

## Rotational Friction Dampers in Industrial Structures

Danial Dehshiri<sup>1</sup>, Amir mohammad Rezaie Sadrabadi<sup>2</sup>, Hamed Tajammolian<sup>3\*</sup>, Mehdi Yazdian<sup>4</sup>

1- MSc, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- MSc, Department of Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

4- Assistant Professor, Department of Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran

### ABSTRACT

In recent decades, one of the main topics of research in the field of structural engineering has been the introduction of various solutions to reduce the response of the structures against dynamic forces. For this purpose, the use of dampers is one of the methods of reducing earthquake excitation, controlling vibrations and energy loss on the structure, by increasing its stiffness, resistance and capacity. The use of these devices in the design of new buildings as well as the retrofitting of the existing ones is easily possible. Rotational friction dampers are an example of cost-effective, practical and effective control tools that absorb earthquake energy by sliding motions with stable hysteretic and non-linear behavior. In this research, due to the importance of this issue, industrial structures such as shelters have been investigated with and without dampers and the effect of dampers on various responses of the structure has been investigated. In this regard, three models with different specifications have been used. In order to investigate the discussed structures, the characteristics of seven pairs of far-field earthquake records introduced in the FEMA-P695 have been used, which were investigated with the help of nonlinear time history analysis. The results of the present research show that rotational friction dampers do not have a positive effect on the transverse frames of the shelter, but they have a positive and significant effect on the longitudinal frames. Among the most important of them, we can mention the positive effect and significant reduction of base shear and structure acceleration. On average, each of these two parameters decreased by 47% and 34% respectively for the structures.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 21 January 2024

Revise Date: 04 May 2024

Accept Date: 01 June 2024

### Keywords:

Accelerograph

Friction damper

Industrial structure

Shelter

Time history analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.435611.3332](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.435611.3332)

\*Corresponding author: Hamed Tajammolian.

Email address: [h.tajammolian@yazd.ac.ir](mailto:h.tajammolian@yazd.ac.ir)

## بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی در سازه‌های صنعتی

حامد تجملیان<sup>3\*</sup>، مهدی یزدیان<sup>4</sup>، دانیال دهشیری<sup>1</sup>، امیرمحمد رضایی صدرآبادی<sup>2</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

### چکیده

در دهه‌های اخیر یکی از موضوعات اساسی تحقیقات در زمینه مهندسی سازه، معرفی راهکارهای گوناگون برای کاهش پاسخ سازه در برابر نیروهای دینامیکی بوده است. بدین منظور استفاده از میراگرها یکی از روش‌های کاهش تحریک زلزله، کنترل ارتعاشات و اتلاف انرژی وارد بر سازه، از طریق افزایش سختی، مقاومت و ظرفیت آن می‌باشد. کاربرد این وسایل در طراحی ساختمان‌های جدید و همچنین مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود به سادگی امکان‌پذیر است. میراگرهای اصطکاکی دورانی - لغزشی از نمونه ابزارهای کنترلی مقرون به صرفه، کاربردی و مؤثری هستند که با رفتار پایدار هیسترتیک و غیرخطی، انرژی را با تغییر مکان و بار لغزشی خود جذب و مستهلک می‌کنند. در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت این موضوع، سازه‌های صنعتی نظیر سوله‌ها، با و بدون میراگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تأثیر میراگر در پارامترهای مختلف سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. در همین راستا از سه مدل با مشخصات مختلف استفاده شده است. جهت بررسی سازه‌های مورد بحث از مشخصات هفت زوج شتاب‌نگاشت حوزه دور معرفی شده در آیین نامه FEMA-P695 استفاده شده است که به کمک تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که میراگرهای اصطکاکی چرخشی تأثیر مثبتی بر روی قاب‌های راستای عرضی سوله‌ها ندارند ولی در قاب‌های راستای طولی عملکرد مثبت و بسزایی دارند، که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تأثیر مثبت و کاهش قابل توجه برش پایه و شتاب سازه اشاره کرد. به‌طور میانگین هرکدام از این دو پارامتر به ترتیب 47 و 34 درصد کاهش برای سازه‌ها داشتند.

کلمات کلیدی: تحلیل تاریخچه‌زمانی، سازه صنعتی، سوله، شتاب‌نگاشت، میراگر اصطکاکی.

doi:	شناسه دیجیتال:				سابقه مقاله:	
	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.435611.3332">10.22065/jsce.2024.435611.3332</a>	/11/30	/11/30	/03/12	/02/15	1402/11/01	
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.435611.3332">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.435611.3332</a>	1403	1403	1403	1403		
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حامد تجملیان		
				h.tajammolian@yazd.ac.ir		

## 1- مقدمه

انرژی ورودی به سازه باید به طریقی جذب یا مستهلک شود و چون میرایی ذاتی سازه برای کنترل ارتعاش آن کافی نمی باشد، از ابزار کنترلی استفاده می شود. ابزارهای کنترلی بر اساس روش استهلاک انرژی به غیر فعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم می شوند. ابزارهای کنترل غیرفعال، حفاظت سازه را با انعکاس یا جذب بخشی از انرژی، بدون نیاز به نیروی خارجی انجام می دهند. یکی از معتبرترین ابزارهای کنترل غیرفعال، میراگرهای اصطکاکی می باشد. این میراگرها دارای ویژگی عملکرد بالای غیرخطی، وابسته بودن به نیرو و تغییر دوره تناوب آن با دامنه ارتعاش می باشند. با اتمام زلزله، سازه تحت نیروی فنری کشسان خود به نزدیکی امتداد اصلی خود باز می گردد [1].

میراگرهای اصطکاکی که به گونه ای طرح می شوند تا پیش از تسلیم اعضای سازه ای بلغزند، به عنوان فیوزهایی دائمی (بدون نیاز به تعویض پس از زلزله) عمل می کنند که در حین زلزله انرژی را مستهلک می نمایند. در نتیجه این کار، ساختمان می تواند بدون وقوع خسارات جدی به اجزاء سازه ای، زمین لرزه را پشت سر بگذارد. میراگرهای اصطکاکی به سادگی مدل می شوند و طراحی با استفاده از آن ها نیز به سادگی انجام می پذیرد. در عمل می توان این میراگرها را در هر نوع پروژه ای استفاده کرد. این امر به کارگیری مفاهیم نوین مهندسی زلزله را در روش های متعارف طراحی ساختمان، تسهیل کرده است. میراگر اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب کفها را به طور قابل توجهی کاهش داده و آسیب پذیری سازه و تجهیزات داخل آن را به حداقل می رساند. میراگرهای اصطکاکی رفتار هیسترتیک پایدار، حلقه های هیسترتیس مستطیلی بزرگ با کاهش سختی کم در سیکل های زیاد و قابلیت جذب انرژی بالایی دارد؛ مکانیزم ساده ای دارند به طوری که ساخت، نصب و نگهداری آن ها را آسان کرده و فضای کمی را در سازه اشغال می کنند. همه این مزایا باعث می شود هزینه اولیه ساخت سازه جدید یا بهسازی یک سازه موجود کاهش یابد. سیستم های اصطکاکی انرژی را از طریق لغزش دو قطعه نسبت به یکدیگر مستهلک می کنند. علاوه بر این، میراگرهای اصطکاکی نسبت به سایر دستگاه های هیسترتیک ترجیح داده می شوند، زیرا آن ها حداکثر انرژی را به دلیل تولید حلقه هیسترتیک مستطیلی تلف می کنند [2].

استفاده از میراگرهای اصطکاکی به دلیل دارا بودن مکانیزم ساده، عدم حساسیت به تغییرات دما و تأثیر اصطکاک در کاهش انرژی ناشی از زلزله یکی از راه های بهبود رفتار لرزه ای سازه ها محسوب می شوند. در واقع سازه ها باید با ترکیبی از سختی، قابلیت شکل پذیری و همچنین اتلاف انرژی از خود مقاومت نشان دهند. طراحی سازه ها به طوری که سازه بعد از زلزله کاملاً بدون تخریب بماند، طراحی غیر اقتصادی به نظر می رسد، بنابراین اکثر آیین نامه های طراحی، فلسفه طراحی مبتنی بر مفهوم شکل پذیری را ارائه نموده اند، بر این اساس یک سازه بایستی به نحوی طراحی شود که شکل پذیری مورد نیاز هر عضو با عملکرد آن در تعادل باشد تا در هنگام حرکات لرزه ای، انرژی به صورت مطمئنی مستهلک گردد. وجود شکل پذیری زیاد در سازه تشکیل مفاصل پلاستیک در برخی اعضا را به همراه خواهد داشت در نتیجه موجب صدمات جدی در برخی المان ها مانند تیرها خواهد شد. میراگرهای الحاقی مورد استفاده این صدمات وارد را کاهش می دهند و در هنگام وقوع زلزله اعضای سازه ای در محدوده رفتار الاستیک باقی می ماندند و از تخریب آن ها جلوگیری می شود.

در سال های اخیر عملکرد میراگرهای اصطکاکی غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم هایی برای تحلیل سازه ها با این نوع میراگر توسعه داده شده است که نشان دهنده عملکرد رضایت بخش این میراگرها در کاهش پاسخ لرزه ای سازه ها است. در این بخش به مروری از تحقیقات و پژوهش های گذشته بر روی میراگرهای اصطکاکی که در طیف وسیعی از دوره های مختلف انجام شده اند پرداخته شده است.

در سال 2002، موئلا<sup>1</sup> و بلو<sup>2</sup> یک میراگر اصطکاکی چرخشی<sup>3</sup> (RFD) جدید معرفی کردند که با قرار دادن یک صفحه فولادی عمودی در بین دو صفحه فولادی افقی همراه با پدهای اصطکاکی، واشرها و اتصالات پیچ و مهره فولادی ساخته شده بود. آن ها اثربخشی

<sup>1</sup> Imad H. Mualla

<sup>2</sup> Borislav Belev

<sup>3</sup> Rotational Friction Damper

میراگر پیشنهادی را به صورت تجربی و عددی با نصب میراگر پیشنهادی در یک مدل قاب مقیاس شده یک طبقه آزمایش کردند؛ و عملکرد میراگر را کاملاً رضایت بخش دریافتند. همچنین مشخص شد که میراگر تا حدی مستقل از سرعت است هر چند، پس از یک محدوده خاص، به صورت خطی به دامنه جابجایی بستگی دارد. همچنین موئلا و بلو شاخص عملکرد لرزه‌ای<sup>۴</sup> (SPI) را به عنوان معیاری برای کارایی RFD پیشنهاد کردند و عملکرد یک قاب فولادی یک طبقه با RFD را با تحریک لرزه‌ای بررسی کردند [3].

کوماچی<sup>۵</sup> و همکاران اثربخشی RFDها را در یک زیر سازه سکو<sup>۶</sup>، به صورت عددی از طریق تحلیل پوش‌آور<sup>۷</sup> ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جابجایی هدف سازه با استفاده از RFDها کاهش می‌یابد [4]. میرزاباقری و همکاران عملکرد RFDها را با دو و سه واحد (لایه‌های صفحات فولادی و لنت‌های اصطکاکی)، به صورت تجربی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که انرژی تلف شده با افزایش تعداد واحدها افزایش می‌یابد [5]. قلی‌زاد و نکو RFDها را برای استفاده در مهاربندهای x شکل پیشنهاد کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پیکربندی پیشنهادی آن‌ها برای RFDها در ساختمان‌های مرتفعی که در معرض زلزله‌های شدید قرار دارند مؤثرتر است [6]. طیاری و همکاران یک روش برای طراحی مبتنی بر احتمال میراگرهای اصطکاکی در قاب‌های فولادی چند طبقه پیشنهاد کردند، و نشان دادند که بیشترین احتمال آسیبی که در هر سازه وجود دارد در نسبت سختی کمتر و نیروی لغزش بیشتر رخ می‌دهد [7].

حسینی و همکاران به بررسی مقایسه‌ای بین روش‌های استاتیکی غیرخطی با روش تاریخچه زمانی برای سازه‌های مهاربندی شده از نوع شورون به همراه جداساز لرزه‌ای لاستیکی با هسته سربی در تراز پایه پرداختند برای این منظور سه سازه با جداساز در سه تراز ارتفاعی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون، با تغییر مکان هدف ASCE41-13، و با الگوی بار جانبی مود اول سازه، یکنواخت، مثلثی، دینامیکی طیفی و مثلثی معکوس به همراه تحلیل تاریخچه زمانی بر روی مدل‌ها اعمال کردند. آن‌ها نشان دادند که برآورد جابجایی حداکثر جداساز و برش‌پایه در روش‌های بار افزون ASCE41-13، دارای دقت بالایی در سازه‌های با تراز ارتفاعی مختلف بوده و در برآورد جابجایی حداکثر طبقات، روش‌های مود اول، یکنواخت، دینامیکی طیفی و مثلثی معکوس دارای دقت کافی در تمام ترازهای ارتفاعی هستند. با افزایش ارتفاع سازه، دقت الگوی بار مثلثی کاهش پیدا کرده است و در مقایسه با آن، روش مثلثی معکوس دارای دقت بالایی می‌باشد [8].

علاوه بر ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، بهینه سازی فرآیند طراحی یکی دیگر از عوامل مهم در بکارگیری RFD است. برای انجام این کار، اخیراً در سال 2020، جراحی و همکاران برای تعیین پارامترهای بهینه فرآیند طراحی RFD، یک بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح شده بر اساس الگوریتم تجمع غیرفعال<sup>۸</sup> (PSOPC) اتخاذ کردند. ساختار بهینه‌سازی شده توانست با موفقیت حداکثر جابجایی سقف، جابجایی سقف باقیمانده و انرژی هیسترتیک تجمعی را به ترتیب 54، 75، و 97 درصد کاهش دهد [9].

نعیم<sup>۹</sup> و کیم<sup>۱۰</sup> میراگر اصطکاکی فنی پیچشی<sup>۱۱</sup> (TSFD) را ارائه کردند که ساخت آن اقتصادی و آسان است. TSFD ترکیبی از میراگر اصطکاکی چرخشی است که توسط موئلا و بلو در سال 2002 توسعه یافته است، همراه با فنرهای پیچشی سنگین که سختی اضافی و نیروی مرکزیت مجدد را در طول تحریکات لرزه‌ای فراهم می‌کند [10].

ویسمرادی و همکاران در سال 2021، یک میراگر خود محوری جدید به نام میراگر اصطکاکی چرخشی خود محوری<sup>۱۲</sup> (SC-RF) معرفی کردند که می‌تواند انعطاف‌پذیری را هم در طراحی میراگر و هم در کاربردهای سازه‌ای به مهندسان ارائه دهد که اتلاف انرژی از

<sup>1</sup> Seismic Performance Index

<sup>2</sup> Y. Komachi

<sup>3</sup> Jacket platform

<sup>4</sup> Pushover

<sup>5</sup> Particle Swarm Optimization based on Passive

<sup>6</sup> Asad Naeem

<sup>7</sup> Jinkoo Kim

<sup>8</sup> Torsional spring friction damper

<sup>9</sup> Self-Centering Rotational Friction Dampers

طریق لغزش اصطکاک چرخشی بر روی سطوح شیار طراحی شده خاص به نام صفحات اصطکاکی رخ می‌دهد. این دستگاه لرزه‌ای نوآورانه می‌تواند هم اتلاف انرژی و هم ویژگی‌های خود محوری را ارائه دهد [11].

برهان و همکاران به بحث مقایسه منحنی‌های شکنندگی در سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی دورانی- لغزشی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک پرداختند آن‌ها سه سازه به تعداد طبقات 3، 6 و 9 را طراحی کردند و در دو حالت مجهز به سیستم میرایی و فاقد آن، تحت رکورد زلزله‌های حوزه دور و نزدیک که در جهت طولی به سازه وارد می‌شدند، قرار دادند پس از انجام تحلیل دینامیکی افزایشی و ایجاد منحنی‌های شکنندگی در چهار سطح خرابی یعنی خفیف، متوسط، شدید و فروپاشی، نشان دادند که عملکرد سازه‌ها در رکوردهای حوزه نزدیک بهتر از حوزه دور بوده است. شتاب به‌عنوان عامل اصلی خرابی سازه‌ها بخصوص تحت رکوردهای حوزه دور شناخته شده همچنین آن‌ها نشان دادند که سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی دارای حاشیه ایمنی بالاتری نسبت به سازه‌های بدون میراگر هستند [12].

در مطالعه‌ای دیگر دهشیری و همکاران، رویکرد احتمالاتی و شکنندگی لرزه‌ای سازه‌ها در حضور اتصال پیچی شکافدار به همراه تیر پیوند قائم را به کمک 22 جفت رکورد زلزله حوزه دور بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده کاهش پاسخ سرعت و برش پایه سازه در هنگام استفاده از اتصال پیچی شکافدار و نیز بهبود شکنندگی لرزه‌ای و افزایش حاشیه ایمنی فروریزش به همراه کاهش احتمال خرابی سازه‌ها بوده است [13].

در دهه‌های اخیر با توجه به پیشرفت مهندسی زلزله مطالعات گسترده و مختلفی بر روی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها صورت گرفته است. این مطالعات در زمینه‌های گوناگونی به خصوص در زمینه کاهش انرژی ورودی زلزله به سازه و در پیرو آن استفاده از میراگرها و جداسازهای لرزه‌ای در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها بوده است. با توجه به این که اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در سازه‌های ساختمانی بوده و توجهی به سازه‌های صنعتی نشده است و به طور خاص عملکرد میراگرها و جداسازهای لرزه‌ای در این گونه سازه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته؛ در حالی که این سازه‌ها مستثنی از این موضوع نیستند و بهبود عملکرد لرزه‌ای آن‌ها نیز حائز اهمیت است، بنابراین در این پژوهش به بررسی عملکرد و تأثیر میراگرهای اصطکاکی در سازه‌های صنعتی نظیر سوله پرداخته شده است. لازم به ذکر است روند انجام این پژوهش به صورت فلوچارت در شکل 1 ارائه گردیده است.

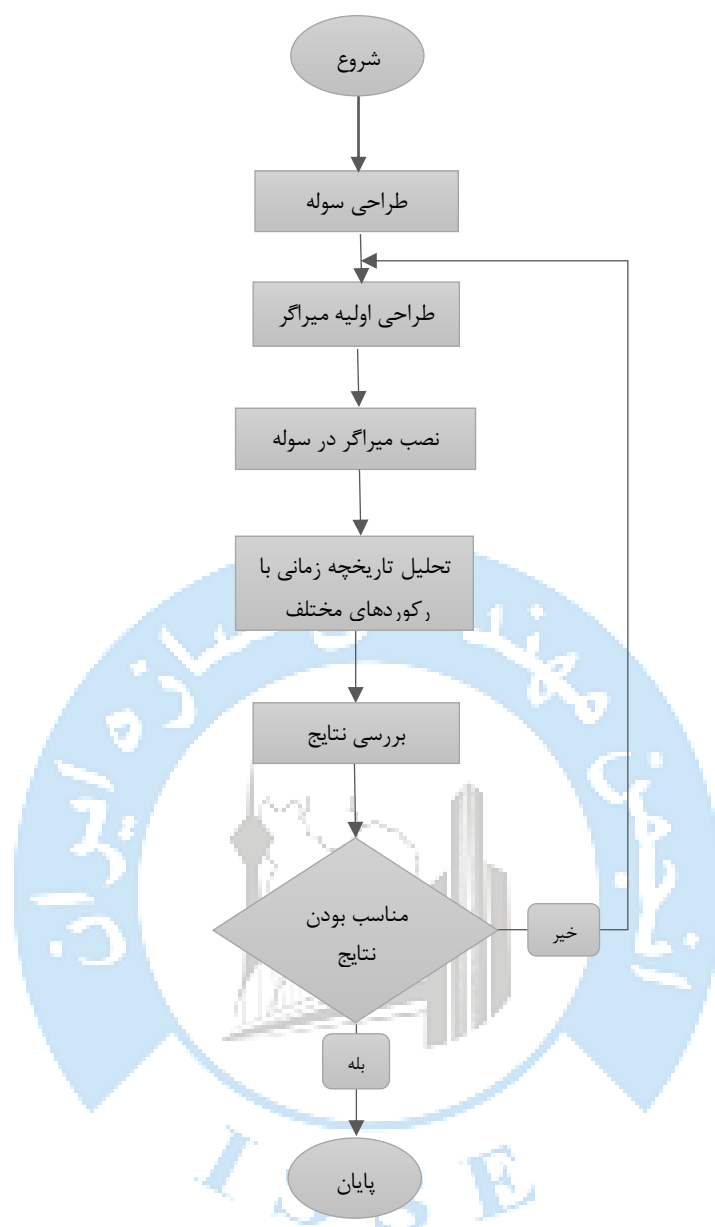
## 2- روش تحقیق

### • جزئیات مدل سازی

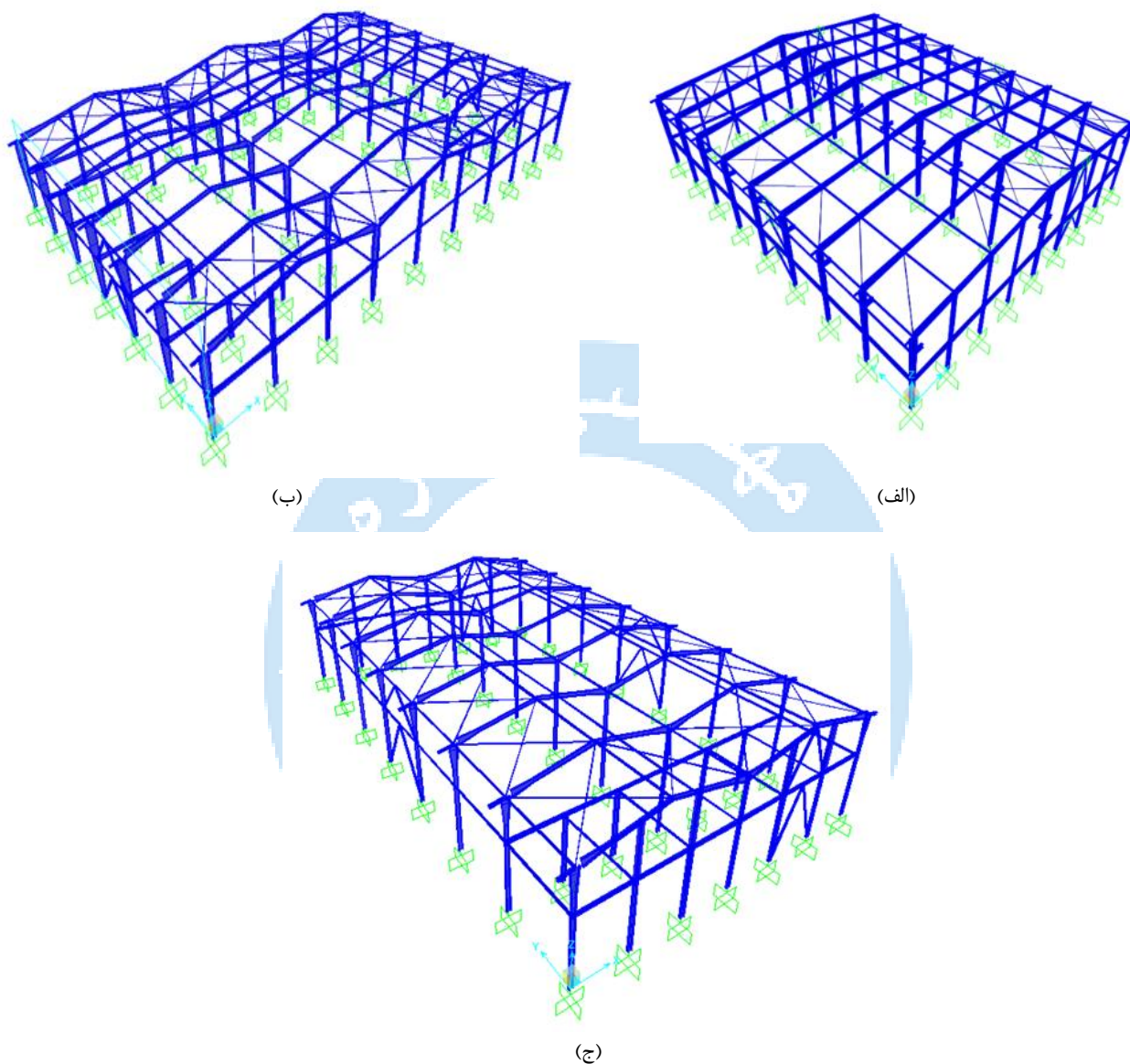
برای بررسی تأثیر میراگرهای اصطکاکی چرخشی بر روی سوله‌های صنعتی از سه سوله متفاوت که محل احداث آن‌ها شهر تهران و خاک منطقه محل احداث تپ سوله می‌باشد استفاده شده است. همچنین ابعاد کلی سوله‌ها در جهت عرضی برای سوله شماره یک تا سه به ترتیب 40، 36 و 24 متر و در جهت طولی به ترتیب 48، 56 و 42 متر مفروض شده است. سوله‌های شماره دو و سه دارای نیم‌طبقه بوده‌اند که مساحت هر کدام به ترتیب 840 و 144 مترمربع می‌باشد و از این لحاظ انتخاب شده‌اند که مقداری بار سنگین داشته باشند. لازم به ذکر است که میراگرها در سوله شماره یک و سه در هر دو جهت سازه و در سوله شماره دو فقط در جهت طولی سازه نصب شده‌اند و در نهایت آنالیز و طراحی این سازه توسط نرم افزار SAP2000 ورژن 22 انجام گردیده است. شکل‌های شماره 2 تا 5 نمای کلی سازه و همچنین مقطع تمامی المان‌ها و محل نصب میراگرها در سازه‌ها را به نمایش می‌گذارند. سوله‌های مورد استفاده همگی نمونه‌های واقعی بوده که در پروژه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور مدل‌سازی میراگر در نرم افزار SAP2000 از آنجایی که امکان مدل‌سازی مستقیم میراگر اصطکاکی وجود ندارد بنابراین باید این میراگر با مشابه‌ترین المان ممکن مدل شود. برای این منظور از المان پلاستیک ون<sup>13</sup> که شبیه‌ترین رفتار را به میراگرهای اصطکاکی نشان می‌دهد استفاده شده است. لازم به ذکر است که در طراحی با نرم افزار بار لغزش بهینه 5 تن در نظر گرفته شده است.

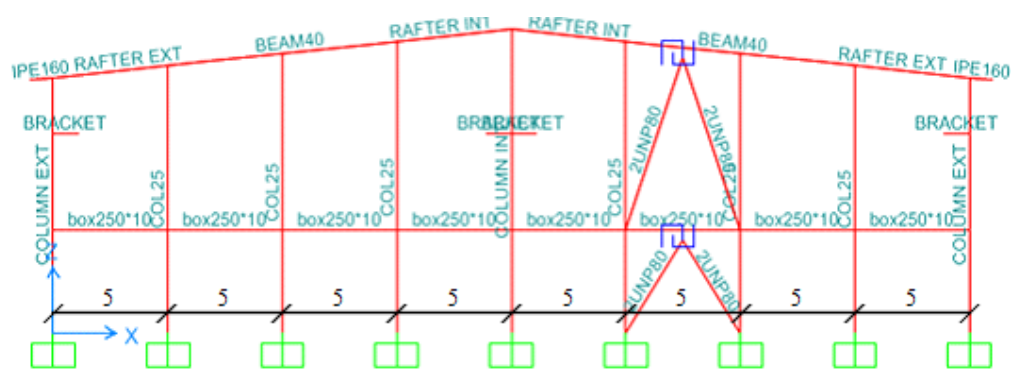
<sup>1</sup> Plastic Wen



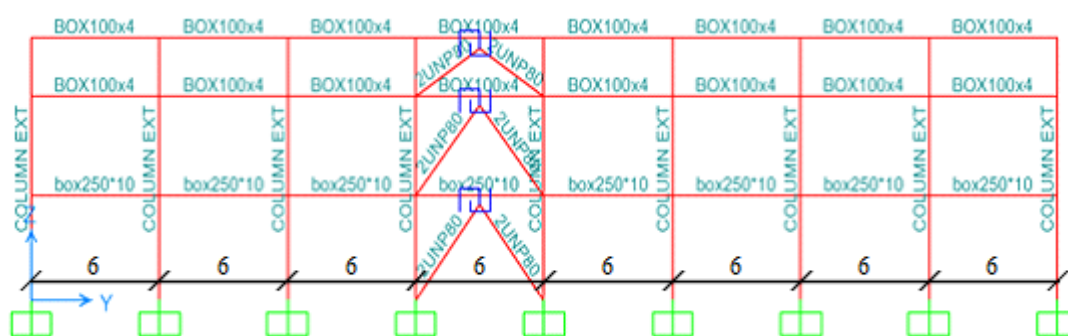
شکل 1: فلوچارت مراحل انجام مطالعه.



شکل 2: نمای سه بعدی سوله‌های مورد مطالعه (الف) سوله شماره یک، (ب) سوله شماره دو، (ج) سوله شماره سه.

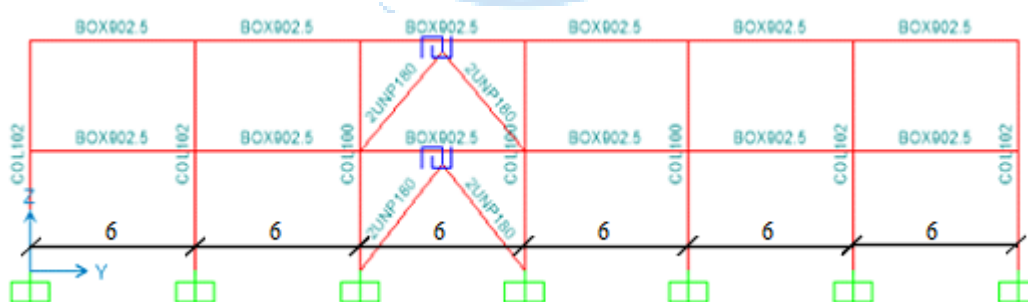


(الف)

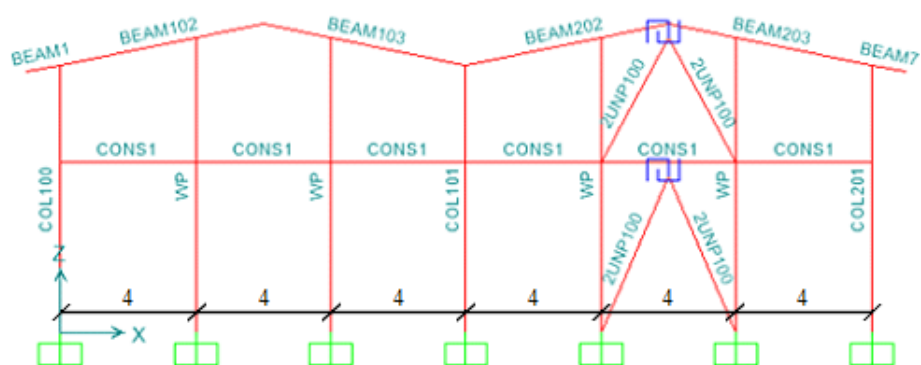


(ب)

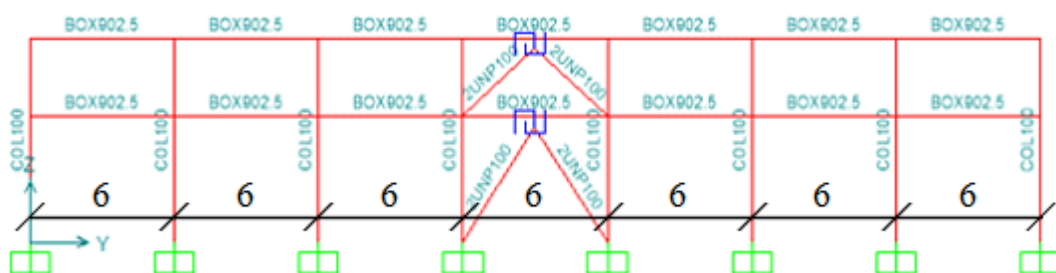
شکل 3: مقاطع المان‌ها و محل قرارگیری میراگرها در سوله شماره یک (الف) راستای X، (ب) راستای Y



شکل 4: مقاطع المان‌ها و محل قرارگیری میراگرها در سوله شماره دو در راستای Y



(الف)



(ب)

شکل 5: مقاطع المان‌ها و محل قرارگیری میراگرها در سوله شماره یک (الف راستای X، (ب) راستای Y

### • تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی

یکی از مراحل مهم در بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب جهت بررسی و مطالعات عددی می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها هفت رکورد زلزله حوزه دور از آیین نامه FEMA-P695 برداشت و استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول شماره 1 آمده است.

جدول 1: مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده [14].

ردیف	نام زلزله	نام ایستگاه زلزله	بزرگا (Mag) بر حسب ریشتر	فاصله از گسل (Rjb) بر حسب کیلومتر	مدت زمان حرکت شدید زمین (D) بر حسب ثانیه	نوع خاک
1	Duzce, Turkey	Blou	7.1	12.02	2.6 - 9	D
2	Loma Prieta	Capitola	6.9	8.6	5.6 - 13.2	D
3	Kocaeli, Turkey	Duzce	7.5	13.6	6.1 - 11.8	D
4	Imperial valley-06	El Centro Array #11	6.5	12.56	4.6 - 9	D
5	Superstition Hills-02	El Centro Lmp	6.5	18.2	9.4 - 35.7	D
6	Superstition Hills-02	Poe Road	6.5	11.1	11.2 - 13.7	D
7	Kobe, Japan	Shin Osaka	6.9	19.14	4.5 - 11.6	D

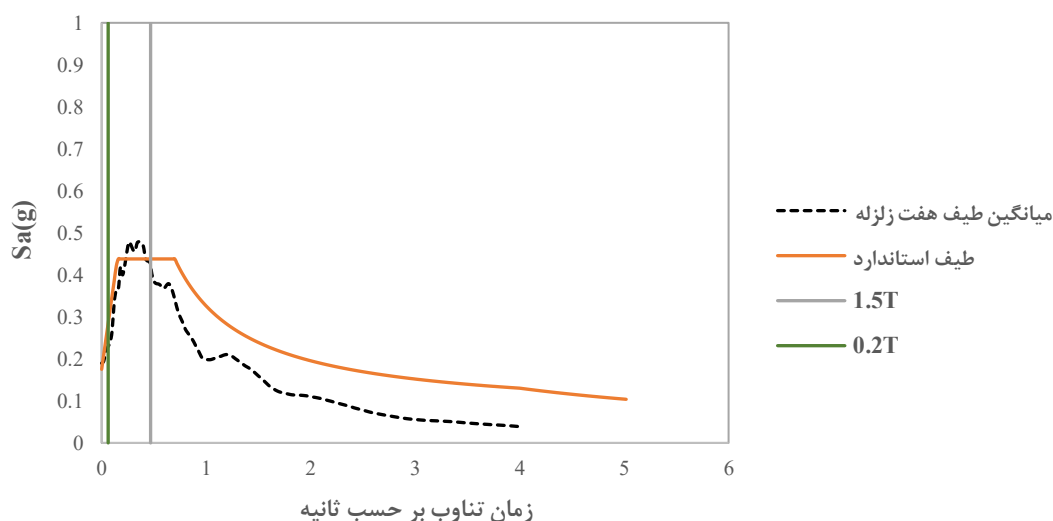
### • مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها

زوج شتاب نگاشت‌های انتخاب شده برای تحلیل سه بعدی سازه‌های مورد نظر، مطابق با آیین نامه 2800، ویرایش چهارم به مقیاس درآورده شده‌اند که ضرایب مقیاس زلزله‌ها برای سازه شماره یک و برای برآیند هر دو جهت در جدول شماره 2 ارائه گردیده است.

جدول 2: ضریب مقیاس هفت زلزله حوزه دور.

ردیف	نام زلزله	ضریب مقیاس زلزله
1	Duzce,Turkey	2.0679
2	Loma Prieta	3.252
3	Kocaeli,Turkey	4.5695
4	Imperial valley-06	4.3861
5	Superstition Hills-02	4.6529
6	Superstition Hills-02	3.5022
7	Kobe,Japan	7.1378

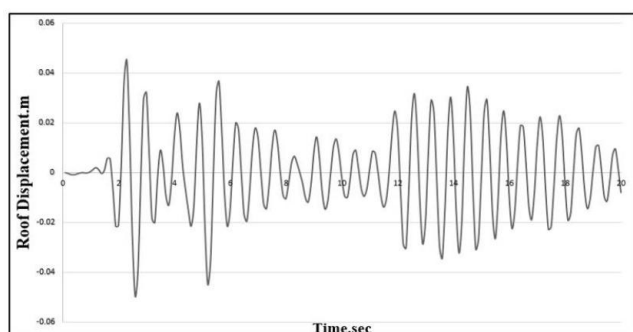
همچنین شکل شماره 6 طیف میانگین هفت زلزله، پس از مقیاس شدن با طیف استاندارد آیین نامه 2800 را نمایش می دهد.



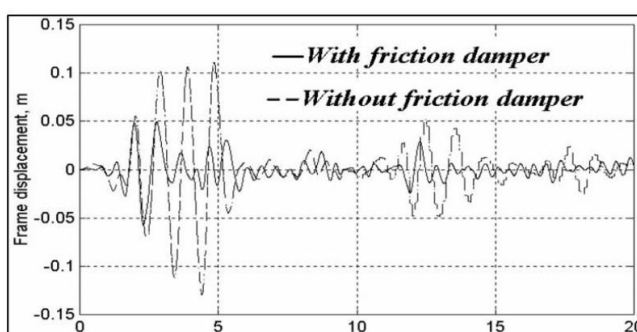
شکل 6: روش تعیین مقیاس زلزله.

#### • صحت سنجی مدل سازی

بررسی صحت مدل سازی در این پژوهش برای حالتی که سازه مورد نظر تحت رکورد زلزله 180 درجه ال سنتر و سال 1940 با شتاب  $0/31g$  آنالیز تاریخیچه زمانی شده است، انجام می شود. به این منظور یک قاب یک دهانه و یک طبقه طراحی شده در مطالعات موئلا و بلو [3] که مورد تحلیل دینامیکی آزمایشگاهی قرار گرفته بود انتخاب شد و مدلسازی و تحلیل در نرم افزار SAP2000 انجام پذیرفت. در این قاب یک میراگر RFD در بالای قاب بوسیله مهاربند شورون نصب شده است. نتایج آنالیز مقاله مرجع در شکل شماره 7 (الف) قابل مشاهده می باشد همانطور که در شکل شماره 7 مشخص گردیده در حالتی که میراگر در قاب تعبیه شده است، جابجایی قاب از مقدار  $0/05$  متر تجاوز نمی کند. همچنین نتایج مدلسازی صورت گرفته در این پژوهش بصورت مقادیر جابجایی قاب در قالب نمودار شکل شماره 7 (ب) نمایش داده شده است. حداکثر جابجایی در این نمودار برابر با  $0/0506$  متر بوده که حداکثر اختلاف موجود  $1/2$  درصد می باشد. بنابراین مدل سازی میراگرهای اصطکاکی از دقت کافی برخوردار بوده اند.



(ب)



(الف)

شکل 7: (الف) نمودار نتایج (جابجایی بام) مقاله موئلا و بلو [3]، (ب) نمودار جابجایی بام برای مدل سازی مشابه در این پژوهش.

### 3- بحث و بررسی نتایج

#### انتخاب میراگر مناسب

در ابتدا با توجه به دستورالعمل‌های طراحی میراگر [3] دو نوع میراگر اصلی برای دو راستای طولی و عرضی سوله (شماره 1) با توجه به خصوصیات سوله شماره یک طراحی شده و برای اطمینان از نتایج بدست آمده، دو میراگر دیگر با نیروی لغزشی در دو حالت 30 درصد کمتر و 30 درصد بیشتر از حالت اصلی نیز انتخاب شده است. سپس جابجایی تاج سوله در دو راستای طولی و عرضی برای 3 میراگر یاد شده مقایسه گردیده است که در جدول شماره 3 خصوصیات میراگرها و نتایج این مقایسه نشان داده نشان داده شده است. لازم بذکر است نتایج بدست آمده مربوط به میانگین حداکثر جابجایی سوله در 7 رکورد زلزله جدول 1 می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی بر این است که تغییر در میراگر اصطکاکی اختلافی در عملکرد سازه ایجاد نکرده و میراگرهای اصطکاکی طراحی شده عملکرد یکسانی می‌توانند داشته باشند، بنابراین روش طراحی میراگر مناسب بوده و میراگر شماره 1 از نیروی لغزشی بهینه‌ای برخوردار بوده است. برای سوله‌های شماره 2 و 3 نیز مطالعات مشابهی صورت گرفته که جهت رعایت اختصار از ذکر آنها خودداری شده است. در ادامه این بخش تمام نتایج ارائه شده مربوط به میراگر بهینه انتخاب شده در هر سوله است.

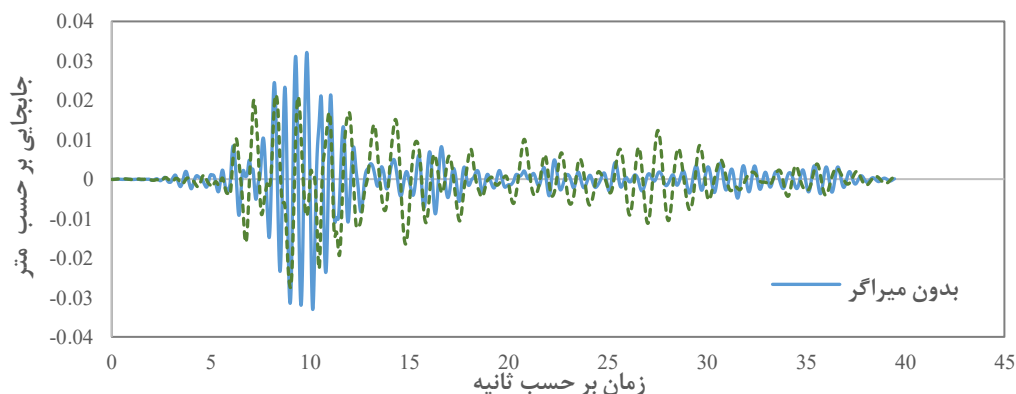
جدول 3: خصوصیات میراگرهای طراحی شده و مقایسه میانگین جابجایی تاج سوله شماره یک با انواع میراگر اصطکاکی.

میراگر شماره 3	میراگر شماره 2	میراگر شماره 1	بدون میراگر		
34/32	63/74	49/03	-	راستای طولی	نیروی لغزش میراگر (kN)
24/03	44/62	34/32	-	راستای عرضی	
4/630	4/624	4/625	3/587	راستای طولی	جابجایی سوله (cm)
2/488	2/479	2/485	2/481	راستای عرضی	

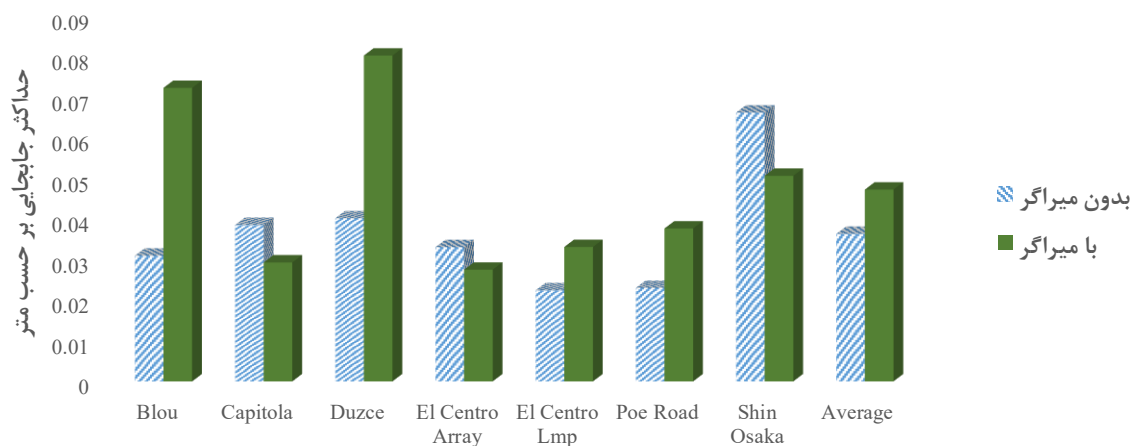
#### تغییر مکان

در این بخش مقایسه جابجایی بام در راستای طولی سازه‌ها، در حالت با و بدون میراگر انجام شده است. برای نمونه نمودار جابجایی بام- زمان سوله شماره یک تحت زلزله Imperial valley-06 در شکل 8 نمایش داده شده است که با نظر به آن می‌توان دریافت حداکثر جابجایی از 33 به 27 میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر نتایج نمودارهای حداکثر جابجایی

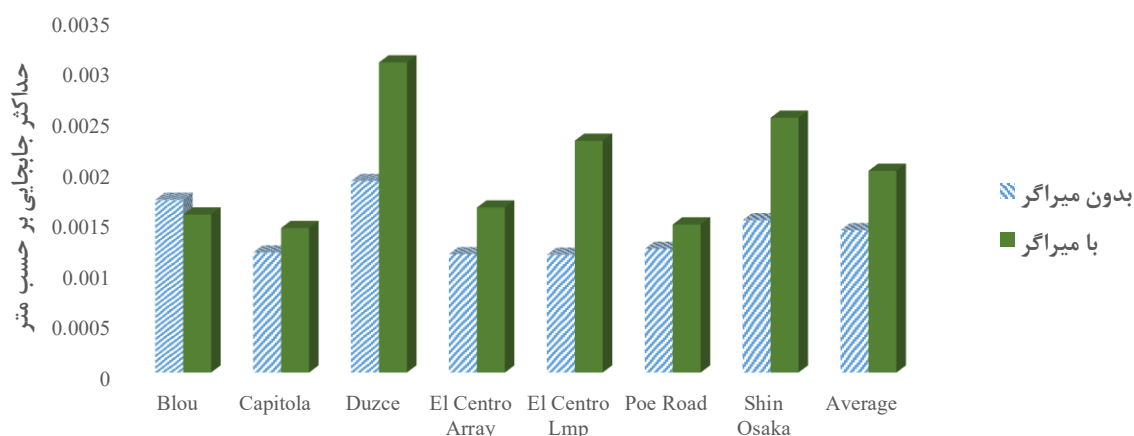
سوله‌ها تحت هفت رکورد زلزله در شکل‌های 9 تا 11 ارائه شده است؛ که بر اساس آن می‌توان بیان نمود در سوله شماره یک با اضافه شدن میراگر میانگین حداکثر جابجایی تحت هفت رکورد زلزله از 36 به 47 میلی‌متر رسیده است، در سوله شماره 2 این مقدار میانگین از 1/4 به 2 میلی‌متر افزایش پیدا کرده است و در سوله شماره 3 ضمن اینکه وجود میراگر تحت هیچ کدام از هفت زلزله تاثیر مثبتی بر روی جابجایی سازه نداشته است مقدار میانگین حداکثر جابجایی از 11 به 49 میلی‌متر افزایش یافته است. بعنوان یک نتیجه کلی می‌توان نتیجه گرفت که اضافه شدن میراگر تاثیر مثبت چندانی در سوله‌ها ندارد. سازه‌های صنعتی بخاطر سبک و کوتاه‌مرتبه بودن جابجایی کمی را در زلزله تجربه می‌کنند و اضافه کردن میراگر بخاطر نرم‌تر کردن سازه بخصوص در جهت طولی که در حالت عادی مهاربندی بوده، میزان جابجایی را تا حدی افزایش داده است.



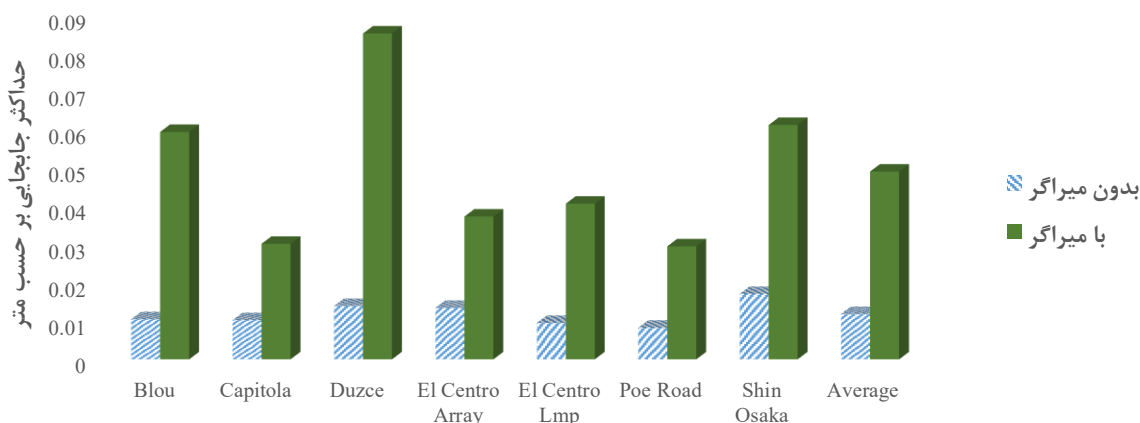
شکل 8: نمودار جابجایی بام - زمان در سوله شماره یک با و بدون میراگر تحت زلزله Imperial valley-06



شکل 9: حداکثر جابجایی سوله شماره یک در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



شکل 10: حداکثر جابجایی سوله شماره دو در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

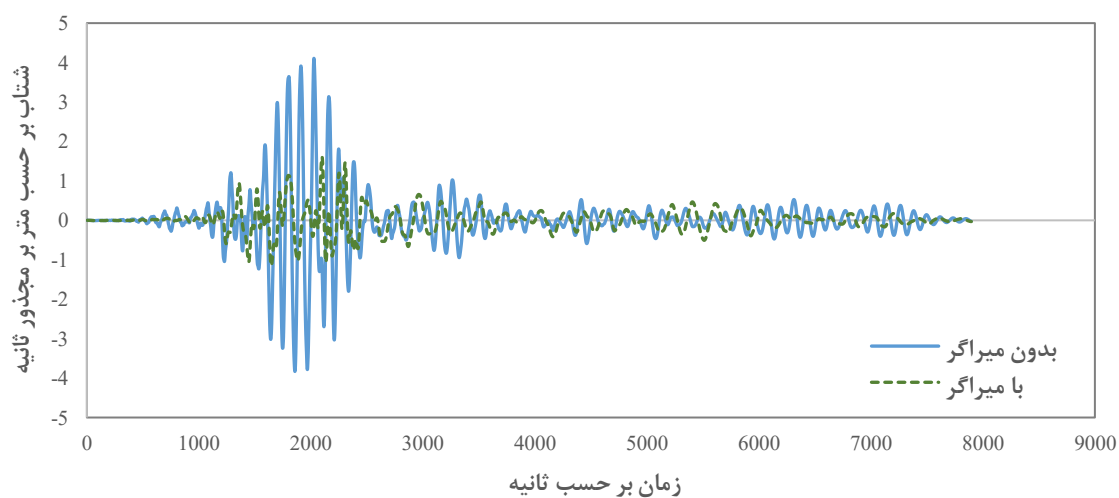


شکل 11: حداکثر جابجایی سوله شماره سه در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

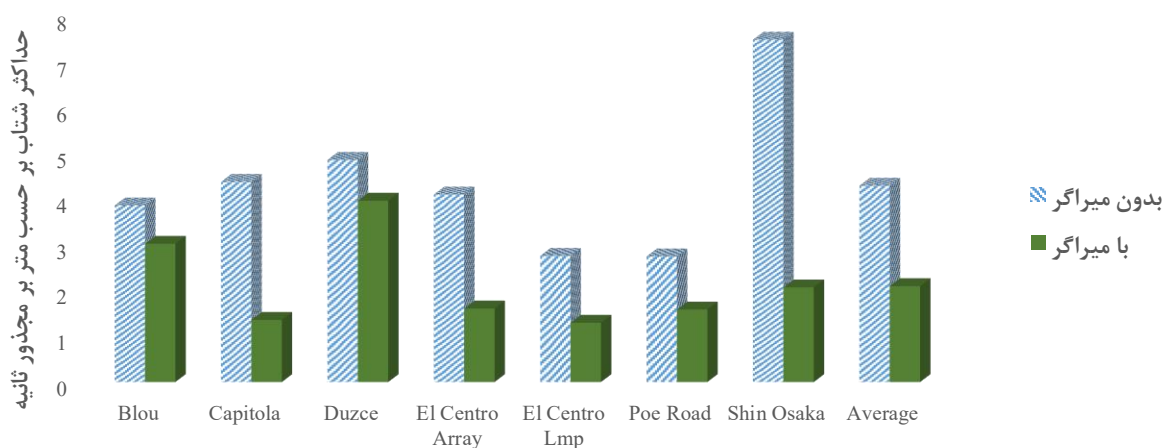
ISSE

#### • شتاب حداکثر

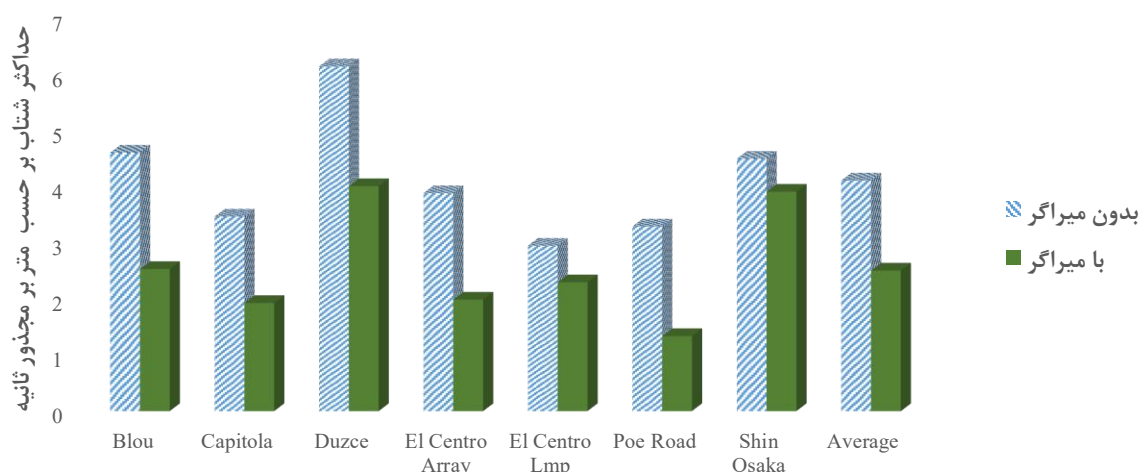
جهت بررسی شتاب سازه در قاب‌های راستای طولی به عنوان نمونه دو مورد از نمودار شتاب-زمان برای سوله شماره یک تحت زلزله Imperial valley-06 در شکل شماره 12 آورده شده است؛ که سوله شماره یک تحت زلزله ال سنتر و حداکثر شتاب از مقدار  $4/1$  به  $1/6$  متر بر مجذور ثانیه کاهش یافته است. شکل‌های شماره 13 تا 15 نمایانگر حداکثر شتاب سوله‌ها تحت هفت رکورد زلزله استفاده شده می‌باشد که پیرو آن میانگین حداکثر شتاب سوله شماره یک از  $4/3$  به  $2/1$  متر بر مجذور ثانیه، برای سوله شماره دو از  $4/1$  به  $2/5$  متر بر مجذور ثانیه و برای سوله شماره سه این مقدار از  $1/8$  به  $1/6$  متر بر مجذور ثانیه کاهش یافته است. در سازه‌های بررسی شده، نصب میراگر در جهت طولی که در حالت عادی مهاربندی بوده باعث نرم‌تر شدن سازه و به تبع آن کاهش شتاب حداکثر شده که می‌تواند نکته مثبتی در نصب میراگر اصطکاکی در سوله‌ها باشد.



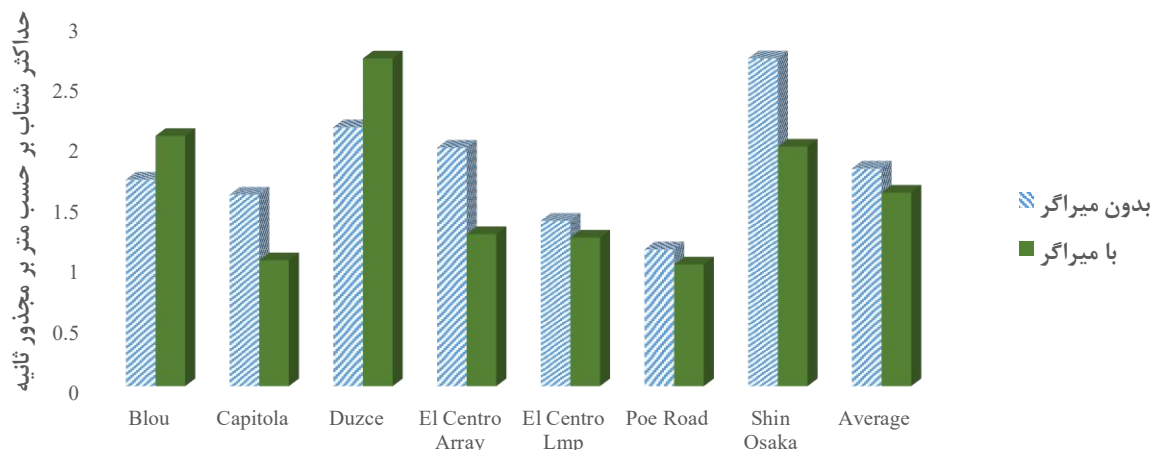
شکل 12: نمودار شتاب - زمان در سوله شماره یک با و بدون میراگر تحت زلزله Imperial valley-06



شکل 13: نمودارهای حداکثر شتاب سوله شماره یک در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



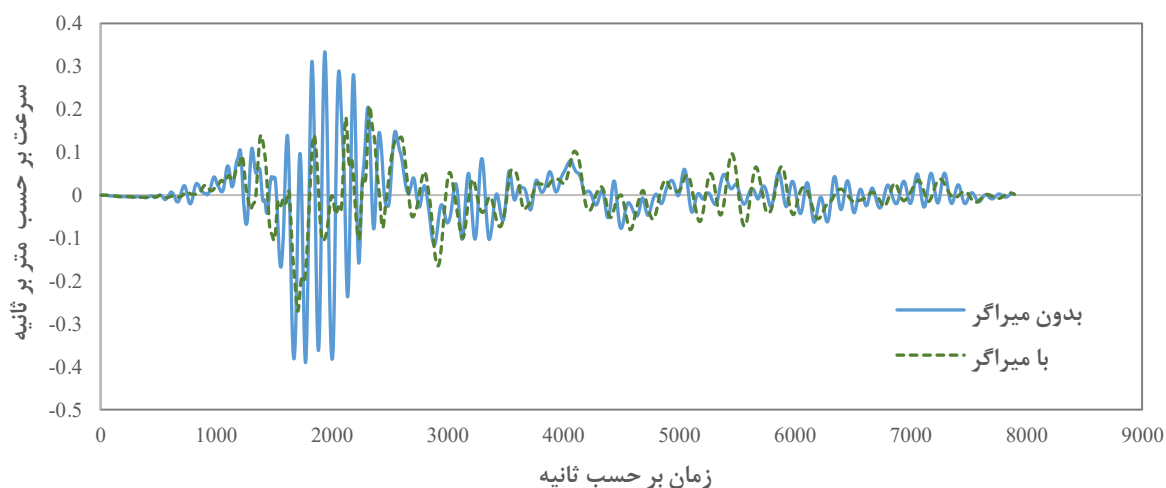
شکل 14: نمودارهای حداکثر شتاب سوله شماره دو در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



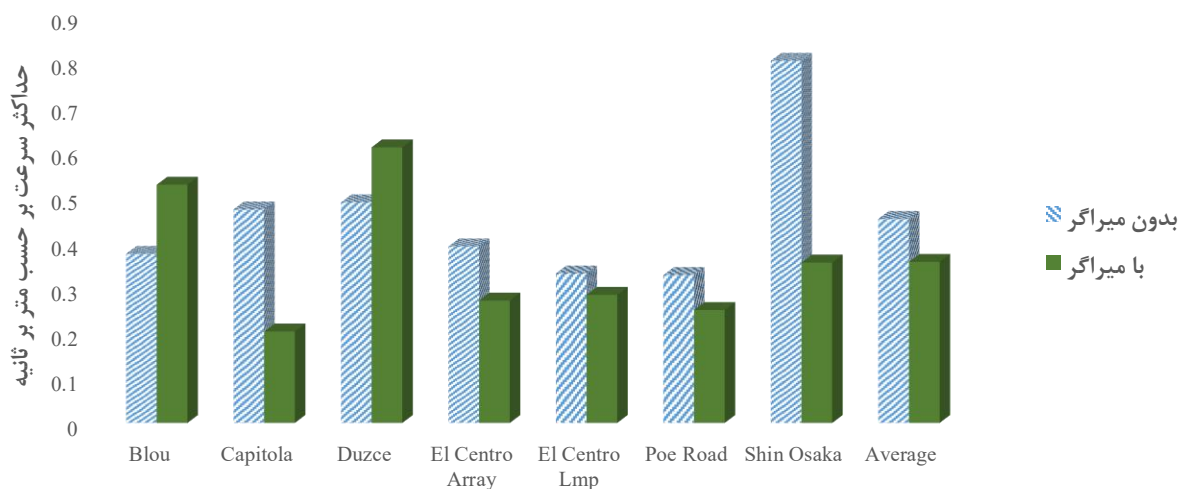
شکل 15: نمودارهای حداکثر شتاب سوله شماره سه در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

#### • سرعت

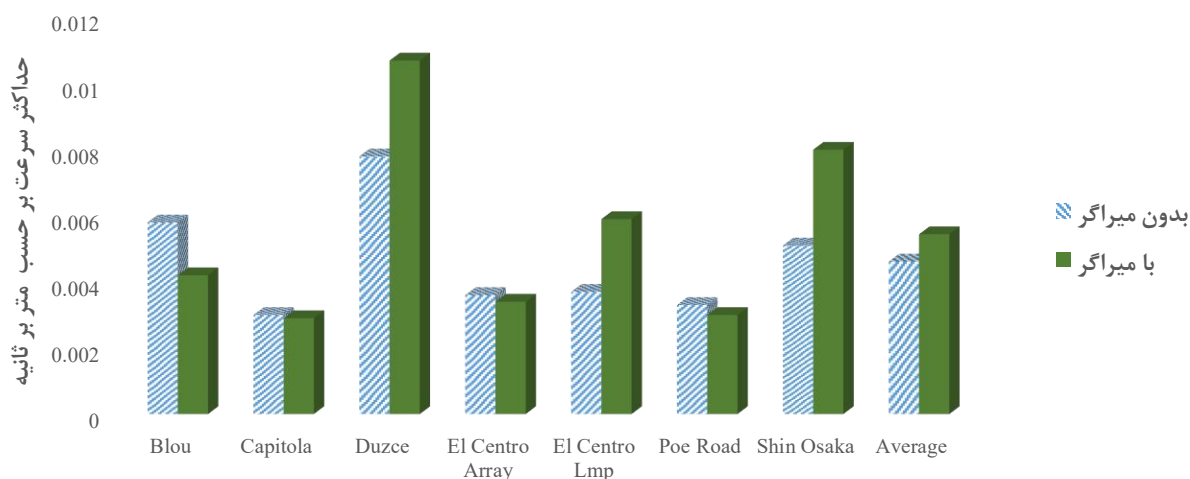
مطابق شکل 16 به عنوان نمونه برای سوله شماره یک تحت زلزله Imperial valley-06 حداکثر سرعت در راستای طولی از 390 به 270 میلی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. در شکل‌های 17 تا 19 نمودار حداکثر سرعت سوله شماره یک، دو و سه با و بدون میراگر تحت هفت رکورد زلزله مشاهده می‌شود. در سوله شماره 1 میانگین حداکثر سرعت سازه تحت هفت رکورد زلزله از 535 میلی‌متر بر ثانیه به حدود 400 میلی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد؛ همچنین میانگین حداکثر سرعت سوله شماره 2 تحت هفت رکورد زلزله از 4/6 به 5/4 میلی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد و میانگین حداکثر سرعت سوله شماره 3 تحت هفت رکورد زلزله از 213 به 316 میلی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.



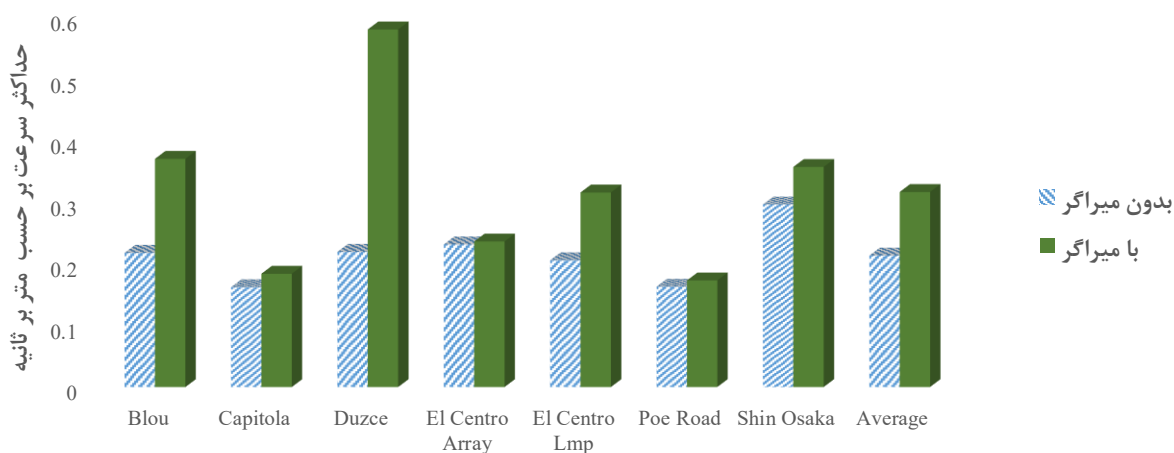
شکل 16: نمودار سرعت - زمان در سوله شماره یک با و بدون میراگر تحت زلزله Imperial valley-06



شکل 17: نمودارهای حداکثر سرعت سوله شماره یک در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



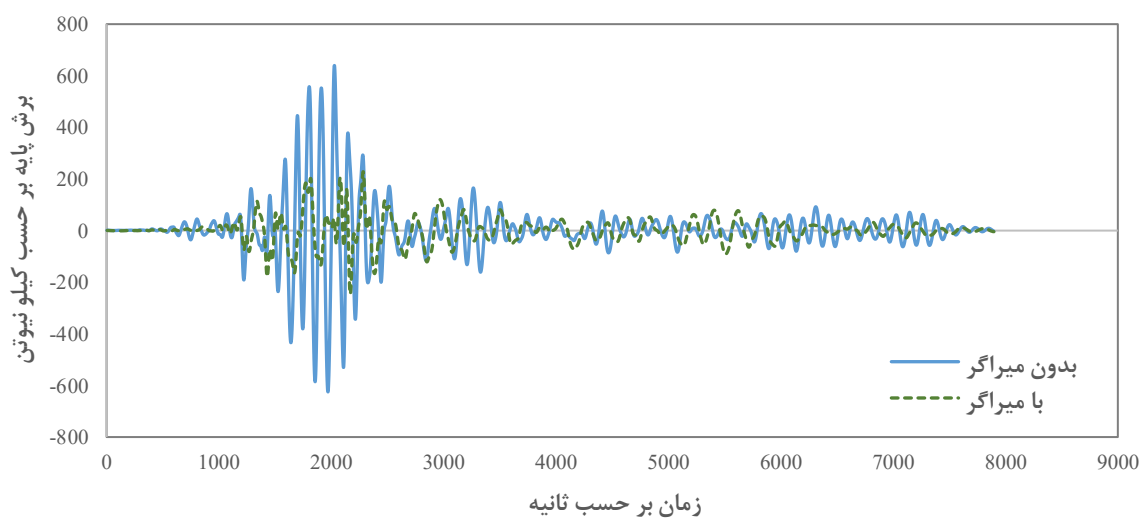
شکل 18: نمودارهای حداکثر سرعت سوله شماره دو در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



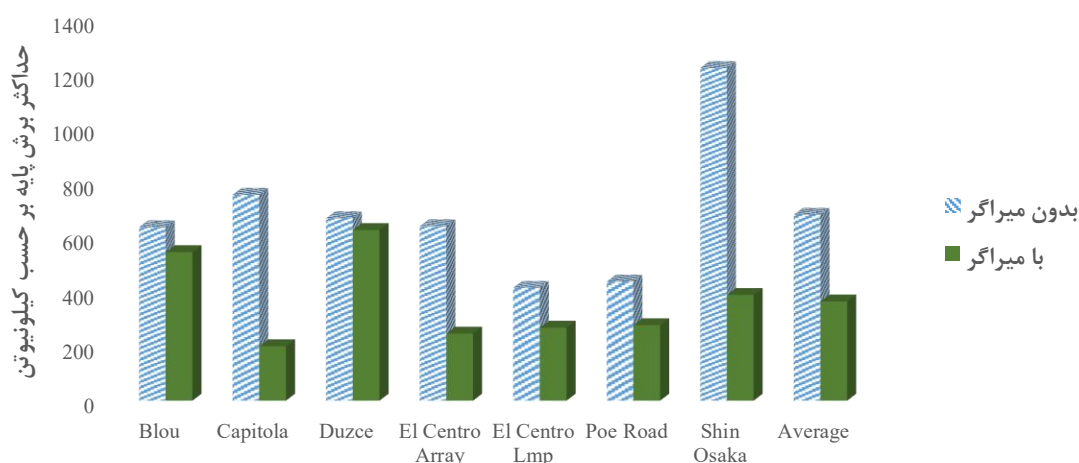
شکل 19: نمودارهای حداکثر سرعت سوله شماره سه در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

### • برش پایه

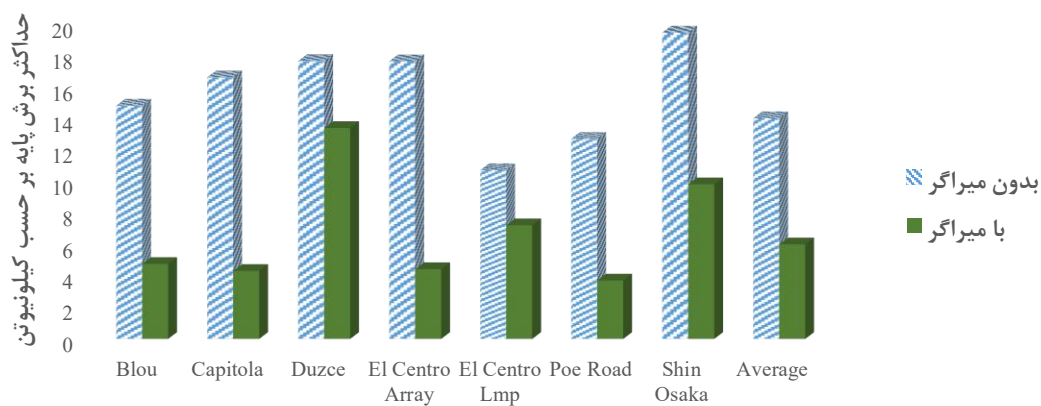
مطابق شکل 20 برای سوله شماره یک تحت زلزله Imperial valley-06 حداکثر برش پایه راستای طولی از 640 کیلونیوتن به 246 کیلونیوتن کاهش می‌یابد. همچنین در شکل‌های 21 تا 23 نمودارهای حداکثر برش پایه سوله شماره یک، دو و سه با و بدون میراگر تحت رکورد هفت زلزله مشاهده می‌شود، که پیرو این شکل‌ها در سوله شماره یک میانگین حداکثر برش پایه تحت رکورد هفت زلزله از 682 کیلونیوتن به 364 کیلونیوتن کاهش می‌یابد و این یعنی کاهش 47 درصدی حداکثر برش پایه که مطلوب به نظر می‌رسد. در سوله شماره 2 حداکثر برش پایه تحت رکورد هفت زلزله از 14 کیلونیوتن به 6 کیلونیوتن کاهش می‌یابد. و همچنین در سوله شماره 3 این مقدار تحت رکورد هفت زلزله از 480 کیلونیوتن به 278 کیلونیوتن کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده حاکی از نرم‌تر شدن سازه در جهت طولی بر اثر نصب میراگر و در نتیجه کاهش برش پایه بوده است. این کاهش می‌تواند در طراحی سوله اثرگذار بوده و منجر به سبک‌تر شدن مقاطع مورد استفاده شود که در بخش "بررسی نسبت تنش اعضا" به آن خواهیم پرداخت.



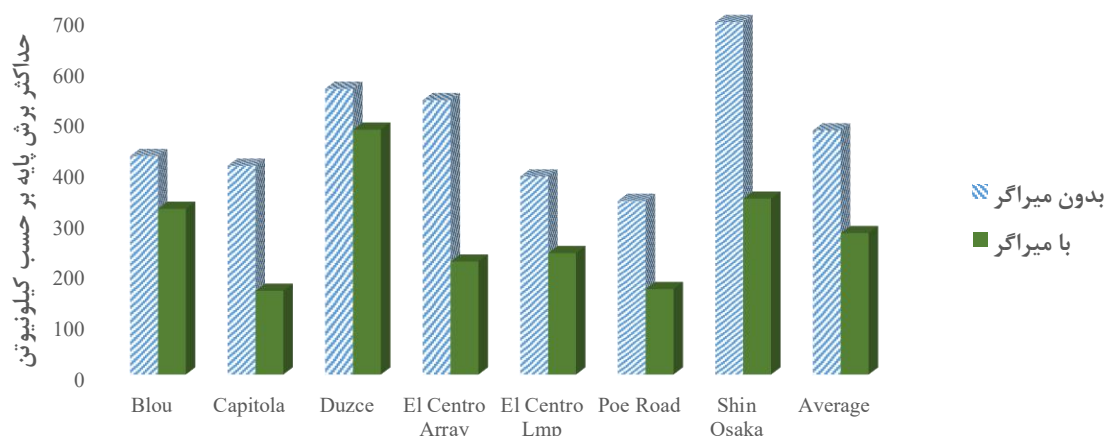
شکل 20: نمودار برش پایه - زمان در سوله شماره یک با و بدون میراگر تحت زلزله Imperial valley-06



شکل 21: نمودارهای حداکثر برش پایه سوله شماره یک در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله



شکل 22: نمودارهای حداکثر برش پایه سوله شماره دو در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

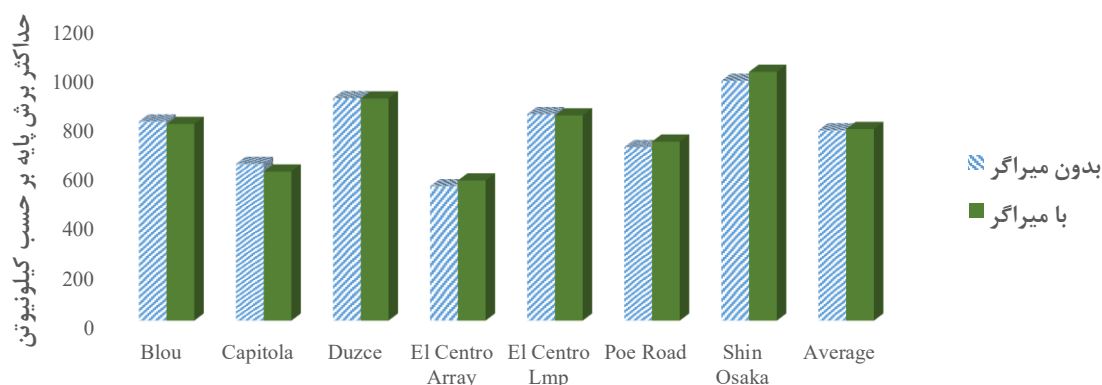


شکل 23: نمودارهای حداکثر برش پایه سوله شماره سه در حالت بدون میراگر و مجهز شده با میراگر تحت هفت رکورد زلزله

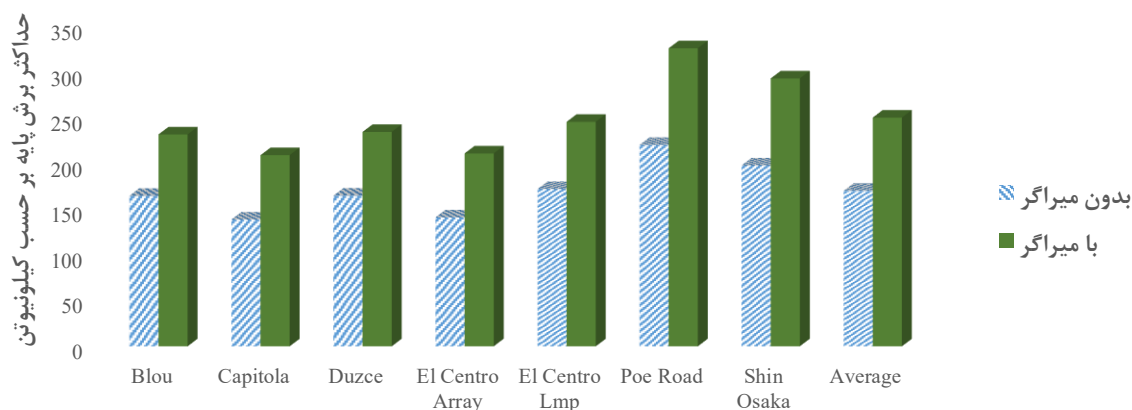
#### • بررسی راستای عرضی سازه‌ها

در این قسمت به ناکارآمد بودن میراگرها در قاب‌های راستای عرضی سازه‌ها اشاره شده است. برای این منظور به بررسی و مقایسه برش پایه سوله‌های شماره یک و سه در قاب‌های راستای عرضی آن‌ها در حالت با و بدون میراگر پرداخته شده است. همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد با اینکه در قاب‌های راستای طولی سازه‌ها، کاهش قابل توجه برش پایه مشاهده شد ولی در قاب‌های عرضی نتیجه کاملاً برعکس است؛ بدین صورت که یا تغییر خاصی مشاهده نشد یا اینکه تأثیر منفی، در این پارامتر از سازه داشته است. این نتیجه برای سایر پارامترهای سرعت، شتاب و جابجایی نیز به همین صورت بوده که یا اثری منفی داشته و یا تغییر زیادی ایجاد نشده است.

در شکل 24 و 25 مقایسه حداکثر برش پایه سازه‌های شماره یک و سه در جهت عرضی قاب‌ها تحت هفت رکورد زلزله در حالت با و بدون میراگر صورت گرفته است که نتایج حاصل نشان دهنده تقریباً ثابت بودن میانگین حداکثر برش پایه در سوله شماره یک و افزایش 32 درصدی میانگین حداکثر برش پایه در سوله شماره سه می‌باشد.



شکل 24: نمودار حداکثر برش پایه سوله شماره یک با و بدون میراگر تحت هفت رکورد زلزله در جهت قاب راستای عرضی



شکل 25: نمودار حداکثر برش پایه سوله شماره دو با و بدون میراگر تحت هفت رکورد زلزله در جهت قاب راستای عرضی

#### – بررسی نسبت تنش اعضا

بررسی دیگری که در این مطالعه انجام شده، مقایسه نسبت تنش طراحی اعضای قاب سوله‌ها در حالت با و بدون میراگر انجام شده است. این مقایسه برای بررسی اقتصادی نصب میراگر در سوله صورت گرفته است. برای سوله شماره یک نسبت تنش بعضی از اعضا کاهش قابل توجهی داشته است، به طور مثال نسبت تنش مهاربندها در طبقه اول سازه بدون میراگر از 1 به  $0/3$  در سازه با میراگر کاهش یافته است و این یعنی کاهش 70 درصدی تنش در بادبندها که مطلوب به نظر می‌رسد. همچنین کاهش 50 الی 60 درصدی نسبت تنش -ها در بعضی تیرهای طبقه مشاهده گردید. اما در سوله شماره دو نتایج مطلوبی حاصل نشد و به طور کلی نصب میراگرها تأثیری در تنش اعضا نداشته است. در سوله شماره سه نیز همانند سوله شماره یک، تنش‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند که برای مثال نسبت تنش بادبندها در طبقه اول سازه بدون میراگر از  $0/8$  به  $0/3$  در سازه با میراگر کاهش می‌یابد و این یعنی کاهش 62 درصدی تنش در مهاربندها و همچنین کاهش 30 الی 50 درصدی تنش‌ها در بعضی تیرهای دیگر سازه مشاهده شد. کاهش تنش اعضا می‌تواند منجر به استفاده مقطعی کوچکتر و در پی آن کاهش هزینه‌های ساخت سوله گردد.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی در سازه‌های صنعتی پرداخته شده است، ابتدا در سازه اولیه که بدون میراگر می‌باشد مهاربندهای شورون در دو جهت سازه جانمایی شده‌اند و در گام بعد میراگرهای اصطکاکی چرخشی در مهاربندها تعبیه شده‌اند و با هفت رکورد زلزله حوزه دور تحلیل و نتایج آن استخراج شده است. با بررسی و مقایسه دو سازه مجهز به میراگر و بدون میراگر، نتایج کلی بدین صورت بوده است که میراگرها در جهت قاب‌های طولی سوله باعث بهبود عملکرد سازه شده‌اند ولی در جهت قاب‌های عرضی، تأثیری بر عملکرد سازه نگذاشته است. به طور خلاصه می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

1) به طور کلی در بعضی از سازه‌ها و رکوردهای زلزله جابجایی کاهش و در بعضی دیگر افزایش یافته است ولی در نهایت با بررسی میانگین حداکثر جابجایی سوله‌ها تحت رکوردهای هفت زلزله نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب سوله‌های شماره یک تا سه دچار افزایش 24، 70 و 78 درصدی حداکثر جابجایی تاج سازه می‌شوند که می‌توان نتیجه گرفت نصب میراگر در جابجایی سازه تأثیر مثبتی ندارد.

- (2) نتایج به دست آمده نشان دهنده کاهش برش پایه در هر سه سوله مورد نظر تحت هر هفت رکورد زلزله است. با بررسی میانگین حداکثر برش پایه سوله‌ها تحت رکوردهای هفت زلزله نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب سوله‌های شماره یک تا سه دچار کاهش 47، 52 و 41 درصدی حداکثر برش پایه سازه می‌شوند که بیان‌کننده تأثیر مثبت و بسزای میراگر، بر روی برش پایه در سوله می‌باشد.
- (3) شتاب هر سه سوله مورد بررسی تحت هر هفت رکورد زلزله کاهش می‌یابد که البته به جز دو رکورد در سوله شماره سه که دچار افزایش شتاب می‌شود. به هر حال با بررسی میانگین حداکثر شتاب سوله‌ها تحت رکوردهای هفت زلزله به ترتیب سوله‌های شماره یک تا سه دچار کاهش 51، 39 و 11 درصدی حداکثر شتاب سازه می‌شوند که نشان دهنده تأثیر مثبت و بسزای میراگر، بر روی شتاب سازه در سوله می‌باشد.
- (4) مطابق نتایج حاصل از بررسی سوله‌های مورد نظر می‌توان به این موضوع اشاره کرد که به طور کلی در بعضی از سازه‌ها و رکوردهای زلزله سرعت کاهش و در بعضی دیگر افزایش یافته است. بدین منظور به بررسی حداکثر سرعت سازه‌ها پرداخته شده است که در مطالعه سوله شماره یک دچار کاهش 22 درصدی و به ترتیب سوله‌های شماره دو و سه دچار افزایش 15 و 32 درصدی سرعت نقطه‌ای در سازه‌ها شده‌اند.
- (5) نتایج حاصل نشان می‌دهند که نسبت تنش اعضا در سوله شماره یک به طور میانگین 60 درصد کاهش و همچنین در سوله شماره سه 47 درصد کاهش داشته است ولی در سوله شماره دو تغییر خاصی مشاهده نشده است.

## مراجع

- [1] Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R. T., & Pall, A. (2004, August). Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal. In *13th world conference on earthquake engineering* (pp. 1-2).
- [2] Chen, W. F., & Lui, E. M. (Eds.). (2005). *Handbook of structural engineering*. CRC press.
- [3] Mualla, I. H., & Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Engineering Structures*, 24(3), 365-371.
- [4] Komachi, Y., Tabeshpour, M. R., Golafshani, A. A., & Mualla, I. (2011). Retrofit of Ressalat jacket platform (Persian Gulf) using friction damper device. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12, 680-691.
- [5] Mirzabagheri, S., Sanati, M., Aghakouchak, A. A., & Khadem, S. E. (2015). Experimental and numerical investigation of rotational friction dampers with multi units in steel frames subjected to lateral excitation. *Archives of civil and mechanical engineering*, 15(2), 479-491.
- [6] Gholizad, A., & Morawej Nekoo, M. (2018). Seismic Performance of a Novel Configuration of Rotational Friction Damper in X Bracings. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), 653-664.
- [7] Taiyari, F., Mazzolani, F. M., & Bagheri, S. (2019). Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 11-20.
- [8] Hosseini, P., Hosseini, M., & Omranizadeh, S. M. (2019). The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators. *Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 35-49.
- [9] Jarrahi, H., Asadi, A., Khatibinia, M., & Etedali, S. (2020). Optimal design of rotational friction dampers for improving seismic performance of inelastic structures. *Journal of Building Engineering*, 27, 100960.

- [10] Naem, A., & Kim, J. (2020). Seismic retrofit of structures using rotational friction dampers with restoring force. *Advances in Structural Engineering*, 23(16), 3525-3540.
- [11] Veismoradi, S., Yousef-beik, S. M. M., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2021). Development and parametric study of a new self-centering rotational friction damper. *Engineering Structures*, 235, 112097.
- [12] Borhan, S., Tajammolian, H., & Yazdian, M. (2021). Evaluation of seismic performance of rotational-friction slip dampers in near-field and far-filed earthquakes. *Earthq. Struct*, 21, 147-159.
- [13] Dehshiri, D., Tajammolian, H., & Mirjalili, M. R. (2024). Investigation on the seismic fragility of steel eccentrically braced frames with vertical link using slotted bolt connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*, doi: 10.22065/jsce.2024.422638.3253
- [14] FEMA P-695. (2009). Quantification of Buildings Seismic Performance Factors. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

