طبقات و افزایش میزان انرژی مستهلک‌شده در یک ساختمان فولادی پنج طبقه با سیستم قاب خمشی است. در این پژوهش، ابتدا مدل‌سازی عددی سازه بدون میراگر در نرم‌افزار SAP2000 انجام شد و سپس با اعمال میراگرهای TADAS در موقعیت‌های متفاوت قاب‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای زلزله منتخب صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میراگر TADAS موجب کاهش قابل توجه تغییرمکان نسبی طبقات و افزایش سختی مؤثر سازه می‌شود؛ به طوری که در برخی حالت‌ها، تغییرمکان در بام تا ۳۸٪ و در سایر طبقات تا ۲۳٪ کاهش یافته است. همچنین میزان انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر در مقایسه با حالت بدون میراگر افزایش چشمگیری دارد (حدود ۴۰٪)، که نشان‌دهنده بهبود عملکرد لرزهای سازه است. این تحقیق بیان می‌کند که مکان قرارگیری میراگرها نقش مهمی در عملکرد سازه در برابر نیروهای زلزله دارد و مقایسه حالات مختلف جانمایی می‌تواند راهنمایی مؤثر برای طراحی سازه‌های مقاوم‌تر باشد.

**کلمات کلیدی:** میراگرهای هیستریزیس؛ میراگرهای TADAS؛ کنترل ارتعاشات؛ جانمایی میراگر.

### ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در مهندسی سازه، بهبود عملکرد لرزهای ساختمان‌ها در برابر زلزله و کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از آن است. تجربه زلزله‌های اخیر در کشورهای مختلف نشان داده است که سیستم‌های باربر جانبی متداول، نظیر قاب‌های

خمشی و دیوارهای برشی، به‌تنهایی پاسخگوی نیازهای لرزه‌ای سازه‌های امروزی نیستند و در بسیاری موارد دچار آسیب‌های شدید می‌شوند. در این راستا، استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال لرزه‌ای نظیر میراگرها به‌عنوان یک روش مقرون‌به‌صرفه و مؤثر برای افزایش مقاومت و پایداری سازه‌ها در برابر زلزله مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در میان انواع میراگرهای غیرفعال، میراگرهای هیستریزیس به دلیل سادگی در ساخت، هزینه پایین، قابلیت نصب در سازه‌های جدید و موجود و کارایی بالا در جذب انرژی زلزله، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. میراگرهای مثلثی فولادی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین انواع میراگرهای هیستریزیس مطرح هستند. عملکرد این میراگر بر پایه تغییرشکل‌های غیرارتجاعی فولاد و ایجاد منحنی هیستریزیس پایدار است که منجر به جذب و اتلاف انرژی ورودی ناشی از زلزله می‌شود.

پژوهش‌های متعددی طی دهه‌های اخیر بر روی عملکرد و کارایی میراگرهای هیستریزیس و به‌ویژه میراگرهای TADAS انجام شده است. نخستین بار کلی و اسکینر (Kelly and Skinner, 1972) مفهوم میراگرهای فولادی را به‌عنوان ابزار جذب انرژی در سازه‌ها معرفی کردند. در ادامه، برگمن و هانسن (Bergman and Hansen, 1990) نشان دادند که میراگرهای فولادی با ایجاد حلقه‌های هیستریزیس پایدار قادر به اتلاف انرژی قابل توجهی هستند.

ویتکر و همکاران (Whittaker et al., 1991) استفاده از میراگرهای TADAS را در ساختمان‌های فولادی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این میراگرها علاوه بر کاهش تغییرمکان نسبی طبقات، موجب افزایش شکل‌پذیری و کاهش آسیب‌پذیری اعضای سازه‌ای می‌شوند. در پژوهشی چان و آلبرمانی (Chan and Albermani, 2008) با تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که جانمایی مناسب میراگرهای TADAS در قاب‌ها می‌تواند کارایی لرزه‌ای سازه را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. هوجاره و ساحاسرابوده (Hujare and Sahasrabudhe, 2014) عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی مجهز به میراگر TADAS را با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بررسی کردند و دریافتند که استفاده از این میراگرها موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیروهای داخلی اعضای سازه می‌شود. در پژوهشی دیگر، شوستری و مرتضایی (Shooshtari and Mortezaei, 2017) اثر جانمایی میراگرهای هیستریزیس را در ساختمان‌های نامنظم بررسی کردند و نشان دادند که انتخاب موقعیت نامناسب میراگر می‌تواند حتی موجب تشدید پاسخ لرزه‌ای در برخی طبقات شود. لی و همکاران (Li et al., 2023) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، بهترین محل نصب میراگرهای TADAS در سازه‌های چندطبقه را تعیین کردند.

به‌طور کلی، مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی در زمینه عملکرد میراگرهای TADAS انجام شده است، اما موضوع مقایسه جانمایی‌های مختلف میراگرها در سازه‌های مسکونی متوسط مرتبه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر یک ساختمان پنج‌طبقه فولادی و بررسی موقعیت‌های متفاوت نصب میراگر TADAS، سعی در ارائه نتایج کاربردی برای طراحی و اجرای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله دارد.

## ۲- مدل‌سازی مسئله

به‌منظور کاهش تأثیر سلیقه و بینش طراح، تمام قاب‌های سازه‌ای با فرضیات، بارگذاری‌ها و روش طراحی یکسان و مطابق ضوابط استاندارد آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند. بنابراین نتایج حاصل از مقایسه حالت‌های مختلف جانمایی میراگر TADAS، وابستگی معناداری به شخص طراح نخواهد داشت و قابل استناد و تکرارپذیر هستند. برای انجام این پژوهش، یک ساختمان فولادی پنج‌طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شد تا رفتار سازه تحت اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای و در حضور میراگرهای TADAS مورد بررسی قرار گیرد؛ این ساختمان دارای پنج طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳.۵ متر و عرض هر دهانه ۵ متر است، سیستم باربر جانبی آن قاب خمشی فولادی می‌باشد، مقطع تیرها IPE300 و مقطع ستون‌ها IPB300 در نظر گرفته شده، میرایی سازه ۳ درصد و تنش تسلیم فولاد سازه‌ای ۲۴۰ مگاپاسکال است، زلزله طرح نیز زلزله طبعی انتخاب شده و برای اعمال بارگذاری ثقلی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار مرده ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر لحاظ شده است.

## ۱-۲ طراحی میراگر Tadas

ابتدا سختی جانبی هر طبقه سازه بدون میراگر و مهاربند محاسبه شد. این سختی از روابط استاندارد مربوط به قاب خمشی فولادی استخراج می‌شود و نشان‌دهنده مقاومت طبقه در برابر تغییرمکان‌های جانبی ناشی از بارگذاری لرزه‌ای است. مقادیر سختی هر طبقه بر اساس مقاطع تیر و ستون، طول دهانه و ارتفاع طبقه به دست آمده و به عنوان پایه‌ای برای افزودن عناصر کنترلی بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

در گام بعد، سختی جانبی مهاربندهای فولادی با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$K_b = \frac{EA_s}{L_b} \quad (1)$$

که در آن  $K_b$  سختی مهاربند،  $A_s$  سطح مقطع مهاربند،  $E$  مدول ارتجاعی فولاد و  $L_b$  طول مهاربند است. پس از محاسبه سختی مهاربندها، به کمک روابط زیر، سختی میراگرهای TADAS محاسبه می‌شود.

$$K_a = SR \times K_f \quad (2)$$

$$K_d = \frac{K_a \times K_b}{K_b - K_a} \quad (3)$$

که در آن  $K_d$  سختی میراگر،  $SR$  نسبت سختی ترکیبی مهاربند و میراگر به سختی طبقه،  $K_f$  سختی طبقه و  $K_a$  سختی ترکیبی مهاربند و میراگر است.

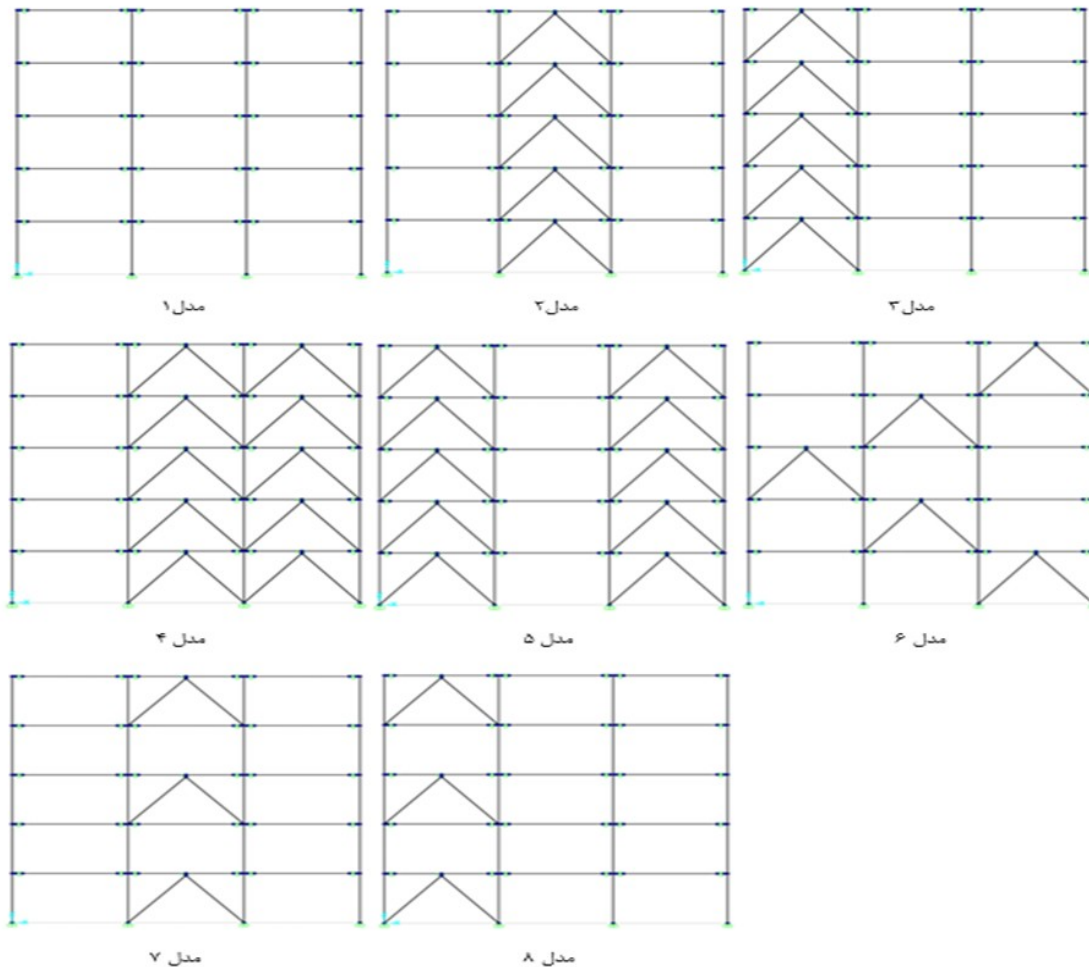
پس از محاسبه سختی مؤثر طبقات و تعیین سختی مهاربند و میراگر، به کمک رابطه زیر، میراگرهای TADAS بر اساس مقادیر سختی به دست آمده طراحی می‌شوند تا ظرفیت تسلیم و شکل هندسی صفحات تسلیم‌کننده متناسب با نیاز هر طبقه تعیین گردد.

$$K_d = \frac{NEBt^3}{6H^3} \quad (4)$$

که در آن  $N$  تعداد ورق‌ها،  $E$  مدول ارتجاعی فولاد،  $B$  عرض ورق،  $H$  ارتفاع ورق و  $t$  ضخامت ورق است. پس از طراحی میراگرهای TADAS و تعیین مشخصات هندسی و مکانیکی آن‌ها بر اساس روابط تحلیلی، مدل‌سازی عددی سازه مجهز به میراگرها در نرم‌افزار SAP2000 انجام می‌گیرد. در این مرحله، میراگرهای طراحی شده در محل‌های از پیش تعیین شده در قاب‌های خمشی جانمایی شده و خواص سختی و ظرفیت تسلیم آن‌ها مطابق مقادیر محاسبه شده به مدل اختصاص داده می‌شود. پس از تکمیل مدل‌سازی، تحلیل دینامیکی سازه تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای صورت می‌گیرد و خروجی‌هایی نظیر تغییرمکان نسبی طبقات، شتاب نسبی طبقات، و میزان انرژی مستهلک شده توسط میراگرها استخراج و مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

## ۲-۲ حالات جانمایی

برای بررسی تأثیر موقعیت نصب میراگرهای TADAS بر رفتار لرزه‌ای سازه، چندین حالت مختلف جانمایی در قاب‌های خمشی ساختمان مورد مطالعه قرار گرفت. در هر حالت، تعداد و محل نصب میراگرها به گونه‌ای انتخاب شد که تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های دینامیکی سازه به صورت مقایسه‌ای ارزیابی شود. برای هر یک از این حالات، مدل‌سازی جداگانه در نرم‌افزار SAP2000 انجام شده و تحلیل تاریخیچه زمانی تحت رکورد زلزله منتخب صورت گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، مبنای مقایسه تغییرمکان نسبی طبقات، برش پایه و میزان انرژی مستهلک شده در حالات مختلف قرار گرفته است.



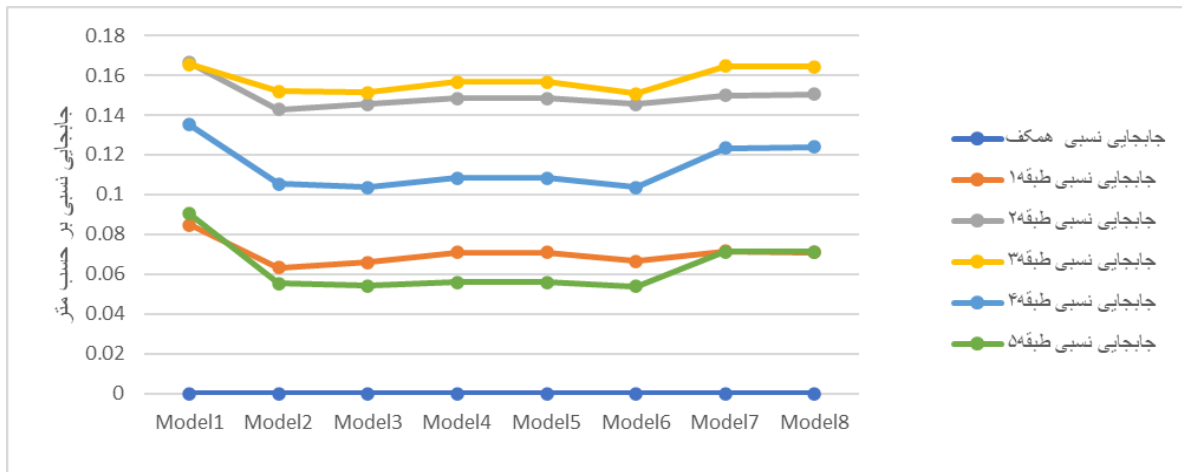
شکل ۱. حالات مختلف جانمایی میراگرهای TADAS.

### ۳- خروجی‌های تحقیق و تحلیل نتایج

پس از انجام مدل‌سازی عددی ساختمان فولادی پنج‌طبقه در حالات مختلف جانمایی میراگرهای TADAS و اجرای تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت رکورد زلزله منتخب، نتایج حاصل از تحلیل‌ها استخراج و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. این مقایسه‌ها امکان تحلیل کمی و کیفی عملکرد میراگرهای TADAS را در موقعیت‌های مختلف فراهم ساخته و معیار مناسبی برای تعیین کارآمدترین الگوی توزیع آن‌ها در سازه ارائه می‌دهد. در ادامه، هر یک از خروجی‌های اصلی پژوهش به تفکیک مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرند:

#### ۱-۳ تحلیل تغییر مکان نسبی طبقات

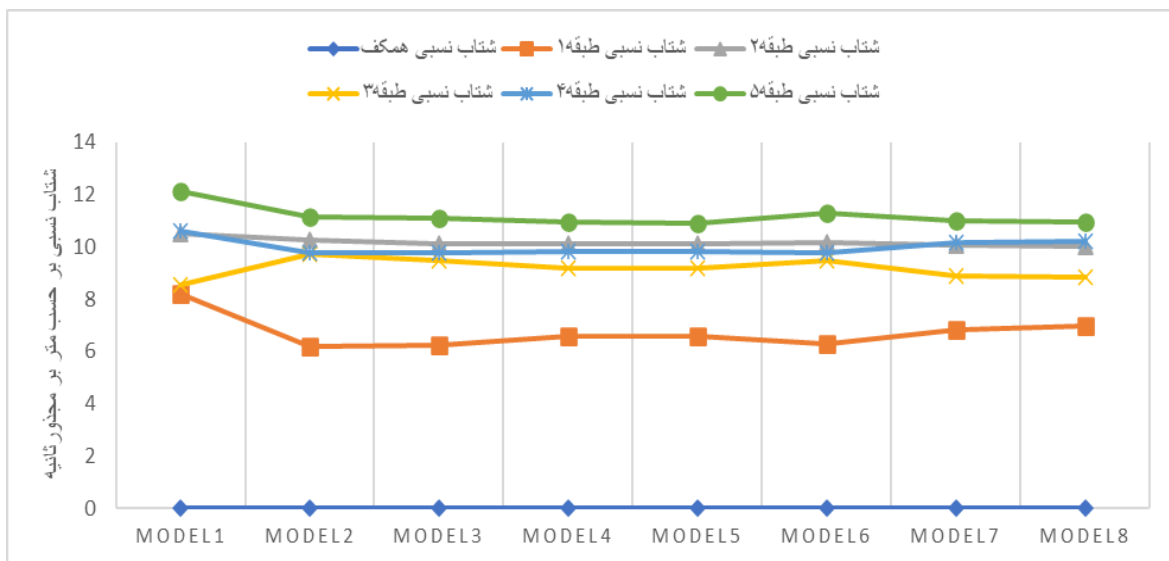
نتایج تحلیل نشان داد که نصب میراگرهای TADAS تأثیر قابل توجهی در کاهش تغییر مکان نسبی بین طبقات دارد. بیشترین کاهش مربوط به حالتی است که میراگرها در قاب میانی جایگذاری شده‌اند (۲۲٪ در طبقات و ۳۸٪ در بام). مشاهده می‌شود سناریوهایی که میراگرها به صورت متقارن در قاب‌های میانی و کناری نصب شدند، عملکرد بهینه در کاهش دررفت طبقات را نشان دادند. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی جانمایی صحیح میراگرها در افزایش پایداری سازه و کاهش آسیب‌های احتمالی سازه‌ای و غیرسازه‌ای است.



شکل ۲. نمودار جابجایی نسبی طبقات در مدل های مختلف.

### ۲-۳ تحلیل شتاب نسبی طبقات

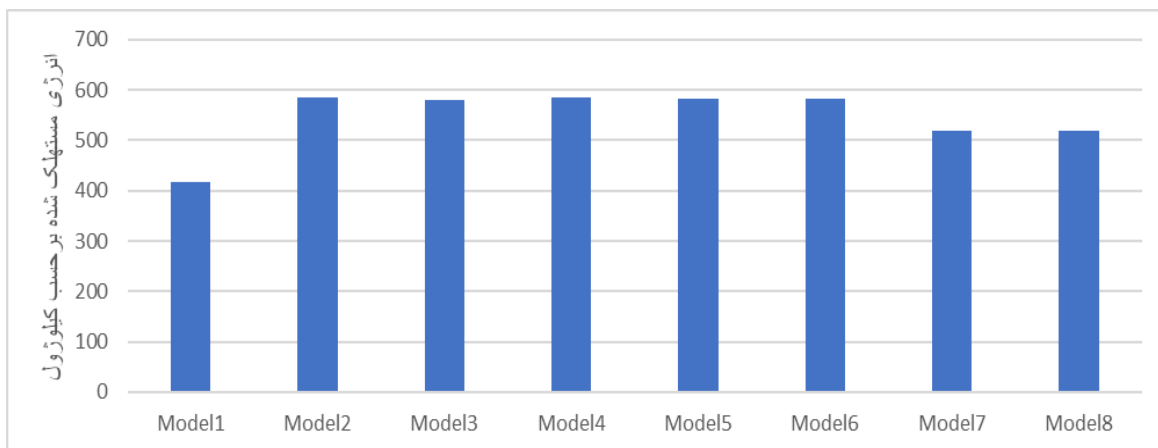
نتایج شتاب طبقات بیانگر کاهش قابل توجه (۱۰٪) شتاب‌های پیک با نصب میراگر است. این کاهش بیانگر کاهش نیروهای وارده بر اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات طبقات و افزایش راحتی ساکنین می‌باشد. همچنین مشاهده شد که کاهش شتاب در طبقات میانی و پایینی به اندازه طبقات فوقانی محسوس نیست، که نشان می‌دهد میراگرها بیشتر انرژی ورودی را در بخش بالایی سازه جذب می‌کنند.



شکل ۳. نمودار شتاب نسبی طبقات در مدل های مختلف .

### ۳-۳ تحلیل انرژی مستهلک شده

انرژی مستهلک‌شده توسط میراگرها به‌عنوان شاخصی از کارایی آن‌ها در کنترل لرزه‌ای سازه محاسبه شد. در حالت بدون میراگر، انرژی اتلاف‌شده بسیار ناچیز بود. با نصب میراگرها در سناریوهای مختلف، میزان انرژی مستهلک‌شده به اندازه ۴۰٪ افزایش یافت. توزیع نامناسب در برخی مدل‌ها (مدل ۷ و ۸) باعث شده که میراگرها کمتر وارد ناحیه غیرالاستیک بشوند و در نتیجه انرژی کمتری جذب کردند. این نتایج نشان می‌دهد که میراگرهای TADAS به‌طور مؤثر انرژی ورودی ناشی از زلزله را جذب و تبدیل به کار حرارتی می‌کنند، در نتیجه بارهای داخلی و تغییر مکان سازه کاهش می‌یابد.



شکل ۴. نمودار انرژی مستهلک شده.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر جانمایی میراگرهای TADAS در یک ساختمان فولادی پنج طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری اصلی مطالعه بر تمرکز بر ساختمان‌های مسکونی با ارتفاع متوسط و تحلیل حالات مختلف جانمایی میراگرها است، که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد که استفاده از میراگرهای TADAS موجب بهبود قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای سازه، از جمله کاهش تغییرمکان نسبی و شتاب طبقات و افزایش انرژی مستهلک شده، می‌شود. مقایسه حالات مختلف جانمایی نشان داد که نحوه توزیع و موقعیت نصب میراگرها تأثیر مستقیمی بر عملکرد لرزه‌ای سازه دارد و این اثر تحت تأثیر تعداد طبقات نیز قرار می‌گیرد؛ به طوری که در سازه‌های متوسط ارتفاع، انتخاب موقعیت میراگر در طبقات میانی و بالایی بیشترین کاهش در تغییرمکان و شتاب را ایجاد می‌کند و در ساختمان‌های بلندتر ممکن است توزیع متفاوتی از میراگرها برای دستیابی به عملکرد مشابه نیاز باشد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در زمینه میراگرهای هیستریزیس همخوانی داشته و اهمیت توجه به جانمایی مؤثر میراگرها با توجه به ویژگی‌های ارتفاعی سازه را در طراحی ساختمان‌های مقاوم برجسته می‌کند.

#### مراجع

1. Kelly, J. M., & Skinner, R. I. (1972). The role of passive energy dissipation in seismic response control. *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, 1, 1–12.
2. Bergman, D. M., & Hanson, R. D. (1990). Viscoelastic mechanical damping devices tested at real earthquake displacements. *Earthquake Spectra*, 9(3), 389–417.
3. Whittaker AS, Bertero VV, Alonso LJ, Thompson CL. Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. *Earthquake Spectra*. 1991;7(4):563–604.
4. Chan RWK, Albermani F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Eng Struct*. 2008;30(4):1058-1066.
5. Hujare P, Sahasrabudhe A. Effect of thickness of damping material on vibration control of structural vibration in constrained layer damping treatment. *Appl Mech Mater*. 2014;592-594:2031-2035.

6. Shooshtari M, Mortezaie H. Effect of using linear multiple tuned mass dampers on concrete structures with hysteresis behavior. *J Vibroeng.* 2017;19(2):1158–1172.
7. Li Z, Wang J, Li C, Cao J. Optimum arrangement of TADAS dampers for seismic drift control of buildings using accelerated iterative methods. *Buildings.* 2023;13(11):2720.
8. وزارت راه و شهرسازی. مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان‌ها. ویرایش چهارم. تهران: دفتر مقررات ملی ساختمان؛ ۱۳۹۸.
9. Tsai, K. C., & Goel, S. C. (1993). Evaluation of cyclic testing of steel plate devices for added damping and stiffness. Report No. UMCE87-10, University of Michigan, MI, USA.
10. Karami Mohammadi, R., Nasri, A., & Ghaffary, A. (2017). TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 515–524.
11. Saiedi, A. (2021). A review of triangle yielding metal dampers (TADAS) in seismic design and retrofitting. *PACE International Journal of Engineering*, 3(1), 1–10.
12. Li, J., & Wang, Z. (2017). Seismic performance assessment of multi-story buildings with TADAS semi-active dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(9), 1453–1470.
13. Zhang, X., Li, H., & Wang, Y. (2015). Optimal placement of semi-active dampers in multi-story buildings under seismic excitations. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(11), 1290-1313.