



General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures

Reza Moradi¹, Ebrahim Khalilzadeh Vahidi^{2*}

¹PhD Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.23.2020

Revised: 09.23.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Structural vibration

passive control

Friction damper

*Corresponding Author:

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi

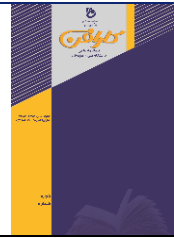
Email:

e_vahidi2000@yahoo.com

ABSTRACT

The Nowadays one of the challenges that engineers and structural designers encounter is reduced vibrations of structures due to lateral forces such as earthquakes and winds. Taking into consideration that the design and construction of tall buildings is one of the most common methods of land-use in highly populated urban areas, the necessity and importance of identifying methods of controlling structural vibrations is felt more keenly than before. One of the methods of structural motion control is passive structural motion control with friction dampers. In this study, the main focus on the application and performance of friction dampers is new ideas for using the friction phenomenon to control structural vibrations and the design challenges of structures with friction dampers. For this purpose, first, we try to point out the important concepts in vibration control. Then, the goals, methods and results of various existing researches are examined to provide a clear view of friction dampers for structural engineers and as a start for future research to develop and improve the performance of friction dampers.





مطالعه اجمالی ایده‌های جدید و کاربردی میراگرهای اصطکاکی جهت کنترل ارتعاش غیرفعال سازه‌ها

رضا مرادی^۱، ابراهیم خلیل زاده وحیدی^{۲*}

- ۱- دانشجوی دکتری سازه، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
- ۲- استادیار، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه یکی از معضلات موجود برای مهندسان و طراحان سازه، کاهش ارتعاشات ناشی از نیروهای جانبی نظیر زلزله و باد به سازه می‌باشد. از طرفی، با توجه به اینکه طراحی و ساخت سازه‌های بلند، یکی از روش‌های متداول استفاده از فضاهای شهری با جمعیت زیاد می‌باشد، ضرورت و اهمیت شناخت روش‌های کنترل ارتعاشات سازه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. یکی از روش‌های کنترل ارتعاش سازه، روش کنترل غیرفعال، با استفاده از میراگرهای اصطکاکی می‌باشد. در این پژوهش، تمرکز اصلی روی کاربرد و عملکرد میراگرهای اصطکاکی، ایده‌های جدید برای استفاده از پدیده اصطکاک به منظور کنترل ارتعاشات سازه و معضلات طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور ابتدا سعی می‌شود که به مفاهیم مهم در کنترل ارتعاشات اشاره شود، سپس اهداف، روش کار و نتایج پژوهش‌های موجود متعدد، بررسی گردد تا دید روشنی از میراگرهای اصطکاکی برای مهندسان سازه فراهم شود و نیز شروعی باشد بر تحقیقات آینده که در آنها به توسعه و بهبود عملکرد میراگرهای اصطکاکی پرداخته می‌شود.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

ارتعاش سازه
کنترل غیرفعال
میراگر اصطکاکی

*نویسنده مسئول: ابراهیم خلیل زاده وحیدی

پست الکترونیکی:

e_vahidi2000@yahoo.com



مقدمه

در حال حاضر، ایران جزو کشورهایی است که وقوع زلزله در آن با خسارات مالی و جانی بالایی همراه است [۱]. نمونه آن، زلزله سرپل ذهاب با ۶۲۰ نفر کشته و ۹۳۸۸ نفر زخمی می‌باشد. این زلزله با بزرگای گشتاوری ۷/۳ شامگاه ۲۱ آبان‌ماه سال ۱۳۹۶ رخ داد [۲]. کانون این زلزله ۵ کیلومتری شهر ازگله و همچنین در عمق ۱۱ کیلومتری رخ داد که به علت عمق کم، در کل منطقه شمال غرب ایران، در جنوب شرق ترکیه و حتی در کویت و شمال عربستان سعودی هم احساس شد [۲]. شتاب بیشینه رکورد ثبت شده در ایستگاه سرپل ذهاب، بیش از دو برابر نسبت شتاب مبنای طرح آیین نامه ۲۸۰۰ برای این منطقه بوده است. با بررسی عملکرد لرزهای تعدادی از سازه‌های فولادی در این زلزله، گسیختگی سیستم باربر جانبی، نبود سیستم مؤثر باربر جانبی، پدیده طبقه نرم و تخریب پیچشی، از جمله عوامل مؤثر در خرابی این سازه‌ها تشخیص داده شد [۳؛ ۴]. همچنین مفصل شدن اتصال تیر به ستون، شکست برشی ستون کوتاه، طبقه نرم، رعایت نکردن فلسفه ستون قوی-تیر ضعیف و ... از جمله مهم‌ترین موارد شکست در سازه‌های بتنی مناطق زلزله زده سرپل ذهاب بود [۵؛ ۶]. بنابراین مهم‌ترین عامل بروز خسارات سازه‌ای در این زلزله، آسیب پذیری بالای ساختمان‌هایی است که با روش سنتی، طراحی و ساخته می‌شوند؛ زیرا در روش طرح لرزهای، سازه زمانی عملکرد مطلوبی حین زلزله خواهد داشت که سیستم باربر جانبی، توانایی جذب و استهلاک انرژی را داشته باشد. به عبارت بهتر، در سازه‌هایی که با این روش طراحی می‌شوند استهلاک انرژی در اعضای رخ می‌دهد که خود جزئی از سیستم باربر لرزهای می‌باشند. بنابراین در این روش، اعضای سازه‌ای دچار خساراتی نظیر تشکیل مفصل پلاستیک می‌شوند.

بهترین راهکار برای کاهش خسارات سازه‌ای در برابر زلزله این است که به جای توجه به افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله، به سمت کاهش در پاسخ تغییر مکان یا شتاب ورودی از زمین به سازه معطوف شود [۷؛ ۸]. روش‌هایی که این هدف را دنبال می‌کنند تحت عنوان کلی روش‌های کنترل ارتعاشات لرزهای، شناخته می‌شوند. انواع روش‌های کنترل ارتعاشات سازه عبارتند از: کنترل فعال، کنترل غیرفعال، کنترل نیمه‌فعال و کنترل ترکیبی می‌باشد [۸-۱۰]. در روش کنترل فعال، پاسخ سازه توسط عملگرهایی که مستقیماً به سازه وصل هستند، کنترل می‌گردد [۸]. در روش کنترل غیرفعال، ارتعاشات سازه توسط وسایل میراکننده انرژی زلزله، کنترل می‌شود. در روش کنترل نیمه فعال، پاسخ سازه توسط عملگرهایی که به میراگرها وصل هستند کنترل می‌شود [۸]. روش کنترل ارتعاشات ترکیبی، ترکیب روش کنترل ارتعاشات فعال و غیرفعال می‌باشد [۸].

کلید ورود به بحث کنترل ارتعاشات سازه، در نظر گرفتن زلزله به‌منزله انرژی (و نه به عنوان نیرو) می‌باشد. رابطه تعادل انرژی در یک سازه تحت زلزله به صورت زیر است:

$$(E_K + E_S) + (E_D + E_H) = E_I \quad (۱)$$

در رابطه بالا E_I بیانگر انرژی ورودی به سازه، E_S انرژی کرنشی سیستم، E_K انرژی جنبشی سیستم، E_D انرژی تلف شده توسط میرایی ویسکوز سیستم و E_H انرژی تلف شده توسط رفتار هیستریزس اعضا می‌باشد. رفتار ویسکوز و هیستریزس خود می‌تواند ناشی از مجموع سیستم سازه‌ای و کنترلی باشد. به عبارت بهتر:

$$E_{D-stru} + E_{D-dam} = E_D$$

$$E_{H-stru} + E_{H-dam} = E_H$$

در دو رابطه فوق E_{D-stru} همان انرژی تلف شده توسط میرایی ذاتی سیستم است که معمولاً بین ۲ تا ۵ درصد نسبت میرایی بحرانی است. E_{D-dam} انرژی تلف شده توسط میرایی‌های وابسته به سرعت (مثل میراگر ویسکوز یا میراگر

ویسکوالاستیک) ضمناً E_{H-stru} انرژی تلف‌شده توسط رفتار غیرخطی اعضای سازه‌ای است که با تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای باربر لرزه‌ای به وقوع می‌پیوندد. همچنین E_{H-dam} انرژی تلف‌شده توسط میراگرهای وابسته به جابه‌جایی (مثل میراگر فلزی تسلیم‌شونده یا میراگر اصطکاکی) که توسط رفتار هیستریزیس یا به عبارتی تسلیم شدن یا لغزش به اتلاف انرژی در سیستم می‌پردازد.

رابطه (۱) نشان می‌دهد که هنگامی که انرژی باد یا زلزله به یک سیستم وارد می‌شود این انرژی به دو صورت مختلف انرژی ذخیره‌شده و انرژی مستهلک‌شده تبدیل می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم مقدار انرژی ورودی به سازه در هنگام زلزله، مقدار ثابتی است. هنگامی که از سیستم‌های میراگر استفاده می‌کنیم مقدار انرژی مستهلک‌شده (E_{DIS}) افزایش می‌یابد. انرژی مستهلک‌شده حاصل انرژی جنبشی (E_K) و انرژی کرنشی (E_S) سیستم است. چون انرژی کرنشی و انرژی جنبشی به ترتیب به جابه‌جایی و سرعت، وابسته هستند، با کاهش مقدار آنها مقدار سرعت و جابه‌جایی سیستم سازه‌ای، کاهش پیدا می‌کند. به عبارت بهتر، میزان خسارات سازه‌ای، کمتر می‌شود. از طرفی با افزایش انرژی مستهلک‌شده، انرژی ذخیره‌شده، کاهش پیدا می‌کند. این بدان معناست که می‌توان با به‌کارگیری وسایل مستهلک‌کننده انرژی، آسیب‌های اعضای سازه‌ای را کاهش داد یا به صفر نزدیک کرد و سازه‌ای با پاسخ لرزه‌ای کمتر و سطح عملکرد بهتر طرح نمود.

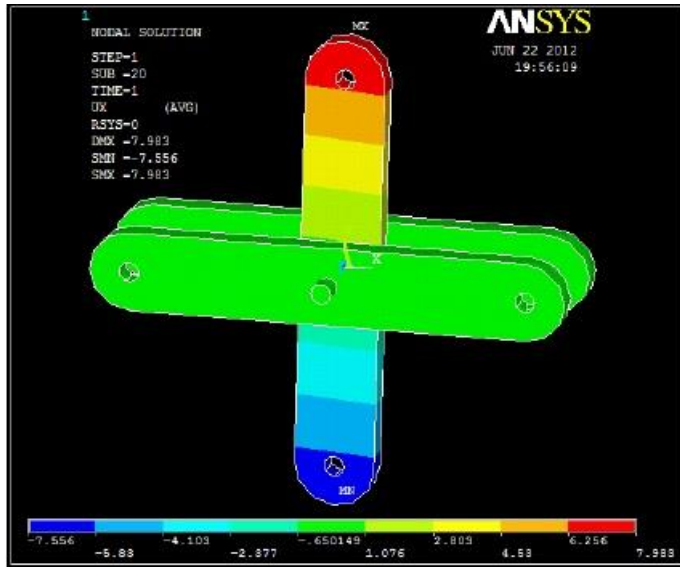
میراگرها بر اساس حساسیت رفتار آنها، شامل میراگرهای وابسته به جابه‌جایی (مثل میراگر اصطکاکی و میراگر فلزی تسلیم‌شونده)، میراگرهای وابسته به سرعت (مثل میراگر ویسکوز) و میراگرهای وابسته به شتاب (مثل میراگر جرم تنظیم‌شونده و میراگر مایع تنظیم‌شونده) تقسیم می‌شوند. دسته‌های دیگر، مثل میراگر ویسکوالاستیک، هم به جابه‌جایی و هم به سرعت حساس هستند [۱۱].

در این تحقیق، تمرکز اصلی بر کاربرد و عملکرد میراگرهای اصطکاکی، ایده‌های جدید برای استفاده از پدیده اصطکاک به‌منظور کنترل ارتعاشات سازه و معضلات طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور، در گام اول، ایده‌های جدید و مطالعات انجام شده در زمینه میراگرهای اصطکاکی با مکانیزم دورانی و در گام دوم تحقیقات انجام شده در زمینه سایر میراگرهای اصطکاکی، مرور و بررسی خواهد شد و در نهایت، پژوهش‌های انجام شده در رابطه با بار لغزش میراگرهای اصطکاکی به عنوان چالشی‌ترین و مهم‌ترین پارامتر طراحی سازه‌های دارای میراگرهای اصطکاکی، بررسی خواهد شد.

میراگرهای اصطکاکی دارای مکانیزم دورانی

انوشه‌یی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] به ارزیابی پدهای اصطکاکی با جنس‌های مختلف در میراگرهای اصطکاکی دورانی شکل پرداختند. برای این منظور، میراگرهای اصطکاکی دورانی با پدهایی از جنس آلومینیوم، گالوانیزه، فولاد ST37 و فولاد ضدزنگ مورد آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار دادند. نتایج آزمایش بر اساس معیارهای پذیرش، میراگرهای حساس به جابه‌جایی موجود در دستورالعمل FEMA356 را ارزیابی کردند. نتایج مطالعات آنها حاکی از آن است که آلومینیوم و فولاد ST37 حلقه‌های هیستریزیس پایدارتری با کمی افت مقاومت دارند. همچنین سایدگی پد اصطکاکی آلومینیومی، گالوانیزه و فولادی ST37 بیشتر است. بر اساس معیارهای پذیرش FEMA356 فقط پد آلومینیومی، قابل قبول است ولی به دلیل سایش زیاد بعد از زلزله شدید باید با پد جدید جایگزین شود [۱۲].

قلی‌زاده و مروج نیکو (۲۰۱۸) [۱۳] به بررسی عددی نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی-دورانی که در قاب‌های فلزی دارای مهاربند ضرب‌دری کاربرد دارند پرداختند. به همین منظور، مطابق شکل ۱ پیکربندی جدیدی از میراگر اصطکاکی-دورانی را پیشنهاد دادند و به‌منظور افزایش انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر پیشنهادی، با استفاده از محاسبات ریاضی به بهینه‌سازی هندسه میراگر پرداختند.



شکل ۱. میراگر اصطکاکی - دورانی قلی زاده و موج نیکو

در گام بعدی، به ارائه روشی مبتنی بر تحلیل استاتیکی معادل برای محاسبه بار لغزش بهینه میراگر اصطکاکی پیشنهادی پرداختند که در آن، لنگر لغزش به طور متغیر و متناسب با برش پایه در ارتفاع توزیع شده است. در نهایت به مقایسه شاخص عملکرد میراگر اصطکاکی (پارامتر SPI) سازه‌های قاب خمشی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه دارای میراگر پیشنهادی در دو حالت توزیع یکنواخت بار لغزش به روش Filiatrault & Cherry و توزیع متغیر بار لغزش به روش ارائه شده، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کارایی میراگر پیشنهادی در سازه‌های مورد مطالعه با افزایش شدت زلزله و افزایش تعداد طبقات بیشتر خواهد شد. همچنین عملکرد لرزه‌ای سازه‌هایی که در آن، نیروی لغزش با روش پیشنهادی و به صورت متغیر توزیع شده، نسبت به توزیع یکنواخت نیروی لغزش میراگر اصطکاکی، مناسب‌تر است.

بونچف^۱ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۴] به ارزیابی کارایی نوعی از میراگرهای اصطکاکی- دورانی به عنوان رابط (فیوز سازه‌ای) بین ستون‌ها به عنوان روشی برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی پرداختند. در این پژوهش، قاب خمشی فولادی ۴ دهانه ۳ طبقه، ۶ طبقه و ۹ طبقه را با این روش، مقاوم‌سازی و پاسخ لرزه‌ای آنها ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر اصطکاکی دورانی به عنوان فیوز سازه‌ای و همچنین استهلاک‌کننده انرژی از طریق اصطکاک، سبب بهبود عملکرد سازه‌ای می‌شود؛ به عبارت بهتر، سبب کاهش برش پایه و دررفت سازه خواهد شد. همچنین این نوع میراگر، در طول عمر مفید بهره‌برداری سازه، نیاز به حفظ و نگهداری ندارد و حتی پس از وقوع زلزله، نیاز به تعویض نخواهد داشت.

هادیان‌فر (۲۱۵) [۱۵] به مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پرداخت. در این پژوهش، روشی ساده و عملی برای مدل‌سازی میراگرهای اصطکاکی- دورانی T شکل پیشنهاد شده است. به این صورت که میراگر T شکل را به صورت دو میله صلب تعریف کرد که در محل اتصال آنها از المان لینک^۲ برای استهلاک

^۱ Bonchev

^۲ Link

انرژی استفاده شده است. سپس برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی برای مدل‌سازی میراگر اصطکاکی - دورانی T شکل، قاب یک دهانه - یک طبقه موآلا، مدل‌سازی و تحلیل شده است. در گام بعدی، با استفاده از روش پیشنهادی مدل‌سازی، قاب یک دهانه - یک طبقه ضعیف مقاوم‌سازی و بهسازی کرده است و رفتار قاب موردنظر را با قاب مقاوم‌سازی شده با استفاده از مهاربند، مقایسه کرده است. در نهایت، لنگر و نیروی محوری ستون‌ها، نیروی محوری بادبندها، برش طبقات، تغییر مکان طبقات، شتاب ماگزیمم طبقات و مقدار انرژی مستهلک‌شده هر دو قاب با هم مقایسه شده است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که سازه مقاوم‌سازی شده با استفاده از میراگر اصطکاکی - دورانی، نسبت به سازه مقاوم‌سازی شده با مهاربند ضرب‌دري، عملکرد لرزه‌ای بهتری داشته است. همچنین استفاده از میراگر اصطکاکی - دورانی، سبب کاهش نیروی داخلی اعضا، کاهش تغییر مکان جانبی سازه و همچنین بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه می‌گردد.

بارمو^۱ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۶] به بررسی عددی استفاده هم‌زمان جداساز لرزه‌ای و میراگر اصطکاکی دورانی در تراز فونداسیون پرداختند. برای این منظور، ساختمان بتنی ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه در حالت‌های بدون جداساز و در حالت ترکیبی از جداساز لاستیکی هسته سربی^۲، جداساز اصطکاکی لغزنده^۳ و همچنین میراگر اصطکاکی دورانی در نرم‌افزار Sap 2000 تحت زلزله السنترو را ارزیابی کردند. در نهایت، پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها شامل زمان تناوب، جابه‌جایی حداکثر بام و برش پایه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از میراگر اصطکاکی دورانی به همراه جداساز، موجب کاهش تغییر مکان جانبی و برش پایه یا به عبارت بهتر، سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ای می‌شود.

شیرخانی و همکاران (۲۰۱۵) [۱۷] کاربرد روش تحلیل زمان - دوام برای قاب‌های فلزی دارای میراگر اصطکاکی دورانی را بررسی کرده‌اند. برای این منظور، قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه را مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل زمان دوام قرار دادند و با مقایسه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل زمان دوام، به دقت روش تحلیلی زمان دوام پرداختند. نتایج تحقیقات آنها حاکی از آن است که استفاده از میراگرهای اصطکاکی دورانی، موجب کاهش دریافت طبقات و حداکثر جابه‌جایی طبقات می‌شود. همچنین جواب‌های تحلیل زمان - دوام با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، هماهنگ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب روش زمان دوام در پیش‌بینی رفتار سازه می‌باشد. صنعتی و همکاران (۲۰۱۴) [۱۸] به بررسی میراگر ترکیبی اصطکاکی - دورانی T شکل و ویسکوالاستیک پرداختند. در این میراگر برای بهبود رفتار میراگر اصطکاکی دورانی در فرکانس‌های از پدهای ویسکوالاستیک به همراه پدهای اصطکاکی می‌باشد. میراگر موردنظر را در یک قاب یک دهانه - یک طبقه فلزی با مقیاس یک سوم نصب و عملکرد لرزه‌ای آن را بررسی کردند. در نهایت، یک قاب سه دهانه هفت طبقه با استفاده از نرم‌افزار Perform 3D مدل‌سازی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شد و نیز پارامترهایی نظیر انرژی ورودی و انرژی مستهلک‌شده قبل و بعد از نصب میراگر مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از میراگرهای ترکیبی پیشنهادی، سبب بهبود رفتار لرزه‌ای سازه شده است.

میرزاباقری و همکاران (۲۰۱۴) [۱۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگرهای اصطکاکی دورانی یک، دو و سه بخشی در قاب‌های فلزی پرداختند. نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری هارمونیک با فرکانس 10 Hz و بار لغزش 0/8 KN قرار گرفتند. نمودار انرژی ورودی و انرژی مستهلک‌شده برای هر نمونه آزمایشگاهی به دست آمد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و میراگرهای اصطکاکی دورانی تک‌بخشی مشاهده شد که میراگرهای اصطکاکی دورانی چندبخشی، قابلیت استهلاک انرژی زیادی دارند. در ادامه، قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه دارای میراگر اصطکاکی دورانی تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شدند. میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات، حداکثر جابه‌جایی طبقه بام، دریافت

¹ Barmo

² Lead Rubber Bearing

³ Friction Pendulum System

طبقات در حالت با و بدون میراگر، مقایسه شدند. آنها مشاهده کردند که رفتار لرزه‌ای سازه دارای میراگر اصطکاکی دورانی بهتر می‌باشد.

منتظر و همکاران (۲۰۱۴) [۲۰] عملکرد قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه با و بدون میراگر اصطکاکی - دورانی تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی و تحلیل فزاینده دینامیکی را مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که میراگر اصطکاکی دورانی، سبب کاهش حداکثر دریفت طبقات شده است. همچنین میراگر اصطکاکی - دورانی تا قبل از لغزش، موجب افزایش سختی قاب فولادی می‌گردد.

پاپادوپولوس^۱ و همکاران (۲۰۱۳) [۲۱] با بررسی عددی و آزمایشگاهی، نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی - دورانی را برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دادند. در این پژوهش، ابتدا مکانیزم عملکرد میراگر پیشنهادی، بررسی شد. در مرحله بعدی، میراگر را ساختند و آن را در قاب مربعی شکل نصب کردند و قاب دارای میراگر اصطکاکی را آزمایش کردند. در نهایت، مدل‌سازی نمونه‌های عددی را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 صحت‌سنجی کردند و سازه ۵ طبقه - ۵ دهانه بتنی را با استفاده از میراگر پیشنهادی طراحی و تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری رفت و برگشتی و زلزله‌های شدید استهلاک؛ انرژی مناسبی خواهد داشت. ضمناً قاب بتنی دارای میراگر پیشنهادی جابه‌جایی، بام کمتر و استهلاک انرژی بیشتر و به عبارت بهتر، عملکرد لرزه‌ای مناسبی دارد.

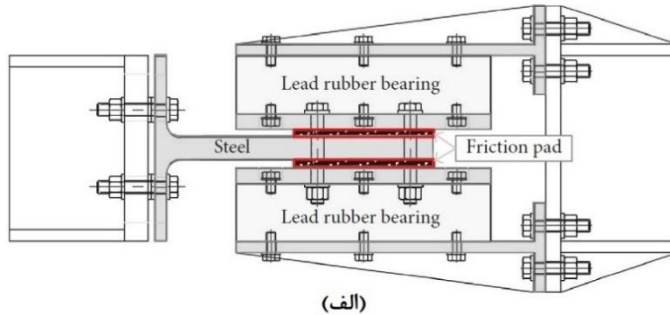
سعید منیر و همکاران (۲۰۱۳) [۲۲] میراگر اصطکاکی دورانی جدیدی را پیشنهاد و بررسی کردند. برای این منظور، آنها ابتدا میراگر پیشنهادی را با ۹ قطعه فولادی و ۹ پیچ و مهره با مقاومت بالا و به صورت مربعی که در دهانه‌های مربعی قابل نصب می‌باشد، ساختند. سپس میراگر پیشنهادی را در آزمایشگاه تحت بارگذاری هارمونیک با فرکانس 0.2 Hz و دامنه‌های $2/5$ ، $3/2$ و 5 سانتی‌متر بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که میراگر موردنظر دارای چرخه‌های هیستریزس پایداری می‌باشد. در گام بعدی، میراگر پیشنهادی را در داخل سازه فلزی یک طبقه نصب کردند و روی میز لرزه تحت چند تحریک زلزله قرار دادند. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تأثیر میراگر پیشنهادی را در قاب فلزی چند طبقه بررسی کردند. برای این منظور، ابتدا مدل آزمایشگاهی قاب فلزی به همراه میراگر پیشنهادی را در SAP2000 مدل‌سازی و تحلیل کردند و نتایج آن را با نتایج نمونه آزمایشگاهی، مقایسه کردند. سپس قاب فلزی چهار طبقه و سه دهانه در دو حالت با و بدون میراگر پیشنهادی را ارزیابی کردند. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که میراگر پیشنهادی، جابه‌جایی جانبی و برش پایه ساختمان را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است.

سایر انواع میراگرهای اصطکاکی

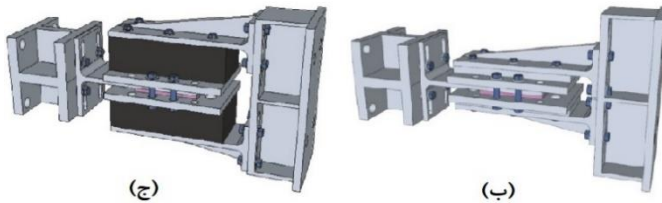
جی یون رو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۳] به بررسی آزمایشگاهی میراگر ترکیبی اصطکاکی - لاستیکی و ارزیابی عددی عملکرد آن در مقابل باد و زلزله پرداختند. برای این منظور، ابتدا میراگر پیشنهادی که در شکل ۲ نشان داده شده است را در آزمایشگاه سنجیدند.

¹ Papadopoulos

² Ji-Eun Roh



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۲. الف) مقطع میراگر پیشنهادی اصطکاکی - لاستیکی جی یون رو و همکاران [۲۳]
 ب) میراگر پیشنهادی اصطکاکی بدون لاستیک ج) میراگر پیشنهادی اصطکاکی با لاستیکی

در گام بعدی، از این میراگر در یک سازه ۲۰ طبقه که در معرض بار باد قرار دارد استفاده و عملکرد لرزه‌ای آن ارزیابی شد. همچنین در این پژوهش، از میراگر پیشنهادی برای کنترل ارتعاشات یک سازه بتنی ۱۵ طبقه بتنی استفاده شده است و عملکرد لرزه‌ای آن در مقابل بار زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی در مقابل بار باد و زلزله عملکرد خوبی و به‌عبارتی استهلاک انرژی بیشتری داشته است.

لاتور^۱ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۴] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دو نوع اتصال اصطکاکی در قاب فلزی پرداختند. برای این منظور ابتدا دو نوع اتصال دارای سطح لغزش افقی و قائم را ساختند و مورد آزمایش قرار دادند. سپس با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی و توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر دو اتصال، استهلاک انرژی خوبی داشته‌اند.

زیمبرو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۵] به بررسی عددی و آزمایشگاهی خصوصیات اصطکاکی و قابلیت استهلاک انرژی اتصالات برشی اصطکاکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد پدهایی که جنس آنها از فلز نرم یا سخت است می‌توانند در ترکیب با فولاد ضدزنگ مورد استفاده قرار گیرند و نتایج رضایت‌بخشی در استهلاک انرژی داشته باشند. همچنین تغییرات نیروی پیچ‌ها در طول لغزش میراگرها قابل توجه است؛ بنابراین طی مراحل تحلیل و طراحی، در نظر گرفتن آنها امری ضروری است و وجود واشرهای فلزی، تأثیر زیادی بر کاهش نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها نخواهد گذاشت. علاوه بر آنها در سرعت‌های بالای لغزش که دمای سطوح افزایش می‌یابد در نظر گرفتن حرارت در مدل‌سازی بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا افزایش دما سبب انبساط و انقباض پیچ‌ها و شل شدن آنها می‌شود.

¹ Latour

² Zimbru

میرزایی فر و همکاران (۲۰۱۷) [۲۶] ضریب رفتار سازه‌های فلزی مجهز به میراگرهای اصطکاکی سیلندری را محاسبه کردند. برای این منظور، آنها در گام اول، قاب‌های فولادی ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ طبقه را با نرم‌افزار SAP2000 طراحی کردند. در گام بعدی، مدل اجزای محدود قاب‌های مذکور را توسط نرم‌افزار Abaqus تحت چهار رکورد زلزله السنترو، کوبه، نرتریج و طبس، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی کردند. همچنین آنها از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده کردند و منحنی‌های پوش‌آور آنها را به دست آوردند. در نهایت برای هر قاب، ضریب رفتار در حالت تنش مجاز و مقاومت نهایی را به دست آوردند. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری در حالت تنش مجاز، برابر ۱۶ و در حالت مقاومت نهایی برابر ۱۱ می‌باشد.

کیم^۱ و کیم (۲۰۱۷) [۲۷] به توسعه روش طراحی بر اساس عملکرد قاب‌های خرپایی دارای میراگر اصطکاکی و همچنین ارزیابی رفتار لرزه‌ای آنها پرداختند. برای این منظور، سازه خرپایی ۶ و ۱۲ طبقه با و بدون میراگر اصطکاکی تحلیل و براساس عملکرد طراحی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که مفصل پلاستیک در وسط قاب تشکیل می‌شود و استفاده از میراگر اصطکاکی در محلی که مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود موجب کاهش خسارات سازه‌ای و افزایش استهلاک انرژی و به عبارتی سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه می‌شود.

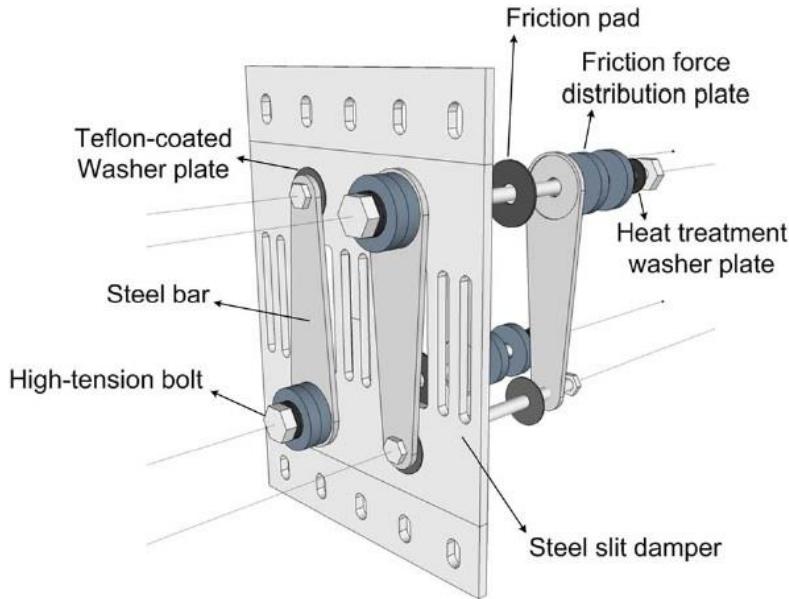
وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۷) [۲۸] به بررسی عددی و آزمایشگاهی نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی با سطح قوسی پرداختند. برای این منظور ابتدا با استفاده از روابط تئوریک رفتار هیستریزیس میراگر پیشنهادی را تخمین و گسترش دادند. سپس شش نمونه آزمایشگاهی را آزمودند. میزان بار لغزش، انرژی مستهلک‌شده، سختی مؤثر و میرایی هر نمونه را بررسی کردند. همچنین نمودار هیستریزیس حاصل از رابطه تئوریک و نمونه‌های آزمایشگاهی را مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که نتایج آزمایشگاهی با روابط تئوریک اختلاف کمی دارد. بنابراین از روابط تئوریک برای تخمین رفتار هیستریزیس میراگرهای پیشنهادی استفاده کرد. مشاهده شد که میراگرهای پیشنهادی دارای نمودار هیستریزیس، زینی‌شکل هستند. در نتیجه، با افزایش جابه‌جایی مقدار نیروی لغزش، زیاد می‌شود. همچنین مقدار نیروی لغزش در هر سیکل با میانگین نیروی لغزش همه سیکل‌ها کمتر از ۱۵ درصد اختلاف دارد.

لی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) [۲۹] به توسعه میراگرهای حساس به جابه‌جایی برای عملکرد مناسب در دو سطح زلزله پرداختند. برای این منظور در این تحقیق از میراگر فلزی تسلیم‌شونده و میراگر اصطکاکی به‌صورت موازی استفاده کردند (شکل ۳). محققان در این پژوهش ابتدا میراگری با مکانیزم اصطکاکی و فلزی تسلیمی را ساختند که برای زلزله‌های متوسط میراگر اصطکاکی فعال شود و برای زلزله‌های شدید میراگر فلزی تسلیمی به همراه میراگر اصطکاکی فعال شود. در گام بعدی، ابتدا میراگر اصطکاکی و سپس میراگر فلزی تسلیم‌شونده را به‌تنهایی و سپس میراگر ترکیبی پیشنهادی را آزمایش کردند. نتایج نمونه آزمایشگاهی نشان داد که میراگر پیشنهادی نسبت به میراگرهای اصطکاکی و میراگر فلزی تسلیم‌شونده، استهلاک انرژی بیشتری خواهد داشت. در مرحله بعدی تحقیق، میراگر پیشنهادی در نرم‌افزار LS-Dyna مدل‌سازی شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مکانیزم انتقال نیرو و همچنین رفتار پس از تسلیم میراگر فلزی بررسی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در گام پایانی بارگذاری میراگر فلزی تسلیمی دچار تسلیم و شکست خواهد شد. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار Perform 3D به مقاومت‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه بتنی دارای میراگر پیشنهادی پرداختند. نتایج نشان داد که میراگر پیشنهادی، سبب کاهش پاسخ و بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم سازه‌ای خواهد شد.

¹ Kim

² Wang

³ Lee



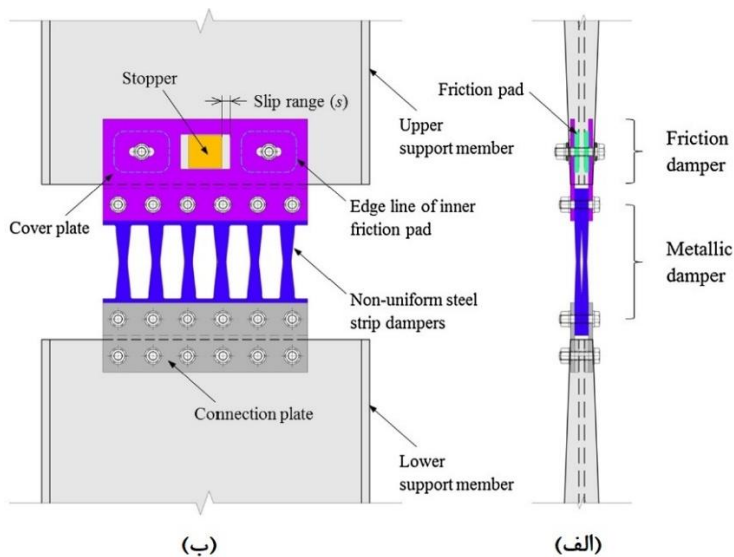
شکل ۳. میراگر اصطکاکی - تسلیمی پیشنهادی Joonho Lee و همکاران [۲۹]

مارتینز و کورادلی^۱ (۲۰۱۷) [۳۰] میراگر اصطکاکی جدید چندگانه قابل نصب روی ستون را به منظور کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ارائه دادند. برای این منظور، میراگر اصطکاکی جدید را روی ستون نصب کردند و ستون موردنظر را تحت چند رکورد زلزله ارزیابی کردند. در نهایت، مدل عددی آن را تهیه و نتایج تحلیل آن را با مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند. در گام آخر مدل wen's برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی میراگر توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی، استهلاک انرژی مناسبی دارد همچنین مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد و می‌توان از مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی لرزه‌ای میراگر پیشنهادی استفاده کرد.

بیات و زهرایی (۲۰۱۶) [۳۱] نقش میراگرها را در بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی با اتصالات صلب و نیمه‌صلب مطالعه کردند. برای این منظور، آنها قاب صلب بدون میراگر، قاب صلب به همراه میراگر اصطکاکی، قاب نیمه‌صلب بدون میراگر و قاب نیمه‌صلب به همراه میراگر اصطکاکی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت رکورد زلزله‌های کوبه، امپریال، نرتریج را تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. در نهایت، تغییر مکان، سرعت، شتاب و برش پایه حداکثر آنها با هم مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از میراگرهای اصطکاکی به همراه قاب با اتصالات نیمه‌صلب، بیشترین استهلاک انرژی یا به عبارتی، بهترین عملکرد لرزه‌ای را خواهد داشت. عزتی و همکاران (۲۰۱۷) [۳۲] به بررسی آزمایشگاهی میراگر جدید ترکیبی اینرسی اصطکاکی و مقایسه آن با میراگر دورانی ویسکوز پرداختند. آنها برای این منظور به مقایسه عملکرد سازه ۴ و ۸ طبقه فولادی تحت زلزله‌های کوبه و طیس یک‌بار به همراه میراگر ترکیبی اینرسی اصطکاکی و یک‌بار دیگر به همراه میراگرهای اینرسی ویسکوز پرداختند. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد میراگرهای اینرسی ویسکوز در مستهلک کردن انرژی، نسبت به میراگرهای اینرسی اصطکاکی، بهتر است.

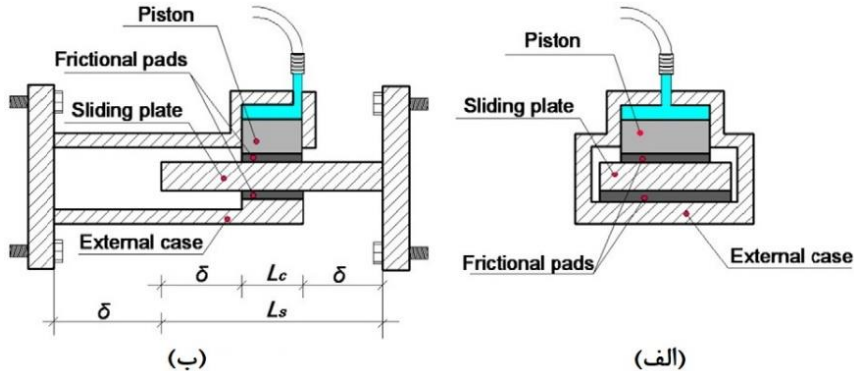
¹ Martínez and Curadelli

لی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) [۳۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی اصطکاکی- تسلیمی پرداختند. در این پژوهش، محققان ابتدا مکانیزم میراگر پیشنهادی که در شکل ۴ نشان داده شده است را توضیح دادند. در مرحله بعدی ۱۰ نمونه آزمایشگاهی ساختند و رفتار اصطکاکی، رفتار کرنشی، رفتار هیستریزیس و ظرفیت استهلاک انرژی آنها را ارزیابی کردند. در نهایت، بعد از صحت‌سنجی، چهار نمونه دیگر در نرم‌افزار OpenSees ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی، استهلاک انرژی مناسبی داشته است. سامانی و همکاران (۲۰۱۵) [۳۴] نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال قابل تنظیم را ارائه دادند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است در این میراگر، فشار عمود بر سطح با استفاده از فشار هیدرولیکی تأمین می‌شود. به همین منظور، ابتدا شش نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بررسی شد.



شکل ۴. میراگر اصطکاکی-تسلیمی پیشنهادی Chang-Hwan Lee و همکاران (الف) دید از کنار (ب) دید از روبه‌رو

¹ Lee



شکل ۵. میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال قابل تنظیم پیشنهادی سامانی و همکاران (الف) دید از کنار (ب) دید از روبه‌رو

نمونه‌های آزمایشگاهی دارای فشار هیدرولیکی مختلفی بودند همچنین بارگذاری با فرکانس‌های مختلفی انجام شد. رفتار هیستریزیس، بار لغزش، انرژی مستهلک‌شده، سختی مؤثر، میرایی ویسکوز معادل برای هر نمونه آزمایشگاهی محاسبه شد و از ضوابط مربوط به آیین‌نامه ASCE41-06 قسمت میراگرهای حساس به جابه‌جایی برای کنترل کیفی میراگرها استفاده شد. در نهایت، نمونه آزمایشگاهی مدل‌سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی رفتار هیستریزیس پایدار و جذب انرژی قابل توجهی دارد.

کازمی و حسینی (۲۰۱۵) [۳۵] به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای میراگر اصطکاکی و میراگر ویسکوالاستیک و بادبند پرداختند. برای این منظور، چهار سری قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه، سری اول قاب دارای مهاربند ضرب‌دردی به‌تنهایی، سری دوم قاب دارای میراگر ویسکوالاستیک، سری سوم قاب دارای میراگر اصطکاکی و میراگر ویسکوالاستیک و سری چهارم قاب دارای میراگر اصطکاکی تحت زلزله حوزه دور و نزدیک با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شد. در نهایت، دریافت طبقات و برش پایه نمونه‌ها با هم مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگرها تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دارند. البته میراگر اصطکاکی در مقایسه با میراگر ویسکوالاستیک با افزایش ارتفاع از استهلاک انرژی آن کاسته می‌شود. عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دارای میراگر اصطکاکی دورانی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک تقریباً یکسان است.

باقری و همکاران (۲۰۱۵) [۳۶] به مقایسه میراگر پیشنهادی فلزی تسلیم‌شونده U شکل و میراگر اصطکاکی-دورانی T شکل پرداختند. برای این منظور، ابتدا جزئیات میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل نشان داده شده است. سپس قاب‌های فلزی ۵ و ۱۰ طبقه تحت تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اضافه کردن هر دو میراگر سبب بهبود رفتار لرزه‌ای سازه می‌گردد؛ به‌طوری‌که میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل پیشنهادی سبب کاهش ۶ تا ۴۰ درصدی برش پایه و ۱۳ تا ۵۷ درصدی ماکزیمم جابه‌جایی طبقات می‌شود. در حالی که میراگر اصطکاکی دورانی، سبب کاهش ۱۵ تا ۴۱ درصدی برش پایه و ۹ تا ۵۳ درصدی ماکزیمم جابه‌جایی طبقات می‌شود. به عبارت بهتر، عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی در استهلاک انرژی زلزله، بهتر از عملکرد میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل پیشنهادی می‌باشد.

میرزایی‌فرد و میرطاهری (۲۰۱۶) [۳۷] به ارزیابی لرزه‌ای و انتخاب بهینه‌ترین حالت قرارگیری میراگر اصطکاکی سیلندی در سازه‌های فلزی پرداختند. برای این منظور آنها قاب فولادی ۶ طبقه ۳ دهانه را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت زلزله سنترو تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. در قاب مذکور، از میراگر

سیلندی یک بار به صورت قطری، بار دیگر به صورت زانویی و بار سوم به صورت زانویی استفاده کردند. منحنی هیستریزیس میراگرها، پاسخ لرزهای سازه‌ها با هم و با قاب بدون میراگر اصطکاکی سیلندی مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که قاب‌های دارای میراگر سیلندی نسبت به قاب‌های بدون میراگر، عملکرد لرزهای بهتری در کاهش جابه‌جایی و نیروی برش پایه دارند. همچنین پاسخ لرزهای و انرژی مستهلک‌شده سازه دارای میراگر اصطکاکی در حالت قطری، از همه حالت‌های دیگر بهتر بود.

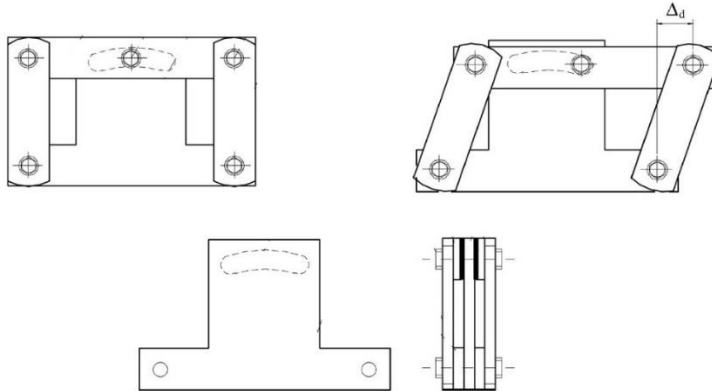
زهرایی و اعلائی (۲۰۱۶) [۳۸] ضریب رفتار سیستم دوگانه قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط و مهاربند هم‌گرا با میراگر اصطکاکی پال را بررسی کردند. برای این منظور، قاب خمشی دوگانه ۳، ۶ و ۹ طبقه در سه حالت ۳، ۵ و ۷ دهانه تحت سه رکورد زلزله چی‌چی، نورتریج و طیس در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل دینامیکی افزایشی و تحلیل استاتیکی غیرخطی شده است. در نهایت، به محاسبه ضریب رفتار پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در قاب هم‌گرا با میراگر اصطکاکی پال نسبت به سایر نمونه‌ها، ضریب رفتار تا ۱۰۰ درصد بهبود یافته است.

محمدی و همکاران (۲۰۱۳) [۳۹] به ارزیابی عملکرد لرزهای و ضریب رفتار قاب‌های خمشی مجهز به میراگر اصطکاکی پال پرداختند. برای این منظور در این پژوهش، سه عدد قاب ۳، ۵ و ۷ طبقه تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگرهای اصطکاکی پال سبب بهبود رفتار لرزهای سازه می‌شود. البته عملکرد لرزهای سازه دارای میراگر اصطکاکی پال با تعداد طبقات کمتر در کاهش دریفت طبقات و نیروی برش پایه، نسبت به سازه دارای میراگرهای اصطکاکی با تعداد طبقات بیشتر، بهتر است. همچنین استفاده از میراگر اصطکاکی پال، سبب افزایش ضریب رفتار می‌گردد.

برزویی و سروقدمقدم (۲۰۱۲) [۴۰] به تعیین پارامترهای مؤثر در کنترل پیچش سازه‌های نامتقارن جرمی توسط میراگرهای اصطکاکی پرداختند. برای این منظور آنها یک سازه به ازای خروج از مرکزیت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحت هفت رکورد زلزله تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی کردند و پاسخ لرزهای سازه‌های مذکور را مقایسه و پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزهای را مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چنانچه وضعیت قرارگیری میراگرهای اصطکاکی و بار لغزشی آنها در سازه‌های نامتقارن مورد استفاده قرار بگیرد، میراگرهای اصطکاکی، توانایی کنترل پیچش ضعیف و قوی سازه‌های نامتقارن را دارند.

وو^۱ و همکاران (۲۰۰۵) [۴۱] به بررسی آزمایشگاهی نوعی از میراگرهای اصطکاکی به نام میراگر اصطکاکی پال اصلاح شده پرداختند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است محققان در این پژوهش، از یک هسته T شکل به جای هسته صلیبی شکل در میراگر اصطکاکی پال استفاده کردند. میراگر مورد نظر در یک قاب فلزی، نصب و بارگذاری کردند. مقایسه میراگر پیشنهادی در این تحقیق با میراگر اصطکاکی پال نشان می‌دهد که عملکرد و میزان انرژی جذب شده هر دو میراگر، یکسان است ولی میراگر پال اصلاح‌شده پیکربندی ساده‌تر، مکانیزم حرکتی ساده‌تر و هزینه ساخت پایین‌تری دارد.

¹ Wu



شکل ۶. میراگر اصطکاکی پال اصلاح شده

تحقیقات انجام شده در زمینه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی

نابید^۱ و همکاران (۲۰۱۹) [۴۲] به بررسی تأثیر زلزله حوزه دور و نزدیک بر بار لغزش میراگر اصطکاکی دیواری پرداختند. برای این منظور، پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتنی ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه-دهانه تحت رکورد زلزله مصنوعی، زلزله حوزه دور و زلزله حوزه نزدیک را ارزیابی کردند. آنها از ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و ۱۰ رکورد زلزله حوزه نزدیک استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده برای محاسبه بار لغزش میراگر اصطکاکی رابطه تجربی که تابع تعداد طبقات، حداکثر شتاب زمین (PGA) و حداکثر سرعت زمین (PGV) می‌باشد را ارائه دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار حداکثر شتاب زمین (PGA) مقدار نیروی لغزش افزایش و مقدار انرژی مستهلک شده کاهش می‌یابد. همچنین در حالت کلی، مقدار نسبت نیروی لغزش بهینه برای زلزله‌های حوزه نزدیک حدود ۱/۵ برابر زلزله‌های حوزه دور بوده است.

شیرای^۲ و همکاران (۲۰۱۹) [۴۳] به بررسی آزمایشگاهی نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی با در نظر گرفتن حرکت گهواره‌ای فونداسیون حین زلزله پرداختند. برای این منظور، نمونه مقیاس شده آزمایشگاهی دارای میراگر اصطکاکی با سطح نیروی لغزش مختلف روی میز لرزان قرار داده‌اند. در پایان، برای هر نمونه آزمایشگاهی، پاسخ سازه شامل دریافت و شتاب طبقات را به دست آوردند و با هم مقایسه کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که نیروی لغزش بهینه میراگر اصطکاکی به انرژی ورودی زلزله به سازه و شرایط حرکت گهواره‌ای فونداسیون حین زلزله بستگی دارد. به علاوه هنگامی که سطح خطر افزایش می‌یابد؛ مقدار نیروی لغزش بهینه میراگر اصطکاکی افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر حرکت گهواره‌ای فونداسیون در هنگام زلزله برای بهینه کردن مقدار نیروی لغزش حتماً باید در نظر گرفته شود.

اونتیروس پروز^۳ و همکاران (۲۰۱۷) [۴۴] با توجه به اینکه رفتار میراگرهای اصطکاکی وابسته به سطح نیروی لغزش است، با استفاده از الگوی بهینه‌سازی استوار^۴ روشی برای بهینه کردن نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی و مکان‌یابی میراگرهای اصطکاکی در سازه را ارائه دادند. سپس با استفاده از این روش، سازه بتنی واقع در شهر

¹ Nabid

² Shirai

³ Ontiveros Pérez

⁴ Robust simultaneous optimization

کلومبین را طراحی و تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، باعث کاهش خرابی سازه در هنگام زلزله خواهد شد.

باقری و همکاران (۲۰۱۵) [۴۵] به تعیین مشخصه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی در طبقات مختلف قاب ساختمانی بر اساس شکل‌پذیری هدف پرداختند. هدف آنها در این تحقیق، ارائه روشی برای توزیع یکنواخت تقاضای شکل‌پذیری در ارتفاع سازه قاب خمشی مجهز به میراگر اصطکاکی بود که با استفاده از آن، بار لغزش میراگرهای طبقات مختلف به دست آید. برای این منظور، آنها سازه قاب خمشی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت سه رکورد زلزله تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. برای هر سه سازه فوق، بار لغزش میراگرها را یک بار طبق روش پیشنهادی و بار دیگر طبق روش معمولی Filiatrault & Cherry محاسبه کردند. در نهایت برای تمام سازه‌ها نمودار هیستریزیس میراگر در طبقات مختلف و مقدار شاخص خرابی^۱ را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در زلزله‌های قوی، سازه‌هایی که با روش معمولی بار لغزش آنها محاسبه و توزیع شده‌اند، احتمال خرابی زیاد است. همچنین بعد از اعمال روش پیشنهادی رفتار چرخه‌ای میراگرهای اصطکاکی بهبود یافته و میراگرها در طبقات مختلف مشارکت بیشتری در استهلاک انرژی دارد و خرابی قاب ساختمانی پس از اعمال روش پیشنهادی، کمتر است.

حق الهی و کرمی (۲۰۱۴) [۴۶] روشی جدید برای توزیع بار لغزش میراگر اصطکاکی به نام «میراگر اصطکاکی با لنت ترمز^۲» در ارتفاع قاب خمشی فولادی بهسازی، ارائه کرده‌اند. برای این منظور، قاب ۵ طبقه فولادی ضعیف را توسط میراگر اصطکاکی پیشنهادی، مقاوم‌سازی و بهسازی کردند. در قاب مذکور، میراگر اصطکاکی را با دو الگو یکی به صورت یکنواخت که در آن بار لغزش میراگر به صورت یکسان در ارتفاع سازه توزیع شده و دیگری به صورت نسبی که در آن، بار لغزش میراگر در هر طبقه به نسبت نیروی برشی آن طبقه توزیع شده، مورد استفاده قرار دادند. قاب ضعیف بهسازی شده با میراگر اصطکاکی تحت زلزله طیس به‌ازای بار لغزش صفر تا ۴۰ تن را مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار دادند و پاسخ لرزه‌ای آنها را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که قابی که در آن، میراگر اصطکاکی با الگوی نسبی توزیع شده است دارای بیشینه تغییر مکان بام و برش پایه کمتر و انرژی مستهلک شده بیشتر است. همچنین رفتار غیرخطی بهتری دارد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی ایده‌های جدید در زمینه کنترل ارتعاش سازه‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی بوده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر سعی شده است که با مرور پژوهش‌های مرتبط با میراگرهای اصطکاکی، بررسی ایده‌های جدید و همچنین مرور تحقیقات در رابطه با نحوه توزیع بار لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی به عنوان چالشی‌ترین پارامتر در طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی، شناخت بیشتری از روش کنترل ارتعاشات غیرفعال با استفاده از میراگرهای اصطکاکی حاصل گردد. در این پژوهش نتایج زیر قابل ذکر می‌باشد:

- ۱- میراگرهای اصطکاکی باعث کاهش نیاز لرزه‌ای در اعضای سازه‌ای می‌شود؛ لذا در طراحی سازه‌های جدید و بهسازی سازه‌های موجود، سبب کاهش هزینه ساخت می‌شود. همچنین در طول عمر مفید بهره‌برداری سازه، نیاز به حفظ و نگهداری ندارد و حتی پس از وقوع زلزله، نیاز به تعویض ندارد؛ بنابراین در طول عمر بهره‌برداری، هزینه زیادی به سازه اضافه نمی‌کنند.

¹ Damage Index

² Friction Brake Pad

- ۲- رفتار میراگرهای اصطکاکی، وابسته به سطح نیروی لغزش است؛ در صورتی که نیروی لغزش، کمتر از نیروی لغزش بهینه باشد میراگر اصطکاکی فعال نمی‌شود، سازه شبیه به سیستم مهاربندی شده عمل می‌کند و آسیب می‌بیند و در صورتی که نیروی لغزش بسیار بزرگ‌تر از نیروی لغزش بهینه باشد سازه شبیه به قاب مفصلی عمل می‌کند و آسیب می‌بیند؛ بنابراین تعیین دقیق میزان بار لغزش، بسیار مهم است.
- ۳- با توجه به اینکه میزان بار لغزش، تابع حداکثر شتاب ورودی به سازه است، از طرفی میراگرهای موجود اکثراً برای یک بار لغزش طراحی و ساخته می‌شوند، ضروری است میراگرهای اصطکاکی‌ای طراحی و ساخته شوند که توانایی فعال شدن در برابر دو سطح بار لغزش یا بیشتر را داشته باشند.
- ۴- زبری یا نرمی سطوح، دما، فشار وارد بر سطح و سرعت لغزش، از جمله پارامترهای مؤثر بر نیروی اصطکاک و پایداری رفتار میراگر هستند.
- ۵- میراگرهای اصطکاکی، نسبت به سایر انواع میراگرها در تغییر شکل‌های کوچک، مقدار انرژی بیشتری مستهلک می‌کنند؛ بنابراین یکی از کاربردهای این نوع میراگرها می‌تواند استفاده از آنها برای تغییر شکل‌های کوچک در سازه‌های بتنی باشد.

Reference

- [1] Khalilzadehvahidi, E., Khalil Zadeh Vahidi, P., & Moradi, R. (2019). Performance Pathology of Historic Adobe Structures and Their Methods of Retrofitting. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 16(45), 53-66. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100531.html?lang=en
- [2] Zare, M., Kamranzad, F., Parcharidis, I., & Tsironi, V. (2017, November 12). *Preliminary report of Mw7. 3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017*. E. report. https://www.emsc-csem.org/Files/news/Earthquakes_reports/Preliminary_report_M7.3_20171112_v3.pdf
- [3] Hosseini Hashemi, B., & Kiani, B. (2018). Performance of Steel Structures and Associated Lessons to be Learned from November 12, 2017, Sarpol-e Zahab-Ezgeleh Earthquake (MW 7.3). *Journal of JSEE*, 20(3), 33-46. http://www.jsee.ir/article_240778.html
- [4] Miyajima, M., Fallahi, A., Ikemoto, T., Samaei, M., Karimzadeh, S., Setiawan, H., Talebi, F., & Karashi, J. (2018). Site Investigation of the Sarpole-Zahab Earthquake, Mw 7.3 in SW Iran of November 12, 2017. *JSCE Journal of Disaster FactSheets*, 1-11. https://committees.jsce.or.jp/disaster/system/files/FS2018-E0002_0.pdf
- [5] Hosseini Hashemi, B., Kiani, B., & Farshchi, H. (2018). Performance of RC Structures and Associated Lessons to be Learned from November 12, 2017, Sarpol-e Zahab-Ezgeleh Earthquake (MW 7.3). *Journal of JSEE*, 20(3), 19-32. http://www.jsee.ir/article_240777.html
- [6] Vetr, M. G., Saeidian, M., & Naserpour, A. (2018). The Main Reasons for Great Damages of Reinforced Concrete Buildings on 12th November 2017, Sarpol-e Zahab Earthquake. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 20(3), 73-92. http://www.jsee.ir/article_240781_8cde9e1bacb23994ef33acc4a3820c2e.pdf
- [7] Soong, T. T., & Costantinou, M. C. (2014). *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. Springer Vienna. <https://books.google.com/books?id=uFMsBAAAQBAJ>

- [8] Spencer, B., Nathan, M., Newmark, & Nagarajaiah, S. (2003). State of the Art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering-ASCE* 129(7), 845-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))
- [9] Masoumnezhad, M. (2017). Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 57-79. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100505.html?lang=en
- [10] Soong, T. T. (1988). State-of-the-art review: Active structural control in civil engineering. *Engineering Structures*, 10(2), 74-84. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(88\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0141-0296(88)90033-8)
- [11] Chen, Y., Chen, C., Jiang, H., Liu, T., & Wan, Z. (2019). Study of an innovative graded yield metal damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 160, 240-254. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.028>
- [12] Anoushehei, M., Daneshjoo, F., Mahboubi, S., & Hashemi, M. H. (2018). Empirical evaluation of cyclic behavior of rotational friction dampers with different metal pads. *Scientia Iranica*, 25(6), 3021-3029. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4.225>
- [13] 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. <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.8672.4555>
- [14] Bonchev, G., Belev, B., & Mualla, I. (2017). Linked columns with friction dampers as a technique for seismic retrofit of steel moment resisting frames. *ce/papers*, 1, 3092-3099. <https://doi.org/10.1002/cepa.361>
- [15] Hadianfard, m. a. (2015). Rehabilitation of Steel Structures by Using the Rotational Friction Dampers. *Journal Of Ferdowsi Civil Engineering*, 26(2), 152-162. <https://doi.org/10.22067/civil.v26i2.49196>
- [16] Barmo, A., Mualla, I., & Hasan, H. (2015). The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation (Friction, Rubber and with the Addition of Rotational Friction Dampers). *Open Journal of Earthquake Research*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.4236/ojer.2015.41001>
- [17] Shirkhani, A., Mualla, I. H., Shabakhty, N., & Mousavi, S. R. (2015). Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.016>
- [18] Sanati, M., Khadem, S. E., Mirzabagheri, S., Sanati, H., & Khosravieh, M. Y. (2014). Performance evaluation of a novel rotational damper for structural reinforcement steel frames subjected to lateral excitations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 75-84. <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0213-5>
- [19] 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. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.05.009>
- [20] Montazer, M., Shirkhani, A., Moghaddam, M., & Rahmani, S. (2014). Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with rotational friction dampers. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2(1), 52-57. https://www.academia.edu/12087987/Incremental_Dynamic_Analysis_of_Steel_Frames_Equipped_With_Rotational_Friction_Dampers
- [21] Papadopoulos, P., Salonikios, T., Dimitrakis, S., & Papadopoulos, A. (2013). Experimental investigation of a new steel friction device with link element for

- seismic strengthening of structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 46(4), 487-504. <https://doi.org/10.12989/sem.2013.46.4.487>
- [22] Monir, H. S., & Zeynali, K. (2013). A modified friction damper for diagonal bracing of structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 87, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.04.004>
- [23] Roh, J.-E., Hur, M.-W., Choi, H.-H., & Lee, S.-H. (2018). Development of a Multiaction Hybrid Damper for Passive Energy Dissipation. *Shock and Vibration*, 2018, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2018/5630746>
- [24] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., & Landolfo, R. (2018). Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.002>
- [25] Zimbru, M., D'Aniello, M., Martino, A., Latour, M., Rizzano, G., & Piluso, V. (2018). Investigation on Friction Features of Dissipative Lap Shear Connections by Means of Experimental and Numerical Tests. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12(1), 154-169. <https://doi.org/10.2174/1874836801812010154>
- [26] Mirzaeefard, H., Mirtaheri, S. M., & Rahmani Samani, H. (2017). Response Modification Factor of Steel Structures Equipped with Cylindrical Frictional Dampers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 453-462. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.689>
- [27] Kim, J., & Kim, S. (2017). Performance-based seismic design of staggered truss frames with friction dampers. *Thin-Walled Structures*, 111, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.001>
- [28] Wang, G., Wang, Y., Yuan, J., Yang, Y., & Wang, D. (2017). Modeling and experimental investigation of a novel arc-surfaced frictional damper. *Journal of Sound and Vibration*, 389, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.11.019>
- [29] Lee, J., Kang, H., & Kim, J. (2017). Seismic performance of steel plate slit-friction hybrid dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.005>
- [30] Martínez, C. A., & Curadelli, O. (2017). Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control. *Journal of Sound and Vibration*, 399, 60-74. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.03.022>
- [31] Bayat, M., & Zahrai, M. (2016). Impact of Friction Dampers on Improving Seismic Performance of Rigid and Semi-Rigid. *Journal of Structure & Steel*, 1395(19), 67-75. <http://journalisss.ir/article-1-63-fa.html>
- [32] Experimental Studies of New Hybrid Inertia Rotational Friction Damper and the Compare of It's Performance with Inertia Rotational Viscous Damper. (2017). *Journal of Structure & Steel*, 1395(20), 23-30. <http://journalisss.ir/article-1-176-fa.html>
- [33] Lee, C.-H., Kim, J., Kim, D., Ryu, J., & Ju, Y. K. (2016). Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection. *Engineering Structures*, 114, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.007>
- [34] Samani, H. R., Mirtaheri, M., & Zandi, A. P. (2015). Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.019>

- [35] Kazemia, M. T., & Hoseini, H. (2015). Performance Evaluation of Viscoelastic and Friction Passive Damping System in Steel Structures. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(2), 1-23. http://www.qjseg.ir/article_749.html
- [36] Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A. (2015). U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. *Structures*, 3, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.04.003>
- [37] Mirzaei Fard, H., & Mirtaheri, M. (2015). Seismic evaluation and selection of optimal location of cylindrical friction dampers in steel structures. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 2(4), 18-30. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=285749>
- [38] Zahrai, S. M., & Alaei, H. (2016). Response Modification Factor for Dual System of Medium Ductility Steel Moment Concentric Braced with Pall Friction Damper. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31.2(4.2), 91-99. http://sjce.journals.sharif.edu/article_935.html?lang=en
- [39] Mahmoudi, M., Mirzaei, A., & Vosough, S. (2013). Evaluating Equivalent Damping and Response Modification Factors of Frames Equipped by Pall Friction Dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 1(1), 78-92. <https://doi.org/10.22075/jrce.2013.7>
- [40] Borzouie, J., & Moghadam, A. S. (2012). Torsional Control of Mass Eccentric One Story Buildings by Friction Dampers. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 2-28(1), 9-15. http://sjce.journals.sharif.edu/article_639.html?lang=en
- [41] Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., & Ou, J. (2005). Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. *Engineering Structures*, 27(8), 1258-1267. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.03.010>
- [42] Nabid, N., Hajirasouliha, I., & Petkovski, M. (2021). Simplified Method for Optimal Design of Friction Damper Slip Loads by Considering Near-Field and Far-Field Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(9), 1851-1875. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1605316>
- [43] Shirai, K., Nagaoka, A., Fujita, N., & Fujimori, T. (2019). Optimal Damper Slip Force for Vibration Control Structures Incorporating Friction Device with Sway-Rocking Motion Obtained Using Shaking Table Tests. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 6356497. <https://doi.org/10.1155/2019/6356497>
- [44] Ontiveros Pérez, S., Miguel, L., & Miguel, L. (2017). Robust Simultaneous Optimization of Friction Damper for the Passive Vibration Control in a Colombian Building. *Procedia Engineering*, 199, 1743-1748. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.430>
- [45] Bagheri, S., Hadidi, A., & Bastami, N. (2015). Determination of Slip Load of Friction Dampers Based on Target Ductility in Different Stories of Building Frames. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45.2(79), 1-11. https://ceej.tabrizu.ac.ir/article_3836.html?lang=en
- [46] Haghollahi, A., & Karami, S. (2014). Study of Application of Fbp Friction Damper in a Chevron Brace for Steel Frame Rehabilitation. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 30-2(2), 125-132. http://sjce.journals.sharif.edu/article_793.html?lang=en