بسمه تعالی

رسول اکرم (ص): اعلم الناس من جمع علم الناس الی العلمه؛
داناترین مردم کسی است که دانش دیگران را به دانش خود بیفزاید.

دانشگاه سیستان و بلوچستان

هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران
۱۷ - ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲
زاهدان - ایران

7th National Congress on Civil Engineering
May 7-8, 2013
Zahedan - Iran

# گواهی ارائه مقاله

شناسه مقاله: ۱۵۲۵۴

نویسندگان: مسعود بزرگوار، عباس کرم الدین

عنوان مقاله: کاربرد میراگر پاندولی اصطکاکی در قاب مهاربندی و تاثیر آن بر رفتار و پاسخ سازه

ضمن تشکر و قدردانی از نویسنده / نویسندگان محترم، گواهی می شود مقاله با مشخصات فوق، از سوی کمیته علمی کنگره به صورت شفاهی پذیرش و در هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان ارائه و در کتاب مجموعه مقالات کنگره چاپ گردیده است.

دکتر غلامرضا غضنفرپور
دبیر کنگره

دانشگاه سیستان و بلوچستان

# کاربرد میراگر پاندولی اصطکاکی در قاب مهاربندی و تاثیر آن بر رفتار و پاسخ سازه

**مسعود بزرگوار[۱] ، عباس کرم الدین[۲]**

**۱- کارشناس ارشد سازه ، دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد**

**۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی عمران ، دانشگاه فردوسی مشهد**

masoud_bozorgvar@yahoo.com - akaramodin@yahoo.com

**خلاصه**

سیستم آونگ اصطکاکی FPS به عنوان یک جداساز لرزه‌ای مناسب اغلب مورد توجه محققین بوده و در بسیاری ازسازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، ابتدا به معرفی میراگر پاندولی اصطکاکی FPD (Friction Pendulum Damper) به عنوان یک میراگر جدید پرداخته و در ادامه استفاده از این میراگر در قاب مهاربندی مورد بحث قرار گرفته است. همچنین در این مطالعه، مدلسازی و تاثیر عواملی چون شعاع انحناء و بار لغزش در رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی، این سیستم در دو قاب فولادی مهاربندی سه و هشت طبقه مدل شده است و پاسخ غیرخطی تاریخچه زمانی برای دو شتاب پایه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت قاب مهاربندی معمولی با قاب مهاربندی مجهز به میراگر پاندولی اصطکاکی FPD و میراگر اصطکاکی PALL مقایسه شده‌اند.نتایج نشان می‌دهند میراگر پاندولی اصطکاکی FPD همانند میراگر اصطکاکی PALL انرژی زیادی را مستهلک کرده به طوری که هیچ یک از مهاربندها تسلیم نگشتند در حالی که، در قاب مهاربندی معمولی تعدادی از مهاربندها تسلیم می‌شوند. افزایش شعاع انحناء باعث افزایش تغییرمکان بیشینه بام، کاهش برش پایه و شتاب حداکثر بام گردیده است. همچنین افزایش بار لغزش باعث کاهش تغییرمکان‌ها و افزایش برش پایه شده است. پاسخ‌های سازه مجهز به میراگر پاندولی اصطکاکی در محدوده بار لغزش بهینه، نسبت به سازه بدون میراگر کاهش قابل توجهی داشته است. میراگر پاندولی اصطکاکی FPD با توجه به وجود سختی بازدارنده خود، در قاب مهاربندی معمولی برای کاهش پاسخ‌ها نسبت به میراگر اصطکاکی PALL عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

**کلمات کلیدی: سازه، میراگر پاندولی اصطکاکی FPD، میراگر اصطکاکی PALL، قاب مهاربندی، بار لغزش بهینه.**

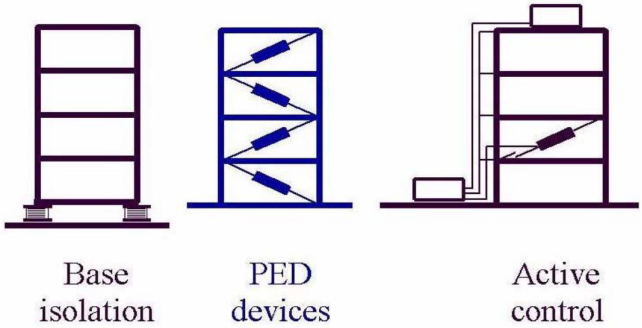
## ۱. مقدمه

در روش‌های مرسوم ،ساختمان با استفاده از ترکیبی از سختی – قابلیت شکل‌پذیری و همچنین استهلاک انرژی در برابر زلزله از خود مقاومت نشان می‌دهد ، مقدار میرایی در این قبیل ساختمان‌ها بسیار کم می‌باشد از این رو انرژی مستهلک شده در محدوده الاستیک سازه ناچیز می‌باشد. در هنگام زلزله‌های قوی، این ساختمان‌ها بعد از محدوده رفتار الاستیک ، تغییرمکان‌های زیادی می‌یابند و فقط به واسطه چگونگی قابلیت تغییرمکان غیرالاستیک خود ، پایدار باقی می‌مانند ، این تغییرمکان‌های غیرالاستیک موجب بوجود آمدن مفاصل پلاستیک به صورت موضعی در نقاطی از سازه می‌گردند که خود باعث افزایش شکل‌پذیری و همچنین افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. در نتیجه مقدار زیادی از انرژی زلزله به واسطه تخریب‌های موضعی در سیستم مقاوم جانبی سازه مستهلک می‌گردد.

به واسطه توجه به نحوه توزیع انرژی در یک سازه امروزه در دنیا روش دیگری به منظور کاستن اثرات زلزله مورد توجه قرار گرفته است. در طی یک زلزله، مقدار زیادی انرژی به سازه تحمیل می‌گردد. این انرژی ورودی به دو صورت جنبشی و پتانسیل (کرنشی) در سازه پدیدار می‌گردد که می‌بایست به طریقی جذب یا مستهلک شود. اگر هیچ نوع میرایی در سازه موجود نباشد، سازه تا بی‌نهایت به ارتعاش خود ادامه می‌دهد. اما عملاً به واسطه خصوصیات سازه، مقداری میرایی در آن بوجود می‌آید که موجب عکس‌العمل در مقابل ارتعاش سازه و میرا کردن می‌گردد. کارایی ساختمان را می‌توان با افزودن جاذب‌های انرژی (میراگرها) به ساختمان افزایش داد.[1]

همانگونه که بیان شد ساختمان می‌تواند در اثر قابلیت شکل‌پذیری، انرژی زیادی را در حین زلزله مستهلک نماید ولی بروز شکل‌پذیری زیاد در ساختمان تشکیل مفاصل پلاستیک در برخی از اعضای سازه را به همراه خواهد داشت. استفاده از سیستم‌های مستهلک کننده انرژی در ساختمان‌ها سبب حذف یا کاهش خسارت اعضای سازه‌ای در حین زلزله می‌گردد و در نتیجه از بروز تخریب جلوگیری می‌نماید. به طور عمومی می‌توان انواع سیستم‌های کنترل سازه را به سه دسته کلی،سیستم‌های فعال و نیمه فعال، سیستم‌های غیرفعال (جداسازی لرزه‌ای نیز جزء سیستم‌های غیرفعال می‌باشد)

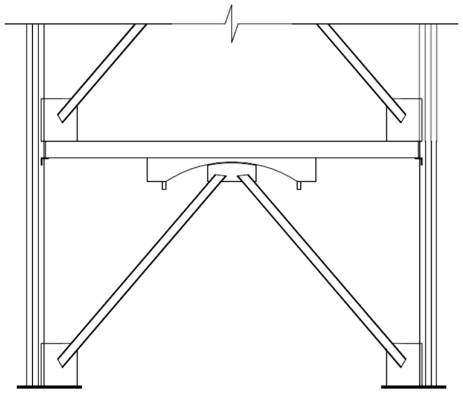
تقسیم نمود. در سیستم‌های غیرفعال اثر میرایی بدون اعمال انرژی خارجی بر روی سیستم میراگر حاصل می‌گردد و عملکرد این وسایل به واسطه حرکت ناشی از زلزله صورت می‌گیرد که رفتاری در جهت استهلاک انرژی از خود نشان می‌دهند.[2] در حالیکه در سیستم‌های فعال با اعمال انرژی خارجی سعی بر کنترل رفتار ساختمان در هنگام بروز بارگذاری جانبی از قبیل زلزله می‌گردد. این انرژی می‌تواند به صورت ایجاد نیروی خارجی در خلاف جهت نیروی وارد بر ساختمان و خلاف جهت ساختمان عمل نماید.[3] روش جداسازی لرزه‌ای نیز در اقصی نقاط دنیا استفاده می‌شود، این سیستم معمولاً در پی سازه‌ها نصب می‌شود و باعث انعکاس و جذب انرژی ورودی زلزله قبل از اینکه این انرژی به سازه انتقال پیدا کند می‌شود.[4] انواع سیستم‌های کنترل سازه در شکل ۱ نشان داده شده است.




**شکل ۱- انواع سیستم‌های کنترل سازه**

## ۲. میراگر پاندولی اصطکاکی FPD (Friction Pendulum Damper)

میراگر پاندولی اصطکاکی همانند جداگر پاندولی اصطکاکی FPS با توجه به هندسه خاص خود دارای یک بار لغزش اولیه μW و یک سختی بازدارنده W/R می‌باشد. که در این روابط W عکس العمل بار قائم در محل میراگر (سطح لغزش)، μ ضریب اصطکاک و R شعاع انحناء سطح لغزش می‌باشد. [5] اختلاف این نوع میراگر با میراگر اصطکاکی PALL به خاطر وجود سختی بازدارنده میراگر پاندولی اصطکاکی می‌باشد.این نوع میراگر را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که در مقابل زلزله‌های خفیف یا باد نلغزد اما حین زلزله‌های شدید تحت نیروی از پیش تعیین شده، شروع به لغزش کند. این لغزش، انرژی ورودی را به طور مکانیکی تلف می‌کند و از جاری شدن مهاربندها و دیگر اعضای سازه جلوگیری می‌کند.با توجه به هندسه خاص این نوع میراگر برای استفاده از آن در سازه باید از مهاربندهای ۷ یا ۸ استفاده نمود. شکل ۱ چگونگی استفاده از این میراگر را در مهاربند ۸ نشان می‌دهد.

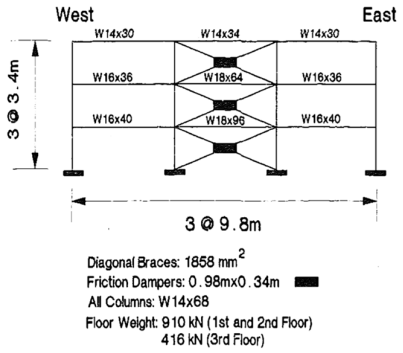


**شکل ۲- استفاده از میراگر پاندولی اصطکاکی FPD در قاب مهاربندی ۸**

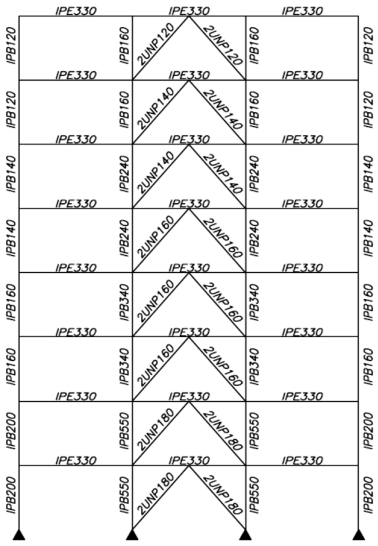
## ۳. مدلسازی

مدل سازه‌ای استفاده شده در این مقاله برای بررسی میراگرهای اصطکاکی FPD وPALL از مطالعات Montgomery وHall در سال ۱۹۷۹ میلادی اتخاذ شده است. این محققین یک سازه سه طبقه فلزی صنعتی را که مجهز به میراگر اصطکاکی PALL بود توسط برنامه DRAIN-2D مورد بررسی قرار دادند.[6] که در شکل ۳ مشخصات این قاب خمشی مهاربندی سه طبقه نشان داده شده است. تمامی کف ها صلب می باشند و اعضای سازه به صورت غیر خطی مدل می‌شوند. لازم به توضیح است برای اینکه اثر سختی میراگر FPD بر روی سازه ذکر شده قابل رویت باشد، این سازه به صورت مفصلی مدل شده است. همچنین با توجه به هندسه خاص میراگر پاندولی اصطکاکی از مهاربندهای ۸ استفاده گردیده است (شکل ۴).

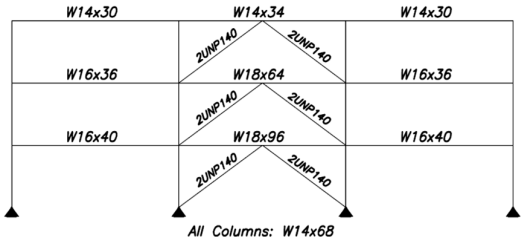
در این راستا یک سازه مهاربندی هشت طبقه نیز در کنار سازه سه طبقه برای بررسی در نظر گرفته شده است. قاب هشت طبقه مهاربندی شده براساس آئین نامه AISC و ضوابط آئین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی گردیده است. جنس خاک نوع دو و منطقه با لرزه‌خیزی بالا در نظر گرفته شده است.مقاومت تسلیم (Fy ) ۲۴۰۰۰ تن بر متر مربع و مقاومت نهایی (Fu ) ۳۷۰۰۰ تن بر متر مربع می باشد. فواصل ستون ها ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳/۲۰ متر می‌باشد. سقف ها صلب بوده و وزن هر سقف ۴۵ تن در نظر گرفته شده است. در طراحی اولیه سازه مهاربندی هشت طبقه سیستم باربری جانبی سازه در حالت بدون میراگر حدوداً ۲۰٪ ضعیف تر طراحی شده است. دلیل این مطلب نشان دادن نقش میراگرهای اصطکاکی FPD در کاهش خسارت و جذب انرژی زلزله در سازه می‌باشد. در شکل ۵ قاب مهاربندی هشت طبقه نشان داده شده است.




**شکل ۳- مشخصات سازه سه طبقه فلزی صنعتی** [6]




**شکل ۵- قاب هشت طبقه مهاربندی**




**شکل ۴- قاب سه طبقه مهاربندی**

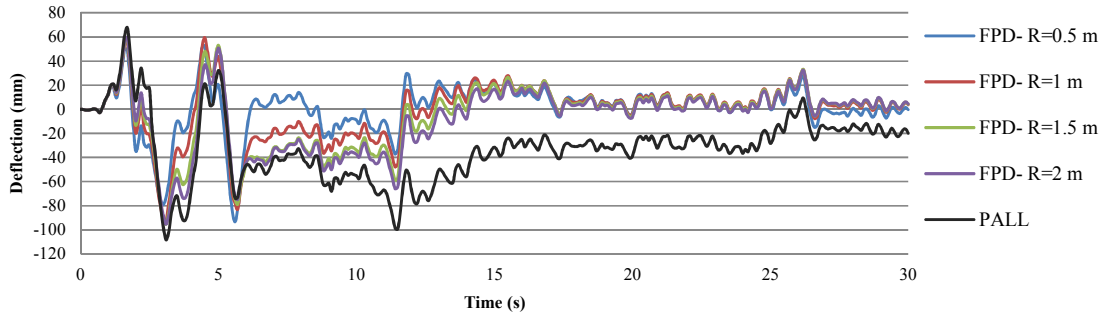
## ۴. نتایج تحلیل‌ها

نتایج حاصله بر روی سازه سه و هشت طبقه برای بررسی اثر میراگر پاندولی اصطکاکی FPD بر عملکرد سازه و مقایسه آن با میراگر اصطکاکی PALL و سازه بدون میراگر برای زلزله‌های السنترو و طبس که با اوج شتاب 0.36g مقیاس شده‌اند ارائه شده است.

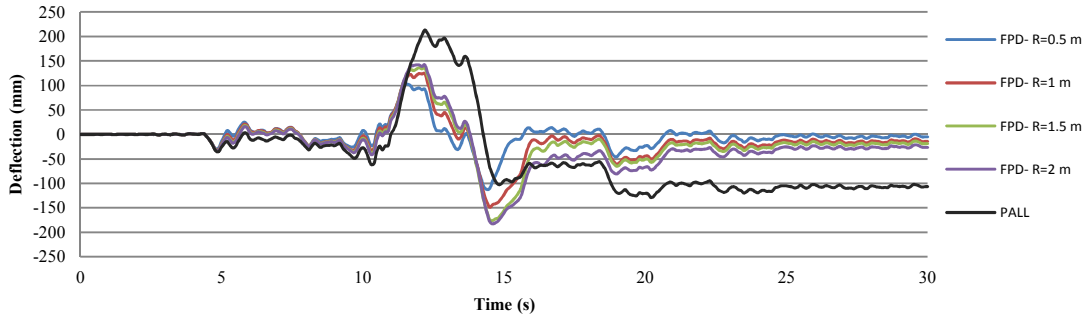
قبل از بررسی نتایج قاب مجهز به میراگر پاندولی اصطکاکی مشاهده می‌شود تعدادی از مهاربندها در دو قاب سه و هشت طبقه بدون میراگر تحت هر دو شتاب پایه تسلیم شده‌اند ولی در قاب مجهز به میراگر پاندولی اصطکاکی هیچ یک از مهاربندها تسلیم نگردیده‌اند، این نشان می دهد که میراگر پاندولی اصطکاکی به عنوان یک میراگر اصطکاکی که جزءای از سیستم‌های اتلاف کننده انرژی می باشد عمل کرده است و انرژی قابل توجهی را مستهلک نموده است.

در ادامه، ابتدا اثر شعاع انحناء میراگر پاندولی اصطکاکی FPD بر روی پاسخ سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس تاریخچه زمانی حداکثر جابجایی جانبی بام برای شعاع‌های انحناء مختلف میراگر اصطکاکی پاندولی FPD و همچنین میراگر اصطکاکی PALL برای هر دو شتاب پایه نشان داده شده است.

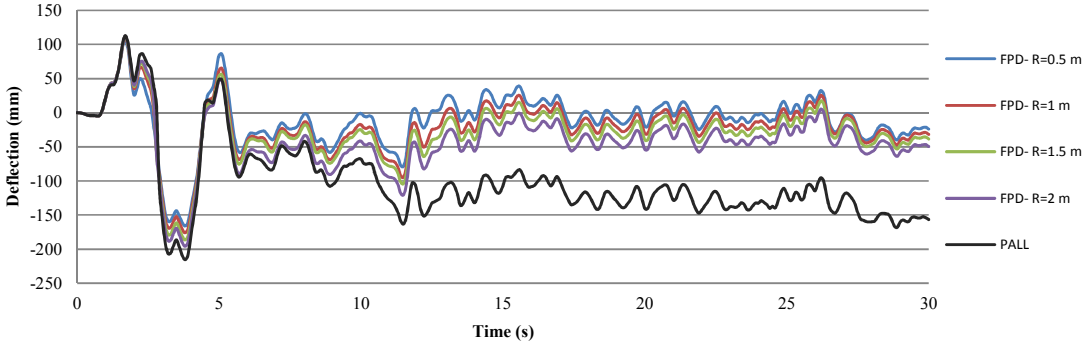
همان طور که در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می شود ، با افزایش شعاع انحناء (R) تغییرمکان بیشینه افزایش می یابد که این مسئله را اینگونه می توان توجیح کرد که با افزایش R سختی ثانویه سیستم FPD که همان (W/R) می باشد کاهش پیدا می کند در نتیجه تغییرمکان‌ها افزایش می یابد. نکته حائز اهمیت در نمودارهای زیر این می باشد که در سازه مجهز به میراگر PALL تغییرمکان نسبتاً قابل توجهی در انتهای تحلیل باقی می ماند در حالی که در سازه مجهز به سیستم FPD این تغییر مکان پس‌ماند نسبت به میراگر PALL بسیار ناچیز می باشد. همچنین با افزایش R تغییر مکان پس‌ماند در سازه افزایش یافته است؛ که این نشان دهنده آن است، انتخاب شعاع‌های انحناء بزرگ باعث افزایش تغییرمکان پس‌ماند خواهد شد.



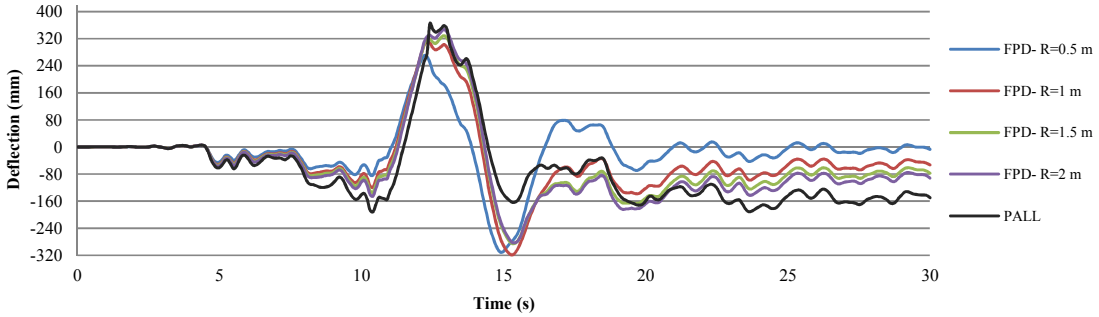

**شکل ۶- تاریخچه زمانی جابجایی جانبی بام برای شعاع‌های انحناء مختلف برای زلزله السنترو- بار لغزش ۱۴۰ کیلونیوتن- قاب ۳ طبقه**




**شکل ۷ - تاریخچه زمانی جابجایی جانبی بام برای شعاع‌های انحناء مختلف برای زلزله طبس- بار لغزش ۱۴۰ کیلونیوتن- قاب ۳ طبقه**

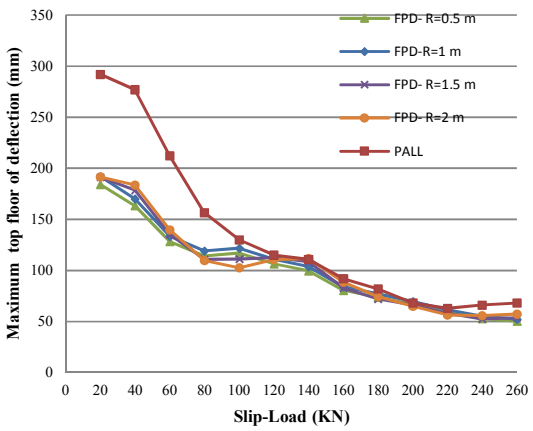



**شکل ۸ – تاریخچه زمانی جابجایی جانبی بام برای شعاع‌های انحناء مختلف برای زلزله السنترو- بار لغزش ۱۰۰ کیلونیوتن- قاب ۸ طبقه**

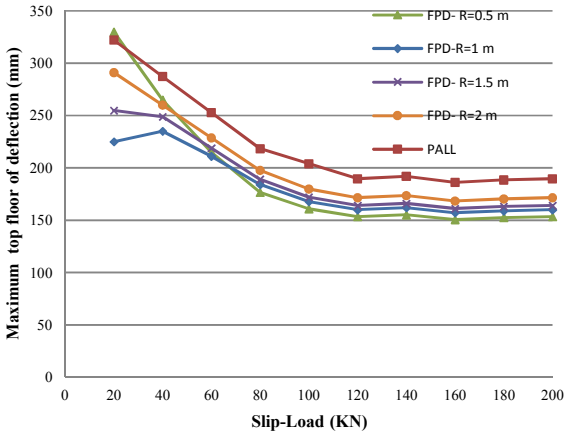



**شکل ۹- تاریخچه زمانی جابجایی جانبی بام برای شعاع‌های انحناء مختلف برای زلزله طبس- بار لغزش ۱۰۰ کیلونیوتن- قاب ۸ طبقه**

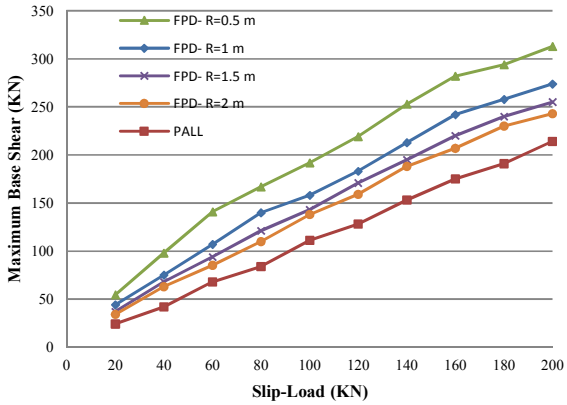
برای بررسی بار لغزش بهینه، قاب سه و هشت طبقه را برای بارهای لغزش متفاوت و شعاع‌های انحناء مختلف مورد تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی قرار داده شده‌اند، که در نمودارهای زیر نتایج مربوط به زلزله السنترو ارائه شده است.



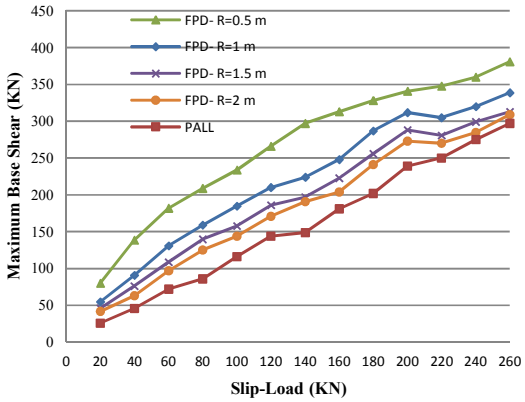

**شکل ۱۱- تغییرات تغییرمکان بیشینه بام برای بار لغزش‌های مختلف – زلزله السنترو – قاب ۳ طبقه**




**شکل ۱۰- تغییرات تغییرمکان بیشینه بام برای بار لغزش‌های مختلف – زلزله السنترو – قاب ۸ طبقه**



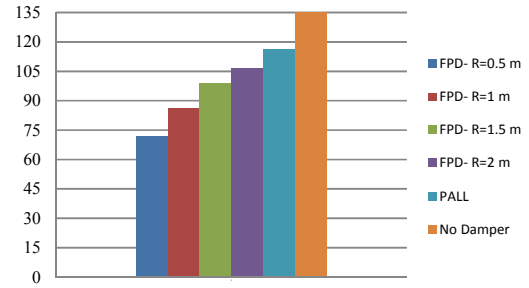

**شکل ۱۲- تغییرات حداکثر برش پایه برای بار لغزش‌های مختلف – زلزله السنترو – قاب ۸ طبقه**



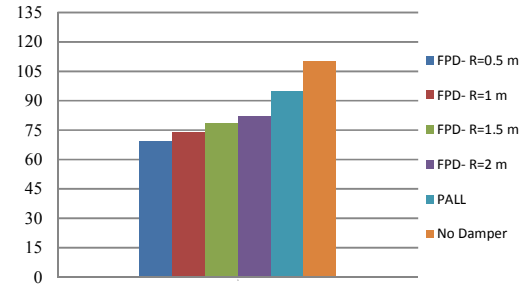

**شکل ۱۳- تغییرات حداکثر برش پایه برای بار لغزش‌های مختلف – زلزله السنترو – قاب ۳ طبقه**

افزایش بار لغزش در میراگر پاندولی اصطکاکی FPD و میراگر اصطکاکی PALL باعث کاهش تغییرمکان بیشینه جانبی بام و افزایش برش پایه می‌گردد. برای هر کدام از این میراگرها حدودی از بار لغزش بهینه وجود دارد که افزایش آن تاثیر قابل توجهی درکاهش تغییرمکان‌ها نخواهد داشت. برای قاب ۳ طبقه حدود ۱۶۰ تا ۲۲۰ کیلونیوتن و قاب ۸ طبقه حدود ۱۲۰ تا ۱۸۰ کیلونیوتن را می‌توان محدوده بار لغزش بهینه در نظر گرفت.

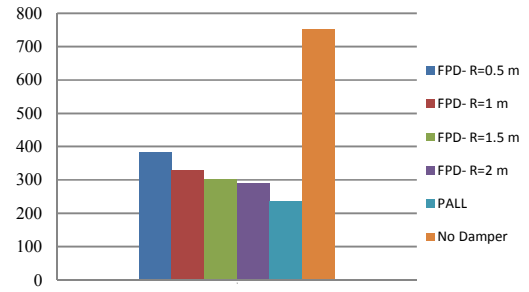
برای بار لغزش ۲۰۰ کیلو نیوتن(قاب ۳ طبقه) و ۱۶۰ کیلونیوتن (قاب ۸ طبقه) که در محدوده بار لغزش بهینه می‌باشد و شعاع‌های انحناء مختلف، مقادیر تغییر مکان بیشینه بام، حداکثر برش پایه و شتاب بام میراگر پاندولی اصطکاکی FPD با میراگر اصطکاکی PALL و سازه بدون میراگر به صورت نمودارهای ستونی زیر برای هر دو شتاب پایه نشان داده و مقایسه شده‌اند.



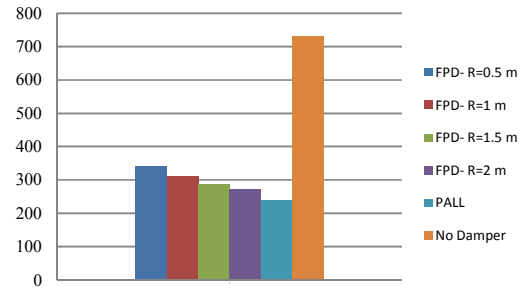

**شکل ۱۴- تغییرمکان بیشینه بام (میلیمتر)- زلزله طبس- قاب ۳ طبقه**



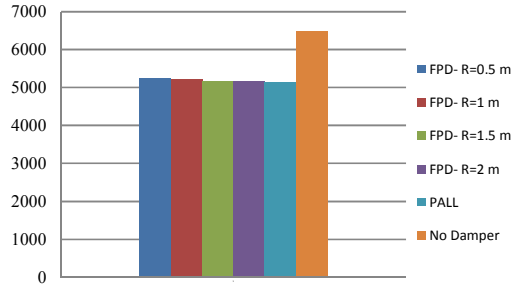

**شکل ۱۵- تغییرمکان بیشینه بام (میلیمتر) - زلزله السنترو- قاب ۳ طبقه**



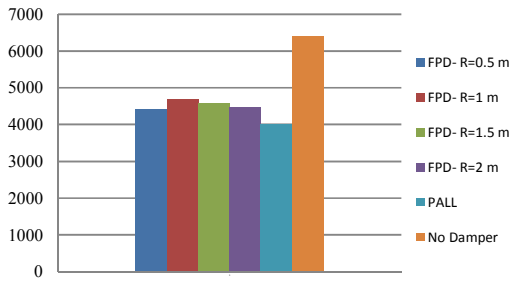

**شکل ۱۶- حداکثر برش پایه (کیلونیوتن)- زلزله طبس- قاب ۳ طبقه**




**شکل ۱۷- حداکثر برش پایه (کیلونیوتن)-زلزله السنترو- قاب ۳ طبقه**



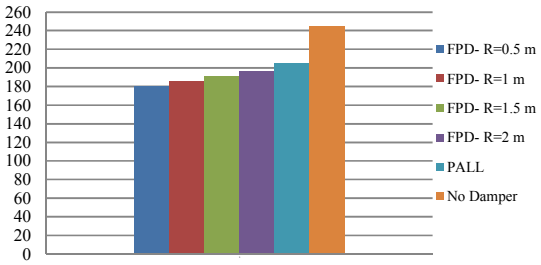

**شکل ۱۸- حداکثر شتاب بام (میلیمتر بر مجذور ثانیه)-زلزله طبس- قاب ۳ طبقه**



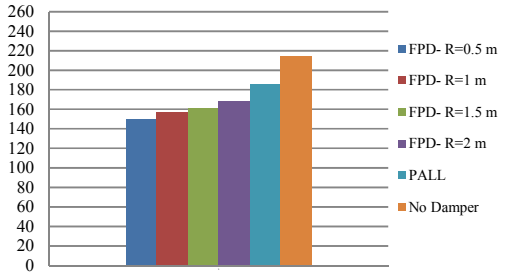

**شکل ۱۹- حداکثر شتاب بام (میلیمتر بر مجذور ثانیه)-زلزله السنترو- قاب ۳ طبقه**

همانطور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود مقادیر تغییرمکان بیشینه بام و حداکثر برش پایه با افزایش شعاع انحناء میراگر پاندولی اصطکاکی FPD به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. همچنین مقدار شتاب حداکثر بام نیز با افزایش شعاع انحناء کاهش می‌یابد اما این کاهش چندان چشم‌گیر نمی‌باشد.

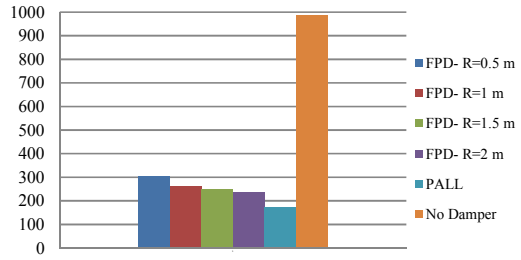
تغییرمکان بیشینه بام، حداکثر برش پایه و شتاب بام در قاب ۳ طبقه برای سازه مجهز به FPD نسبت به سازه بدون میراگر به ترتیب حدود ۳۰٪ ، ۶۰٪ و ۲۴٪کاهش داشته است.همچنین حداکثر تغییرمکان بام سازه مجهز به میراگر FPD نسبت به میراگر PALL حدود ۱۵٪ بیشتر کاهش داشته است در حالی که برش پایه حدود ۲۰٪ افزایش داشته است.



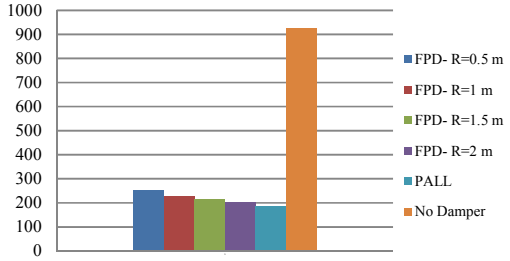

**شکل ۲۰- تغییرمکان بیشینه بام (میلیمتر)- زلزله طبس- قاب ۸ طبقه**



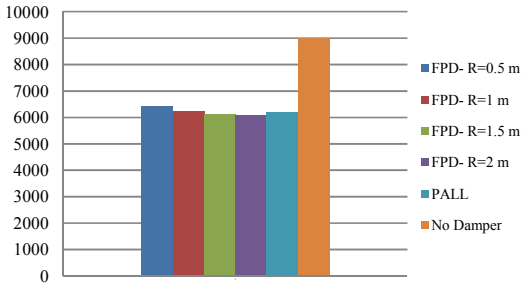

**شکل ۲۱- تغییرمکان بیشینه بام (میلیمتر)- زلزله السنترو- قاب ۸ طبقه**



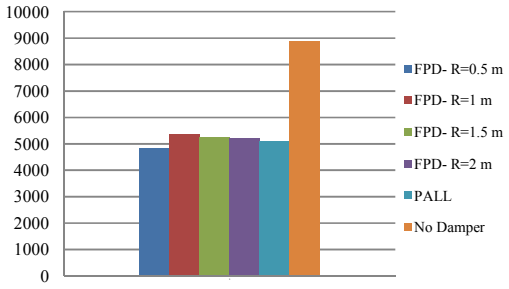

**شکل ۲۲- حداکثر برش پایه (کیلونیوتن)- زلزله طبس- قاب ۸ طبقه**




**شکل ۲۳- حداکثر برش پایه (کیلونیوتن)-زلزله السنترو- قاب ۸ طبقه**




**شکل ۲۴- حداکثر شتاب بام (میلیمتر بر مجذور ثانیه)-زلزله طبس- قاب ۸ طبقه**




**شکل ۲۵- حداکثر شتاب بام(میلیمتر بر مجذور ثانیه)- زلزله السنترو- قاب ۸ طبقه**

تغییرمکان بیشینه بام، حداکثر برش پایه و شتاب بام در قاب ۸ طبقه برای سازه مجهز به FPD نسبت به سازه بدون میراگر به ترتیب حدود ۲۵٪ ، ۷۰٪ و ۳۵٪کاهش داشته است.همچنین حداکثر تغییرمکان بام سازه مجهز به میراگر FPD نسبت به میراگر PALL حدود ۱۳٪ بیشتر کاهش داشته است در حالی که برش پایه حدود ۲۰٪ افزایش داشته است.

## ۵. نتیجه‌گیری

۱ ) نتیجه تحلیل‌های انجام گرفته بر روی قاب‌های سه و هشت طبقه مهاربندی که مجهز به میراگر پاندولی اصطکاکی FPD می‌باشند نشان می‌دهد که این سیستم انرژی ورودی قابل توجهی را مستهلک می‌کند زیرا هیچ یک از مهاربندها با وجود FPD تسلیم نمی‌شوند در حالی که در قاب مهاربندی بدون این سیستم تعدادی از مهاربندها تسلیم می‌گردند.

۲ ) در سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی PALL بدلیل عدم وجود سختی بازدارنده، در پایان زلزله مقداری تغییرمکان پس‌ماند باقی می‌ماند. این در حالی است که در میراگر پاندولی FPD بدلیل وجود سختی بازدارنده این تغییرمکان پس‌ماند به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

۳ ) پارامتری که در رفتار میراگر پاندولی اصطکاکی FPD بسیار موثر است شعاع انحناء (R) می‌باشد. تغییرات شعاع انحناء در افزایش یا کاهش سختی بازدارنده (W/R) اثرگذار است. با افزایش شعاع انحناء حداکثر تغییرمکان جانبی بام افزایش، حداکثر برش پایه و شتاب بام کاهش یافته است. با افزایش شعاع انحناء میراگر FPD ، رفتار این سیستم به میراگر اصطکاکی PALL نزدیک می‌گردد.

۴ ) افزایش بار لغزش در میراگر پاندولی اصطکاکی FPD و میراگر اصطکاکی PALL باعث کاهش تغییرمکان بیشینه جانبی بام و افزایش برش پایه می‌گردد. برای هر کدام از این میراگرها حدودی از بار لغزش بهینه وجود دارد که افزایش آن تاثیر قابل توجهی در کاهش تغییرمکان‌ها نخواهد داشت.

۵ ) میراگر پاندولی اصطکاکی FPD با توجه به وجود سختی بازدارنده (W/R) خود در قاب مهاربندی معمولی برای کاهش پاسخ‌ها نسبت به میراگر اصطکاکی PALL عملکرد بهتری داشته است و در کاهش تغییرمکان بیشینه جانبی بام میراگر FPD نسبت به PALL حدود ۱۵٪ موثرتر بوده است در حالی که برش پایه در میراگر FPD نسبت به PALL برای شعاع‌های انحناء مختلف به طور متوسط حدود ۲۰٪ افزایش داشته است.

## ۶. مراجع

1. Connor,J.J.،(2001) *"An Introduction to structural motion control"*، IT University Press.
2. Soong, T. T. Dargush, Gary F.(1997) *" Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering"*
3. Kaynia,A.M.،Veneziano,D.،Biggs,J.M.،(1981)، *" Seismic effectiveness of tuned mass dampers"*، Journal of Structural Division، ASCE،107(ST8)،1465-1484
4. Michael D. Symans, PhD *" Seismic Protective Systems: Seismic Isolation"*
5. Earthquake Protection Systems, (2003) *" Technical Characteristics of Friction Pendulum Bearings"*
6. Filiatrault, A., and Cherry, S.(1987) *"Seismic Response Control of Buildings Using Friction Dampers"*