



## عملکرد لرزه‌ای پیکربندی جدیدی از میراگر اصطکاکی دورانی در مهاربندهای ضربدری

امین قلی‌زاد<sup>\*</sup>، محمد مروج نکو

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۲  
بازنگری: ۱۳ آبان ۱۳۹۴  
پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۶ بهمن ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

کنترل ارتعاشات  
میراگر اصطکاکی دورانی  
شاخص عملکرد لرزه‌ای  
لنگر لغزش بهینه  
پیکربندی بهینه

**چکیده:** در این مقاله پیکربندی جدیدی برای میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهاد شده و رفتار آن تحلیل گردیده است. این میراگر دارای ساختاری بسیار ساده‌تر از میراگر پال بوده و المان اصطکاکی شامل مفصل و بازوها بر خلاف میراگر موآلا که در زیر تیر قرار می‌گیرد، در مرکز قاب بوده و از طریق کشش و فشاری که از مهاربندها اعمال می‌شود، مفصل اصطکاکی تحت لنگر دورانی قرار می‌گیرد. پارامترهای طراحی این نوع میراگر که در این مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند، لنگر آستانه لغزش در مرکز میراگر، طول بازوی افقی و طول بازوی قائم میراگر است. رابطه‌ای بین مقادیر بهینه سه پارامتر یاد شده بدست آمده است که عملکرد بهینه را برای میراگر فراهم می‌کند. همچنین روشی ساده و مبتنی بر تحلیل استاتیکی معادل برای طراحی این میراگر ارائه شده است که لنگر لغزش بهینه را به طور متغیر در طبقات توزیع می‌کند. تعبیه میراگرهای بهینه در طبقات قاب و بررسی شاخص عملکرد آن‌ها، برتری این روش توزیع را نسبت به توزیع یکنواخت نشان می‌دهد. توزیع متغیر روشی ساده و بدون نیاز به تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی زیاد برای یافتن بهترین شاخص عملکرد است. این روش شاخص‌های عملکردی بهتر از شاخص‌های بدست آمده از توزیع یکنواخت ارائه می‌دهد. همچنین در توزیع متغیر لنگر لغزش در طبقات، همه میراگرها بخصوص در طبقه بام به خوبی به لغزش می‌افتند. در مطالعات موردی میراگر پیشنهادی شاخص عملکرد لرزه‌ای سازه را تا ۱۱٪ بهبود داده است که در صورت توزیع بهینه در طبقات تا ۱۷٪ نیز افزایش می‌یابد. کارایی این سیستم در سازه‌های مرتفع‌تر و تحت زلزله‌های شدیدتر بیشتر است.

### ۱- مقدمه

سیستم‌های کنترل غیرفعال به طور موفقیت‌آمیزی برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه در مقابل زلزله و بادهای قوی به کار رفته است. میراگرهای اصطکاکی که نوعی از این سیستم‌ها است، پتانسیل بالایی در جذب و استهلاک انرژی با هزینه پایین و سهولت در نصب و نگهداری دارد. میراگرهای اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب کف‌ها را به طور قابل توجهی کاهش داده و آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات داخل آن به حداقل می‌رساند. میراگرهای اصطکاکی رفتار هیستریتیک<sup>۱</sup> پایدار، حلقه‌های هیستریزیس مستطیلی بزرگ با کاهش سختی کم در سیکل‌های زیاد و قابلیت جذب انرژی بالایی دارد؛ مکانیزم ساده‌ای دارند به طوری که ساخت، نصب و نگهداری آن‌ها را آسان کرده و فضای کمی را در سازه اشغال می‌کنند. همه این مزایا باعث می‌شود هزینه اولیه ساخت سازه جدید یا بهسازی یک سازه موجود کاهش یابد. سیستم‌های اصطکاکی انرژی را از طریق لغزش دو قطعه نسبت به یکدیگر مستهلک می‌کنند. گزیده‌ای از مطالعات انجام گرفته در خصوص بادبندهای مجهز به میراگر اصطکاکی توسط نویسنده مقاله [۱] و قبل از آن توسط لوی<sup>۲</sup>

و همکارانش [۲] ارائه شده است. سه دهه پیش میراگرهای اصطکاکی که برای لغزش تحت بار از پیش تعیین شده طراحی شده بودند توسط فیلترالت<sup>۳</sup> و چری [۳] مطالعه شده و سیستم‌های اصطکاکی از نوع اتصالات سوراخ‌دار و پیچ شده که دو قطعه از یک مهاربند را با پیچ‌های پرمقاومت اصطکاکی به یکدیگر متصل می‌کردند به وسیله فیتزجرالد<sup>۴</sup> و همکارانش [۴] پیشنهاد شد. پوپوف<sup>۵</sup> و همکارانش این اتصال را در یک مدل آزمایشگاهی انعطاف‌پذیر روی میز لرزان آزمایش کردند و مشاهده کردند که انرژی ورودی را به طور موثری مستهلک می‌کند.

میراگرهای اصطکاکی بیشتر در کانادا و به عنوان مهاربند در بهسازی و در سازه‌های فولادی جدید به وسیله پال بکار گرفته شد [۵]. در دهه اخیر موآلا<sup>۶</sup> [۶] نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی را با عملکرد دورانی ارائه کرد. رفتار هیستریتیک و پایدار میراگر وابسته به نوع صفحات اصطکاکی به کار رفته است. آزمایش‌هایی برای یافتن پارامترهای موثر مانند تعداد دفعات بارگذاری، دامنه جابه‌جایی، نیروی پیش تنیدگی پیچ‌ها و پیش تنیدگی مهارها بر روی مدل قاب مجهز به میراگر اصطکاکی انجام شده است [۷].

3 Filiatrault  
4 Fitzgerald  
5 Popove  
6 Mualla

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gholizad@uma.ac.ir

1 hysteretic  
2 Levy

$$SPI = \sqrt{R_d^2 + R_f^2 + R_e^2} \quad (۱)$$

$$R_d = \frac{D_f}{D_p} \quad (۲)$$

$$R_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (۳)$$

$$R_e = \frac{E_i - E_h}{E_i} \quad (۴)$$

که در روابط بالا  $R_d$  فاکتور کاهش پاسخ،  $R_f$  فاکتور کاهش برش پایه و  $R_e$  فاکتور انرژی مانده است.  $D_f$  تغییر مکان سازه مجهز به میراگر اصطکاکی،  $D_p$  تغییر مکان سازه قاب خمشی اولیه،  $V_f$  برش پایه سازه مجهز به میراگر اصطکاکی،  $V_p$  برش پایه قاب خمشی اولیه،  $E_i$  انرژی ورودی به سازه مجهز به میراگر اصطکاکی و  $E_h$  انرژی هیستریتیک اتلاف شده توسط میراگر می‌باشد. در روابط بالا فرض بر الاستیک ماندن اعضای سازه می‌باشد. با توجه به رابطه ۱ تا ۴ و فاکتورهای موثر در آن، بهترین حالت عملکرد میراگر زمانی است که شاخص کارایی میراگر حداقل شود. معمولاً نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی در طبقات یکسان فرض می‌شود. مورسچی [۱۵] نشان داده است که با بهینه کردن توزیع نیروی لغزش در ارتفاع بر پایه الگوریتم ژنتیک، می‌توان به مقادیر بهتری در شاخص‌های عملکرد دست یافت. نیروی لغزش بهینه وابسته به پرپود سازه و شدت زلزله روی داده است. به دست آوردن نیروی لغزش بهینه مستلزم تحلیل‌های دینامیکی زیادی است. بدین جهت فیلیترالت و چری [۳] روش ساده شده‌ای را نیز در تعیین بار لغزش بهینه ارائه کرده‌اند که در آن بار لغزش بهینه تابعی از پرپود سازه، پرپود زمین و شتاب محل می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از شاخص کارایی بیان شده و یک روش مستقیم بر مبنای تحلیل استاتیکی معادل به بررسی و تعیین نیروی لغزش بهینه پرداخته می‌شود. برای این منظور عملکرد میراگر در سه ساختمان چهار، هشت و دوازده طبقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ساختمان‌های مورد مطالعه تحت شتابنگاشت‌های مختلف با شتاب اوج کم تا خیلی زیاد مورد ارزیابی قرار گرفته و در هر شتاب، شاخص عملکرد به ازای لنگرهای لغزش مختلف محاسبه گردیده است. همچنین لنگر لغزش بهینه به دست آمده از حداقل شاخص عملکرد و روش مستقیم نیز مورد مقایسه قرار گرفته است.

همچنین آزمایش‌ها با مدل مقیاس کامل سه طبقه بر روی میز لرزان نشان داده است که سیستم میراگر ارائه شده ظرفیت خوبی برای کاهش قابل توجه در ارتعاشات ناشی از زلزله دارد. همچنین مدل‌سازی عددی این قاب سه طبقه در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی DRAIN-2DX انطباق کارایی لرزه‌ای قاب با میراگر اصطکاکی با نتایج آزمایشگاهی را تایید می‌کند [۷]. موالا و بلیو با تحلیل‌های عددی نشان داده‌اند که در یک لنگر لغزش برای میراگر اصطکاکی دورانی، برش پایه حداقل و انرژی میرا شده حداکثر است. همچنین افزایش سختی میراگر و مهاربندها تأثیری در مقدار برش پایه و انرژی میرا شده ندارد اما باعث کاهش جابجایی قاب می‌شود. به علاوه این که نیروی پیش تنیدگی در مهاربندها تأثیر چندانی در پاسخ قاب ندارد [۶]. کارایی میراگر مذکور توسط دیگر محققین نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله میرزاباقری، آقا کوچک و همکارانشان رفتار لرزه‌ای قاب فولادی مجهز به این میراگر را با افزایش تعداد صفحات اصطکاکی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند [۸].

گل افشانی و قلی‌زاد از میراگر اصطکاکی برای کاهش آسیب خستگی استفاده نمودند [۹]. ابداع پیکربندی‌های جدید برای میراگرهای اصطکاکی و مطالعه کارایی آن‌ها همچنان ادامه دارد [۱۵]. در این خصوص می‌توان به ارائه پیکربندی جدیدی برای میراگرهای اصطکاکی دورانی در مهاربندهای قطری توسط سعید منیر و همکارانش اشاره کرد که شامل پیچ‌های اصطکاکی بوده و نتایج بررسی آزمایشگاهی آن را با تحلیل نرم‌افزار SAP2000 آزمودند [۱۱]. میرطاهری و همکارانش میراگر اصطکاکی سیلندری را که شامل استوانه‌های اصطکاکی داخل هم بود پیشنهاد داده و نمونه فیزیکی آن را مورد آزمایش قرار دادند [۱۲] که متعاقباً رحمانی سامانی و گروه اشاره شده کارایی نوع نیمه فعال این میراگر را در عملکرد لرزه‌ای سازه مورد ارزیابی قرار دادند [۱۳]. برخی محققین نیز در زمینه تعیین پارامترهای بهینه برای میراگرهای تعبیه شده در طبقات یک سازه مطالعه نموده‌اند که می‌توان به بهینه‌سازی چند هدفه فلاح و همکارانش با استفاده از الگوریتم ژنتیک اشاره نمود [۱۴]. شایان ذکر است در این مقاله ترکیب متفاوت و ساده‌تری از میراگر اصطکاکی دورانی معرفی و عملکرد آن بصورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت کارایی آن با مطالعه عددی سنجیده شده و رویه ساده‌ای برای طراحی مهندسی آن پیشنهاد شده است.

نیروی لغزش بهینه یک پارامتر مهم در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی است. اگر نیروی آستانه لغزش بسیار زیاد باشد، ممکن است در یک زلزله متوسط میراگرها لغزش نکرده و سازه به صورت قاب خمشی مهاربندی شده عمل کرده و در نتیجه خرابی در سازه ایجاد شود. نیروی لغزش بهینه مربوط به میراگرهای اصطکاکی را می‌توان از شاخص‌های عملکرد به دست آورد. در شاخص عملکرد میراگرهای اصطکاکی فاکتورهای چون کاهش تغییر مکان، افزایش اتلاف انرژی میراگر، کاهش برش پایه موثر است. موالا و بلیو [۶] شاخص کارایی میراگر را به منظور ارزیابی عملکرد میراگرها به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

## ۲- میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی

شکل ۱ ساختار میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی را نشان می‌دهد. اجزای این میراگر بسیار شبیه به میراگر اصطکاکی است که توسط موآلا [۱۶] در سال ۲۰۰۰ ابداع گردیده است با این تفاوت که صفحه قائم امتداد یافته و شکل متقارنی دارد و در نتیجه به جای اینکه مانند میراگر دورانی به زیر تیر متصل شود، در مرکز قاب قرار گرفته و از چهار سو به اعضای مهاربندی به شکل ضربدری متصل شده است. اجزای اصلی میراگر از دو صفحه عمودی و دو صفحه افقی تشکیل شده است. لایه‌های اصطکاکی بین این صفحات قرار می‌گیرند. صفحات نیز به مهارهای ضربدری متصل می‌شود. صفحات افقی و قائم و لایه اصطکاکی با پیچ پیش تنیده به هم متصل می‌شوند. برای ثابت نگه داشتن نیروی بین صفحات از واشر فنری استفاده شده و برای جلوگیری از اثر این واشرهای فنری بر روی صفحات، بین آن‌ها واشر سخت قرار می‌گیرد. نوع عملکرد میراگر نیز مشابه میراگر دورانی می‌باشد. اما نوع تغییر شکل میراگر در قاب متفاوت است. با جابه جا شدن تیر تحت نیروی جانبی اعضای مهاربندی که در یک قطر قرار دارند شروع به کشیده شدن می‌کنند، در مقابل اعضای مهاربندی قطر دیگر تحت فشار قرار می‌گیرند. نیروهای اعمال شده در مرکز قاب بر روی میراگر اثر کرده و لنگری را پیرامون مفصل میراگر ایجاد می‌کنند. این لنگر ناشی از بازوهای میراگر می‌باشد. این لنگر باعث دوران مفصل در مرکز میراگر شده و تغییر شکل دورانی ایجاد می‌شود. مشابه میراگر دورانی، لنگر دورانی ایجاد شده بواسطه دوران نسبی لایه‌های اصطکاکی قرار گرفته بین صفحات میراگر سبب استهلاک انرژی می‌شود. الگوی رفتاری این میراگر تحت بار دوره‌ای از طریق تحلیل مدل اجزای محدود و بصورت شکل ۲ تایید شده و در این تحلیل از المان تماسی برای مدل نمودن اصطکاک بین اجزا استفاده گردیده است.

مطابق شکل ۱ مفصل اصطکاکی در نقطه E و مرکز قاب قرار می‌گیرد. در این شکل F نیروی جانبی وارد بر قاب می‌باشد، این نیرو توسط تیر بالایی قاب در قالب نیروهای کششی و فشاری  $F_1$  و  $F_2$  در هر یک از مهاربندها منتقل و باعث ایجاد لنگر  $M_f$  در میراگر می‌شود.  $r_v$  و  $r_h$  به ترتیب طول بازوی قائم و بازوی افقی میراگر می‌باشد. برای جلوگیری از کمانش مهاربندی ضربدری باید نیروی محوری هر یک از مهاربندها کمتر از نیروی لازم برای کمانش هر یک از مهاربندها باشد. می‌توان رابطه بین لنگر لغزش  $M_f$  و نیروی محوری مهاربندها  $F_1$  و  $F_2$  را برای بازوی عمودی و افقی میراگر به صورت رابطه زیر ارائه داد:

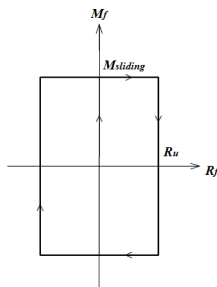
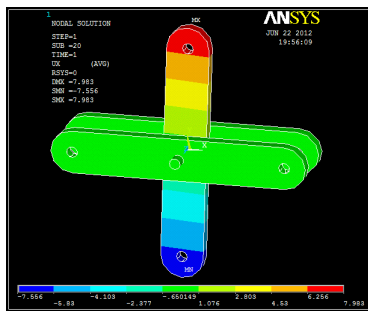
$$2r_h F_1 \sin \alpha_1 = M_f \quad (5)$$

$$2r_v F_2 \cos \alpha_2 = M_f \quad (6)$$

از روابط ۵ و ۶ مشخص است که مهاربندها دارای نیروی یکسانی نخواهند بود و در طی یک بارگذاری رفت و برگشتی مقدار حداکثر بار محوری در هر مهاربند جابه جا خواهد شد. بنابراین هر دو مهاربند باید برای حداکثر بار محوری رابطه ۵ و ۶ طراحی شوند:

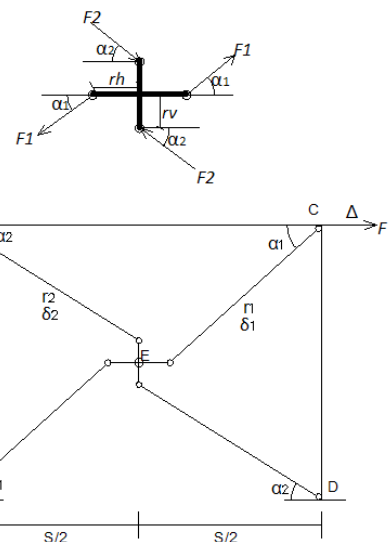
$$F_{design} = \max \left\{ \frac{M_f}{2r_h \sin \alpha_1}, \frac{M_f}{2r_v \cos \alpha_2} \right\} \quad (7)$$

که در این روابط  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  زاویه‌ای است که هر یک از مهاربندها با راستای افق می‌سازد. مطابق شکل ۲ رفتار لنگر-دوران میراگر در مفصل اصطکاکی از رفتار اصطکاکی کلمب تبعیت می‌کند.



شکل ۲: رفتار میراگر اصطکاکی بر مبنای تحلیل اجزای محدود [۷]

Fig. 2. Finite element analysis of friction damper and its behavior



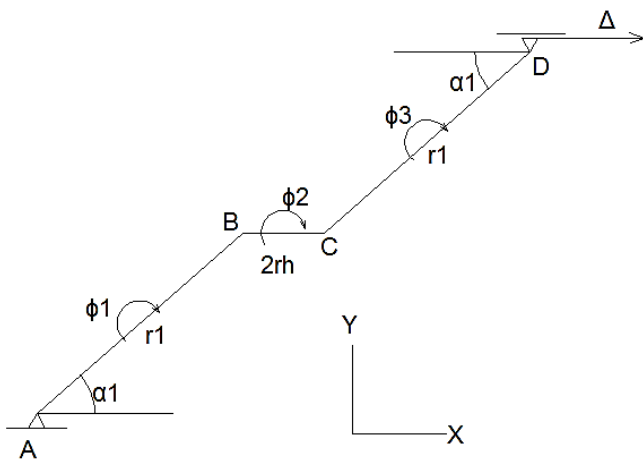
شکل ۱: قاب با میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی در مرکز

Fig. 1. Frame equipped with the proposed friction damper

### ۵- رابطه دوران مفصل میراگر و جابجایی قاب

برای بدست آوردن مقدار دوران در مرکز مفصل اصطکاکی در میراگر، نیاز به محاسبات دوران و جابجایی است. در شکل ۳ یکی از زوج مهاربندها به همراه بازوی افقی میراگر نشان داده شده است. طول هر یک از مهارها  $r_1$  و زاویه ای که با راستای افق می‌سازند  $\alpha_1$  و طول بازوی افقی میانی است. در شکل ۳ انتهای D مهاربند CD به اندازه  $\Delta$  جابه جا شده است و تحت این جابجایی هر یک از اعضای متصل به آن دوران و تغییر مکان داشته‌اند. با استفاده از معادلات سینماتیک حرکت می‌توان رابطه بین جابجایی قاب و دوران بازوی افقی  $\varphi_2$  میراگر را به صورت زیر بیان کرد:

$$\varphi_2 = \frac{\Delta}{2r_h \tan \alpha_1} \quad (10)$$



شکل ۳: مهاربند به همراه بازوی افقی متصل به آن

Fig. 3. Friction damper horizontal arms rotation

برای جفت مهاربندهای دیگر به همراه بازوی قائم میراگر که آنها را به همدیگر متصل می‌کند، نیز به طور مشابه مراحل بالا انجام می‌شود. شکل ۴ نشان دهنده این مهارها به همراه بازوی میانی و دوران آنها جهت انجام محاسبات است. در این شکل  $r_2$  هر یک از بازوها و  $\alpha_2$  زاویه‌ای است که هر یک از مهاربندها با راستای افق می‌سازند. به طور مشابه برای این جفت مهاربندها به همراه بازوی قائم میراگر، با استفاده از روابط دینامیک حرکت می‌توان نوشت:

$$\varphi_2' = \frac{\Delta}{2r_v} \quad (11)$$

از این شکل می‌توان دریافت که رفتار مفصل دورانی اصطکاکی در مقابل بار غیر خطی پلاستیک بوده و لنگر دوران در طول جابجایی قاب یکسان است. طبق آزمایشات انجام شده این چرخه‌ها پایدار بوده و هیچ تغییری در طول بارگذاری رفت و برگشتی از خود نشان نمی‌دهند [۱۷]. از طرفی طبق رابطه ۷ بار کماتش مهاربندها به لنگر دورانی اصطکاکی وابسته است بنابراین در طول یک تغییر مکان در یک قاب مقدار نیرو در مهاربندها افزایش پیدا نخواهد کرد و می‌توان آن‌ها را تحت یک نیروی ثابت در طی یک تغییر مکان طراحی کرد. در شکل ۲،  $Ru$  حداکثر دوران و  $M_{sliding}$  حداکثر لنگر در حالت لغزش میراگر است. از این شکل استنباط می‌شود تا زمانی که لنگر اصطکاکی در مفصل میراگر به لنگر لغزش نرسیده، هیچ دوران نسبی اتفاق نمی‌افتد.

### ۳- پارامترهای موثر در عملکرد میراگر

پارامترهای مورد بررسی برای میراگر پیشنهادی، شامل لنگر آستانه لغزش، طول بازوی افقی  $r_h$  و طول بازوی قائم  $r_v$  میراگر می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از روابط ریاضی، به بررسی شرایط بهینه برای قاب شکل ۱ پرداخته می‌شود. شرایط بهینه به معنی حداکثر انرژی مستهلک شده توسط میراگر در طی بارگذاری و حداقل جابجایی قاب تحت نیروی اعمال شده است. انرژی مستهلک شده در میراگر برابر است با حاصلضرب مقدار لنگر اصطکاکی در مقدار دوران نسبی ایجاد شده. چون رفتار میراگر مانند شکل ۲ می‌باشد، تحت یک بارگذاری استاتیکی، میراگر همیشه دو مقدار لنگر خواهد داشت، لنگری برابر با لنگر لغزش و لنگری برابر صفر. با این شرایط، تغییرات انرژی مستهلک شده توسط میراگر فقط وابسته به تغییرات دوران در مفصل میراگر است.

### ۴- جابجایی قاب و پارامترهای موثر میراگر

طبق شکل ۱ می‌توان رابطه تعادل را برای تیر قاب به صورت زیر نوشت:

$$K_f \Delta + F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 = F \quad (8)$$

که در این رابطه  $K_f$  سختی قاب خمشی بدون میراگر و مهاربند و  $F$  نیروی جانبی است. با جایگزین کردن نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  از روابط ۵ و ۶ در رابطه ۸ و حل بر حسب  $\Delta$ ، خواهیم داشت:

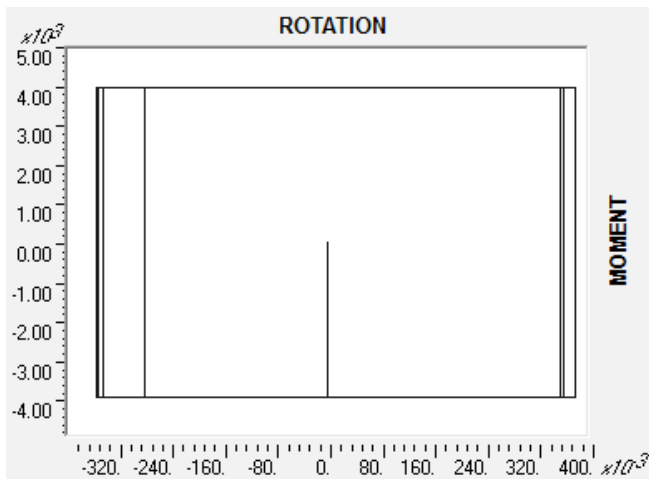
$$\Delta = \frac{F}{K_f} - \frac{M_f}{2K_f} \left( \frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} \right) \quad (9)$$

$\Delta$  تغییر مکان قاب تحت بارگذاری استاتیکی است. با جاگذاری مقادیر نیروی جانبی، لنگر اصطکاکی، سختی قاب خمشی و طول بازوهای میراگر به همراه زاویه  $\alpha_1$ ، مقدار  $\Delta$  بدست می‌آید.

رابطه ۱۴ بیان کننده شرایط بهینه برای قاب مجهز به میراگر است. به عبارت دیگر اگر برای یک میراگر تحت نیروی جانبی  $F$  و لنگر لغزش  $M_f$  در مفصل میراگر و با ابعاد  $r_v$  و  $r_h$  رابطه ۱۴ برقرار باشد، حداکثر انرژی مستهلک شده در میراگر را خواهیم داشت. اگر رابطه ۱۳ در مقدار لنگر  $M_f$  ضرب شده تا  $ED$  انرژی مستهلک شده بدست آید و از  $ED$  بدست آمده بر حسب  $M_f$  مشتق گرفته شود، رابطه ۱۴ مجددا حاصل می‌شود.

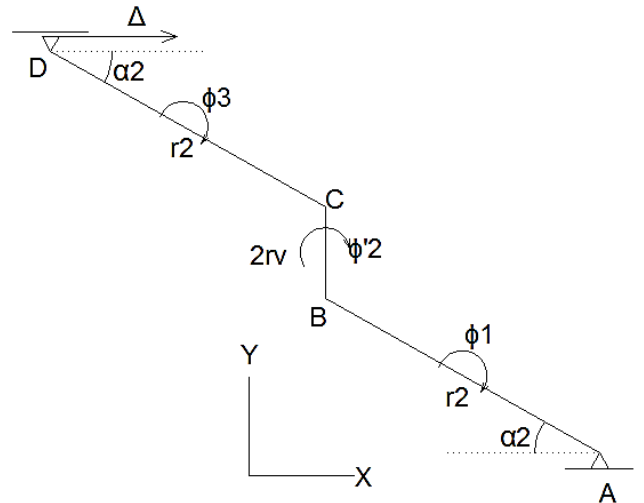
### ۷- مطالعه موردی شرایط بهینه

برای بررسی صحت رابطه ۱۴ مطالعه موردی با استفاده از نرم افزار تحلیل سازه و تحت بار جانبی استاتیکی انجام گرفته است. مدل مطالعه شده یک قاب خمشی یک دهانه و یک طبقه با طول دهانه ۶ متر و ارتفاع ۳ متر است. برای تیر و ستون از یک مقطع I شکل با ابعاد ۳۰۵ میلیمتر ارتفاع، ۱۲۷ میلیمتر عرض بال، ضخامت بال ۹/۶۵ میلیمتر و ضخامت جان ۹/۳۵ میلیمتر و برای مهاربندها از یک مقطع لوله‌ای با قطر ۲۰۰ میلیمتر و ضخامت ۱۰ میلیمتر استفاده شده است. مقطع اجزای میراگر مهم نیست چون از مصالح صلب تعریف می‌شود بنابراین به صورت دلخواه انتخاب می‌شود. مصالح از فولاد با مدول الاستیسیته  $200 \text{ kN/mm}^2$  استفاده شده است. مقدار بار جانبی برابر با  $100 \text{ kN}$  به قاب اعمال می‌شود. فرض شده است که تحت این بار استاتیکی، قاب به صورت الاستیک عمل می‌کند. برای مدل کردن میراگر اصطکاکی دورانی از المان پلاستیک ون استفاده شده است. مقدار لنگر لغزش میراگر نیز  $4 \text{ kN.m}$  است. برای اطمینان از رفتار المان ون قاب تحت یک بارگذاری رفت و برگشتی قرار می‌گیرد. منحنی لنگر- دوران المان ون استفاده شده برای مدل میراگر در شکل ۵ ترسیم شده است.



شکل ۵: منحنی لنگر- دوران المان ون برای مدل میراگر

Fig. 5. Wen plastic element moment-rotation for damper modelling



شکل ۴: مهاربند به همراه بازوی قائم متصل به آن

Fig. 4. Friction damper vertical arms rotation

دوران کلی در میراگر که در هر دو بازو اتفاق می‌افتد، برابر با جمع دو مقدار بالا است. هر دو دوران تحت یک جابجایی مشخص، خلاف جهت یکدیگر می‌باشد. بنابراین دوران نسبی در مفصل میراگر برابر است با:

$$\varphi = \frac{\Delta}{2r_v} + \frac{\Delta}{2r_h \tan \alpha_1} \quad (12)$$

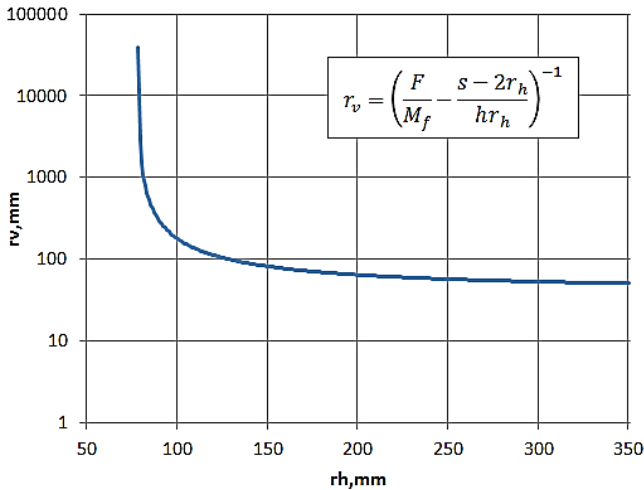
### ۶- لنگر لغزش بهینه و ابعاد بهینه میراگر

با جایگزینی رابطه ۹ در رابطه ۱۲، مقدار دوران میراگر بر حسب ابعاد میراگر و لنگر لغزش بدست می‌آید. این رابطه یک رابطه سهمی شکل با جهت تعقر رو به پایین بوده پس دارای نقطه اکسترممی با حداکثر دوران است.

$$\varphi = \frac{F}{2K_f} \left( \frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} \right) - \frac{M_f}{4K_f} \left( \frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} \right)^2 \quad (13)$$

با مساوی صفر قرار دادن مشتق رابطه ۱۳ نسبت به جمله  $\left( \frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} \right)$  خواهیم داشت:

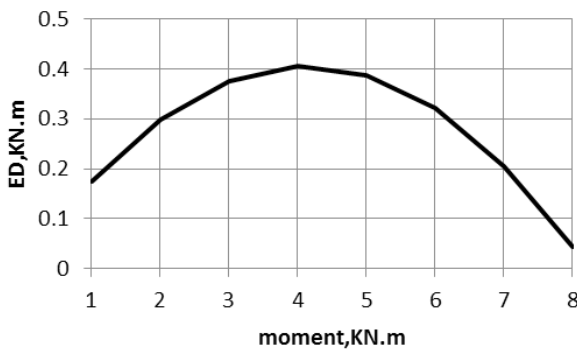
$$\frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} = \frac{F}{M_f} \quad (14)$$



شکل ۶: رابطه  $r_v$  و  $r_h$  بهینه برای قابی با ابعاد ۳ در ۶ متر

Fig. 6. Optimum  $r_h$  vs.  $r_v$  for a 6m×3m frame

حال برای مدل ارائه شده در نرم افزار SAP2000، لنگر لغزش بهینه یافت می‌شود. تمام مشخصات قاب مدل شده ثابت بوده و فقط مقدار لنگر لغزش تغییر داده می‌شود. طول بازوی افقی میراگر  $r_h = 100$  mm و طول بازوی قائم  $r_v = 200$  mm انتخاب می‌شود. به ازای هر لنگر مقدار انرژی مستهلک شده، ED محاسبه می‌شود. شکل ۷ نمودار تغییرات لنگر و انرژی را برای قاب مدل شده نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۷ مشخص است، لنگر لغزش در  $4 \text{ kN.m}$  حداکثر انرژی مستهلک شده در میراگر را دارد.



شکل ۷: رابطه لنگر لغزش و مقدار انرژی میرا شده

Fig. 7. Sliding threshold moment vs. dampers energy dissipation rate

حال با استفاده از رابطه ۱۴ لنگر لغزش بهینه برای قاب مدل شده با همان مشخصات محاسبه می‌شود.

همان طور که از شکل ۵ مشخص است، این شکل مانند شکل ۲ مستطیلی کامل بوده و تحت لنگر لغزش  $4 \text{ kN.m}$  لغزش کرده است. بنابراین المان ون در قاب مجهز به میراگر رفتار اصطکاکی را به درستی مدل می‌کند.

ابتدا طول بازوهای میراگر بررسی می‌شود. به عبارت دیگر تغییرات جابجایی قاب، دوران میراگر و انرژی مستهلک شده توسط میراگر نسبت به تغییرات طول بازوهای افقی و قائم میراگر در جدول ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. ستون اول، به ترتیب دوران در میراگر، جابجایی قاب و انرژی مستهلک شده را برای قاب مدل شده در نرم افزار نشان می‌دهد. ستون دوم نیز همین مقادیر را که بر اساس روابط ۹، ۱۲ و ۱۴ برای قاب با مشخصات بالا محاسبه شده، نشان می‌دهد. اختلاف کمی بین مقادیر عددی و تحلیلی مشاهده می‌شود. این اختلاف ناشی از عدم در نظر گرفتن تغییر شکل طولی مهاربندها در رابطه ۸ و بعضی ساده سازی‌ها در رابطه ۱۲ می‌باشد. همان طور که از جدول ۱ مشخص است، با افزایش ابعاد میراگر، مقدار جابجایی قاب افزایش و مقدار دوران و انرژی مستهلک شده توسط میراگر کاهش می‌یابد. طبق رابطه ۱۳، باید به ازای یک ابعاد مشخص از میراگر، دوران و انرژی حداکثر باشد. با مراجعه به جدول ۱، ردیف دوم به ازای  $100 \text{ mm}$   $r_h = 200 \text{ mm}$  و  $r_v = 200 \text{ mm}$  مقدار دوران و انرژی میرا شده حداکثر است. حال با استفاده از رابطه مقدار ابعاد بهینه محاسبه می‌شود. در این رابطه طول بازوی افقی  $r_h = 100 \text{ mm}$  داده می‌شود و سپس مقدار  $r_v$  از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود. طبق رابطه ۱۴  $r_v$  برابر است با:

$$r_v = \left( \frac{F}{M_f} - \frac{1}{r_h \tan \alpha_1} \right)^{-1} = \left( \frac{F}{M_f} - \frac{S - 2r_h}{hr_h} \right)^{-1} \quad (15)$$

$$= \left( \frac{100}{4} - \frac{6 - 2 \times 0.1}{3 \times 0.1} \right)^{-1} = 0.177 \text{ m}$$

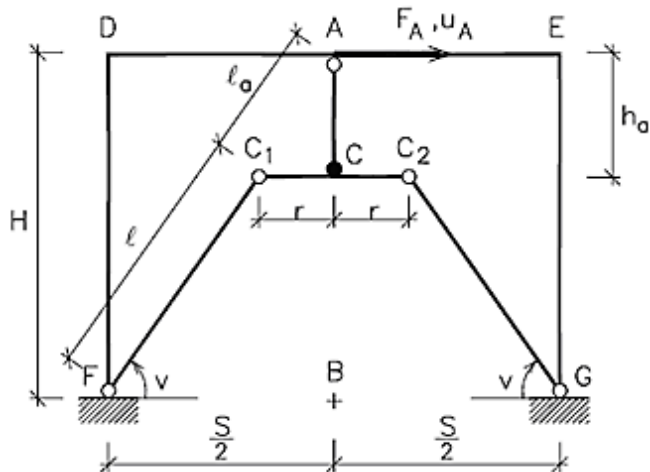
در رابطه ۱۵ مقدار  $\tan \alpha_1$  با مقدار  $\frac{S - 2r_h}{h}$  جایگزین شده است. در این رابطه  $S$  طول دهانه و  $h$  ارتفاع قاب می‌باشد. از رابطه ۱۵ مقدار  $r_v$  برابر با  $177$  میلی‌متر بدست آمد که به مقدار  $200$  میلی‌متر نزدیک است. اگر در قاب مدل شده در نرم‌افزار به جای  $r_v = 200 \text{ mm}$  عدد  $r_v = 177 \text{ mm}$  جایگزین شود، خواهیم دید که مقدار دوران برابر با  $0.10145 \text{ rad}$  که بیشتر از مقدار  $0.10140 \text{ rad}$  و جابجایی برابر با  $8/23$  میلی‌متر که کمتر از  $8/43$  میلی‌متر خواهد بود. اگر برای رابطه ۱۵ تغییرات  $r_v$  را نسبت به  $r_h$  برای قاب مدل شده در نرم‌افزار با ابعاد و مشخصات داده شده در بالا ترسیم کنیم، یک نمودار هیپربولیک بدست خواهد آمد که شاخه مقادیر مثبت آن در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان دهنده مقادیر بهینه  $r_v$  و  $r_h$  برای قاب داده شده است که یک مجانب افقی در  $r_v = 39 \text{ mm}$  و یک مجانب قائم در  $r_h = 78 \text{ mm}$  دارد. با نزدیک شدن مقدار  $r_h$  به  $78$  میلی‌متر، مقدار بهینه  $r_v$  به سمت بی نهایت میل می‌کند. هم چنین با میل کردن  $r_h$  به بی نهایت، مقدار بهینه  $r_v$  به عدد  $39$  میلی‌متر نزدیک می‌شود.

جدول ۱: جابجایی قاب، دوران و انرژی مستهلک شده در میراگر نسبت به تغییرات ابعاد میراگر

Table 1. Frame displacement, damper rotation and energy dissipation rate for different dimensions of damper

$r_h$ (mm)	$r_v$ (mm)	Rotation (rad)	Disp (mm)	ED (kN.m)	Rotation (rad)	Disp (mm)	ED (kN.m)
۱۰۰	۱۰۰	-/۰.۹۸۲۴	۶/۸۴	-/۳۹۲۹۶	-/۰.۹۰۹۸	۶/۲۰	-/۳۶۳۹۴
۱۰۰	۲۰۰	-/۱.۰۱۴	۸/۴۳	-/۴۰۵۶	-/۰.۹۳۷۰	۷/۷۰	-/۳۷۴۸۱
۱۰۰	۳۰۰	-/۱.۰۰۶۴	۸/۹۶	-/۴۰۲۵۶	-/۰.۹۲۹۴	۸/۲۰	-/۳۷۱۷۸
۱۰۰	۴۰۰	-/۰.۹۹۹۲	۹/۲۳	-/۳۹۹۶۸	-/۰.۹۲۲۵	۸/۴۵	-/۳۶۹۰۱
۱۰۰	۵۰۰	-/۰.۹۹۳۷	۹/۳۹	-/۳۹۷۴۸	-/۰.۹۱۷۴	۸/۶۰	-/۳۶۶۹۵
۱۰۰	۶۰۰	-/۰.۹۸۹۷	۹/۵	-/۳۹۵۸۸	-/۰.۹۱۳۵	۸/۷۰	-/۳۶۵۴۲
۲۰۰	۱۰۰	-/۰.۹۵۴۷	۱۰/۱	-/۳۸۱۸۸	-/۰.۸۸۹۳	۹/۲۰	-/۳۵۵۷۲
۲۰۰	۲۰۰	-/۰.۸۲۷۲	۱۱/۶۹	-/۳۳۰۸۸	-/۰.۷۶۶۷	۱۰/۷۰	-/۳۰۶۶۷
۲۰۰	۳۰۰	-/۰.۷۶۶۵	۱۲/۲۲	-/۳۰۶۶	-/۰.۷۰۹۲	۱۱/۲۰	-/۲۸۳۶۶
۲۰۰	۴۰۰	-/۰.۷۳۲۸	۱۲/۴۹	-/۲۹۳۱۲	-/۰.۶۷۷۳	۱۱/۴۵	-/۲۷۰۹۱
۲۰۰	۵۰۰	-/۰.۷۱۱۵	۱۲/۶۵	-/۲۸۴۶	-/۰.۶۵۷۱	۱۱/۶۰	-/۲۶۲۸۶
۲۰۰	۶۰۰	-/۰.۶۹۶۸	۱۲/۷۶	-/۲۷۸۷۲	-/۰.۶۴۳۳	۱۱/۷۰	-/۲۵۷۳۳
۳۰۰	۱۰۰	-/۰.۸۷۲۸	۱۱/۱۸	-/۳۴۹۱۲	-/۰.۸۱۵۹	۱۰/۲۰	-/۳۲۶۳۵
۳۰۰	۲۰۰	-/۰.۶۹۲۳	۱۲/۷۸	-/۲۷۶۹۲	-/۰.۶۴۳۳	۱۱/۷۰	-/۲۵۷۳۳
۳۰۰	۳۰۰	-/۰.۶۱۳۹	۱۳/۳۱	-/۲۴۵۵۶	-/۰.۵۶۹۱	۱۲/۲۰	-/۲۲۷۶۶
۳۰۰	۴۰۰	-/۰.۵۷۱۳	۱۳/۵۸	-/۲۲۸۵۲	-/۰.۵۲۸۹	۱۲/۴۵	-/۲۱۱۵۸
۳۰۰	۵۰۰	-/۰.۵۴۴۷	۱۳/۷۴	-/۲۱۷۸۸	-/۰.۵۰۳۸	۱۲/۶۰	-/۲۰۱۵۳
۳۰۰	۶۰۰	-/۰.۵۲۶۵	۱۳/۸۴	-/۲۱۰۶	-/۰.۴۸۶۷	۱۲/۷۰	-/۱۹۴۶۶
۴۰۰	۱۰۰	-/۰.۸۱۸۲	۱۱/۷۳	-/۳۲۷۲۸	-/۰.۷۶۶۷	۱۰/۷۰	-/۳۰۶۶۷
۴۰۰	۲۰۰	-/۰.۶۱۱۱	۱۳/۳۲	-/۲۴۴۴۴	-/۰.۵۶۹۱	۱۲/۲۰	-/۲۲۷۶۶
۴۰۰	۳۰۰	-/۰.۵۲۴	۱۳/۸۵	-/۲۰۹۶	-/۰.۴۸۶۷	۱۲/۷۰	-/۱۹۴۶۶
۴۰۰	۴۰۰	-/۰.۴۷۷	۱۴/۱۲	-/۱۹۰۸	-/۰.۴۴۲۳	۱۲/۹۵	-/۱۷۶۹۲
۴۰۰	۵۰۰	-/۰.۴۴۷۷	۱۴/۲۸	-/۱۷۹۰۸	-/۰.۴۱۴۷	۱۳/۰۹	-/۱۶۵۸۷
۴۰۰	۶۰۰	-/۰.۴۲۷۷	۱۴/۳۸	-/۱۷۱۰۸	-/۰.۳۹۵۸	۱۳/۱۹	-/۱۵۸۳۴
۵۰۰	۱۰۰	-/۰.۷۸۱۱	۱۲/۰۵	-/۳۱۲۴۴	-/۰.۷۳۳۲	۱۱/۰۰	-/۲۹۳۲۷
۵۰۰	۲۰۰	-/۰.۵۵۸۱	۱۳/۶۵	-/۲۲۲۲۴	-/۰.۵۲۰۷	۱۲/۵۰	-/۲۰۸۲۶
۵۰۰	۳۰۰	-/۰.۴۶۵۶	۱۴/۱۸	-/۱۸۶۲۴	-/۰.۴۳۳۲	۱۳/۰۰	-/۱۷۳۲۷
۵۰۰	۴۰۰	-/۰.۴۱۶	۱۴/۴۴	-/۱۶۶۴	-/۰.۳۸۶۳	۱۳/۲۴	-/۱۵۴۵۲
۵۰۰	۵۰۰	-/۰.۳۸۵۱	۱۴/۶	-/۱۵۴۰۴	-/۰.۳۵۷۲	۱۳/۳۹	-/۱۴۲۸۷
۵۰۰	۶۰۰	-/۰.۳۶۴۱	۱۴/۷۱	-/۱۴۵۶۴	-/۰.۳۳۷۴	۱۳/۴۹	-/۱۳۴۹۴
۶۰۰	۱۰۰	-/۰.۷۵۴۵	۱۲/۲۷	-/۳۰۱۸	-/۰.۷۰۹۲	۱۱/۲۰	-/۲۸۳۶۶
۶۰۰	۲۰۰	-/۰.۵۲۱	۱۳/۸۶	-/۲۰۸۴	-/۰.۴۸۶۷	۱۲/۷۰	-/۱۹۴۶۶
۶۰۰	۳۰۰	-/۰.۴۲۵	۱۴/۴	-/۱۷	-/۰.۳۹۵۸	۱۳/۱۹	-/۱۵۸۳۴
۶۰۰	۴۰۰	-/۰.۳۷۳۵	۱۴/۶۶	-/۱۴۹۴	-/۰.۳۴۷۳	۱۳/۴۴	-/۱۳۸۹۳
۶۰۰	۵۰۰	-/۰.۳۴۱۵	۱۴/۸۲	-/۱۳۶۶	-/۰.۳۱۷۲	۱۳/۵۹	-/۱۲۶۸۸
۶۰۰	۶۰۰	-/۰.۳۱۹۸	۱۴/۹۳	-/۱۲۷۹۲	-/۰.۲۹۶۷	۱۳/۶۹	-/۱۱۸۶۸

می‌باشد. وزن کلی ۴۵۰ kN بوده و پریود ارتعاش ۱ ثانیه می‌باشد و میرایی سازه ۵ در صد میرایی بحرانی است. از بادبندهایی با مساحت  $201 \text{ mm}^2$  استفاده شده است. نیروی پیش کشیدگی بر اساس حداکثر نیروی ایجاد شده در طی زلزله تعیین می‌شود. ابعاد میراگر  $r=0.165 \text{ m}$  و  $h_a=0.2 \text{ m}$  است. مدل سازی رفتار اصطکاکی میراگر توسط پلاستیک خشک (المان ون) انجام شد. از همین مشخصات برای مدل سازی قاب مجهز به میراگر پیشنهادی که در شکل ۱ نشان داده شده است نیز استفاده شده است.



شکل ۸: قاب مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی موالا [۲]

Fig. 8. Frame equipped with Mualla rotational friction damper

قاب‌های مدل شده تحت تحریک زلزله السنترو در جهت شمال-جنوب با  $PGA=3/417 \text{ m/s}^2$  و در مدت ۲۰ ثانیه بررسی گردید. شکل ۹ پاسخ‌های بدست آمده در نرم افزار Drain-2DX که توسط موالا انجام شد را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ پاسخ همان سازه تحت شتاب نگاشت مشخص که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 و المان ون و با آنالیز مودال تاریخچه زمانی غیر خطی بدست آمده است را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۹ و ۱۰ دیده می‌شود تطابق خوبی به خصوص در حداکثر پاسخ‌ها دیده می‌شود و المان ون مورد استفاده در این تحقیق توانسته است رفتار قاب مجهز به میراگر را به درستی مدل کند. انتظار می‌رفت که پاسخ‌ها دقیقاً بر هم منطبق باشد، اما خطاهای کوچکی در پاسخ‌ها دیده می‌شود که علت آن ناشی از دو عامل است. اول اینکه مدل ارائه شده در SAP2000 دقیقاً پلاستیک خشک نیست، دوم اینکه پیش کشیدگی در مدل سازی انجام شده صفر است. هم‌چنین روش تحلیل تاریخچه زمانی مودال وابسته به تعداد مودها است. هر چه تعداد مودهای بکار رفته در تحلیل بیشتر باشد دقت نتایج بیشتر است.

$$M_f = \frac{F}{\frac{1}{r_v} + \frac{1}{r_h \tan \alpha_1}} = \frac{F}{\frac{1}{r_v} + \frac{S-2r_h}{hr_h}} \quad (16)$$

$$= \frac{100}{\frac{1}{0.2} + \frac{6-2 \times 0.1}{3 \times 0.1}} = 4.11 \text{ kN.m}$$

مقدار لنگر لغزش بهینه بدست آمده از رابطه ۱۴ تقریباً برابر با مقدار بدست آمده از قاب مدل شده در نرم‌افزار است. لذا این رابطه می‌تواند مقادیر لنگر لغزش و ابعاد میراگر را در شرایط بهینه تخمین بزند.

## ۸- مطالعه موردی

جهت بررسی عملکرد میراگرهای اصطکاکی دورانی در قاب‌های فولادی، سه ساختمان چهار، هشت و دوازده طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همه‌ی قاب‌ها دارای سه دهانه یکسان با طول  $4/5$  متر و ارتفاع  $3/2$  متر می‌باشد. مصالح انتخاب شده برای قاب‌ها شامل: مدول الاستیسیته فولاد برابر با  $196133 \text{ MPa}$ ، نسبت پواسون  $0.3$ ، تنش تسلیم فولاد برابر با  $235 \text{ MPa}$  و تنش نهایی آن  $363 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که بازوهای میراگر از مصالح صلب و غیر قابل تغییر شکل در نظر گرفته شده است. تمام قاب‌ها به صورت قاب خمشی طراحی شده و به عنوان قاب خمشی اولیه در تعیین شاخص عملکرد استفاده می‌شود. بارگذاری قاب‌ها بر اساس آیین‌نامه ایران (مبحث ششم) انجام شده است. بار مرده طبقات برابر با  $27 \text{ kN/m}$  و بار مرده بام برابر با  $25 \text{ kN/m}$ ، بار زنده طبقات برابر با  $10 \text{ kN/m}$  و بار زنده بام برابر با  $6 \text{ kN/m}$  در نظر گرفته شده است. بارگذاری زلزله از نوع استاتیکی معادل بوده و برای محاسبه برش پایه هر قاب، ضریب زلزله C بر اساس آیین‌نامه مبحث ششم محاسبه شده و در مقدار جرم موثر سازه که شامل بار مرده و  $20$  درصد از بار زنده است، ضرب می‌شود. نسبت شتاب مبنای طرح،  $A=0.35$  پهنه به خطر نسبی خیلی زیاد، نوع زمین (I) و ضریب رفتار سازه برای تمام قاب‌ها  $R=7/0$  در نظر گرفته شده است. ضریب اهمیت ساختمان گروه ۳ یعنی  $I=1$  می‌باشد. طراحی قاب‌ها نیز بر اساس آیین‌نامه AISC89ASD انجام شده است.

## ۹- مدل سازی در نرم افزار

برای مدل‌سازی مفصل میراگر اصطکاکی دورانی در نرم افزار SAP2000 از المان پلاستیک ون استفاده شده است. جهت بررسی دقت المان پیشنهادی، نتایج تغییر مکان به دست آمده در این تحقیق برای یک قاب یک طبقه تحت تحریک زلزله السنترو<sup>۱</sup> با نتایج بدست آمده توسط موالا و بلو که در نرم افزار Drain-2DX انجام شده است، مقایسه می‌شود. ابعاد قاب مدل شده توسط موالا و بلو همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است  $4/8$  متر در  $7/6$  متر تیر صلب و سختی ستون‌ها  $34 \times 10^6 \text{ mm}^4$



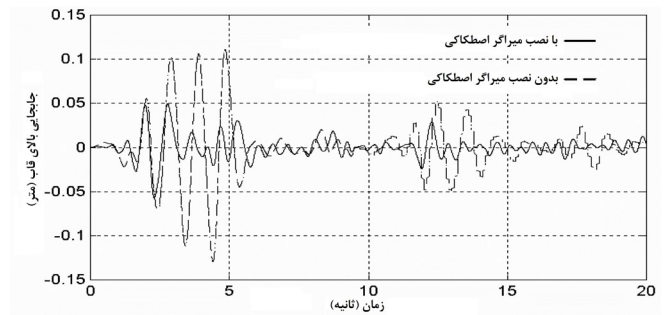
### ۱۰- مشخصات میراگر و مهاربندها

طول بازوهای میراگر به طور دلخواه و تا حد امکان کوچک انتخاب می‌شود. طول بازوی افقی میراگر  $r_h = 100 \text{ mm}$  و طول بازوی قائم  $r_v = 120 \text{ mm}$  انتخاب شده است. بازوها به صورت صلب در نظر گرفته شده و به واسطه المان پیچشی پلاستیک ون به یکدیگر متصل شده‌اند. اگر میراگر تحت بارگذاری زلزله لغزش نکند رفتاری مشابه مهاربند ضربدری خواهد داشت. به عبارت دیگر نیروی محوری در هر یک از اعضای محوری مهاربند تحت تحریک زلزله و همراه با کاهش یا افزایش شتاب زمین تغییر کرده و امکان کماتش در آن‌ها وجود دارد. به عبارت دیگر قاب به صورت قاب مهاربندی عمل می‌کند. اگر میراگرها بلغزند، حداکثر بار محوری که به مهاربندها اعمال می‌شود، مستقیماً وابسته به لنگر لغزش است. هر چه لنگر لغزش بیشتر باشد، حداکثر نیروی محوری که به مهاربند وارد می‌شود، افزایش می‌یابد. لنگر لغزش در محدوده  $0 \text{ kN.m}$  تا  $10 \text{ kN.m}$  تغییر می‌کند. بنابراین حداکثر لنگر لغزش  $10 \text{ kN.m}$  حداکثر بار محوری را در مهاربندها اعمال می‌کند. با استفاده از رابطه  $7$  حداکثر نیروی محوری مهاربندها برابر است با  $83/75 \text{ kN}$  برای همی قاب‌ها از 2UNP80 با فاصله  $1$  سانتی‌متر بال به بال برای مهاربندها استفاده شده است. حداکثر بار مجاز محوری این جفت نبشی برابر است با  $195/33 \text{ kN}$ . بنابراین احتمال کماتش مهاربند در هیچ یک از قاب‌ها تحت تحریک زلزله وجود ندارد.

### ۱۱- قاب‌های خمشی مجهز به میراگر تحت زلزله

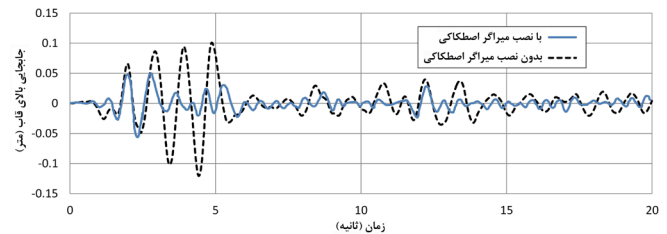
پس از طراحی هر یک از قاب‌های اولیه تحت بارهای ثقیلی و بار جانبی به روش استاتیکی معادل، در دهانه‌های میانی قاب‌ها میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی قرار داده می‌شود. سپس تحت بارگذاری زلزله قرار می‌گیرد. پاسخ حداکثر هر یک از قاب‌ها تحت این تحریک استخراج شده و در محاسبه شاخص عملکرد سازه به کار می‌رود. لنگر لغزش برای همه میراگرها در همه طبقات یکسان در نظر گرفته شده است. دامنه تغییرات لنگر لغزش از  $0 \text{ kN.m}$  تا  $10 \text{ kN.m}$  تغییر می‌کند. به ازای هر یک از لنگرهای لغزش مقادیر حداکثر پاسخ جابجایی بام، حداکثر برش پایه و انرژی مستهلک شده توسط میراگر ثبت می‌شود. با استفاده از این مقادیر نیز شاخص عملکرد به ازای هر مقدار لنگر لغزش محاسبه شده و لنگری که حداقل شاخص عملکرد را دارد به عنوان لنگر لغزش بهینه انتخاب می‌شود. هم‌چنین برای ارزیابی اثر شدت زلزله، عملکرد قاب‌ها با سه مقدار  $0/4g$ ,  $0/3g$ ,  $0/2g$  بررسی خواهد شد. شتاب نگاشت مورد استفاده در این تحقیق مولفه شمال جنوب زلزله Elcentro بوده و در مدت  $20$  ثانیه از این شتاب نگاشت، سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرض می‌شود که همه قاب‌ها در طی تحریک زلزله، در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. این فرض تا حد زیادی صحیح می‌باشد چرا که مقدار خسارت وارده به قاب‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی صفر است [۸]. در جدول ۲ مقادیر فاکتورهای برش پایه، جابجایی بام و انرژی مستهلک



شکل ۹: پاسخ قاب با و بدون میراگر تحت تحریک زلزله، مدل شده توسط موالا و بلو در نرم افزار Drain-2DX [۱۶]

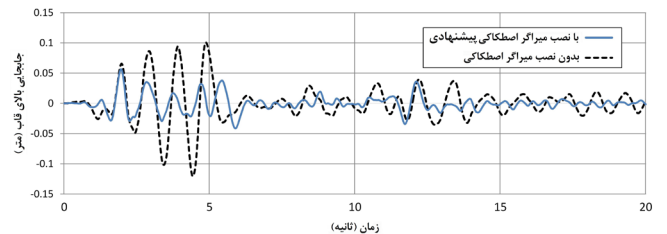
Fig. 9. Seismic response of steel frame with and without friction damper by Mulalla and Bellev



شکل ۱۰: پاسخ بدست آمده برای قاب اولیه با و بدون میراگر موالا، مدل شده در نرم افزار SAP2000

Fig. 10. Seismic response of steel frame with and without Mulalla friction damper modeled with SAP2000

در شکل ۱۱ قاب فولادی مطالعه شده توسط موالا که به میراگر چرخشی پیشنهاد شده در این مقاله مجهز شده تحت زلزله ال سنترو مورد تحلیل قرار گرفته است و نتیجه تحلیل انجام گرفته نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی علیرغم سادگی توانسته است کارایی قابل توجهی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه داشته باشد.



شکل ۱۱: پاسخ بدست آمده برای قاب اولیه با و بدون میراگر پیشنهادی، مدل شده در نرم افزار SAP2000

Fig. 11. Seismic response of steel frame with and without proposed friction damper modeled with SAP2000

لغزش بهینه برای آن قاب تحت آن شتاب اوج می‌باشد. مشاهده می‌شود که فاکتورها و شاخص عملکرد در هر قاب اعدادی نزدیک به یکدیگر هستند. برای قاب‌های ۴ طبقه و ۱۲ طبقه نیز روند مشابهی وجود دارد.

شده به همراه شاخص عملکرد SPI برای قاب ۸ طبقه محاسبه شده است. مقادیر شاخص عملکرد حداقل به ازای هر شتاب اوج با حروف بزرگ مشخص شده است. لنگر لغزشی که حداقل شاخص عملکرد را دارد، لنگر

### جدول ۲: فاکتورهای جابجایی بام، برش پایه، انرژی و شاخص عملکرد SPI برای قاب ۸ طبقه

Table 2. Roof displacement, base shear, energy dissipation and performance index for 8 story building

$M_f$ (kN.m)	$R_f$			$R_d$			$R_e$			SPI		
	۰/۲g	۰/۳g	۰/۴g	۰/۲g	۰/۳g	۰/۴g	۰/۲g	۰/۳g	۰/۴g	۰/۲g	۰/۳g	۰/۴g
۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۷۳۲	۱/۷۳۲	۱/۷۳۲
۱	۰/۷۱۸	۰/۷۸۵	۰/۸۲۱	۰/۸۷۰	۰/۸۹۹	۰/۹۱۸	۰/۳۸۲	۰/۴۷۹	۰/۵۵۴	۱/۱۹۱	۱/۲۸۶	۱/۳۵۱
۲	۰/۶۲۴	۰/۶۶۰	۰/۷۱۸	۰/۷۹۹	۰/۸۴۹	۰/۸۷۰	۰/۲۶۲	۰/۳۲۱	۰/۳۸۲	۱/۰۴۷	۱/۱۲۳	۱/۱۹۱
۳	۰/۶۰۲	۰/۶۲۴	۰/۶۳۸	۰/۷۰۷	۰/۷۹۹	۰/۸۳۸	۰/۲۳۹	۰/۲۶۲	۰/۳۰۰	۰/۹۵۹	۱/۰۴۷	۱/۰۹۶
۴	۰/۶۳۴	۰/۶۰۷	۰/۶۲۴	۰/۶۰۶	۰/۷۴۰	۰/۷۹۹	۰/۲۴۰	۰/۲۴۳	۰/۲۶۲	۰/۹۰۹	۰/۹۸۷	۱/۰۴۷
۵	۰/۶۷۸	۰/۶۱۵	۰/۶۱۰	۰/۵۲۱	۰/۶۷۲	۰/۷۵۵	۰/۲۵۱	۰/۲۳۷	۰/۲۴۶	۰/۸۹۱	۰/۹۴۲	۱/۰۰۱
۶	۰/۷۳۴	۰/۶۳۴	۰/۶۰۲	۰/۴۷۰	۰/۶۰۶	۰/۷۰۶	۰/۲۶۴	۰/۲۴۰	۰/۲۳۹	۰/۹۱۰	۰/۹۰۹	۰/۹۵۸
۷	۰/۷۹۰	۰/۶۶۰	۰/۶۲۱	۰/۴۶۳	۰/۵۴۶	۰/۶۵۴	۰/۲۷۸	۰/۲۴۷	۰/۲۳۷	۰/۹۵۷	۰/۸۹۱	۰/۹۳۳
۸	۰/۸۴۸	۰/۶۹۶	۰/۶۳۴	۰/۴۶۱	۰/۴۹۸	۰/۶۰۶	۰/۲۹۲	۰/۲۵۵	۰/۲۴۰	۱/۰۰۸	۰/۸۹۳	۰/۹۰۹
۹	۰/۹۰۶	۰/۷۳۴	۰/۶۵۲	۰/۴۶۰	۰/۴۷۰	۰/۵۶۰	۰/۳۰۶	۰/۲۶۴	۰/۲۴۴	۱/۰۶۱	۰/۹۱۰	۰/۸۹۳
۱۰	۰/۹۶۳	۰/۷۷۱	۰/۶۷۸	۰/۴۶۰	۰/۴۶۵	۰/۵۲۰	۰/۳۱۹	۰/۲۷۳	۰/۲۵۱	۱/۱۱۴	۰/۹۴۱	۰/۸۹۰

آمده مقایسه می‌شود.

قاب‌های خمشی مورد مطالعه همان قابهای طراحی شده در بند ۸ می‌باشد. برای تعیین برش پایه، همه پارامترها و بارگذاری مشابه با بند ۸ می‌باشد. تنها پارامتری که تغییر می‌کند ضریب شتاب مینای طرح A است که سه مقدار  $0/۲g$ ،  $0/۳g$ ،  $0/۴g$  خواهد داشت. لازم به ذکر است که طبق مبحث ششم مقررات ملی ایران حداکثر شتاب مینای طرح  $0/۳۵g$  است، ولی در این تحقیق با هدف بررسی روش تحلیل استاتیکی معادل، مقدار  $0/۴g$  انتخاب شده است. در هر قاب، توزیع برش در طبقه‌ها برای هر شتاب مینا انجام شده، سپس با استفاده از رابطه ۸ لنگر لغزش بهینه برای آن طبقه محاسبه می‌شود. در رابطه ۱۴ با قرار دادن  $r_h = 100 \text{ mm}$  و  $r_v = 120 \text{ mm}$  خواهیم داشت:

$$M_f = \frac{F}{\frac{1}{r_v} + \frac{S-2r_h}{hr_h}} = \frac{F}{\frac{1}{0.12} + \frac{4.5-2 \times 0.1}{3 \times 0.1}} = 0.0459F \quad (17)$$

### ۱۲- توزیع متغیر لنگر لغزش بهینه

در بند قبل به بررسی شاخص عملکرد قاب‌ها تحت شتاب‌های اوج کم تا زیاد با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مودال پرداخته شد. هدف از بررسی شاخص‌های عملکرد، یافتن لنگر لغزش بهینه طبقات بود. برای این منظور تحلیل‌های زیادی انجام شد تا تغییرات شاخص عملکرد SPI به ازای تغییرات لنگر لغزش طبقات بدست آید. علاوه بر تحلیل‌های زیاد، فرض شده بود که لنگر لغزش در همه‌ی طبقه‌ها یکسان است. یکسان در نظر گرفتن لنگر لغزش در طبقه‌ها ممکن است کارایی قاب را کاهش دهد، چون طبقه‌های بالا که تحت برش و لنگر کمتری قرار دارند به لنگر لغزش کمتری نیاز دارند تا دچار لغزش شوند، اما طبقات پایین‌تر که تحت برش بیشتری هستند، نیاز به لنگر لغزشی متناسب با برش دارند.

در این بند بر مینای روش تحلیل استاتیکی معادل و براساس رابطه ۱۴ که برای قاب یک دهانه و یک طبقه بدست آمده، یک روش ساده و مستقیم ارائه می‌شود به طوری که توزیع لنگرها در قاب به گونه‌ای است که در طبقه‌های بالا لنگرهای لغزش کمتر و در طبقه‌های پایین لنگر لغزش بیشتری برای میراگر اصطکاکی پیشنهادی بدست می‌دهد. سپس با یک تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی مودال به بررسی شاخص عملکرد این قاب با توزیع جدید لنگر پرداخته و با شاخص‌های عملکردی که در بند ۱۱ بدست

بر مبنای تحلیل استاتیکی معادل روش مناسبی برای تعیین لنگر لغزش بهینه در قاب‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی است. در مجموع نتایج تحلیل‌های انجام گرفته حاکی از آن است که استفاده از میراگر اصطکاکی پیشنهادی توانسته است شاخص عملکرد سازه را تا ۱۱٪ بهبود بخشد. این بهبود عملکرد در صورت استفاده از رویه پیشنهاد شده برای توزیع بهینه لنگر آستانه لغزش در طبقه‌های ساختمان به میزان ۶٪ نیز افزایش یافته است. همچنین مطالعات موردی حاکی از آن است که کارایی میراگر اصطکاکی با افزایش تعداد طبقات سازه و شدت زلزله بیشتر می‌شود.

### مراجع

- [1] A. Gholizad, P. Kamrani Moghaddam, Friction damper dynamic performance in seismically excited knee braced steel frames, *International Journal of Civil Engineering*, 12(1) (2014) 32-40.
- [2] R. Levy, O. Lavan, A. Rutenberg, Seismic design of friction-damped braced frames based on historical records, *Earthquake Spectra*, 21(3) (2005) 761-778.
- [3] A. Filiatrault, S. Cherry, Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures, *Journal of Structural Engineering*, 116(5) (1990) 1334-1355.
- [4] T.F. Fitzgerald, T. Anagnos, M. Goodson, T. Zsutty., Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections, *Earthquake Spectra*, 5(2) (1989) 383-391.
- [5] A.S. Pall, C. Marsh, Response of friction damped braced frames, *ASCE Journal of Structural Division*, 108(ST6) (1982) 1313-1323.
- [6] I.H. Mualla, B. Belev, Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, *Engineering Structures*, 24(3) (2002) 365-371.
- [7] I.H. Mualla, L.O. Nielsen, B. Belev, W.I. Liao, C.H. Loh, A. Agrawal, Numerical prediction of shaking table tests on a full scale friction damped structure, in: 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, 2002.
- [8] S. Mirzabagheri, M. Sanati, A.A. Aghakouchak, S.E. Khadem, 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) (2015) 479-491.
- [9] A.A. Golafshani, A. Gholizad, Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1) (2009) 180-187.
- [10] S. Hemati, M. Tehranizadeh, F. Khaleghian, Performance assessment of a new friction damper for seismic protection of steel moment-resisting frames,

با جایگزین کردن برش طبقه در رابطه بالا، لنگر لغزش بهینه برای آن طبقه بدست می‌آید. حال با انجام تحلیل تاریخچه زمانی مودال برای قاب‌های با توزیع متغیر لنگر لغزش میراگرها، شاخص عملکرد مشابه با آنچه در بند ۱۱ انجام شده است، محاسبه می‌شود. در جدول ۳ مشاهده می‌شود که شاخص‌های عملکرد بدست آمده با توزیع متغیر لنگر لغزش در طبقه‌ها و توزیع یکنواخت به هم نزدیک است. همچنین مشاهده می‌شود که فاکتورهای برش پایه، جابجایی و انرژی مستهلک شده در هر شتاب اوج برای هر دو توزیع یکسان است. این جدول نشان دهنده دقت مناسب روش توزیع متغیر در بر آورد لنگر لغزش بهینه در طبقه‌ها می‌باشد.

### جدول ۳: شاخص عملکرد برای توزیع لنگر لغزش قاب ۱۲ طبقه

Table 3. Performance indexes for constant and variable configuration of friction damper

PGA (g)	VARIABLE DISTRIBUTION			UNIFORM DISTRIBUTION		
	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۴
$R_f$	۰/۷۱۷	۰/۷۰۴	۰/۷۱۵	۰/۷۶۰	۰/۷۵۴	۰/۷۶۰
$R_d$	۰/۵۵۵	۰/۵۷۱	۰/۵۷۹	۰/۵۵۳	۰/۵۶۹	۰/۵۵۳
$R_e$	۰/۳۴۱	۰/۳۵۳	۰/۳۶۱	۰/۴۰۸	۰/۳۹۰	۰/۴۰۸
SPI	۰/۹۶۸	۰/۹۷۲	۰/۹۸۸	۱/۰۲۴	۱/۰۲۲	۱/۰۲۴

این جدول شاخص عملکرد قاب ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد، که برای قاب‌های ۴ و ۸ طبقه نیز روند مشابهی تکرار می‌شود.

### ۱۳- نتیجه گیری

از بررسی شاخص‌های عملکرد بدست آمده از دو روش توزیع، برتری روش توزیع متغیر لنگر لغزش در طبقه‌ها نسبت به روش یکنواخت ثابت می‌شود. روش متغیر، روشی ساده و مبتنی بر تحلیل استاتیکی خطی بوده و نیازی به تحلیل‌های غیر خطی تاریخچه زمانی مودال برای یافتن لنگر لغزش بهینه ندارد. در صورتی که در روش توزیع یکنواخت باید تعداد زیادی تحلیل دینامیکی انجام شود تا بر اساس شاخص عملکرد حداقل، لنگر لغزش بهینه طبقات بدست آید. همچنین در روش توزیع یکنواخت لنگر لغزش بهینه، طبقه‌های بالا لغزش بسیار ناچیزی دارند و این به دلیل زیاد بودن لنگر لغزش و کم بودن برش طبقه است. و این نشان دهنده کارایی پایین میراگر در طبقه‌های بالاست. اما در توزیع متغیر، لنگرهای لغزش به نسبت برش طبقه توزیع شده‌اند و همه میراگرها به خوبی لغزیده و حرکت رفت و برگشتی مستطیلی شکل که از میراگر انتظار می‌رود، از خود نشان می‌دهد و این نشان دهنده کارایی خوب میراگر در همه طبقه‌ها است. علاوه بر این، شاخص عملکرد در هر دو توزیع نزدیک به هم می‌باشد و حتی در بعضی موارد کمتر نیز هست. از همه این موارد می‌توان نتیجه گرفت که روش توزیع متغیر،

- systems for optimal structural performance, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2000.
- [16] I.H. Mualla, Parameters influencing the behavior of a new friction damper device, in: SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, United States, 2000.
- [17] L.O. Nielsen, I.H. Mualla, A Friction damping system: Low order behavior and design, Technical University of Denmark, 2002.
- [18] A. Gholizad, P. Kamrani Moghaddam, Performance of friction damper for dynamic response reduction of seismically excited knee braced steel frame, in: 9th International Congress On Civil Engineering, Semnan, Iran, 2012.
- [19] J. Vaseghi Amiri, S.G. Jalali, Performance of steel moment frames equipped with rotational friction damper, Journal of Steel & Structure, Iranian Society of Steel Structures, 5(6) (2009) 93-105.
- in: Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium, 2011.
- [11] H.S. Monir, K. Zeynali, A modified friction damper for diagonal bracing of structures, Journal of Constructional Steel Research, 87 (2013) 17-30.
- [12] M. Mirtaheri, A.P. Zandi, S.S. Samadi, H.R. Samani, Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers, Engineering Structures, 33(12) (2011) 3647-3656.
- [13] H.R. Samani, M. Mirtaheri, A.P. Zandi, Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper, Journal of Constructional Steel Research, 112 (2015) 354-362.
- [14] N. Fallah, S. Honarparast, NSGA-II based multi-objective optimization in design of Pall friction dampers, Journal of Constructional Steel Research, 89 (2013) 75-85.
- [15] L. Moreschi, Seismic design of energy dissipation

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Gholizad, M. Morawej Nekoo, Seismic Performance of a Novel Configuration of Rotational Friction Damper in X Bracings. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 653-664.

DOI: 10.22060/ceej.2017.8672.4555

