

## Behavioural factor of Pall and Rotational dampers under far field and near field records

Negar Rahimzade<sup>1</sup>, Hashem Shariatmadar<sup>2\*</sup>

1- MSc, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2-Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

Nowadays, in order to reduce the damages of structures during earthquakes, the method of reducing earthquake forces with control tools is used. In this study, the effect of two types of Pall and Rotational frictional dampers in the same bracing frames on behaviour factor to minimize the design force has been analysed. The structures were first modelled and the designed sections for beam, column and bracing were taken and then nonlinear time history analysis for seven near field earthquakes and eight far field earthquakes has been used and it has been compared with nonlinear static analysis. In this study, a total of 9 nonlinear static analyses and 135 dynamic analysis of time history have been used. This behaviour factor was 5.0 for the structure equipped with Pall damper and 4.5 for the structure equipped with Rotational damper. This indicates 42% increase in behaviour factor for structures equipped with Pall damper and 28% increase in this coefficient for structures equipped with Rotational damper, which leads to less seismic responses, more resistant in structure and ultimately more economical design. The results also show an increase in behaviour factor in lower height structures than high-rise structures. On the other hand, the results show an increase in behaviour factor by 12% and 5% in Pall damper and Rotational structures under near field earthquakes compared to the far field. The behaviour factor for structure equipped with Pall damper subjected to near and far acceleration time history is equal to 5 and 4.5, respectively. This factor is calculated to be 4.5 and 4.25 for Rotational damper for near and far records, correspondingly. As a result, the use of Pall dampers in areas close to active faults is suggested.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 April 2021

**Revise Date:** 19 May 2021

**Accept Date:** 28 May 2021

### Keywords:

*Behavior factor*

*Pall damper*

*Rotational damper*

*Nonlinear static analysis*

*Dynamic time history analysis.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.281093.2420>

\*Corresponding author: Hashem Shariatmadar

Email address: shariatmadar@um.ac.ir

## ضریب رفتار سازه‌ی مجهز به میراگر پال و دورانی، تحت اثر نگاشت‌های دور و نزدیک

### گسل

نگار رحیم زاده<sup>۱</sup>، هاشم شریعتمدار<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

۲- استاد، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

امروزه جهت کاهش خسارات وارد بر سازه به هنگام زلزله، از روش کاهش نیروهای زلزله با ابزارهای کنترلی استفاده می‌شود. در این پژوهش، تاثیر دو نوع میراگر اصطکاکی پال و دورانی در قاب‌های مهاربندی یکسان، بر ضریب رفتار سازه جهت به حداقل رساندن نیروی طراحی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پس از مدل‌سازی و به دست آوردن مقاطع تیر، ستون، مهاربند و محاسبه بار لغزش، ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگرهای مورد بحث با انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای هفت زلزله میدان نزدیک و هشت زلزله میدان دور، مورد بررسی قرار گرفته و سپس با تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) مقایسه شده است. در این پژوهش ۹ تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و ۱۳۵ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی صورت گرفته است. ضریب رفتار برای سازه مجهز به میراگر پال، ۵/۰ و برای سازه مجهز به میراگر دورانی ۴/۵ نتیجه‌گیری شده است که بیانگر افزایش ۴۲ درصدی ضریب رفتار برای سازه‌های مجهز به میراگر پال و نیز افزایش ۲۸ درصدی این ضریب برای سازه‌های مجهز به میراگر دورانی می‌باشد. این افزایش در ضریب رفتار باعث پاسخ‌های لرزه‌ای کمتر، سازه مقاوم‌تر و همچنین اقتصادی‌تر شدن طرح می‌شود. همچنین نتایج، افزایش ضریب رفتار در سازه‌های با ارتفاع کمتر نسبت به سازه‌های مرتفع را نشان می‌دهد. از طرفی نتایج نشان‌دهنده افزایش ضریب رفتار به میزان ۱۲٪ و ۵٪ در سازه‌های مجهز به میراگر پال و دورانی تحت زلزله‌های میدان نزدیک نسبت به زلزله‌های میدان دور است. ضریب رفتار سازه مجهز به میراگر پال تحت نگاشت میدان نزدیک و میدان دور به ترتیب معادل ۵ و ۴/۵ و این ضریب برای سازه مجهز به میراگر دورانی تحت نگاشت میدان نزدیک و میدان دور اعداد ۴/۵ و ۴/۲۵ برآورد گردید. در نتیجه استفاده از میراگر پال در مناطق نزدیک به گسل‌های فعال پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: میراگر پال، میراگر دورانی، ضریب رفتار، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.281093.2420	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.281093.2420	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۷	۱۴۰۰/۰۳/۰۷	۱۴۰۰/۰۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۱/۲۵
				* نویسنده مسئول:		هاشم شریعتمدار
				پست الکترونیکی:		shariatmadar@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر به علت وقوع زلزله‌های مخرب، یافتن ایده‌های تازه جهت کاهش نیروی زلزله برای محافظت از سازه‌ها و ساکنان آن‌ها، کاهش هزینه و افزایش سرعت، از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی سازه شده‌است. در روش‌های مرسوم، مقاومت ساختمان با استفاده از سه عامل سختی، قابلیت شکل‌پذیری و استهلاک انرژی، با افزودن اجزای سازه‌ای نظیر دیواربرشی، قاب مهاربندی، قاب خمشی و از این قبیل تامین می‌شود. معایب این روش، بالا رفتن هزینه و وزن سازه می‌باشد. امروزه روش دیگری برای کاهش اثرات زلزله مورد توجه قرار گرفته‌است. انرژی ورودی به سازه باید به طریقی جذب یا استهلاک شود و چون میرایی ذاتی سازه برای کنترل ارتعاش آن کافی نمی‌باشد، از ابزار کنترلی استفاده می‌شود. ابزارهای کنترلی بر اساس روش استهلاک انرژی به غیر فعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند. ابزارهای کنترل غیرفعال، حفاظت سازه را با انعکاس یا جذب بخشی از انرژی، بدون نیاز به نیروی خارجی انجام می‌دهند. یکی از معتبرترین ابزارهای کنترل غیرفعال، میراگرهای اصطکاکی می‌باشد. این میراگرها دارای ویژگی عملکرد بالای غیرخطی، وابسته بودن به نیرو و تغییر دوره تناوب آن با دامنه‌ی ارتعاش می‌باشند. با اتمام زلزله، سازه تحت نیروی فنری کشسان خود به نزدیکی امتداد اصلی خود باز می‌گردد [1]. ایده اولیه استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی به قرن بیستم میلادی برمی‌گردد. پال<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۰ میراگر پال را جهت مستهلک کردن انرژی زلزله از طریق اصطکاک ابداع کرد و به نتایجی نظیر توزیع انرژی در سراسر ارتفاع، نرم شدن سازه بدون از دست دادن خواص خمیری یا ناکشسان، کاهش دامنه ارتعاش و شتاب، محدود کردن انرژی بدون نیاز به منبع گران‌قیمت دست یافت [2]. پاسکویین<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۴ به ارائه تاریخچه‌ای از سیستم‌های جاذب انرژی و نحوه طراحی آن‌ها پرداختند [1]. چری<sup>۳</sup> و فیلیاترالت<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۶ با قرار دادن یک قاب سه طبقه با میراگر اصطکاکی بر روی میز لرزه و اعمال زلزله‌ای با شتاب  $0.9g$  به سازه، متوجه سالم ماندن سازه شدند ولی در نبود میراگر، سیستم در سطح لرزه پایین‌تری دچار خرابی می‌شد [3]. لی<sup>۵</sup> و همکاران نشان دادند که توزیع بار لغزش متناسب با برش طبقه، مؤثرتر از توزیع یکسان بار لغزش در طبقات است [4]. داریوش و آپوستولاکیس<sup>۶</sup> نشان دادند که در قاب‌های خمشی با میراگرهای اصطکاکی، توزیع شتاب، جابجایی نسبی و شکل‌پذیری، یکنواخت‌تر می‌شود [5]. سرجو<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ نمونه نیمه فعال این میراگر را شبیه‌سازی کرده و کاهش پاسخ سازه و نوسانات و سازگاری بیشتر سازه با تحریکات زمین لرزه را دریافتند [6]. در نهایت در سال ۲۰۲۰ سیمنو<sup>۸</sup> و همکاران به معرفی کامل انواع میراگرهای اصطکاکی به لحاظ صرفه اقتصادی و آسانی ساخت و نصب پرداخته و از این جهت استفاده از میراگر اصطکاکی پال و دورانی را جهت کاهش خسارات ناشی از زلزله توصیه کردند [7]. میراگر اصطکاکی دورانی برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط مولا<sup>۹</sup> و بیلینو<sup>۱۰</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها جهت بهبود رفتار نمودار هیستریزیس و پایداری سازه پیشنهاد کردند. همچنین مولا با تحلیل عملکرد میراگر دورانی در یک سازه یک طبقه و سپس تعمیم آن به سازه‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه افزایش استهلاک انرژی و کاهش برش در طبقات بالایی را گزارش داد [8]. در سال ۲۰۱۸ قلی‌زاد و نکو با قرار دادن میراگر دورانی در سازه‌های با مهاربندهای متفاوت، استفاده از مهاربند ضربدری را برای سازه‌های مجهز به این نوع میراگر را توصیه کردند [9]. تحقیقات تکمیلی در این مورد در سال ۲۰۱۸ توسط توس<sup>۱۱</sup> و همکاران روی یک قاب سه طبقه مجهز به میراگر روی میز لرزه صورت گرفت [10]. امینی و همکاران در سال ۲۰۲۰ تاثیر وجود و عدم وجود میراگر اصطکاکی دورانی را در قاب مهاربندی در دوره تناوب یکسان بررسی کردند

۱ - Pall

۲ - Pasquin

۳ - Cherry

۴ - Filiatrault

۵ - Lee

۶ - Apostolakis

۷ - Sarjou

۸ - Simnoe

۹ - Mualla

۱۰ - Belev

۱۱ - Tusset

و کاهش پاسخ سازه و افزایش مقاومت آن را دریافتند [11]. سوک<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگرهای تحت تاثیر اصطکاک را بررسی کردند و افزایش این ضریب تحت اثر اصطکاک به وجود آمده در این میراگرها را نتیجه گرفتند [12]. از طرفی تاثیر بار لغزش بر پاسخ سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی در سال ۲۰۲۰ توسط قربانی و رفویی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت و کاهش پاسخ جابه‌جایی و شتاب با افزایش بار لغزش را نتیجه گرفتند [13]. مایر و همکاران به بررسی رفتار میرایی ۳ سازه با ارتفاع‌های متفاوت و مجهز به میراگرهای متفاوت پرداخته و افزایش ضریب رفتار هر سه سازه با افزودن میراگر را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و اختلاف حدود ۲/۴ درصد را بین دو روش نتیجه گرفتند [14].

در این پژوهش، ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی پال و دورانی مورد بررسی قرار گرفت. ضریب رفتار با استفاده از دو روش تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی محاسبه گردید. با توجه به این که ضریب رفتار متأثر از نوع زلزله می‌باشد، سازه‌ها تحت تاثیر تاریخچه زمانی زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل آنالیز گردید. ضریب رفتار برای حالت استاتیکی و دینامیکی جداگانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. از طرفی ضریب رفتار برای دو نوع میراگر ذکر شده، برای دو نوع زلزله گسل نزدیک و دور از گسل به طور جداگانه برآورد گردید. در این پژوهش ۸ زلزله دور از گسل و ۷ زلزله نزدیک گسل با توجه به منطقه لرزه‌خیزی و نوع خاک منطقه انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت ضریب رفتار محاسبه شده با استفاده از روش‌های مختلف و تحت تاثیر انواع زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک مورد بررسی، تحلیل و مقایسه قرار گرفت و در آخر ضریب رفتار برای سازه‌های مجهز به این دو میراگر پیشنهاد گردید.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش دو میراگر اصطکاکی پال و دورانی که از کاراترین میراگرهای اصطکاکی هستند، در سیستم قاب مهاربندی همگرای متوسط دوبرعی مورد بحث قرار گرفتند. به همین دلیل در این مطالعات، اثرات پیچش لحاظ نمی‌شود. از آنجایی برای بررسی تاثیر ارتفاع سه سازه ۲، ۶ و ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده‌اند، در مجموع ۹ مدل، ۹ تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و ۱۳۵ تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی برای ۱۵ زلزله انجام شده‌است. در مرحله‌ی بعدی بار جانبی شبیه‌سازی شده، بر روی مدل‌های مختلف اعمال شده و تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) آغاز می‌شود. پس از ترسیم منحنی بار-تغییر مکان بام هر مدل، ضریب رفتار طبق روش پیشنهادی آیین‌نامه، تحت عنوان یک نوآوری در این پژوهش محاسبه می‌شود. سپس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی سازه‌های مورد نظر، تحت هفت زلزله میدان نزدیک و هشت زلزله میدان دور، با استخراج مقادیر از نمودار منحنی هیستریزس و مقایسه آن‌ها با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرند. مشخصات زلزله‌های مورد بحث در جداول ۱ و ۲ آمده است. معیار انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها، درجه خطرپذیری منطقه و نوع خاک می‌باشد. لذا شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده، مطابق فرضیات پژوهش، در منطقه با خطرپذیری زیاد و با خاک نوع ۴ انتخاب شده است. همچنین با توجه به فاصله کانونی، نوع گسل و مکانیسم گسیختگی، شتاب‌نگاشت‌های هر دو نوع زلزله میدان دور و میدان نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است.

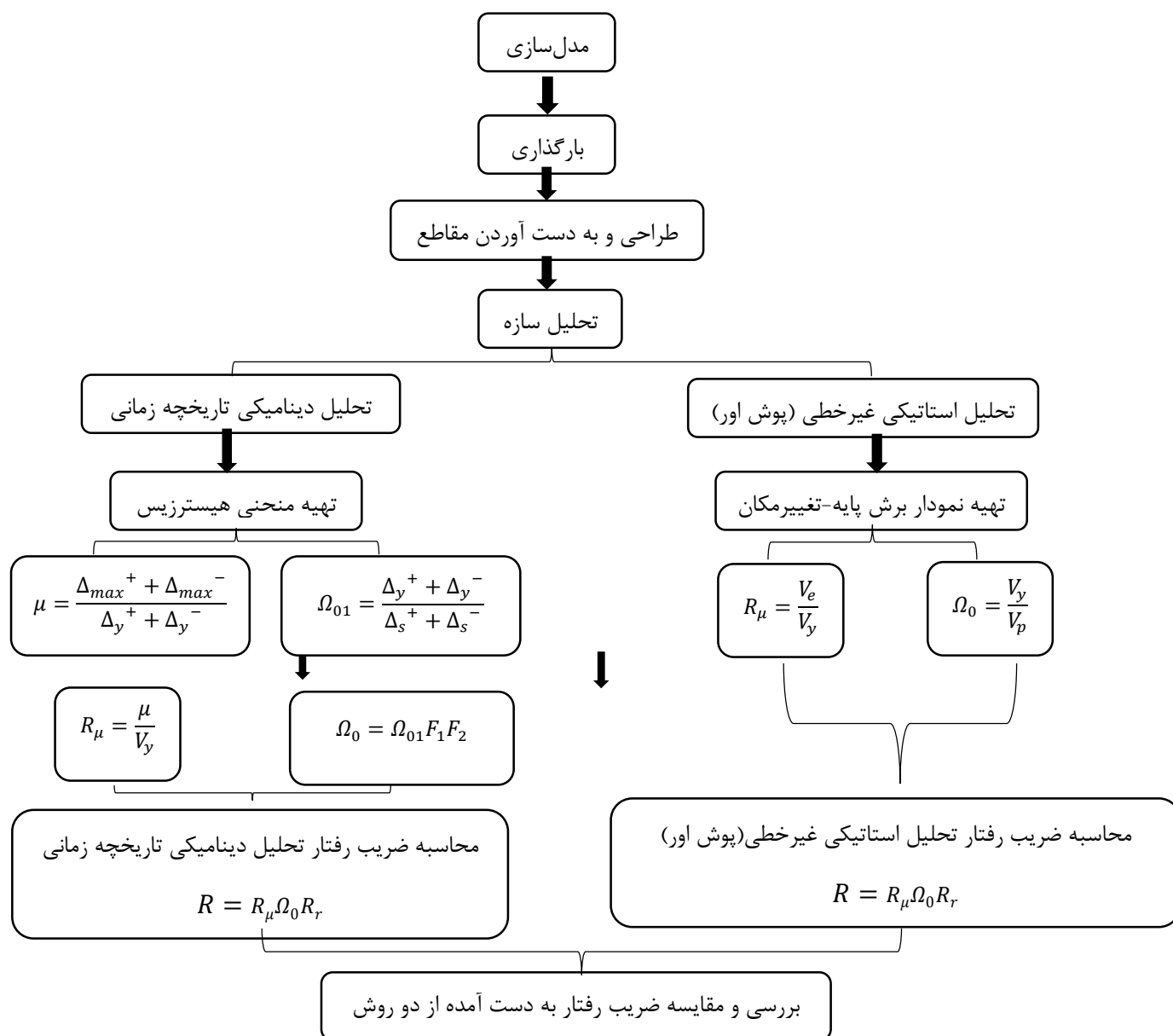
جدول ۱: مشخصات زلزله‌های میدان نزدیک

زلزله	بزرگی (ریشتر)	بیشینه شتاب زمین (g)	فاصله (Km)	زمان (s)
کوبه	6.9	0.4832	7.08	0.01
پارکفیلد	6.1	0.3570	9.90	0.01
پالم اسپرینگ (دیزرت هات)	6.0	0.3310	8.00	0.005
پالم اسپرینگ (شمالی)	6.0	0.6940	8.20	0.005
کوکالی	7.4	0.3760	3.10	0.01
نورت ریج	6.7	0.4328	.26	0.02
لوما پریتا	6.9	0.5144	7.58	0.005

جدول ۲: مشخصات زلزله‌های میدان دور

زلزله	بزرگی (ریشتر)	بیشینه شتاب زمین (g)	فاصله (Km)	(زمان)
تایوان اسمارت (۰۰۴)	6.8	0.1629	7.42	0.01
تایوان اسمارت (۰۰۶)	5.0	0.1903	7.53	0.01
سویر استیشن هیلز	6.9	0.1559	6.58	0.01
نورت ریج (بالدوین)	7.1	0.1677	6.99	0.02
سویر استیشن هیلز (PCL)	7.2	0.1858	6.89	0.01
لوما پریتا (گیلروی)	7.1	0.2122	6.70	0.005
امپریال ولی	7.0	0.2704	7.80	0.01
نورت ریج (هالیوود)	6.8	0.2313	7.90	0.02

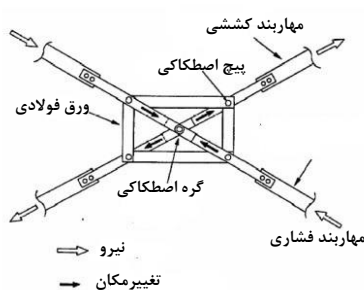
فلوچارت فرایند انجام شده در تعیین ضریب رفتار در شکل ۱ آورده شده است:



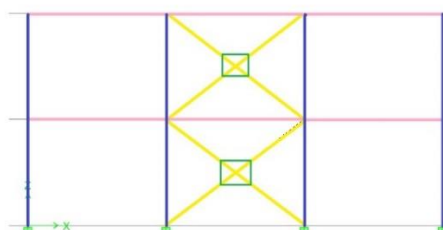
شکل ۱: فلوچارت روند به دست آوردن ضریب رفتار به دو روش استاتیکی غیرخطی و دینامیکی تاریخچه زمانی

## ۳- معرفی میراگر پال و مکانیسم عملکرد آن

میراگر اصطکاکی پال یکی از رایج ترین انواع میراگرهای اصطکاکی است که در بادبندهای کششی، قطری و شورون به کار می-روند. این میراگر شامل یک بادبند و چند ورق فولادی، به همراه پیچ های اصطکاکی پرمقاومت می باشد که در بخش میانی بادبند به نحوی به هم متصل می شوند که بیشترین سطح اصطکاک را با هم داشته باشند. شکل ۲ اجزای تشکیل دهنده این میراگر و شکل ۳ نحوه قرارگیری میراگر و موقعیت مهاربندها را نمایش می دهد. این مجموعه تحت بار لغزش معینی نسبت به یکدیگر شروع به حرکت و لغزش می کنند و میرایی و استهلاک انرژی از این طریق تامین می شود. اگر بار لغزش بهینه میراگر زیاد باشد، اصطکاک و لغزشی در آن به وجود نمی آید؛ در طرف مقابل اگر بار لغزش بهینه میراگر کم باشد، اتلاف و استهلاک انرژی قابل چشم پوشی است. استهلاک انرژی لرزه ای به صورت مکانیکی موجب کشسان باقی ماندن سازه و به تاخیر افتادن تسلیم آن و در نهایت جلوگیری از جاری شدن بادبند و دیگر اجزای سازه ای می شود. به همین دلیل ساخت و استفاده از این میراگر، آسان و بسیار ارزان است، چرا که اصطکاک منبع بسیار ارزان تری نسبت به سایر منابع اتلاف انرژی می باشد.



شکل ۲: میراگر اصطکاکی پال [15].



شکل ۳: موقعیت مهاربندها و میراگر پال در سازه ۲ طبقه.

الگوی ساز و کار میراگر اصطکاکی پال در سال ۱۹۸۶ توسط پال و مارش به شرح زیر پیشنهاد گردیده است:

ابتدای هر دو مهاربند فعال بوده و در فشار و کشش، در ناحیه کشسان قرار دارند. سپس بادبند فشاری کمانش می کند، اما نیروی کشش در بادبند کششی هنوز در ناحیه کشسان در حال افزایش است. طراحی سیستم به گونه ایست که بار لغزش بهینه قبل از جاری شدن بادبند کششی در سازه اعمال شود و به دنبال آن چهار عنصر دیگر میراگر فعال شده و به شکل لوزی درآیند. در نتیجه مهاربند فشاری، شکل خمیده خود را از دست داده و بعد از لغزش، صاف و مستقیم شود. میراگر با رسیدن نیروی مهاربند کششی به بار لغزش بهینه، شروع به عمل کرده و موجب لغزیدن بالشتک های اصطکاکی می شود. در نتیجه طول بادبند کششی بدون افزایش نیرو افزایش می یابد. تغییر بار به جهت مخالف، سبب به کشش افتادن مهاربندی که به شکل صاف درآمده بود، می شود و از همین لحظه جذب انرژی آغاز می-

شود. نیروی بادبند اول که حالا تحت فشار است، به حد کماتش رسیده و در سیستم، رفتاری مشابه مرحله دوم دیده می‌شود. با افزایش بار، مرحله سوم تکرار شده و چرخه رفت و برگشتی بارگذاری-باربرداری تکمیل می‌شود [10].

### ۱-۳- محاسبه طیف طرح بار لغزش در میراگر پال

گام اول در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی، تعیین درست و دقیق بار لغزش میراگر می‌باشد. بر اساس مطالعات پال، طرح بار لغزش لرزه‌ای سازه‌های دارای میراگر پال طبق روابط ۱ تا ۸ می‌باشد [16]:

در گام اول طراحی یک قاب مهاربندی‌نشده، در ترکیب بارهای معمولی (بار ثقیلی و بار باد) انجام می‌شود. زمان تناوب غالب سازه بدون بادبند،  $T_u$ ، برای این سازه‌ی تقویت نشده به دست آورده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن صرفه‌ی اقتصادی، طراحی مقاطع مهاربندها به نحوی صورت می‌گیرد که اولین و مهم‌ترین شرط  $\frac{T_u}{T_b} < 0.4$  که در آن  $T_b$  زمان تناوب غالب سازه با بادبند است، حتما رعایت شده باشد [16]. پس از آن زمان تناوب غالب زمین محل احداث سازه،  $T_g$ ، برحسب  $M_L$  که بزرگی محلی زلزله است، طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$T_g = 2\pi(65 - 7.5 M_L) \quad 5 \leq M_L \leq 7 \quad (1)$$

مقادیر مرتبط با زمان تناوب‌ها، باید در محدوده تعیین‌شده‌ی روابط (۲) تا (۴) قرار گیرند:

$$0.2 \leq \frac{T_b}{T_u} \ll 0.8 \quad (2)$$

$$0.005 \leq \frac{a_g}{g} \ll 0.04 \quad (3)$$

$$0.05 \leq \frac{T_g}{T_u} \ll 20 \quad NS \ll 10 \quad (4)$$

$NS$  تعداد طبقات سازه،  $a_g$  حداکثر شتاب زمین و  $g$  شتاب گرانش زمین می‌باشد.

در صورت لزوم، ضریب طرح،  $\alpha$ ، طبق رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\alpha = (-1.24NS - 0.31) \frac{T_b}{T_u} + 1.04NS + 0.43 \quad (5)$$

بار لغزش کل،  $V_0$ ، از رابطه ۶ به دست می‌آید که در آن  $m$  وزن سازه می‌باشد.

$$\frac{V_0}{m a_g} = \frac{T_g}{T_u} \alpha \quad (6)$$

$V_{S(i)}$ ، برش لغزش هر طبقه از تقسیم برش لغزش کل بین طبقات، طبق رابطه ۷ و بار لغزش هر طبقه،  $P_{0ij}$ ، طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$V_{S(i)} = \frac{V_0}{NS} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{Di}} P_{0ij} \cos \theta = V_{S(i)} \quad (8)$$

$\theta$  زاویه هر مهاربند با تیر و  $N_{Di}$  تعداد میراگرهای اصطکاکی در طبقه  $i$ ام را نشان می‌دهد. با روابط داده‌شده مقادیر بار لغزش سازه‌های مورد مطالعه در جداول ۳ تا ۵ آورده شده است:

جدول ۳: بار لغزش بهینه محاسبه شده برای میراگر اصطکاکی پال در سازه ۲ طبقه

بار لغزش (T)	سازه ۲ طبقه
20.02	طبقه دوم
19.29	طبقه اول

جدول ۴: بار لغزش بهینه محاسبه شده برای میراگر اصطکاکی پال در سازه ۶ طبقه

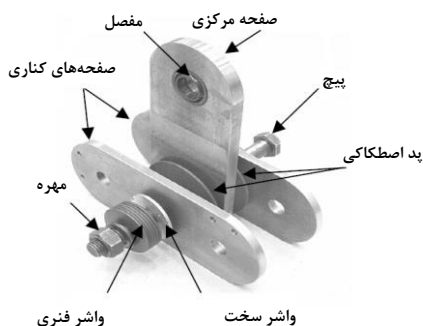
سازه ۶ طبقه	بار لغزش (T)
طبقه ششم	29.02
طبقه پنجم	28.14
طبقه چهارم	28.00
طبقه سوم	26.89
طبقه دوم	26.02
طبقه اول	24.00

جدول ۵: بار لغزش بهینه محاسبه شده برای میراگر اصطکاکی پال در سازه ۱۰ طبقه

سازه ۱۰ طبقه	بار لغزش (T)
طبقه دهم	31.02
طبقه نهم	29.14
طبقه هشتم	29.00
طبقه هفتم	25.50
طبقه ششم	26.11
طبقه پنجم	23.19
طبقه چهارم	22.99
طبقه سوم	22.15
طبقه دوم	22.01
طبقه اول	21.00

#### ۴- معرفی میراگر دورانی و مکانیسم عملکرد آن

میراگرهای دورانی شامل دو صفحه عمودی و دو صفحه افقی می‌باشند که به مهاربندهای مفصلی متصل می‌شوند. بین این صفحات، چندلایه اصطکاکی قرار داده می‌شود که به کمک پیچ‌های پیش‌تنیده به هم متصل شده و در مرکز قاب نصب می‌شوند. جهت جلوگیری از تغییر نیروی بین این صفحات، واشر فنری به کار رفته و برای این که از خستگی صفحات جلوگیری شود، واشر سخت بین آن‌ها قرار داده می‌شود. شکل ۴ اجزای تشکیل‌دهنده میراگر دورانی را نشان می‌دهد. جلوگیری مهاربندها از چرخش صفحات، موجب عملکرد میراگر به صورت یک گره صلب می‌شود. اگر گشتاور اعمال شده به مقاومت اصطکاکی غلبه کند، چرخش در گره صلب آغاز می‌شود و استهلاک انرژی از طریق نیروی اصطکاکی موجود بر وجه تماس انجام می‌شود.



شکل ۴: قطعات میراگر اصطکاکی دورانی [10].



## ۴-۱- برآورد بار لغزش بهینه میراگر اصطکاکی دورانی

در میراگر دورانی نیرویی که گشتاور ناشی از آن، از گشتاور اصطکاکی صفحات پیرامون آن نقطه، بیشتر باشد و شرایط لغزیدن صفحات اصطکاکی روی هم را فراهم کند، نیروی لغزش نامیده می‌شود. مقدار حداقل نیروی لغزش، نیرویی است که بارگذاری متوسط و نیروهای برشی تأثیری در لغزش میراگر نداشته باشند. مقدار حداکثر نیروی لغزش، نیرویی است که قبل از شروع تسلیم هر یک از اجزای سازه، میراگر دچار لغزش شده باشد و این لغزش تا زمان به حداکثر رسیدن مقدار انرژی تلف شده به وسیله عمل اصطکاک ادامه داشته باشد. موالا با انجام تحلیل سازه، لنگر لغزش بهینه،  $(M_{FOPT})$ ، را به صورت رابطه‌ی ۹ به دست آورد [17].

$$\frac{M_{FOPT}}{h_a E A_b} = \frac{u_{A_0}}{L} \cos v^2 \quad (9)$$

$h_a$  ارتفاع میراگر،  $u_{A_0}$  تغییر مکان جانبی قاب،  $A_b$  سطح مقطع بادبند،  $E$  مدول کشسانی فولاد،  $L$  طول بادبند و  $v$  زاویه بادبند نسبت به محور افقی می‌باشد. با روابط داده شده مقادیر لنگر لغزش سازه‌های مورد مطالعه در جداول ۶ تا ۸ آورده شده است:

جدول ۶: لنگر لغزش بهینه برای سازه ۲ طبقه در میراگر اصطکاکی دورانی

طبقه	فاصله (m)	لنگر لغزش بهینه بر اساس رابطه ۹ (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
2	0.006230	6.893	5.9
1	0.002988	8.954	6.8

جدول ۷: لنگر لغزش بهینه برای سازه ۶ طبقه در میراگر اصطکاکی دورانی

طبقه	فاصله (m)	لنگر لغزش بهینه بر اساس رابطه ۹ (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
6	0.04344	48.06	40.50
5	0.03373	37.32	30.50
4	0.02490	27.54	25.00
3	0.01670	18.47	17.00
2	0.00975	10.78	12.00
1	0.00408	4.51	8.00

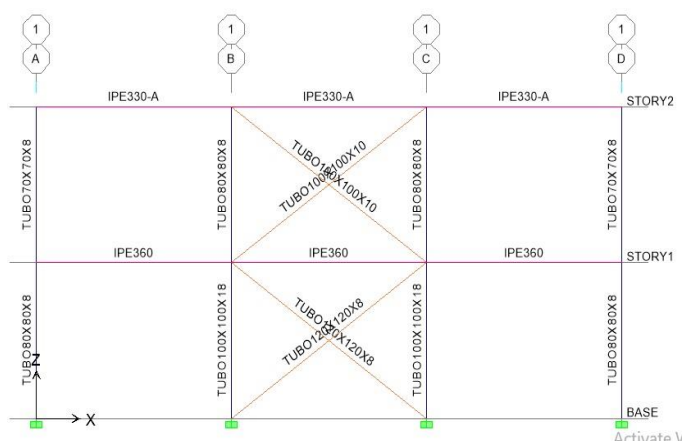
جدول ۸: لنگر لغزش بهینه برای سازه ۱۰ طبقه در میراگر اصطکاکی دورانی

طبقه	فاصله (m)	لنگر لغزش بهینه بر اساس رابطه ۹ (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
10	0.11630	193.012	180.50
9	0.09893	164.184	116.20
8	0.08220	181.892	180.20
7	0.06620	146.118	140.50
6	0.05120	141.619	138.00
5	0.03816	105.550	101.50
4	0.02640	87.626	85.00
3	0.01680	65.056	60.00
2	0.00933	36.129	38.70
1	0.00351	13.592	15.50

## ۵- طراحی و مدل سازی سازه‌ها

طراحی سازه‌های مورد مطالعه در نرم افزار ETABS 9.7.4 با فرض رفتار دوخطی مصالح انجام شده است [18,19]. بارگذاری ثقلی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران و بارگذاری لرزه‌ای مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و طراحی به روش حالت حدی می‌باشد. بار مرده طبقات  $590 \frac{Kg}{m^2}$  و بار مرده بام  $565 \frac{Kg}{m^2}$ ، بار مرده خطی ناشی از دیوار  $250 \frac{Kg}{m}$ ، بار زنده طبقات  $200 \frac{Kg}{m^2}$  و بار زنده بام نیز  $150 \frac{Kg}{m^2}$  می‌باشد. روش انتخابی برای بارگذاری لرزه‌ای، روش استاتیکی معادل می‌باشد. سازه مسکونی و با اهمیت متوسط  $I=1$  می‌باشد. سازه از نوع قاب ساده مهاربندی همگرای معمولی فولادی و همچنین خاک از نوع IV و منطقه با خطرپذیری زیاد  $A=0.3$  است. مهاربندها

در قاب میانی مطابق شکل ۵ قرار داده شده‌اند. مصالح انتخابی از فولاد ST37 با تنش تسلیم  $3700 \frac{Kg}{cm^2}$  در نرم‌افزار مدل شده، تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌های با و بدون میراگر، مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ کنترل گردیده و پس از اطمینان از صلاحیت سازه با میراگر از نظر تغییرمکان جانبی طبقات، طراحی مقاطع انجام شده است. مقاطع به‌دست آمده برای هر سازه به شرح جدول ۹ تا ۱۱ می‌باشد. به عنوان نمونه، نمای شماتیک سازه ۲ طبقه پس از طراحی در شکل ۵ آورده شده‌است. پس از طراحی و کنترل صلاحیت سازه‌های مدل شده به لحاظ تغییرمکان جانبی سازه، برای وارد کردن اثر میراگرهای اصطکاکی، مقاطع به‌دست آمده برای تیر، ستون و مهاربندها در نرم‌افزار OPENSEES، با فرض رفتار کشسان-ناکشسان و بارگذاری رفت و برگشتی با شیب یکسان به صورت المان فیزی و از جنس مصالح steel01 با ضریب سخت‌شوندگی کرنشی  $0/3$  وارد شده‌است. سپس میراگرهای اصطکاکی پال و دورانی به صورت المان نقطه‌ای با اعمال بار لغزش محاسبه شده، تحلیل گردیده و نمودارهای برش پایه-تغییرمکان در تحلیل استاتیکی پوش اور و نمودار هیستریزس در تحلیل دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید.



شکل ۵: نمای شماتیک سازه ۲ طبقه طراحی شده.

جدول ۹: مشخصات اعضای قاب مهاربندی ۲ طبقه

تیر	مهاربند	ستون میانی	ستون کناری	سازه ۲ طبقه
IPE360	BOX120×120×8	BOX100×100×18	BOX80×80×8	طبقه دوم
IPE330	BOX100×100×10	BOX80×80×8	BOX70×70×8	طبقه اول

جدول ۱۰: مشخصات اعضای قاب مهاربندی ۶ طبقه

تیر	مهاربند	ستون میانی	ستون کناری	سازه ۶ طبقه
PE360	BOX140×140×16	BOX220×220×60	BOX140×140×25	طبقه ششم
IPE360	BOX140×140×16	BOX220×220×55	BOX140×140×16	طبقه پنجم
IPE360	BOX140×140×16	BOX180×180×35	BOX120×120×25	طبقه چهارم
IPE360	BOX120×120×20	BOX160×160×25	BOX120×120×20	طبقه سوم
IPE360	BOX120×120×20	BOX140×140×16	BOX120×120×10	طبقه دوم
IPE330	BOX100×100×10	BOX120×120×16	BOX100×100×18	طبقه اول

جدول ۱۱: مشخصات اعضای قاب مهاربندی ۱۰ طبقه

تیر	مهاربند	ستون میانی	ستون کناری	سازه ۱۰ طبقه
IPE360	BOX140×140×32	BOX400×400×75	BOX240×240×35	طبقه دهم
IPE360	BOX140×140×32	BOX360×360×75	BOX160×160×20	طبقه نهم
IPE360	BOX140×140×32	BOX340×340×75	BOX140×140×25	طبقه هشتم
IPE360	BOX140×140×25	BOX300×300×65	BOX140×140×20	طبقه هفتم
IPE360	BOX140×140×20	BOX260×260×60	BOX120×120×20	طبقه ششم
IPE360	BOX140×140×20	BOX200×200×60	BOX100×100×18	طبقه پنجم
IPE360	BOX140×140×16	BOX180×180×40	BOX100×100×16	طبقه چهارم
IPE360	BOX140×140×16	BOX140×140×32	BOX90×90×16	طبقه سوم
IPE360	BOX120×120×20	BOX120×120×20	BOX90×90×8	طبقه دوم
IPE330	BOX100×100×18	BOX70×70×10	BOX80×80×8	طبقه اول

## ۶- نحوه محاسبه ضریب رفتار

ضریب کاهش مقاومت،  $R$ ، جهت به حداقل رساندن مقدار نیروهای طراحی و استفاده بهینه از ظرفیت سازه‌ها برای استهلاک انرژی لرزه‌ای از زمان آغاز محدوده‌ی رفتار غیرخطی مصالح در استانداردهای تحلیل و طراحی کاربرد دارد. بر اساس آیین نامه‌های ATC19 و ATC34 ضریب رفتار به صورت رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود [21 و 20].

$$R = R_{\mu} \Omega_0 R_y \quad (10)$$

$R_y$  ضریب مقاومت شکل‌پذیری است که در روش حالت حدی برابر واحد است.  $R_{\mu}$  نشانگر ظرفیت شکل‌پذیری سازه در ناحیه غیرخطی مصالح و  $\Omega_0$  ضریب مقاومت افزون می‌باشند. جهت در نظر گرفتن اثرات میراگرهای الحاقی، پارامتر  $R_{\xi}$  طبق رابطه ۱۱ پیشنهاد شده است [22].

$$R_{\xi} = \frac{\bar{R}}{R} \quad (11)$$

$R$  ضریب رفتار سازه با میرایی ذاتی تا ۵٪ و  $\bar{R}$  ضریب رفتار سیستم با میراگر می‌باشد.

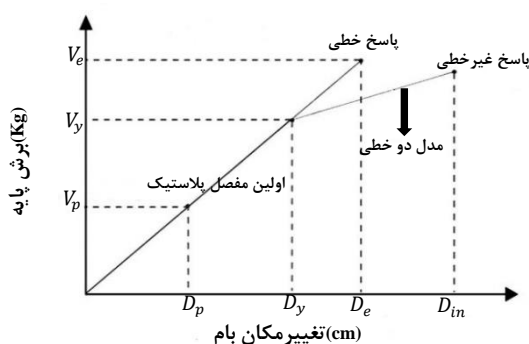
## ۶-۱- محاسبه‌ی ضریب رفتار بر مبنای تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

نمودار برش پایه-تغییرمکان بام مربوط به یک تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) با فرض تقریب دوخطی به همراه عناصر اصلی ضریب رفتار در رابطه ۱۲ برحسب شکل ۶ آورده شده است [21].

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y} = \frac{D_e}{D_y} \quad \text{و} \quad \Omega_0 = \frac{V_y}{V_p} = \frac{D_y}{D_p} \quad (12)$$

$V_p$  مقاومت برش پایه‌ی طرح،  $D_p$  تغییرمکان طرح،  $V_y$  مقاومت تسلیم سازه،  $D_y$  تغییرمکان تسلیم تعیین شده پس از دوخطی کردن نمودار،  $V_e$  بیشینه‌ی مقاومت کشسان،  $D_e$  بیشینه‌ی تغییرمکان کشسان و  $D_{in}$  تغییرمکان در نقطه شکست می‌باشد.

$V_y$  اولین برش قرائت شده پس از دوخطی کردن نمودار برش پایه-تغییرمکان، در نقطه شکست می‌باشد.  $V_e$  پس از دوخطی کردن نمودار برش پایه-تغییرمکان، با امتداد شیب اول تا تغییرمکان نهایی سازه به دست می‌آید.  $V_p$  نقطه تغییر شیب منحنی برش منحنی در محل تشکیل اولین مفصل خمیری می‌باشد. با استفاده از نرم افزار opensees، مقادیر ضریب رفتار ۳ سازه‌ی مورد بحث با افزودن میراگرها در جدول ۱۲ ذکر می‌گردد.



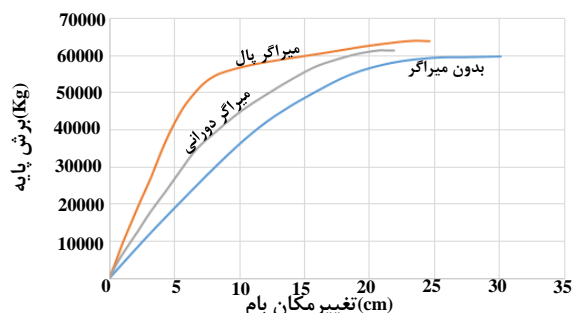
شکل ۶: منحنی ظرفیت یک مدل سازه ای [21].

جدول ۱۲: محاسبه ضریب رفتار سازه‌های مورد مطالعه به روش استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

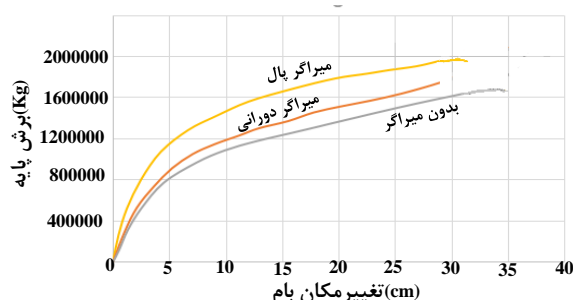
سازه	$V_e (kg)$	$V_y (kg)$	$V_p (kg)$	$R_\mu$	$\Omega_0$	R	$R_\xi$
۲ طبقه بدون میراگر	107223	64665	30618	1.65	2.11	3.05	-
۲ طبقه مجهز به میراگر پال	146174	64394	30054	2.26	2.14	4.86	1.38
۲ طبقه مجهز به میراگر دورانی	102169	61499	23337	1.66	2.63	4.37	1.25
۶ طبقه بدون میراگر	2603445	1308620	656222	1.98	1.99	3.96	-
۶ طبقه مجهز به میراگر پال	5168595	1699981	1024702	3.04	1.65	5.04	1.27
۶ طبقه مجهز به میراگر دورانی	2414788	1138750	534755	2.12	2.12	4.51	1.13
۱۰ طبقه بدون میراگر	5291148	2577818	1415197	2.05	1.82	3.73	-
۱۰ طبقه مجهز به میراگر پال	7506122	2318352	1530366	3.23	1.51	4.90	1.31
۱۰ طبقه مجهز به میراگر دورانی	1547432	605953	358899	2.55	1.68	4.31	1.15
میانگین در سازه بدون میراگر	2667272	1317035	700679	1.90	1.97	3.73	-
میانگین در سازه مجهز به میراگر پال	4273630	1360909	861708	2.84	1.77	4.93	1.32
میانگین در سازه مجهز به میراگر دورانی	1354796	602067	305670	2.11	2.15	4.40	1.18

### ۶-۱-۱- بررسی و تحلیل نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش اور)

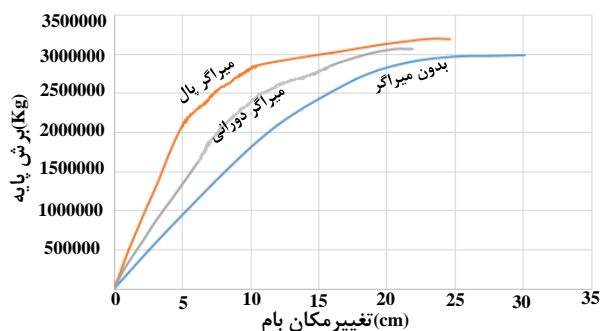
۱- ضریب رفتار قاب‌های مجهز به میراگرهای پال و دورانی به ترتیب ۳۲٪ و ۱۸٪ نسبت به قاب‌های مهاربندی بدون میراگر افزایش دارد. این افزایش نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر سازه‌ی مجهز به میراگر اصطکاکی برای اتلاف انرژی زلزله با وارد شدن به محدوده‌ی رفتار غیرخطی مصالح، کاهش پاسخ لرزه‌ای و در نتیجه اقتصادی‌تر شدن طرح می‌باشد. عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر میراگر پال نسبت به دورانی به میزان ۱۲٪ نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر میراگر پال برای اتلاف انرژی ورودی و عملکرد لرزه‌ای بهتر آن نسبت به میراگر دورانی می‌باشد. همچنین ضریب رفتار سازه با ارتفاع کمتر، بیشتر از سازه‌های بلند است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر هر دو میراگر در سازه کوتاه، به علت کم‌تر بودن تعداد مفاصل خمیری در آن است. نمودار پوش اور نمونه سازه ۲، ۶ و ۱۰ طبقه در شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده است:



شکل ۷: منحنی پوش اور سازه ۲ طبقه در حالت با میراگر پال، دورانی و بدون میراگر.



شکل ۸: منحنی پوش اور سازه ۶ طبقه در حالت با میراگر پال، دورانی و بدون میراگر.



شکل ۹: منحنی پوش اور سازه ۱۰ طبقه در حالت با میراگر پال، دورانی و بدون میراگر.

۲- با مقایسه منحنی پوش اور سازه‌های مورد بحث نتیجه می‌شود قرار دادن میراگر اصطکاکی پال و دورانی در سازه، نمودار را به سمت بالا سوق می‌دهد که نشانگر بالارفتن مقاومت تسلیم در سازه‌های با میراگر پال و دورانی می‌باشد. همچنین طبق شکل ۷ تا ۹ سازه با میراگر پال نسبت به سازه با میراگر دورانی، دارای مقاومت تسلیم بیشتر در مفاصل خمیری است و اولین مفصل خمیری در سازه با میراگر پال در زمان دیرتری نسبت به میراگر دورانی رخ می‌دهد که موجب افزایش مقاومت سازه در زلزله‌های با شدت بالا با اضافه شدن این میراگرها می‌باشد.

۳- همچنین سازه با میراگر نسبت به سازه بدون میراگر در منحنی پوش اور به سمت چپ سوق پیدا کرده است که گواهِ بر کاهش تغییر مکان تسلیم در سازه با میراگر اصطکاکی، نسبت به سازه بدون میراگر می‌باشد. این کاهش تسلیم در میراگر پال نسبت به دورانی به میزان بیشتری مشاهده می‌شود.

۴- در هر سازه‌ای که مقدار ضریب اضافه مقاومت،  $\Omega_0$ ، عدد بزرگتری باشد، حاشیه ایمنی کمتر می‌شود. سازه با میراگر دورانی دارای حاشیه ایمنی کمتر نسبت به سازه با میراگر پال می‌باشد. همچنین سخت‌شدگی کرنشی باعث افزایش مقاومت پس از تسلیم و به دنبال آن افزایش مقاومت سازه می‌شود. با توجه به شکل ۷ تا ۹ پس از تسلیم سازه و تغییرشیب منحنی، سازه مجهز به میراگر، با شیب کمتر به نقطه مقاومت نهایی رسیده است. چون در سازه با میراگر دورانی، پس از تسلیم در اولین مفصل خمیری شیب نمودار بیشتر از سازه با میراگر پال است، در نتیجه در این سازه نسبت به سازه مجهز به میراگر پال، مقاومت پس از تسلیم به میزان بیشتری افزایش یافته است. همچنین در هر سه نوع سازه، ضریب اضافه مقاومت متاثر از ارتفاع بوده و در سازه با ارتفاع کمتر، ضریب اضافه مقاومت کمتر و در نتیجه حاشیه ایمنی بیشتر مشاهده می‌شود.

۵- ضریب کاهش شکل‌پذیری،  $R_{\mu}$ ، هر چه بزرگتر باشد، قابلیت استهلاک انرژی سازه در برابر نیروهای زلزله بیشتر است. به عبارت دیگر با افزایش تغییرشکل نهایی سازه، انهدام به تأخیر می‌افتد و بر حاشیه ایمنی سازه افزوده می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل سازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد مقدار ضریب شکل‌پذیری در میراگرهای پال و دورانی به ترتیب، ۴۹ و ۱۱ درصد افزایش یافته است که این امر گواه تأخیر بیشتر در انهدام سازه‌ی با میراگر پال نسبت به سازه با میراگر دورانی است. با بیشتر بودن این ضریب در سازه‌های بلند مورد مطالعه نتیجه می‌شود در سازه‌های بلند، آسیب به سازه در بازه زمانی دیرتری شروع می‌شود.

۶- ضریب رفتار حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) برای سازه بدون میراگر  $3/73$  می‌باشد که در مقایسه با آیین‌نامه ۲۸۰۰ به علت دست بالا بودن این تحلیل و در نظر گرفتن بدترین حالت، حدود ۶٪ بیشتر می‌باشد. ضریب رفتار سازه‌های کوتاه‌تر، با ضریب رفتار ارائه شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ بیشتر تطابق دارد.

## ۶-۲- محاسبه‌ی ضریب رفتار بر مبنای تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی

در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح محاسبه شده است. پس از طراحی سازه‌های مدل شده، برای وارد کردن اثر میراگرهای اصطکاکی، مقاطع به‌دست آمده برای تیر، ستون و مهاربندها در نرم‌افزار OPENSEES، با فرض رفتار کشسان-ناکشسان و بارگذاری رفت و برگشتی با شیب یکسان به صورت المان فیبری و از جنس مصالح steel01 با ضریب سخت‌شدگی کرنشی  $0/3$  وارد شده‌است. در این روش ماتریس سختی و میرایی از یک گام به گام دیگر تغییر می‌کند، اما در طول هر گام زمانی ثابت است. پاسخ سازه مدل شده تحت شتاب زلزله به روش عددی و برای هر گام زمانی محاسبه شده است. تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی از تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت تاثیر شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های میدان نزدیک و میدان دور که منطبق بر شرایط لرزه‌خیزی سازه‌ها بوده‌اند انتخاب شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌ها بر مبنای حداکثر شتاب سایت پروژه مقیاس گردیدند. ضریب رفتار بر مبنای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با فرض رفتار کشسان-ناکشسان و بارگذاری-باربرداری با شیب یکسان، مطابق شکل ۱۰ به دست می‌آید [21]. خطوط موازی با محورهای افقی و قائم، از نقاط L و N که مربوط به جابه‌جایی‌های حداکثر منفی و مثبت هستند، مجانب منحنی هیستریزس رسم شده را در نقاط S و H قطع می‌کنند. در نتیجه حداکثر جابه‌جایی‌های منفی و مثبت OM و OC و حداکثر جابه‌جایی‌های مثبت و منفی تسلیم سازه OB و OF به‌دست می‌آیند. نقاط T و K نیز که محل تقاطع خط مجانب رسم شده از مرکز با خطوط مجانب ناحیه‌ی سخت‌شدگی کرنشی هستند، نشان‌دهنده‌ی تشکیل اولین مفصل خمیری می‌باشند. ضریب رفتار و سه عنصر اصلی آن طبق روابط ۱۳ تا ۱۵ به دست می‌آید [21]:

$$\mu = \frac{\Delta_{max}^+ + \Delta_{max}^-}{\Delta_y^+ + \Delta_y^-} \quad (13)$$

$$R_{\mu} = \frac{\mu}{c_1} \quad (14)$$

$$\Omega_{01} = \frac{\Delta_y^+ + \Delta_y^-}{\Delta_s^+ + \Delta_s^-} \quad (15)$$

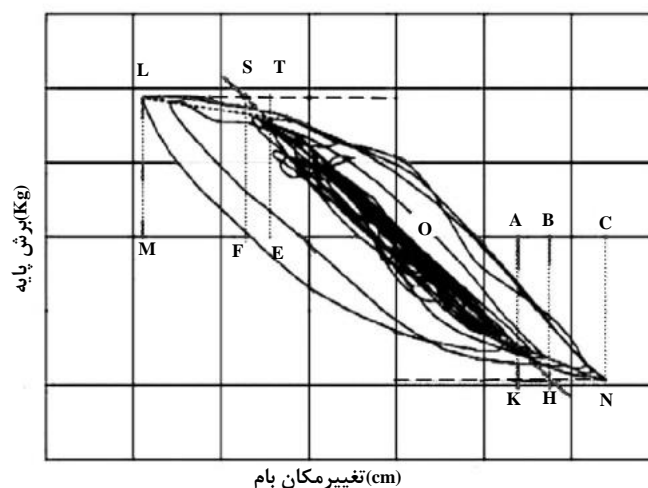
$C_1$  نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان غیرارتجاعی به بیشینه‌ی تغییرمکان ارتجاعی،  $\mu$  ضریب شکل‌پذیری،  $\Omega_{01}$  ضریب مقاومت افزون اولیه،  $\Delta_{max}^+$  تغییرمکان بیشینه‌ی مثبت،  $\Delta_{max}^-$  تغییرمکان بیشینه‌ی منفی،  $\Delta_y^+$  تغییرمکان بیشینه‌ی مثبت تسلیم کلی قاب،  $\Delta_y^-$  تغییرمکان بیشینه‌ی منفی تسلیم کلی قاب،  $\Delta_s^+$  تغییرمکان مثبت مربوط به تشکیل اولین مفصل خمیری،  $\Delta_s^-$  تغییرمکان منفی مربوط به تشکیل اولین مفصل خمیری و  $R_\mu$  نشانگر ظرفیت شکل‌پذیری سازه در ناحیه غیرخطی مصالح می‌باشند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، ضریب  $\Omega_0$  در محدوده‌ی بین  $1/5$  الی  $3/5$  و طبق رابطه ۱۶ به دست می‌آید [23].

$$\Omega_0 = \Omega_{01} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \quad (16)$$

$\Omega_0$  مقاومت افزون،  $F_1$  ضریب اضافه مقاومت سیستم،  $F_2$  ضریب اضافه مقاومت مصالح،  $F_3$  ضریب اضافه مقاومت طراحی هستند و به ترتیب  $1/0.5$ ،  $1/1.5$ ،  $1/1.0$  می‌باشند.

با استفاده از نرم‌افزار OPENSEES، ضرایب به دست آمده طبق تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، برای سازه‌های مورد مطالعه در جدول ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۰: منحنی هیستریزس فرضی برای محاسبه‌ی تغییرمکان‌های مورد نظر [22].

جدول ۱۳: متوسط ضریب رفتارهای محاسبه شده بر مبنای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

سازه	نوع سازه	R	$R_{\xi}$
دوطبقه	بدون میراگر	3.20	-
	مجهاز به میراگر پال	4.60	1.44
	مجهاز به میراگردورانی	4.16	1.30
شش طبقه	بدون میراگر	3.49	-
	مجهاز به میراگر پال	4.67	1.36
	مجهاز به میراگردورانی	4.42	1.26
ده طبقه	بدون میراگر	3.43	-
	مجهاز به میراگر پال	4.55	1.33
	مجهاز به میراگردورانی	4.14	1.20
مقادیر متوسط	بدون میراگر	3.37	-
	مجهاز به میراگر پال	4.60	1.36
	مجهاز به میراگردورانی	4.24	1.25

## ۶-۲-۱- بررسی و تحلیل نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی و مقایسه با نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی

با استفاده از پانزده شتاب‌نگاشت زلزله‌های ذکر شده، نتایج به شرح زیر است:

۱- افزودن میراگرهای پال و دورانی به ترتیب باعث افزایش ضریب رفتار سازه به میزان ۳۶٪ و ۲۵٪ می‌شود. این افزایش در سازه‌های کوتاه‌تر، بیشتر از سازه‌های بلند می‌باشد. از آنجایی که تعداد مفاصل خمیری در سازه کوتاه‌تر، کمتر از تعداد مفاصل خمیری در سازه بلند است، لذا ضریب رفتار بزرگتر در سازه‌های کوتاه‌تر، منطقی و صحیح می‌باشد. این موضوع در سازه مجهز به میراگر دورانی هم مشاهده می‌شود، اما تاثیر ارتفاع در سازه مجهز به میراگر پال بیشتر از سازه مجهز به میراگر دورانی است.

۲- با افزودن میراگر پال، ضریب رفتار در زلزله میدان نزدیک نسبت به زلزله میدان دور ۱۲٪ و با افزودن میراگر دورانی ۵٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر استفاده از میراگر اصطکاکی در رفتار سازه به هنگام زلزله‌های میدان نزدیک بیشتر می‌باشد. دلیل این امر این است که در زلزله‌های میدان نزدیک، زمان اعمال انرژی به سازه کمتر و مقدار انرژی وارده بیشتر می‌باشد. جدول ۱۴ به مقایسه ضریب رفتار سازه‌های مورد بحث، تحت زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک می‌پردازد.

جدول ۱۴: مقایسه ضریب رفتار در زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک

سازه	R	$R_{\xi}$
بدون میراگر	3.35	-
پال	4.88	1.45
دورانی	4.36	1.30
بدون میراگر	3.39	-
پال	4.32	1.27
دورانی	4.12	1.21

از طرفی میراگر اصطکاکی ابتدا باید به بار لغزش بهینه در نظر گرفته شده برسد تا بتواند شروع به حرکت و استهلاک انرژی کند و چون این عمل به صورت آبی انجام می‌شود، رفتار میراگرهای اصطکاکی در زلزله‌های میدان نزدیک بهتر از میدان دور است. همچنین میراگر



پال دارای ضریب رفتار بالاتری نسبت به میراگر دورانی در زلزله‌های میدان نزدیک است. علت این امر آن است که در میراگر پال، جابه‌جایی به صورت افقی انجام می‌شود و با رسیدن به بار لغزش، عمل استهلاک انرژی آغاز می‌شود؛ اما میراگر دورانی باید تا رسیدن به لنگر لغزش بهینه بچرخد، پس به زمان بیشتری نیاز دارد. همین امر بهینه‌بودن میراگر پال نسبت به دورانی را در زلزله‌های میدان نزدیک روشن می‌سازد. لذا جهت حائق آمدن بر مشکل رفتاری سازه‌ها، در مناطق در معرض زلزله‌های میدان نزدیک، استفاده از میراگر پال توصیه و تاکید می‌گردد.

۳- به لحاظ تطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ تفاوتی بین ضریب رفتار در زلزله‌های میدان نزدیک و زلزله‌های میدان دور، در سازه‌های بدون میراگر وجود ندارد. مشاهده می‌شود هم در زلزله‌های میدان نزدیک و هم در زلزله‌های میدان دور ضریب رفتار سازه بدون میراگر، در سازه‌های بلند نسبت به سازه‌های کوتاه، با ضریب رفتار ارائه شده آیین‌نامه تطابق بهتری دارد.

۴- مقدار ضریب شکل‌پذیری،  $R_{\mu}$ ، در میراگرهای پال و دورانی به ترتیب، ۱۳ و ۸ درصد افزایش یافته که گواه قابلیت استهلاک انرژی در سازه‌های با میراگر نسبت به سازه‌های بدون میراگر و تاخیر بیشتر در انهدام سازه با میراگر پال نسبت به میراگر دورانی است. جدول ۱۵ به مقایسه این ضریب در سازه‌های مورد بحث می‌پردازد.

جدول ۱۵: مقایسه افزایش ضریب کاهش شکل‌پذیری میراگرهای پال و دورانی

نوع میراگر	طبقات	سازه به سازه بدون میراگر در $R_{\mu}$ نسبت ضریب تحلیل استاتیکی غیرخطی	سازه به سازه بدون میراگر در $R_{\mu}$ نسبت ضریب تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی
مجهز به میراگر پال	۲ طبقه	1.360	1.140
	۶ طبقه	1.330	1.090
	۱۰ طبقه	1.520	1.160
مجهز به میراگر دورانی	۲ طبقه	1.001	1.090
	۶ طبقه	1.008	1.150
	۱۰ طبقه	1.290	1.020

۵- سازه با میراگر اصطکاکی دارای مقاومت پس از تسلیم بیشتری نسبت به سازه بدون میراگر است. از جدول ۱۶ برداشت می‌شود که ضریب اضافه مقاومت در زلزله‌های میدان نزدیک در مقایسه با زلزله‌های میدان دور بیشتر می‌باشد. جدول ۱۶ به مقایسه ضریب اضافه مقاومت سازه‌های مورد مطالعه می‌پردازد.

جدول ۱۶: مقایسه ضریب اضافه مقاومت سازه مجهز به میراگر پال و دورانی در زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک

نوع نگاهت	طبقات	بدون میراگر	مجهز به میراگر پال	مجهز به میراگر دورانی
نگاشت نزدیک گسل	۲ طبقه	1.36	2.01	1.79
	۶ طبقه	1.60	1.98	1.93
	۱۰ طبقه	1.52	1.79	1.80
نگاشت دور گسل	۲ طبقه	1.47	1.64	1.69
	۶ طبقه	1.53	1.86	1.54
	۱۰ طبقه	1.47	1.63	1.86
متوسط		1.49	1.81	1.76

۶- تفاوت مقادیر حاصل از دو روش در سازه بدون میراگر  $1/106\%$ ، در سازه با میراگر پال  $1/07\%$  و در سازه با میراگر دورانی  $1/037\%$  می باشد که این تفاوت بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. دلیل این امر، شکل گیری چرخه ی هیستریزس رفتاری در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی است که شرایط واقعی تری را برای سازه در نظر می گیرد. در سازه های کم ارتفاع نتایج هر دو تحلیل به هم نزدیک بوده و این تفاوت در سازه های با ارتفاع بلندتر، بیشتر می باشد.

۷- در هر دو روش، ضریب رفتار سازه با میراگر پال بیشتر از میراگر دورانی نتیجه می شود. طبق جدول ۱۷ سازه با میراگر پال به میزان  $13\%$  ظرفیت بالاتری برای اتلاف انرژی لرزه ای ورودی با وارد شدن به محدوده رفتار غیرخطی مصالح دارد. تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) در سازه های کوتاه، با ضریب رفتار تعیین شده در آیین نامه ۲۸۰۰ تطابق دارد و در سازه های بلند، ضریب رفتار حاصل از این تحلیل بیشتر از آیین نامه می باشد. اما ضریب رفتار به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی در سازه های بلندتر به ضریب رفتار آیین نامه ۲۸۰۰ نزدیک می شود.

جدول ۱۷: مقایسه ضریب رفتار تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و دینامیکی تاریخچه زمانی

طبقات	نوع سازه	ضریب رفتار تحلیل استاتیکی غیرخطی	ضریب رفتار تحلیل تاریخچه زمانی
۲ طبقه	بدون میراگر	3.50	3.20
	مجهز به میراگر پال	4.86	4.60
	مجهز به میراگر دورانی	4.37	4.16
۶ طبقه	بدون میراگر	3.96	3.49
	مجهز به میراگر پال	5.04	4.67
	مجهز به میراگر دورانی	4.51	4.42
۱۰ طبقه	بدون میراگر	3.73	3.43
	مجهز به میراگر پال	4.90	4.55
	مجهز به میراگر دورانی	4.31	4.14
مقدار متوسط	بدون میراگر	3.73	3.37
	مجهز به میراگر پال	4.93	4.60
	مجهز به میراگر دورانی	4.40	4.24

## ۷- نتیجه گیری

۱- از آن جایی که بار لغزش بهینه محدود به ۲۰٪ وزن سازه می باشد، مقادیر ضریب رفتار برای سازه های مذکور به شرح زیر است:

نوع میراگر	نگاشت نزدیک گسل	نگاشت دور گسل	روش استاتیکی غیرخطی
مجهاز به میراگر پال	5.00	4.50	5.00
مجهاز به میراگر دورانی	4.50	4.25	4.00

بنابر نتایج به دست آمده مقدار ضریب رفتار در قاب مهاربندی همگرای متوسط برای سازه مجهز به میراگر پال، ۵/۰ و برای سازه مجهز به میراگر دورانی ۴/۵ پیشنهاد می گردد. در هر دو تحلیل، افزایش ضریب رفتار در سازه های با ارتفاع کمتر، نسبت به سازه های مرتفع بیشتر است.

۲- طبق هر دو تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و دینامیکی تاریخچه زمانی افزایش مقاومت سازه پس از تسلیم در سازه مجهز به میراگر دورانی، به میزان ۲۱٪ بیشتر از سازه مجهز به میراگر پال است و در سازه های با ارتفاع کمتر، مقدار بیشتری دارد.

۳- طبق هر دو تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و دینامیکی تاریخچه زمانی افزایش ضریب کاهش شکل پذیری در میراگر پال و دورانی، به ترتیب به میزان ۴۹٪ و ۱۱٪ مشاهده می شود که موجب تاخیر در انهدام سازه و بالارفتن حاشیه ایمنی سازه می شود.

۴- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بیان گر این است که ضریب رفتار در زلزله های میدان نزدیک نسبت به زلزله های میدان دور، به میزان ۱۲٪ در میراگر پال و ۵٪ در میراگر دورانی، بیشتر افزایش می یابد. به لحاظ تطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ تفاوت آنچنانی بین ضریب رفتار در زلزله های میدان نزدیک و زلزله های میدان دور در این دو روش وجود ندارد و این تطابق در سازه های بلند نمایان تر است.

۵- تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) در سازه های کوتاه، با ضریب رفتار تعیین شده در آیین نامه ۲۸۰۰ تطابق دارد؛ اما ضریب رفتار به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی در سازه های بلندتر به ضریب رفتار آیین نامه ۲۸۰۰ نزدیک می شود.

۶- طبق هر دو تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و دینامیکی تاریخچه زمانی بر روی هر سه سازه ۲، ۶ و ۱۰ طبقه در حالت با و بدون میراگرهای پال و دورانی نتایج نشان می دهد سازه مجهز به میراگر پال دارای جذب انرژی بیشتر، مقاومت بیشتر، پایداری بیشتر و در نهایت قابلیت اطمینان بیشتر می باشد.

## 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] Pall, A. S., & Marsh, C. (1982). Response of friction damped braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 108(9), 1313-1323.
- [3] Filiatrault, A., & Cherry, S. (1986). Seismic tests of friction damped steel frames. In *Dynamic Response of Structures* (pp. 138-145). ASCE.
- [4] Lee, S. H., Park, J. H., Lee, S. K., & Min, K. W. (2008). Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on storey shear force distribution. *Engineering Structures*, 30(4), 930-940.
- [5] Apostolakis, G., & Dargush, G. F. (2010). Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(4), 355-376.
- [6] Sarjou, P. H., & Shabakhty, N. (2017). Effect of the improved pall friction damper on the seismic response of steel frames. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(4), 1833-1837.
- [7] Simone, S. (2020). *Simulation, experimentation and identification of frictional dampers: application to a satellite propeller* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [8] 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.
- [9] Gholizad, A., & Nekoo, M. M. (2018). Seismic Performance of a Novel Configuration of Rotational Friction Damper in X Bracings.
- [10] Tusset, A. M., Janzen, F. C., Piccirillo, V., Rocha, R. T., Balthazar, J. M., & Litak, G. (2018). On nonlinear dynamics of a parametrically excited pendulum using both active control and passive rotational (MR) damper. *Journal of Vibration and Control*, 24(9), 1587-1599.
- [11] Amini, A., Ekici, Ö., & Yakut, K. (2020). Experimental Study of Regenerative Rotational Damper in Low Frequencies. *International Journal of Automotive Technology*, 21(1), 83-90.
- [12] Suk, R., & Altıntaş, G. (2020). Behavior of multidirectional friction dampers. *Journal of Vibration and Control*, 26(21-22), 1969-1979.
- [13] Ghorbani, H. R., & Rofooei, F. R. (2020). A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures. *Engineering Structures*, 225, 111273
- [14] Meyer, N., & Seifried, R. (2020). Numerical and experimental investigations in the damping behavior of particle dampers attached to a vibrating structure. *Computers & structures*, 238, 106281.
- [15] Spencer Jr, B. F., & Soong, T. T. (1999, August). New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. In *Proceedings of international post-SMiRT conference seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibration of structures* (pp. 23-25). Cheju, Korea.
- [16] Pall, A. (2004, August). Performance-based design using pall friction dampers-an economical design solution. In *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada* (Vol. 70, No. 7, pp. 576-571).
- [17] Mualla, I. H. (2000). *Experimental & computational evaluation of a new friction damper device* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Dept. of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark).
- [18] Computers and Structures, inc, (1999), "Etabs Nonlinear Version 50 8.5.0", 1995 University Ave. Berkeley, CA., California, USA, 94704.
- [19] Choubisa, J., Chakrabarti, P., Poddar, S., Audichya, R., & Bhatt, R. M. (2021). Structural behavior of steel structures on the basis of computer simulation software. *Materials Today: Proceedings*.
- [20] ATC, Structural Response Modification Factors : ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California, pp. 5-32 (1995).
- [21] ATC, A Critical Review of Current Approaches to Earthquake Resistant Design, ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California (1995)
- [22] Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., & Alonso, L. J. (1991). Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604.
- [23] Martinez-Rodrigo, M., & Romero, M. L. (2003). An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. *Engineering Structures*, 25(7), 913-925.