



# عملکرد قابهای خمشی فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی (RFD)

جواد واثقی امیری<sup>۱</sup>، سید قاسم جلالی<sup>۲</sup>  
(دریافت: ۸۸/۴/۱۵، پذیرش: ۸۸/۱۲/۲۵)

## چکیده

میراگرهای اصطکاکی به علت هزینه پایین و کارایی مناسب در دسته سیستم‌های کنترلی غیرفعال جایگاه خوبی دارند. در تعیین بار لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی، شاخص‌های عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین روش ساده شده‌ای نیز در تعیین بار لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی پال بررسی شده است. میراگر اصطکاکی دورانی در سال ۲۰۰۰ معرفی شد. بر روی این میراگر بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در این مقاله با انجام ۵۴۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی، قابهای خمشی فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی با بارهای لغزش متغیر، بررسی شدند. این تحلیل‌ها بر روی سه ساختمان با ارتفاع‌های مختلف و تحت شتاب نگاشت‌های متفاوت انجام شد. در ضمن نیروی لغزش بهینه از روش ساده شده نیز به دست آمد. این نتیجه حاصل شد، که شاخص‌های عملکرد مختلف میراگر جوابهای تقریباً یکسانی را در تعیین بار لغزش بهینه نتیجه می‌دهند. عملکرد میراگر با افزایش ارتفاع سازه بهبود می‌یابد. همچنین خطای روش ساده شده در تعیین بار لغزش میراگرهای اصطکاکی دورانی کمتر از ۲ درصد، در مقایسه با روش دقیق می‌باشد.

## کلمات کلیدی

میراگر، میراگر اصطکاکی دورانی، شاخص عملکرد، انرژی هیستریزس

## Performance of Steel Frames Equipped with Rotational Friction Dampers (RFD)

J.Vaseghi, S.Gh.Jalali

### ABSTRACT

Friction dampers have low cost and good performance. Therefore they are in a good position on passive control devices. There are performance indexes to optimize the slip load of friction dampers. Also investigators created a simplified method to determine the optimal slip load of Pall friction dampers. Rotational friction damper was introduced at 2000. Experimental and numerical tests were done on this damper. In this paper, steel frames with rotational friction dampers, and variable slip loads, are investigated, by 540 nonlinear dynamic time history analysis. These analyses were done on three frames with different heights and different accelerograms. Also slip load is obtained from the simplified method. These results are achieved, that the different performance indexes of damper, give a nearly response to determine the slip load. Performance of dampers is better by increasing the heights of structure. And the error of simplified method to determine the optimal slip load of rotational friction damper less than 2 percent, in comparison with exact method.

### Keyword

Damper, Rotational Friction Damper, Performance Index, Hysteretic Energy

۱. دانشیار دانشکده عمران، بابل خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی بابل، vaseghi@nit.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی دکتری سازه، بابل خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی بابل، jalali\_sgj@yahoo.com



اصطکاک منبع اتلاف انرژی بسیار ارزانی است. می‌توان گفت تئوری طراحی لرزه‌ای سازه‌های قابی مجهز به میراگرهای اصطکاکی توسط پال و همکاران آغاز شد [۱]. میراگرهای اصطکاکی را بعد از زلزله می‌توان به راحتی تنظیم کرد. همچنین این میراگرها معمولاً نیاز به تعویض نخواهند داشت. به دلیل مزایای فوق استفاده از میراگرهای اصطکاکی در حال گسترش هستند. در دهه‌های اخیر انواع دیگر میراگرهای اصطکاکی نظیر میراگرهای سومیتومو و (EDR) معرفی شدند [۲]. مهدویان و همکاران با استفاده از میراگرهای اصطکاکی و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها پرداختند [۳]. تهرانی زاده و خالقیان بیان داشتند که مصالح لنت ترمز دارای بار لغزش بدون نوسان است و از آلیاژ برنج بهتر می‌باشد [۴]. میراگر اصطکاکی دورانی (RFD) در سال ۲۰۰۰ توسط مولا معرفی شد. این میراگر برای بهسازی ساختمان‌های موجود و ساخت ساختمان‌های جدید بر مبنای شکل‌پذیری کاربرد دارد. لذا اهمیت بررسی این میراگر در مناطق لرزه‌خیز حائز اهمیت است. آزمایشات اولیه بر روی قاب یک طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی در دانشگاه دانمارک انجام شد [۵] و آزمایشات تمام مقیاس برای یک سازه سه طبقه مجهز به میراگر در تایوان و بر روی میز لرزه صورت گرفت [۶]. همه آزمایشات بیانگر کارایی مناسب میراگر تحت رویداد لرزه‌ای بوده است. مدل‌سازی سازه‌های فوق در نرم‌افزار Drain-2DX تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان داد [۵ و ۶]. عهادیان فرد و همکاران با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های تاریخیچه زمانی بیان داشتند که کاربرد میراگرهای اصطکاکی دورانی پاسخ تغییر مکان‌های سازه را ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۷]. در عملکرد میراگرهای اصطکاکی فاکتورهایی چون کاهش تغییر مکان، افزایش

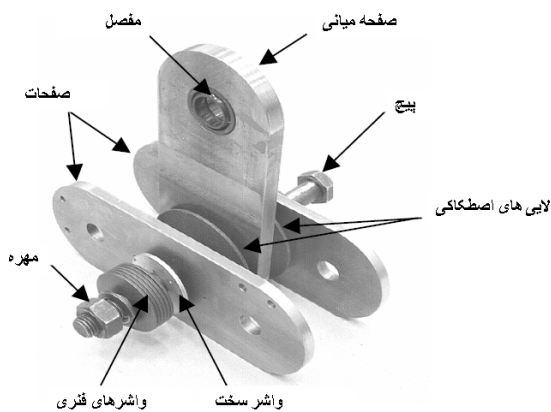
اتلاف انرژی میراگر، کاهش برش پایه و کاهش انرژی کرنشی الاستیک سازه موثر است. فیلیترالت و چری [۸] با استفاده از فاکتورهای فوق شاخص عملکرد نسبی و مولا و بلو [۵]، شاخص کارایی میراگر را به منظور ارزیابی عملکرد میراگرها بررسی کردند. نیروی بهینه لغزش مربوط به میراگرهای اصطکاکی، را می‌توان از این شاخص‌های عملکرد به دست آورد. معمولاً نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی در طبقات یکسان فرض می‌گردد. مورسچی نشان داد که با بهینه کردن توزیع نیروی لغزش در ارتفاع بر پایه الگوریتم ژنتیک، می‌توان به مقادیر بهتری در شاخص‌های عملکرد دست یافت [۹]. نیروی لغزش بهینه وابسته به پرپود سازه و شدت زلزله روی داده است. به دست آوردن نیروی لغزش بهینه از طریق شاخص‌های عملکرد، مستلزم تحلیل‌های دینامیکی زیادی است، بدین جهت فیلیترالت و چری 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 [۱۰]. اگر نیروی لغزش بسیار بیش از حد بهینه اعمال شود، ممکن است در یک رویداد لرزه‌ای با شتاب پایتتر میراگرها لغزش نکرده و سازه به صورت قاب خمشی مهاربندی شده عمل کرده و در نتیجه خرابی در سازه ایجاد شود.

با توجه به اینکه میراگرهای اصطکاکی در محل لغزش، از مدل اصطکاکی کلمب تبعیت می‌کنند، بنابراین دارای سختی بی‌نهایت است. وجود چنین المانی موجب کند شدن همگرایی، در تحلیل‌های دینامیکی می‌شود. ال-ویلسون با ارائه روش تحلیل غیر خطی مودال تاریخیچه زمانی این مشکل را تعدیل کرد. این تحلیل با در نظر گرفتن مودهای بیشتر و المان‌های غیرخطی محدود دارای دقت مناسبی است [۱۱].

با توجه به تحقیقات قبلی، که ذکر شد، هنوز بر روی

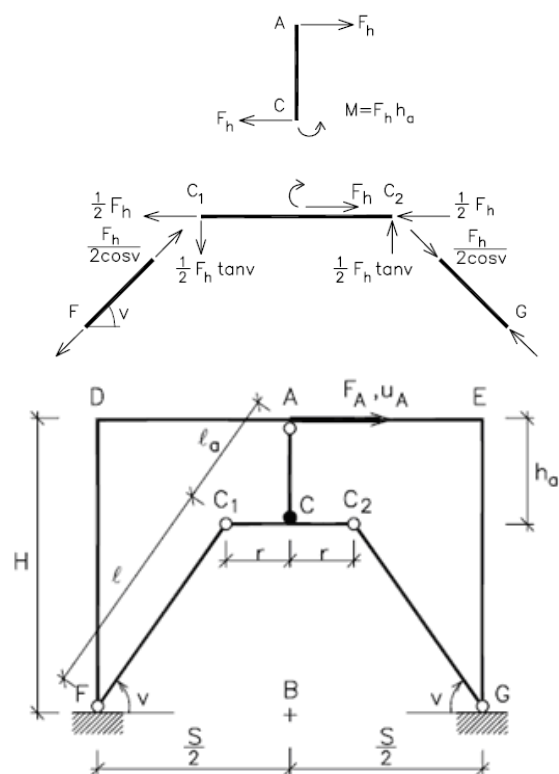


عملکرد میراگرهای اصطکاکی دورانی در ساختمان‌های چند طبقه، بررسی نیروهای لغزش ناشی از دو شاخص عملکرد و ارزیابی روش ساده شده در تعیین بار لغزش این میراگر، تحقیقی صورت نگرفته است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 و با استفاده از شاخص‌های بیان شده و روش ساده شده به بررسی تعیین نیروی لغزش بهینه پرداخته می‌شود. همچنین با مقایسه نتایج، ارزیابی شاخص‌ها نیز صورت می‌گیرد. به این منظور با رسیدن به مدل اصطکاکی مطلوب در المان میراگر، عملکرد میراگر در سه ساختمان با تعداد سه، پنج و هشت طبقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس به منظور بررسی اثر شدت زلزله، ساختمان‌های مورد مطالعه تحت شتابهای مختلف با ماکزیمم شتاب اوج کم‌الی خیلی زیاد مطابق با استاندارد ۲۸۰۰، ارزیابی می‌گردند و در هر شتاب، بارهای لغزش مختلف بررسی می‌شود. از طرفی تعیین تقریب بار لغزش بهینه به دست آمده از مینیمم شاخص‌های عملکرد و روش ساده شده نیز مورد نظر است.



شکل (۱): اجزای میراگر اصطکاکی دورانی [۵]

شکل (۲) مدل قاب یک طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد.

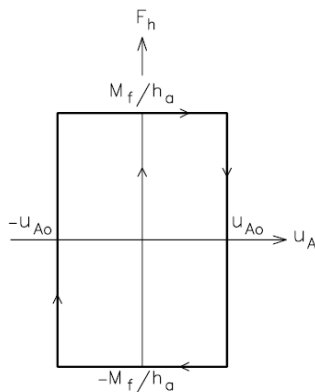


شکل (۲): قاب مجهز به میراگر اصطکاکی در حالت

مرکزگرا [۱۲]

## ۲- معرفی میراگر اصطکاکی دورانی و پارامترهای موثر بر آن

شکل (۱)، میراگر اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد. اجزای اصلی میراگر یک صفحه عمودی و دو صفحه افقی است. لایه‌های اصطکاکی بین این صفحات قرار می‌گیرند. صفحه عمودی به تیر بالایی خود مفصل می‌شود. صفحات افقی و قائم و لایه اصطکاکی با یک پیچ به هم متصل می‌شوند. برای ثابت نگه داشتن نیروی بین صفحات از واشر فنری استفاده می‌شود و برای جلوگیری از اثر این واشرهای فنری بر روی صفحات افقی بین آنها واشر سخت قرار می‌گیرد [۵].



شکل (۳): رفتار میراگر اصطکاکی [۱۲]

مهمترین نکته‌ای که در به کارگیری میراگرهای اصطکاکی باید در نظر گرفته شود، تعیین بار لغزش بهینه می‌باشد. به این منظور باید به بررسی شاخص‌های عملکرد میراگر پرداخته شود. فاکتورها و شاخص‌های عملکرد معمولاً دارای مقادیری بین صفر و یک هستند. مقدار یک می‌تواند به این معنی باشد که یا نیروی لغزش صفر است و در میراگر اتلاف انرژی وجود ندارد، و یا اینکه مقدار نیروی لغزش میراگر بسیار زیاد بوده و میراگرها به کار نمی‌افتند. در حالت اول میراگر به صورت قاب خمشی عمل کرده و در حالت دوم میراگر به صورت قاب خمشی مهاربندی شده عمل می‌کند. در تعیین شاخص‌های عملکرد مقدار صفر یک مقدار آرمانی و تئوریک بوده و رسیدن به آن در حالت عملی غیرممکن است. و به این جهت مقدار مینیمم شاخص‌های عملکرد انتخاب می‌شود.

شاخص کارایی میراگر توسط موآلا و بلو معرفی شده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SPI = \sqrt{R_d^2 + R_f^2 + R_e^2} \quad (۳)$$

$$R_d = \frac{D_f}{D_p} \quad (۴)$$

$$R_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (۵)$$

مطابق شکل مفصل اصطکاکی در نقطه C قرار می‌گیرد. شکل (۲) حالت استفاده از نوع مرکزگرای میراگر اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد. این نوع ترکیب بندی ماکزیمم اتلاف انرژی را ایجاد می‌شود.

در این شکل  $F_h$  نیروی لغزش می‌باشد، این نیرو توسط تیر بالایی قاب به میراگر وارد می‌شود. نیروی  $F_h$  در بازوی  $h$  لنگر اصطکاکی لغزش،  $M_f$  را می‌سازد. با تقسیم لنگر اصطکاکی ( $M_f$ ) بر بازوی دوران  $C_1C_2$ ، در آستانه لغزش و بعد از آن دو نیروی فشاری و کششی به دست می‌آید، که در شکل (۲) دیده می‌شود.

دو نیروی فشاری و کششی در میله‌های مهارتی توسط رابطه (۱) به دست می‌آیند. برای جلوگیری از کمناش میله فشاری باید این میله‌ها توسط همین نیروها به دست آمده پیش کشیده شود.

$$F_a = \frac{M_f}{2h_a \cos(v)} \quad (۱)$$

در فرمول (۱)  $M_f$  لنگر اصطکاکی،  $v$  زاویه مهار و  $h_a$  بازوی میراگر است، که در شکل (۲) دیده می‌شود.

به جهت اینکه در هنگام اعمال بار خارجی دو برابر نیروی پیش کشیدگی در مهارها ایجاد می‌شود و هیچگاه نیروی درون مهارها از این مقدار بیشتر نمی‌شود، بنابراین مهارها باید برای دو برابر نیروی پیش کشیدگی و مطابق با رابطه (۲) طراحی شوند [۱۲].

$$A_b = \frac{M_f}{\sigma_y h_a \cos(v)} \quad (۲)$$

در فرمول (۲)،  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده میله مهارتی است. رفتار واقعی میراگر در مفصل اصطکاکی از رفتار اصطکاکی کلمب تبعیت می‌کند. در شکل (۳) رابطه بار-تغییر مکان ( $F_h - U_A$ ) نشان داده شده است.



نسبت تعداد المان‌های جاری شده به کل المان‌های سازه بیان می‌شود.

از آنجایی که به دست آوردن نیروی لغزش بهینه از مینیمم شاخص‌های عملکرد مستلزم تحلیل‌های زیادی می‌باشد، لذا روش ساده شده‌ای نیز برای محاسبه بار لغزش بهینه پیشنهاد شده است. محققین دریافتند که نه تنها خواص سازه، بلکه فرکانس و دامنه حرکت زمین نیز در تعیین بار لغزش موثر است. بنابراین مهم است که در تعیین نیروی لغزش بهینه محل ساختمان، خواص خاک و ناحیه لرزه‌خیزی مشخص شود.

در روش ساده شده از طیف بار لغزش برای به دست آوردن بار لغزش بهینه استفاده می‌شود. این طیف با استفاده از دو پارامتر  $\alpha$  و  $\beta$  ارائه شده در رابطه‌های (۸) و (۹) به دست می‌آید. نمودار طیف در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$\alpha = (-1.24Ns - 0.31) \frac{T_b}{T_u} + 1.04Ns + 0.43 \quad (8)$$

$$\beta = (-1.07Ns - 0.10) \frac{T_b}{T_u} + 1.01Ns + 0.45 \quad (9)$$

در رابطه‌های (۸) و (۹)،  $Ns$  تعداد کل طبقات،  $T_u$  پریود سازه بادی‌بندی نشده و  $T_b$  پریود سازه بادی‌بندی شده است. توصیه شده است در حد امکان نسبت  $\frac{T_b}{T_u}$  کمتر از ۰/۴ باشد.

با محاسبه مقدار  $T_g$  که زمان تناوبی در طیف پاسخ شتاب است، که حداکثر شتاب را بدهد و محاسبه مقدار  $\frac{T_g}{T_u}$  و استفاده از منحنی طیف شکل (۴) می‌توان برای سازه مورد نظر  $V_o/m.a_g$  را به دست آورد [۱۰].

با در نظر گرفتن  $m$  (جرم) و  $a_g$  (شتاب لرزه‌خیزی منطقه)، مقدار  $V_o$  به دست می‌آید. نیروی لغزش میراگرها در طبقات یکی بوده و نیروی لغزش هر میراگر به صورت

$$R_e = (E_i - E_h) / E_i \quad (6)$$

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 هستریتیک اتلاف شده توسط میراگر می‌باشد. در رابطه‌های بالا فرض بر الاستیک ماندن اعضای سازه می‌باشد. با توجه به رابطه (۳) و فاکتورهای موثر در آن بهترین حالت عملکرد میراگر زمانی است که شاخص کارایی میراگر مینیمم شود.

هر یک از سه فاکتور کاهش پاسخ، کاهش برش پایه و انرژی مانده، یکی از فاکتورهای بهسازی در عملکرد میراگرها هستند. هر یک این فاکتورها مطابق نظر مهندسين می‌توانند در بهسازی سازه‌ها استفاده شود [۵].

شاخص عملکرد نسبی میراگر به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$RPI = \frac{1}{2} \left( \frac{SEA}{SEA_{(o)}} + \frac{U_{\max}}{U_{\max(o)}} \right) \quad (7)$$

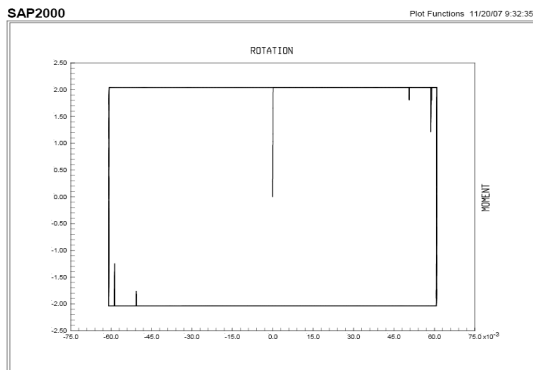
در رابطه (۷)  $SEA$  و  $U_{\max}$  به ترتیب مساحت زیر نمودار تاریخچه زمانی انرژی کرنشی الاستیک و ماکزیمم انرژی کرنشی الاستیک سازه مجهز به میراگر اصطکاکی در طی یک نمودار تاریخچه زمانی تحت تحریک زلزله می‌باشد.  $SEA_{(o)}$  و  $U_{\max(o)}$  همین مقادیر اما مربوط به سازه قاب خمشی اولیه هستند [۸]. هر دو شاخص عملکرد مفهومی برای نزدیک کردن سازه به حد الاستیک را دارا می‌باشند بنابراین در نقطه مینیمم شاخص‌ها باید کمترین اعضا به حد جاری شدن برسند. بدین منظور در نقطه عملکرد بهینه باید میزان خسارت بررسی شود. میزان خسارت به صورت



تقسیم نیروی لغزش ( $V_o$ ) کل به تعداد طبقات از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$V_s = \frac{V_o}{N_s} \quad (10)$$

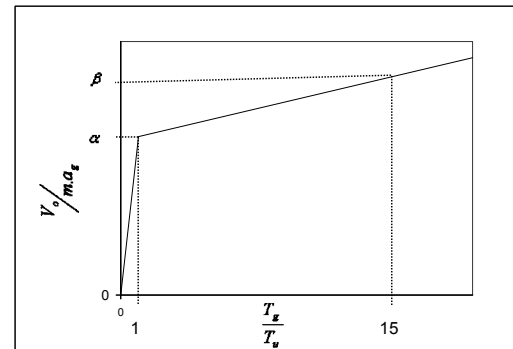
انتخاب پارامترهای مناسب برای این المان در برنامه SAP2000، رفتار میراگر در محل مفصل اصطکاکی مانند شکل (۵) حاصل می‌شود. شکل (۵) رابطه بار-تغییر مکان استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد، که تطابق مناسبی با رفتار واقعی میراگر دارد. [۱۴].



شکل (۵): منحنی پسماند به دست آمده در SAP2000

جهت بررسی دقت المان پیشنهادی، نتایج تغییر مکان به دست آمده در این تحقیق برای یک قاب یک طبقه تحت تحریک زلزله السترو با نتایج به دست آمده توسط مولا و بلو که در نرم‌افزار Drain-2DX انجام شده است، مقایسه گردید.

ابعاد قاب مدل شده توسط مولا و بلو  $7.6m \times 4.6m$ ، تیر صلب و سختی ستونها  $34 \times 10^6 mm^4$  می‌باشد. وزن کلی  $450KN$  بوده و پریرود لرزش ۱ ثانیه می‌باشد، و میرایی سازه ۵ درصد میرایی بحرانی است. از بادبندهایی با مساحت  $201mm^2$  استفاده می‌شود. نیروی پیش کشیدگی براساس حداکثر نیروی ایجاد شده در طی زلزله تعیین می‌شود. ابعاد میراگر  $r = 0.165m$  و  $h_a = 0.2m$  است. مدل‌سازی رفتار اصطکاکی میراگر توسط پلاستیک خشک انجام شد. مدل نهایی قاب مانند شکل (۲) است. قاب تحت تحریک زلزله السترو در جهت شمال-جنوب با  $PGA = 3.417$  متر بر مجذور ثانیه و در مدت ۲۰ ثانیه



شکل (۴): نمودار طیف لغزش بهینه [۸]

در مورد استفاده از میراگرهای وابسته به تغییر مکان قوانینی در دستورالعمل بهسازی وجود دارد، و به این صورت می‌باشد، که اگر در یک طرف مرکز صلیب ساختمان، در یک تراز کمتر از دو میراگر نصب شود، این میراگرها و اجزای متصل به آنها باید قادر به تحمل تغییر مکانهای برابر با ۲۰٪ حداکثر تغییر مکان محاسبه شده برای آن وسیله تحت زلزله سطح خطر-۲ باشند [۱۳]. از آنجایی که در تغییر مکان‌های قاب، نیروی لغزش میراگر ثابت می‌باشد. لذا تنش‌های درون مهارهای متصل به آن از رابطه (۲) فراتر نرفته و این میراگر قوانین دستورالعمل را ارضا می‌نماید.

### ۳- مدل پیشنهادی

همانطور که بیان شد، رابطه بار-تغییر مکان ( $F_h - U_A$ ) میراگر اصطکاکی دورانی در شکل (۳) نشان داده شده است. مقدار نیروی برشی وارد شده به میراگر از تقسیم لنگر میراگر اصطکاکی بر ارتفاع میراگر به دست می‌آید. در نرم‌افزار SAP2000 از المان پلاستیک ون در مدل‌سازی رفتار اتصال اصطکاکی استفاده شده است. با



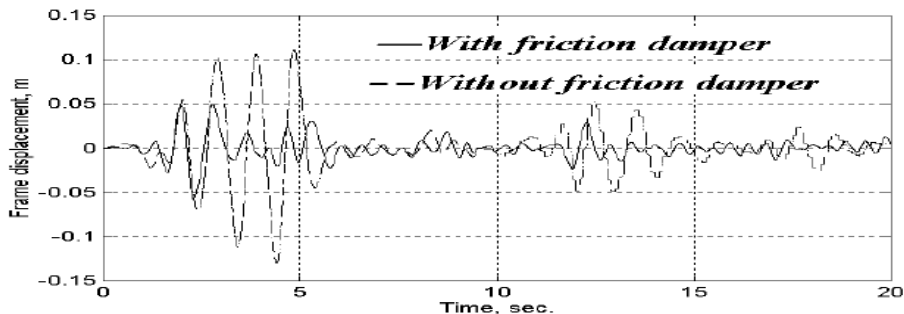
مدل‌سازی انجام شده صفر در نظر گرفته شده است. این موضوع نشان می‌دهد، که نیروی پیش‌کشیدگی تاثیر بسیار زیادی بر پاسخ قابهای مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی ندارد. به این موضوع در [۵] نیز اشاره شده است.

#### ۴- بررسی میراگر اصطکاکی دورانی در قابهای فولادی

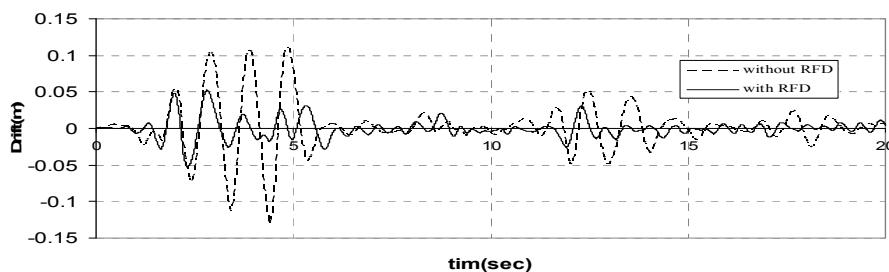
جهت بررسی اثر میراگرهای اصطکاکی دورانی در قابهای فولادی، سه ساختمان سه، پنج و هشت طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نیروی لغزش میراگرها در طبقات یکسان فرض می‌گردد. به منظور طراحی اولیه مهارها مجموع نیروی لغزش همه میراگرها را برابر  $0.125W$  ساختمان در نظر گرفته می‌شود. انتخاب چنین نیروی لغزشی در طراحی مهارها یک فرض اولیه است، و در صورتی که نیروی لغزش بهینه در مقاداری بزرگتر از این

بررسی گردید. شکل (۶) پاسخ‌های به دست آمده در نرم‌افزار DRAIN- 2DX که توسط مولا انجام شد و در شکل (۷) پاسخ همان سازه تحت شتاب نگاشت مشخص شده که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 و المان ون و با آنالیز مودال تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده است، را نشان می‌دهد. در مدل‌سازی توسط SAP2000 نیروی پیش‌کشیدگی مهارها صفر در نظر گرفته شده است [۱۴].

با مقایسه شکل (۶) و (۷) دیده می‌شود تطابق بسیار مناسبی به خصوص در حداکثر پاسخ‌ها دیده می‌شود و المان پیشنهادی در این تحقیق توانسته است رفتار قاب مجهز به میراگر را به درستی مدل کند. انتظار می‌رفت که پاسخ‌ها دقیقاً برهم منطبق شوند، اما خطاهای ناچیزی در پاسخ‌های کوچک دیده می‌شود، که علت آن ناشی از دو عامل است. اول اینکه مدل ارائه شده در SAP2000 دقیقاً پلاستیک خشک نیست، و دوم اینکه پیش‌کشیدگی در



شکل (۶): پاسخ قاب با و بدون میراگر تحت تحریک زلزله، مدل شده توسط مولا و بلو در نرم‌افزار DRAIN- 2DX [۵]



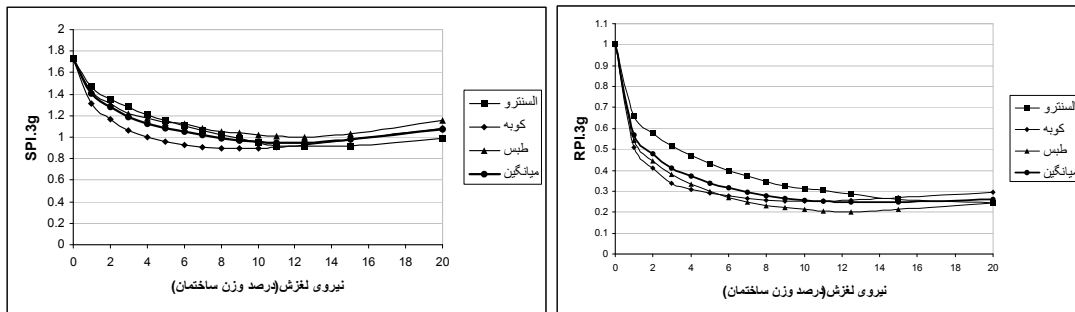
شکل (۷): پاسخ به دست آمده برای قاب اولیه با و بدون میراگر، مدل شده در این تحقیق در نرم‌افزار SAP2000

نیرو حاصل شد، لازم است که مهارها برای نیروی بیشتر کنترل شوند. اما اگر نیروی لغزش در کمتر از  $0.125W$  گرفت، مقاطع مهارها نیاز به تغییر نخواهد داشت. به منظور تعیین نیروی لغزش بهینه در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، مقدار کل نیروی لغزش از صفر تا  $0.2W$  در گام‌های مختلف افزایش داده می‌شود و شاخص‌های مطرح شده محاسبه می‌گردند. همواره کنترل می‌شود، که مهارها حتی در نیروی لغزش  $0.2W$  نیز به صورت الاستیک باقی بمانند. ضمناً وزن قاب سه طبقه،  $155$  تن، پنج طبقه  $280$  تن و هشت طبقه،  $460$  تن می‌باشد و نیروی لغزش کل به صورت مساوی در ارتفاع تقسیم می‌گردد، با استفاده از رابطه (۲) و در نظر گرفتن ضریب تنش مجاز، مهارها طراحی شده و در تمام ساختمان‌های مورد مطالعه مهارها، میله‌گردهایی به قطر  $34$  میلیمتر جوابگو بوده و استفاده شد. میراگرها به صورت هم مرکز و به ابعاد  $\frac{1}{20}$  قاب انتخاب می‌شوند، و اجزای اتلاف‌کننده انرژی در میراگرهای اصطکاکی از رفتار اصطکاک کلمب تبعیت می‌کنند. این ساختمان‌ها تحت سه شتاب نگاشت زلزله الاسترو، کوبه و طبس با چهار شتاب مناطق تحت لرزه‌خیزی کم ( $PGA=0.2g$ )، متوسط ( $PGA=0.25g$ )، زیاد ( $PGA=0.3g$ )، و خیلی زیاد ( $PGA=0.35g$ )، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در مجموع نیاز به  $540$  تحلیل غیر خطی می‌باشد. در تمام تحلیل‌ها، گام‌های تحلیل برابر  $0.02$  ثانیه در نظر گرفته می‌شود که با گام شتاب نگاشت یکی است [۱۴]. لازم به ذکر است که گرچه میراگر اصطکاکی دورانی با داشتن یک مفصل در محل اتصال به تیر، شکل‌پذیری را بالا می‌برد [۵]، اما باید از مهارهایی همچون میله گرد و یا کابل‌هایی با مقامت بالا استفاده کرد. نیروی لغزش در میراگرهای اصطکاکی دورانی در بازوی عمودی لنگر لغزش را ایجاد می‌کند، و این مهارها در هر لنگر لغزش خاص نیاز به یک پیش کشیدگی متناسب با آن را دارند، که

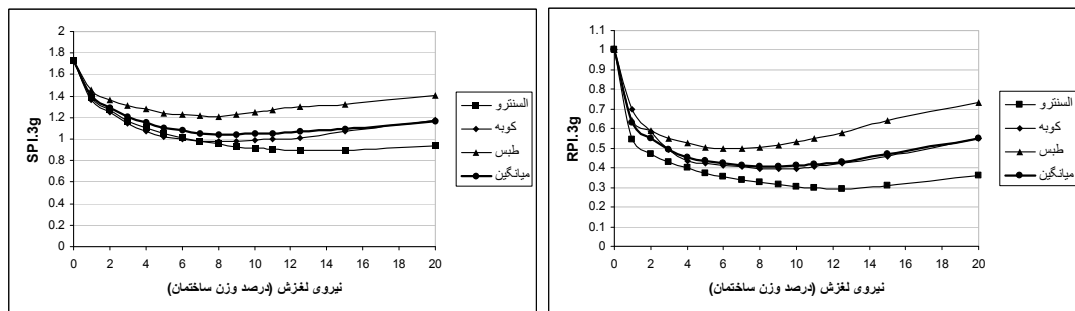
از رابطه (۱) محاسبه می‌شود و تیری که میراگر به آن متصل است، باید برای این نیرو طراحی گردد. در این تحقیق نیروی پیش‌کشیدگی با اعمال کرنش اولیه ایجاد گردید.

به این دلیل که لنگر لغزش مقدار مشخصی دارد، پس نیروی درون میله‌ها از حد خاصی تجاوز نمی‌کند، و این میراگر قادر است، قوانین دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران را اقتناع کند. در نهایت پس از طراحی اجزای میراگر و ترسیم شاخص‌های عملکرد میراگر نقطه مینیمم شاخص‌های عملکرد مشخص شد، و نیروی لغزش بهینه به دست آمده است. این نیروی لغزش علاوه بر سه شتاب نگاشت، برای میانگین سه شتاب نگاشت نیز به دست آمده است. علت این امر این است که مشخص گردد، اگر در بررسی رفتار سازه‌ای از شتاب نگاشت‌های مختلف استفاده شود، آیا میانگین آنها نیز جواب مطلوبی را می‌دهد، و برای هر سه شتاب نگاشت می‌تواند صادق باشد. نمونه‌ای از این شاخص‌های عملکرد در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) و جدول (۱) ارائه شده است. شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به ترتیب شاخص عملکرد نسبی و کارایی میراگر را برای ساختمان‌های ۳، ۵ و ۸ طبقه تحت زلزله‌های الاسترو، کوبه و طبس با حداکثر شتاب  $0.3g$  و همچنین میانگین جوابهای آنها را نشان می‌دهند. جدول (۱) نیز مقادیر نیروی لغزش بهینه را برای یک ساختمان ۵ طبقه تحت شتاب‌های حداکثر متفاوت و زلزله‌های فوق‌الذکر نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، مشخص می‌شود که، شاخص‌های عملکرد میراگر در محدوده  $1/5$  الی  $2$  درصدی نسبت به وزن سازه ( $15$  الی  $20$  درصد نسبت به نیروی لغزش بهینه) مقادیر ثابتی را نشان می‌دهد. این موضوع قادر به تعدیل کردن خطاهای ساخت، نصب و عوامل محیطی است [۱۴].

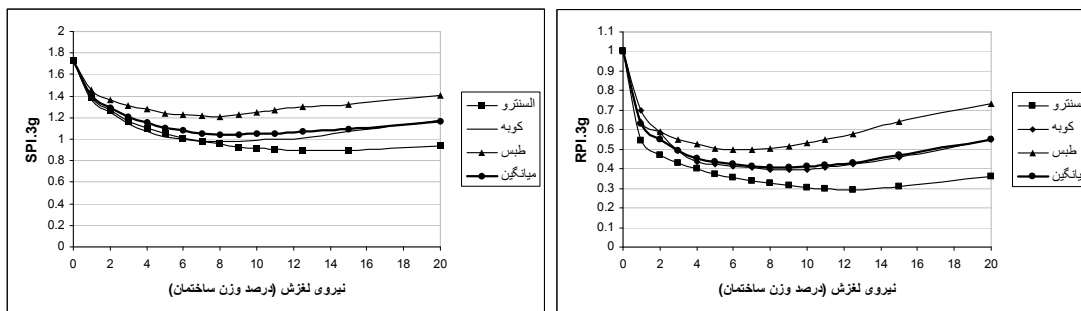




شکل (۸): راست- شاخص عملکرد نسبی میراگر، چپ- شاخص کارایی میراگر ساختمان سه طبقه تحت زلزله‌های 0.3g



شکل (۹): راست- شاخص عملکرد نسبی میراگر، چپ- شاخص کارایی میراگر ساختمان پنج طبقه تحت زلزله‌های 0.3g



شکل (۱۰): راست- شاخص عملکرد نسبی میراگر، چپ- شاخص کارایی میراگر ساختمان هشت طبقه تحت زلزله‌های 0.3g

جدول (۱): مقادیر بار لغزش بهینه برای ساختمان ۵ طبقه

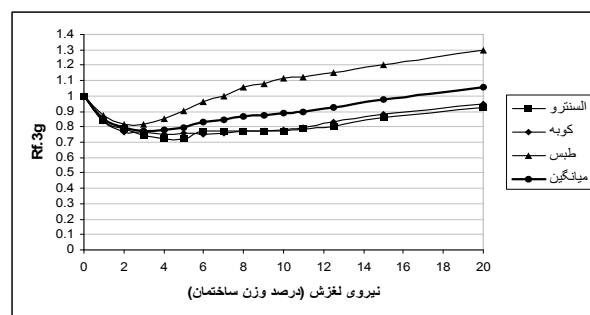
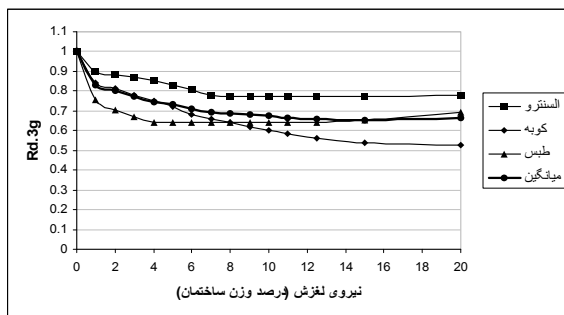
بارهای لغزش بهینه (درصد از وزن سازه)				شاخص عملکرد	زلزله
0.35g	0.3g	0.25g	0.2g		
۱۵	۱۵	۱۲/۵	۱۰	(SPI)	السترو
۱۵	۱۲/۵	۱۱	۹	(RPI)	
۹	۸	۶	۵	(SPI)	کوبه
۱۰	۹	۸	۶	(RPI)	
۹	۸	۷	۵	(SPI)	طیس
۸	۷	۵	۵	(RPI)	
۱۰	۸	۷	۶	(SPI)	میانگین
۱۰	۹	۷	۶	(RPI)	

با توجه به نتایج به دست آمده، نیروی بهینه لغزش میانگین برای شتاب نگاشت‌های با  $0.35g$  در قاب سه طبقه ۱۵ درصد، در قاب پنج طبقه ۱۰ درصد و در قاب هشت طبقه ۷/۵ درصد می‌باشد. در مرحله بعد میزان خسارت در نقطه بهینه عملکرد بررسی می‌شود. میزان خسارت برای تمام سازه‌ها و تمام زلزله‌ها به جز قاب پنج طبقه تحت زلزله السنترو با  $PGA=0.35g$  برابر صفر شد. در این قاب پنج طبقه میزان خسارت در دو حالت ساختمان بدون میراگر و مجهز به میراگر با نیروی لغزش بهینه از ۶۶ به ۱۵ درصد کاهش یافت.

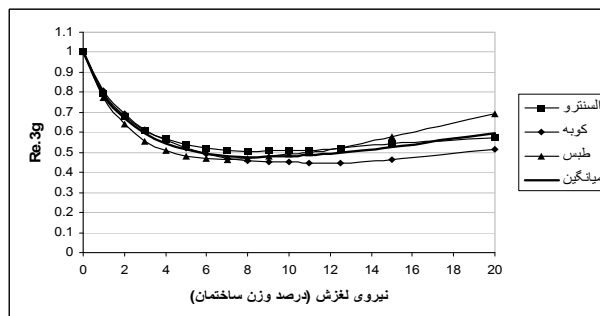
با افزایش  $PGA$  زلزله مقدار انرژی بیشتری به سازه وارد می‌شود. به منظور اتلاف انرژی بیشتر نقطه بهینه شاخص‌های عملکرد را جلو می‌برد، و به تبع آن، در شتاب نگاشت‌ها با افزایش ماکزیمم شتاب از  $PGA=0.2g$  تا  $PGA=0.35g$ ، نیروی لغزش بهینه افزایش می‌یابد. این

افزایش در قاب سه طبقه، ۷/۵ درصد، در قاب پنج طبقه ۴ درصد و در قاب هشت طبقه ۲/۵ درصد نسبت به وزن سازه است. این موضوع بیانگر این است، که در سازه‌ها با پیروید بالاتر عملکرد میراگر بهتر می‌شود.

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) فاکتورهای کاهش تغییر مکان، کاهش برش پایه و کاهش انرژی ماندگار برای قاب هشت طبقه تحت زلزله‌هایی با  $PGA=0.35g$  ترسیم شده است. همانطور که از نمودارهای (۱۱) و (۱۲) مشخص است، هیچ کدام از سه فاکتور ترسیم شده، در نقطه مینیمم خود نمی‌تواند نیروی لغزش مشخصی را مطابق با فاکتورهای دیگر بدهد. اما استفاده از این سه فاکتور در شاخص عملکرد نسبی میراگر، نیروی لغزش مشخصی را می‌دهد، که این نیروی لغزش قابل مقایسه با شاخص کارایی میراگر است.



شکل (۱۱): راست - فاکتور کاهش برش پایه، چپ - فاکتور کاهش تغییر مکان در ساختمان هشت طبقه تحت زلزله‌های  $0.3g$



شکل (۱۲): فاکتور کاهش انرژی ماندگار ساختمان هشت طبقه تحت زلزله‌های  $0.3g$



به منظور ارزیابی روش ساده شده ارائه توسط فیلترالت و چری، نیروی لغزش با استفاده از معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۰) و نمودار (۴) به دست آمد، و با نیروی لغزش بهینه به دست آمده از شاخص‌های عملکرد مقایسه شد. نسبت پریود سازه مهارشده به سازه مهارنشده برای قاب سه، پنج و هشت طبقه به ترتیب، ۰/۶۸۶، ۰/۷۱۲ و ۰/۷۶۴ می‌باشد. به منظور به دست آوردن  $T_g$  از طیف پاسخ سه شتاب نگاشت مطرح شده استفاده شد. استفاده از پریود هیچ یک از شتاب نگاشت‌ها که از طیف پاسخ شتاب به دست آمد، نیروی لغزش بهینه‌ای نزدیک به مقدار دقیق را نمی‌دهد. همچنین نیروی لغزش بسیار غیر محافظه کارانه‌ای از طیف میانگین حاصل می‌شود. اما میانگین سه پریود به دست آمده از سه طیف، نیروی لغزش مناسبتری را نتیجه می‌دهد. و خطاهای حاصله در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرند. حداکثر خطای بار لغزش به دست آمده از روش تقریبی با روش به دست آمده از شاخص‌های عملکرد، در مورد قاب سه طبقه ۰/۰۲ درصد و در قاب پنج طبقه ۱/۷۹ درصد و در قاب هشت طبقه ۰/۵۸۷ درصد نسبت به وزن سازه بوده است.

## ۵- بحث و بررسی

شاخص‌های عملکرد نسبی و کارایی میراگر برای سه ساختمان سه، پنج و هشت طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی به دست آمد. مینیمم شاخص‌های عملکرد، نقطه عملکرد بهینه میراگر محسوب می‌شود. در نهایت بار لغزش بهینه از روش تقریبی توسط میانگین سه طیف پاسخ شتاب محاسبه شده و سپس با بار لغزش بهینه از شاخص‌های عملکرد مقایسه شد.

به منظور به دست آوردن شاخص کارایی میراگر لازم به محاسبه سه فاکتور کاهش تغییر مکان، کاهش برش پایه و کاهش انرژی مانده در ساختمان از روابط (۴)، (۵) و (۶) می‌باشد. کاهش هر کدام از این سه فاکتورها می‌تواند به معنای ایجاد نیروهای کمتر در سازه باشد و در نتیجه میزان خسارت در سازه کاهش می‌یابد. با توجه به

نمودارهای (۱۱) و (۱۲) هیچ‌کدام از سه فاکتور فوق، نمی‌توانند بار لغزش یکسانی مطابق با فاکتورهای دیگر را بدهند، اما به کارگیری آنها در شاخص کارایی میراگر از رابطه (۳)، جوابهای یکسانی را مطابق با شاخص عملکرد نسبی میراگر می‌دهد، که در نمودارهای (۸)، (۹) و (۱۰) و جدول (۱) دیده می‌شود.

همانطور که از نمودار (۱۱-چپ) دیده می‌شود، سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی می‌توانند پاسخی مساوی و یا کمتر از سازه‌های قاب خمشی مهاربندی شده داشته باشند. این موضوع علاوه بر اثر در شاخص کارایی میراگر در کنترل سازه و کنترل تغییر مکان‌های جانبی بسیار مهم است. به طوری که با مجهز کردن سازه به میراگرهای اصطکاکی علاوه بر اتلاف بالای انرژی در سازه، می‌توان جابجایی را در حد سازه‌های مهار شده کنترل کرد و در واقع می‌توان مزیت سازه قاب خمشی مهاربندی شده را با مجهز کردن آن به میراگر به صورت توأم داشت. گرچه در نمودار (۱۱) ممکن است، نقطه مینیمم مشخصی وجود نداشته باشد، اما در مقایسه با نمودارهای (۱۰) نقطه شروع به تغییر مکان ثابت نزدیک نقطه نیروی لغزش بهینه قرار می‌گیرد.

رابطه‌های (۳) و (۷) هر دو مفهومی در جهت کاهش نیروهای درون سازه و کاهش انرژی الاستیک سازه را دارند، بنابراین در نقطه بهینه لغزش ناشی از مینیمم این شاخص‌ها مطابق نمودارهای (۸)، (۹) و (۱۰) باید حداقل میزان خسارت و اعضای که به تسلیم می‌رسند، وجود داشته باشد. با توجه به نتایج حاصله، عملکرد میراگر در هر سه ساختمان سه و پنج و هشت طبقه بسیار خوب بوده و تعداد اعضای را که در طی یک رویداد لرزه‌ای به تسلیم می‌رسند، را به شدت کاهش می‌دهد. به جز یک مورد در قاب پنج طبقه در تمام قابها و تمام زلزله‌ها، میزان خسارت برابر صفر شد. عملکرد میراگر با افزایش ارتفاع بهتر می‌شود، به طوری که با کاهش نیروی لغزش نیاز به پیش کشیدگی کمتری نیاز است. مقادیر نیروی لغزش بهینه برای زلزله‌هایی با شتاب

اوج 0.35g در قاب سه طبقه ۱۲/۵ درصد، در قاب پنج طبقه ۱۰ درصد و در قاب هشت طبقه ۸ درصد به دست آمد. علت این امر را می‌توان ناشی از پررود بالاتر ساختمان و دوران بیشتر میراگرها دانست. این موضوع می‌تواند استفاده از مهارهایی همچون میلگرد و یا کابل را در کاربرد میراگر اصطکاکی دورانی توجیه کند.

ممکن است استفاده از یک شتاب نگاشت برای بررسی عملکرد میراگر مناسب نباشد، اما نتایج مربوط به مقدار میانگین نتایج به دست آمده از سه شتاب نگاشت قابل اطمینان است. زیرا نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بار لغزش به دست آمده از میانگین بارهای لغزش سه شتاب نگاشت، نیز حداقل خسارت را ایجاد می‌کند. که علت این امر می‌تواند عدم حساسیت بار لغزش بهینه در میراگرهای اصطکاکی باشد. هیچ نگرانی در مورد از کار افتادن میراگرها در شتاب‌های پایین تر وجود ندارد، به طوری که در شتاب‌های پایتتر و در نقطه عملکرد بهینه، اتلاف ۴۰ درصدی انرژی را توسط میراگر خواهد داشت. دو شاخص کارایی میراگر و عملکرد نسبی میراگر جوابهای نسبتاً یکسانی را داده است. این موضوع می‌تواند در مورد شاخص کارایی میراگر (که به دست آوردن آن ساده تر است) حائز اهمیت باشد. وزن میراگر و اجزای الحاقی به آن، به ۲/۵ درصد وزن اسکلت سازه نمی‌رسد، اما می‌تواند خرابی را در سازه به شدت کاهش دهد. این موضوع در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و همچنین به کارگیری در ساختمان‌های با اهمیت زیاد بسیار مهم است. در مورد ساختمان‌های مورد مطالعه استفاده از روش تقریبی در مورد این میراگر جوابهای قابل قبولی می‌دهد، که خود می‌تواند مبنای طراحی قرار گیرد و یا به عنوان شروع برای پیدا کردن نقطه عملکرد بهینه با استفاده از شاخص‌های عملکرد باشد [۹].

## ۶-نتایج

- با توجه به کاهش نیروی لغزش بهینه در ساختمان‌ها با افزایش پررود عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی در ساختمان‌های بلند بهتر می‌شود.

- شتاب نگاشت‌های مختلف، پاسخ‌های مختلفی در تعیین بار لغزش بهینه می‌دهند. اما میانگین پاسخ‌های شتاب نگاشت‌ها می‌تواند معیار بهتری برای قضاوت محسوب گردد. لذا توصیه می‌گردد در تعیین بار لغزش بهینه، حداقل از سه شتاب نگاشت استفاده شود و میانگین آن ملاک طراحی قرار گیرد.

- از آنجا که خطا تعیین بار لغزش بهینه از روش ساده شده، کمتر از ۲ درصد می‌باشد. لذا این روش در طراحی میراگرهای اصطکاکی دورانی نیز کاربردی می‌باشد و دقت روش ساده شده مناسب است.

- دو شاخص کارایی و عملکرد نسبی میراگر، جوابهای نزدیکی را دادند. این موضوع استفاده از شاخص کارایی میراگر را در طراحی دقیق میراگر به دلیل ساده‌تر بودن در محاسبات توجیه می‌کند.

- استفاده از میراگر اصطکاکی دورانی موجب کاهش شدید میزان خسارت از حدود ۶۶ به ۱۵ درصد شده است و حتی در اکثر موارد شاخص خسارت صفر گردیده است. با توجه به وزن میراگر و قطعات الحاقی آن، استفاده از این میراگر در طراحی سازه‌های جدید و بهسازی سازه‌های قدیمی توجیه پذیر می‌باشد.

## ۷-مراجع

- 1-Pall, Avtar. Marsh, Cedric, "seismic Response of Friction Damped Braced Frames" Structural Division, Vol. 108, No. 6, June 1982 pp. 1313-1323. (1982)
- 2- Chaidez, Servio Tulio de la Cruz, "Contribution to the Assessment of the Efficiency of Friction Dissipators for Seismic of building" thesis, Barcelona, Spain. (2003)
- ۳- مهدویان، سیاوش، فلاح، نصرت‌الله، پورزینلی، سعید " استفاده از میراگرهای اصطکاکی برای کنترل لرزشی



ساختمان‌ها" پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۶).

۴- تهرانی‌زاده، محسن، خالقیان، فرشید "مقایسه نتایج آزمایشگاهی میراگر اصصکاکی با سطوح لغزش مختلف" پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۶).

5- Mualla, Imad And Bellev, Borislav "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation" Engineering Structures 24, 365-371, (2002).

6-Liao, Wen. Mualla, Imad And Loh,Chin, "Shaking table test of a friction damped frame structure", Struct. Design Tall Spec. Build. 13, 45-54(2004).

۷-عهادیان فرد، محمدعلی، زهرایی، مهدی، سعادت. سعید (۱۳۸۶) "بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمانهای فولادی مجهز به میراگر اصصکاکی چرخشی" سومین کنگره مهندسی عمران.

8- Filiatrault, A and Cherry, S (1989) "Efficient Nuomerial Modelling For Design Of Friction Damped Steel Plane Frames", Canadian Journal Of Civil Engineering , Vol 16, no, 3, pp. 211-218.

9- Moreschi, Luis (2000) "Seismic Design of Energy Dissipation Systems for Optimal Structural Performance" Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics, Blacksburg, Virginia.

10- Filiatrault, A and Cherry, S (1990) "Seismic Design Spectra For Friction-Damped Structures", Journal Of Structural Engineering, Vol. 116, No. 5.

۱۱- ویلسون، ادوارد ال- حبیب‌الله، اشرف- سهروردی، اقبال- موریس، رابرت "تکنیک‌های عددی و حل گام به گام مسائلی در SAP2000, ETABS, SAFE " بابک کریمخانی، چاپ اول، انتشارات آذرباد (۱۳۸۰).

12- Nielsen, Leif. Mualla, Imad (2002) "A Friction damping system Low order behavior and design" Report BYG·DTU, R-0302002, ISSN 1601-2917, ISBN 87-7877-090-4.

۱۳- دفتر امور فنی و تدوین معیارها سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود" چاپ اول، انتشارات پژوهشکده بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۱).

۱۴- جلالی، سید قاسم، "بررسی پارامتریک اثر میراگرهای اصصکاکی دورانی در قابهای فولادی با بادبندهای برون محور" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران (۱۳۸۶).