

## مقاوم‌سازی ساختمان‌های فولادی به کمک میراگرهای اصطکاکی چرخشی\*

«یادداشت پژوهشی»

محمد علی هادیان فرد<sup>(۱)</sup>

**چکیده** با استفاده از میراگرهای اصطکاکی چرخشی می‌توان رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی را بهبود بخشید و نیروهای داخلی را در بادبندها، ستون‌ها و سایر اعضای سازه به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در این تحقیق روشی ساده برای مدل‌سازی و تحلیل قاب‌های بادبندی مجهز به این میراگرها پیشنهاد گردیده است. مدل پیشنهادی به خوبی بیانگر رفتار لرزه‌ای میراگر است و قابل کاربرد برای تحلیل قاب‌های بادبندی شده با مقاطع رایج در ایران می‌باشد. قاب‌های فولادی بادبندی شده در دو حالت بدون میراگر و همراه با میراگر مورد تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار گرفته و مواردی نظیر برش پایه، نیروی محوری ستون‌ها و بادبندها، جابه‌جایی نسبی طبقات و غیره با هم مقایسه گردیده‌اند. سازه در تمامی موارد سازه با میراگر عملکرد بهتری داشته و رفتار لرزه‌ای مناسب‌تری از خود نشان داده است. بنابراین برای تقویت ساختمان‌های موجود و یا طراحی سازه‌های جدید با وزن کمتر، استفاده از میراگرهای اصطکاکی بسیار مفید می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** مقاوم‌سازی، میراگر اصطکاکی چرخشی، ساختمان‌های فولادی، استهلاک انرژی.

## Rehabilitation of Steel Structures by Using the Rotational Friction Dampers

M. A. Hadianfard

**Abstract** The rotational friction dampers can be improved the seismic behavior of the steel structures, and they can be reduced the internal forces in the bracing members, columns and the other structural members. In this research, a simple method for modeling and analysis of braced frames equipped by these dampers is proposed. The proposed model describes seismic behavior of dampers very well and it is applicable to analysis of braced frames with common sections in Iran. Braced steel frames with dampers and without dampers are considered for time-history dynamic analysis, and some parameters such as: base shear, axial forces of the columns and the bracing, drift of stories etc. for two different cases are compared. In the entire analyzes, the structure with damper has been shown the better performance and the more suitable seismic behavior than the structure without damper. Then, use of frictional dampers for rehabilitation of existing buildings or designing of new structures with minimum weight is very useful.

**Keywords** Rehabilitation, Rotational Friction Damper, Steel Structure, Energy Dissipation.

\* تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۱۰/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۱۰ می‌باشد.

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز.

### مقدمه

استفاده از میراگرهای اصطکاکی برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها در برابر بارهای جانبی باد و زلزله به‌عنوان یک سیستم ارزان‌قیمت مستهلک‌کننده‌ی انرژی که به‌راحتی قابل نصب و تعمیر می‌باشد، توسط محققان زیادی مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته است. از این جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط پال و مارش [1]، هم‌چنین آیکن و همکاران [2,3]، گریگورین و پاپو [4] اشاره نمود. استفاده از میراگر اصطکاکی چرخشی برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط مؤلا و بیلو [5] مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت. این افراد پاسخ یک قاب فولادی یک‌طبقه‌ی مجهز به بادبندهای شورون (مهاربند ۸) پیش‌تینده همراه با میراگر اصطکاکی چرخشی را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین تحقیقات تکمیلی بر روی قاب‌های مهاربندی شده مجهز به میراگر اصطکاکی چرخشی در سال ۲۰۰۷ توسط پارک و همکاران [6] انجام گرفت.

مؤلا و بیلو [5] اثر نیروی پیش‌تندگی بادبندها را بر روی رفتار میراگر اصطکاکی و پاسخ سازه بررسی نمودند و نشان دادند که میزان پیش‌تندگی بادبندها نقش اساسی در تغییر پاسخ سازه ندارد و اصولاً پیش‌تندگی برای اقتصادی کردن مقطع بادبندها و جلوگیری از کماتش آنها دارای کاربرد می‌باشد. در تحقیقات انجام شده توسط ایشان حداکثر تفاوت بین پاسخ دو سازه یکی با استفاده از ۱۰۰ درصد نیروی پیش‌تندگی و دیگری با ۲۰ درصد نیروی پیش‌تندگی کمتر از ۴ درصد بوده است.

بنابراین با توجه به نوع ساخت و سازه‌ها در ایران که معمولاً از سیستم قاب‌های بادبندی استفاده می‌گردد و باید سیستم مهاربندی در زلزله‌های متوسط و خفیف بتواند بدون استفاده از عملکرد میراگر نیروهای جانبی را تحمل کند و جابه‌جایی سازه را کنترل نماید، لازم است که بادبندها از مقاطع نسبتاً قوی و مقاوم در برابر کماتش ساخته شوند. در این حالت در زلزله‌های قوی قبل از کماتش بادبندها میراگرها فعال می‌گردند و با

لغزش ایجاد شده در آنها انرژی زلزله مستهلک می‌گردد.

در تحقیق حاضر روشی ساده و عملی برای مدل کردن میراگرها توسط نرم‌افزارهای رایج آنالیز سازه نظیر ETABS پیشنهاد گردیده است و سپس رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی مهاربندی شده همراه با میراگرهای اصطکاکی چرخشی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و با رفتار سیستم‌های فاقد میراگر مقایسه گردیده است و نشان داده شده است که استفاده از میراگرهای اصطکاکی می‌تواند به مقدار قابل‌توجهی رفتار لرزه‌ای سازه را بهبود بخشد. مهاربندها به‌صورت شورون است و میراگر در محل اتصال مهاربند به تیر قرار دارد، در ضمن میله‌های مهاربند به‌صورت پیش‌تینده نیست و برای آنها از مقاطع متداول در ایران (مقاطع دابل ناودانی) استفاده شده است. بنابراین مهاربندها به‌گونه‌ای طراحی گردیده‌اند که دارای مقاومت فشاری کافی هستند و قبل از لغزش میراگر کماتش نمی‌کنند. در اصل تفاوت مدل استفاده شده در این پژوهش با مدل‌های قبلی مطالعه شده توسط مؤلا [5] و پارک [6] در نوع مقطع مهاربندها می‌باشد.

### مشخصات میراگر اصطکاکی چرخشی

در شکل (۱) نمونه‌ای از میراگر اصطکاکی چرخشی نمایش داده شده است. هم‌چنین یک تصویر شماتیک از نحوه‌ی استقرار سیستم میراگرهای متصل به مهاربندهای شورون در شکل (۲) نشان داده شده است. از آنجایی که مهاربندهای متصل به صفحه‌ی افقی میراگر مانع چرخش آن می‌شوند، میراگر مانند یک گره T شکل صلب عمل می‌کند که در صورت غلبه‌ی گشتاور اعمالی بر مقاومت اصطکاکی شروع به چرخش می‌نماید و توسط نیروی اصطکاکی موجود بر وجه تماس باعث استهلاک انرژی می‌شود. اگر لنگر چرخشی اصطکاکی قابل تحمل توسط میراگر را با  $M_f$  نمایش دهیم (بعد از این لنگر پیچشی در میراگر لغزش رخ می‌دهد) و لنگر نهایی ناشی از نیاز لرزه‌ای در

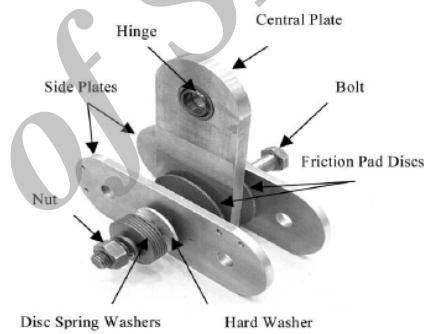
### مدل کردن سازه شامل میراگر

در این تحقیق برای مدل کردن سازه از نرم افزار ETABS2000 استفاده شده است. و روشی ساده و عملی برای مدل کردن میراگرهای اصطکاکی چرخشی پیشنهاد گردیده است که با استفاده از آن می توان قاب های دوبعدی یا سه بعدی چندین طبقه را به راحتی مورد تحلیل قرار داد. قاب های مورد بررسی همگی به صورت قاب صلب بادبندی شده می باشند و کلیه ی بادبندها به شکل (۸) (شورن) و مجهز به سیستم میراگر اصطکاکی چرخشی می باشند که در محل اتصال بادبند به تیر قرار می گیرند. برای اعضای تیر و ستون و بادبند از المان های FRAME و برای میراگر اصطکاکی از المان LINK استفاده گردیده است. به کمک این المان، مقادیر سختی و میرایی و هم چنین مقاومت تسلیم (لنگر لغزش) و نسبت سختی پس از تسلیم جهت میراگرهای چرخشی تعریف می گردد و رفتار میراگر به صورت دو خطی مدل می شود.

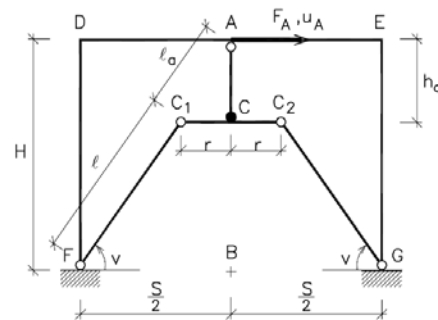
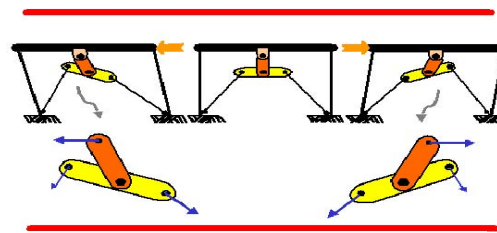
میراگر چرخشی اصطکاکی، به صورت دو میله ی صلب که به صورت T شکل به هم مفصل گردیده اند مدل شده است. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دو گره مربوط به انتهای بال T شکل محل اتصال عضوهای قطری مهاربند و گره انتهایی جان T شکل محل اتصال میراگر به تیر می باشد. گره وسط عضو T شکل که در آن محل دو میله ی صلب به هم مفصل شده اند، بیان کننده ی رفتار اصلی میراگر می باشد. با تعریف المان LINK در این نقطه و اختصاص رفتار دو خطی به آن، بعد از رسیدن لنگر به لنگر لغزش، این گره به صورت مفصل عمل می نماید و باعث اتلاف انرژی زلزله می گردد.

آنالیز سازه به صورت دینامیکی تاریخچه زمانی و با استفاده از رکورد زلزله ی السنترو صورت گرفته است قاب های مورد مطالعه شامل دو قاب دوبعدی A و B مطابق اشکال (۳) و (۴) و قاب سه بعدی C مطابق شکل (۵) می باشند. خصوصیات مقاطع استفاده شده در قاب های دوبعدی A و B در جداول (۱) و (۲) و

میراگر قفل شده و بدون لغزش معادل  $M_U$  باشد، مقاومت نرمالیز شده میراگر را می توان به صورت  $\eta_m = M_f/M_U$  بیان نمود. اگر لنگر لغزش در میراگر برابر با صفر باشد ( $M_f=0$ ) در این حالت  $\eta_m=0$  معادل با قاب صلب بدون بادبندی است. و اگر لنگر لغزش میراگر معادل با نیاز لرزه ای باشد ( $M_f = M_U$ ) در این حالت  $\eta_m=1$  است که معادل با قاب بادبندی بدون میراگر می باشد. بنابراین محدوده ی عملکرد میراگر چرخشی مربوط به  $0 < \eta_m < 1$  است. بهترین  $\eta_m$  که حداکثر اتلاف انرژی و حداقل جابه جایی در قاب را ایجاد می کند، نشان دهنده ی میزان لنگر لغزش بهینه برای میراگر می باشد [5].

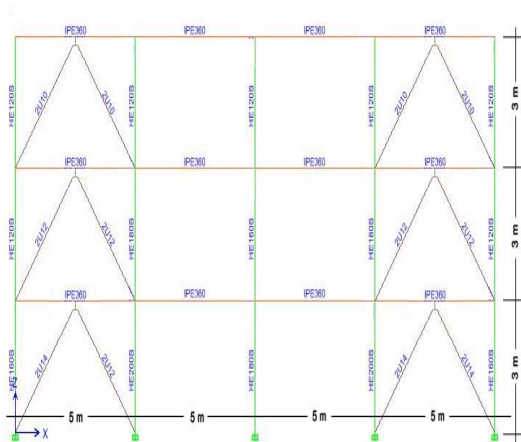


شکل ۱ قطعات میراگر اصطکاکی چرخشی

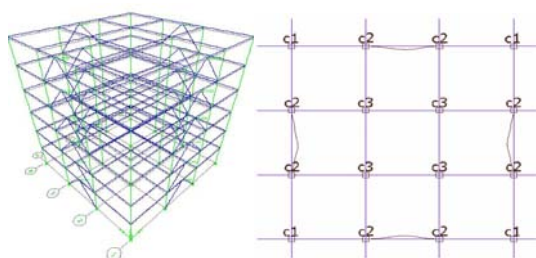


شکل ۲ تصویر شماتیک از قاب مجهز به میراگر اصطکاکی

چرخشی [5]

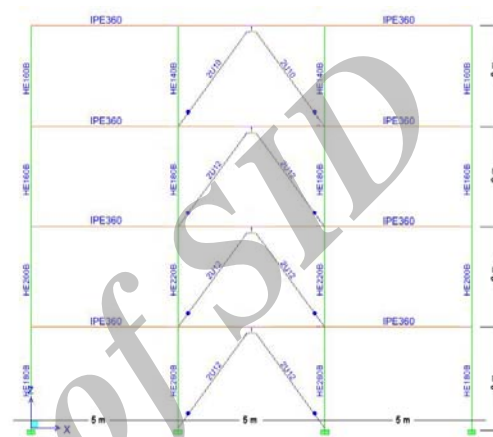


شکل ۴ نمایش قاب نوع B



شکل ۵ نمایش نما و پلان قاب سه‌بعدی نوع C

خصوصیات مقاطع مربوط به قاب سه‌بعدی C در جدول (۳) منعکس گردیده است. در قاب‌های دوبعدی A و B بار مرده‌ی وارد بر تیرها برابر با ۳ تن بر متر و بار زنده برابر با ۱ تن بر متر در نظر گرفته شده است و در قاب سه‌بعدی C بار مرده برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ نمایش قاب نوع A

جدول ۱ مشخصات مقاطع قاب دوبعدی A

طبقه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	تیرها	باد بندها
۱	HEB 200	HEB 260	IPE360	2U12
۲	HEB 200	HEB 220	IPE360	2U12
۳	HEB 180	HEB 180	IPE360	2U12
۴	HEB 160	HEB 140	IPE360	2U10

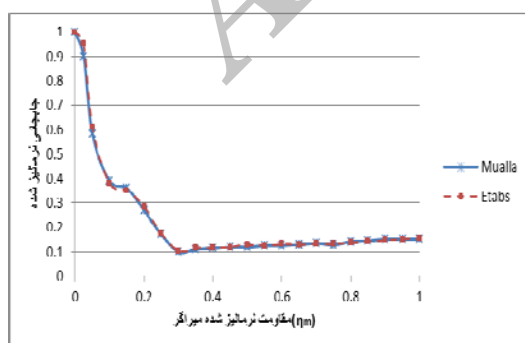
جدول ۲ مشخصات مقاطع قاب دوبعدی B

طبقه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی (کنار بادبند)	ستون وسط	تیرها	باد بندها
۱	HEB 160	HEB 200	HEB 180	IPE360	2U12
۲	HEB 120	HEB 180	HEB 160	IPE360	2U12
۳	HEB 120	HEB 120	HEB 120	IPE360	2U10

جدول ۳ مشخصات مقاطع قاب سه بعدی C

طبقه	ستون های چهارگوشه ساختمان (C1)	ستون های کنار بادبند (C2)	ستون های وسط ساختمان (C3)	تیرهای ساختمان	بادبند ها
۱	HEB 700	HEB 700	HEB 700	IPE 270	2U 30
۲	HEB 700	HEB 700	HEB 400	IPE 270	2U 30
۳	HEB 700	HEB 450	HEB 400	IPE 270	2U 28
۴	HEB 600	HEB 450	HEB 400	IPE 270	2U 22
۵	HEB 400	HEB 300	HEB 300	IPE 270	2U 18
۶	HEB 260	HEB 240	HEB 240	IPE 270	2U 14

حداکثر شتاب  $PGA=3.417 \text{ m/Sec}^2$  می باشد. رفتار غیرخطی میراگر به صورت دو خطی مدل گردیده است. در شکل (۶) پاسخ به دست آمده برای سازه (جابه جایی نرمالیز شده) در ازای مقادیر مختلف  $\eta_m$  (مقاومت نرمالیز شده میراگر) که توسط مؤلا و بیلینو [۷] قبلاً به کمک نرم افزار DRAIN-2DX محاسبه شده است با پاسخ به دست آمده در این مقاله توسط نرم افزار ETABS مقایسه گردیده است (برای حالت  $3A_b$ ). هم چنین در شکل (۷) درصد اتلاف انرژی به دست آمده از دو حالت فوق با هم مقایسه گردیده است. حداکثر تفاوت در نتایج در حدود ۶ درصد می باشد که حاکی از دقت خوب مدل سازی به روش پیشنهادی توسط نرم افزار ETABS می باشد.



شکل ۶ مقایسه پاسخ سازه حاصل از نرم افزار ETABS و مطالعات مؤلا [5]

### صحت سنجی مدل سازی

به منظور صحت سنجی مدل سازی های انجام شده، قاب یک دهانه ای یک طبقه ای در نظر گرفته شده توسط مؤلا و بیلینو [5] که توسط نرم افزار DRAIN-2DX تحلیل شده است، در این مطالعه مجدداً با نرم افزار ETABS-2000 مدل سازی و تحلیل شده است. خصوصیات این قاب به شرح زیر می باشد:

دهانه ای قاب برابر با  $7/6$  متر و ارتفاع آن  $4/6$  متر می باشد. تیر قاب به صورت کاملاً صلب و با سختی بی نهایت در نظر گرفته شده است. اتصال ستون ها به تکیه گاه به صورت کاملاً گیردار و مقطع ستون ها از نوع بال پهن با ممان اینرسی  $I=34 \times 10^6 \text{ mm}^4$  می باشند. وزن کل سازه معادل  $450$  کیلو نیوتن و پرود آن برابر  $T=1 \text{ Sec}$  می باشد و نسبت میرایی برابر با  $5$  درصد در نظر گرفته شده است. بر روی این قاب در محل اتصال بادبند شورون از میراگر اصطکاکی چرخشی به ابعاد  $h_a=0.2 \text{ m}$  و  $r=0.165 \text{ m}$  استفاده شده است (شکل ۲ ارتفاع میراگر و عرض میراگر مطابق با شکل ۲ می باشد). برای بادبندها از سه مقطع مختلف استفاده شده است؛ مقطع اول از میلگرد به قطر  $16$  میلی متر و مساحت  $A_b=201 \text{ mm}^2$  می باشد و مقاطع دوم و سوم هر کدام دارای مساحت های  $2A_b$  و  $3A_b$  می باشند. شتاب نگاشت مورد استفاده برای تحلیل تاریخچه زمانی، مؤلفه ای شمالی-جنوبی زلزله ای السنترو با

بهینه را با توجه به بند سوم مشخص کرد. برای این کار کافی است که سازه توأم با میراگر برای نیروهای لغزش مختلف آنالیز شود و با استفاده از نتایج آن نیروی لغزشی (لنگر لغزشی) که کمترین نیروی برش را در طبقه به وجود می‌آورد به عنوان نیروی لغزش بهینه‌ی میراگر انتخاب گردد.

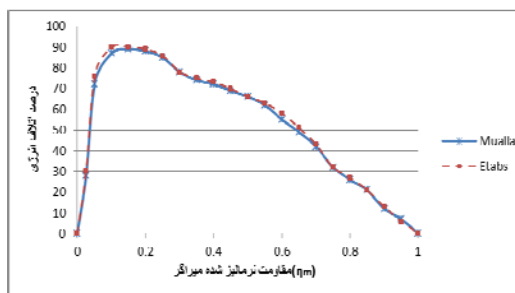
برای قاب یک‌دهانه‌ی یک‌طبقه‌ی نشان داده شده در شکل (۲) که مجهز به میراگر و بادبندهای پیش‌تینده می‌باشد می‌توان مقدار لنگر لغزش بهینه ( $M_{FOPT}$ ) را پس از آنالیز سازه از رابطه‌ی (۱) به دست آورد [7,8].

$$\frac{M_{FOPT}}{h_a EA_b} = \frac{u_{AO}}{L} \cos^2 v \quad (1)$$

در این رابطه  $h_a$  ارتفاع میراگر،  $u_{AO}$  تغییر مکان جانبی قاب،  $A_b$  سطح مقطع بادبند،  $E$  مدول الاستیسیته‌ی فولاد،  $L$  طول بادبند و  $v$  زاویه‌ی بادبند نسبت به محور افق می‌باشد.

برای مدل‌های تحلیل شده در این مقاله که به صورت قاب‌های چنددهانه‌ی چندطبقه می‌باشند و از بادبندهای با مقاطع معمول ناودانی و بدون پیش‌تیندگی استفاده شده است، رابطه‌ی (۱) دارای دقت کافی نیست و به جای آن باید از گام‌های سه‌گانه‌ی توضیح داده شده در بالا استفاده نمود. در مدل‌های مورد نظر برای پیدا کردن لنگر لغزش بهینه، قاب را تحت اثر رکورد زلزله‌ی الاسترو تحلیل نموده و برای نیروهای لغزش مختلف، نیروی برش طبقات محاسبه و بر اساس کمترین نیروی برش ایجاد شده، مقدار نیرو (لنگر) لغزش بهینه محاسبه گردیده است.

به عنوان نمونه برای قاب دوبعدی مدل A نتایج تحلیل در جدول (۴) و برای قاب دوبعدی مدل B نتایج در جدول (۵) منعکس گردیده است. برای هر دو قاب مقادیر به دست آمده از فرمول (۱) با مقادیر دقیق به دست آمده از تحلیل مقایسه گردیده است که حاکی از عدم دقت کافی رابطه‌ی (۱) برای مدل‌های تحلیل شده می‌باشد (به جز برای طبقه‌ی آخر ساختمان).



شکل ۷ مقایسه‌ی درصد اتلاف انرژی حاصل از نرم‌افزار ETABS و مطالعات مؤلا [5]

### برآورد نیروی لغزش بهینه در میراگر

نیروی لغزش میراگر به نیرویی گفته می‌شود که گشتاور ناشی از آن نیرو حول نقطه‌ی چرخش از گشتاور اصطکاکی صفحات حول آن نقطه بیشتر شود و باعث لغزیدن صفحات اصطکاکی روی هم گردد. نکته‌ی مهمی که در طراحی میراگر اصطکاکی وجود دارد تعیین میزان نیروی لغزش بهینه در گره‌های اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور لازم است که به توضیحات زیر توجه نمود.

۱- سیستم میراگر اصطکاکی نباید در برابر بارهای باد و زلزله‌های ضعیف تا متوسط و یا در برابر نیروهای برشی به دست آمده از روابط استاتیکی آئین‌نامه‌ها شروع به لغزش نماید. این مطلب حداقل مقدار نیروی لغزش را مشخص می‌نماید.

۲- عملاً لغزش در میراگر باید قبل از شروع جاری شدن در هر یک از المان‌های سازه، رخ دهد که این مطلب نیز حداکثر مقدار نیروی لغزش را مشخص می‌نماید.

۳- عمل لغزش در میراگر باید به نحوی باشد که مقدار انرژی تلف شده به وسیله‌ی عمل اصطکاک به حداکثر مقدار خود برسد.

حدود بالا و پایین که در بندهای اول و دوم مشخص شده است محدوده‌ای را برای تعیین مقدار تقریبی نیروی اصطکاک مشخص می‌نماید و با انجام چند سری آنالیز غیرخطی می‌توان مقدار نیروی لغزش

برای هر دو قاب A و B مقادیر  $V$  و  $L$  مطابق زیر در نظر گرفته شده است.

$$v = \tan^{-1}\left(\frac{3}{2.5}\right) = 50$$

مهاربند

$$L = \sqrt{3^2 + 2.5^2} = 3.9$$

با توجه به جدول (۴) مقدار لنگر لغزش بهینه برای کلیه طبقات قاب مدل A برابر با  $M_{FOPT} = 5.5$  T.m انتخاب گردیده است. همچنین با توجه به جدول

(۵) برای قاب مدل B در طبقات اول و دوم  $M_{FOPT} = 5$  T.m و در طبقه سوم معادل  $M_{FOPT} = 3$  T.m در نظر گرفته شده است.

برای قاب سه بعدی مدل C مقادیر تغییر مکان و لنگر لغزش در جهت X و Y در جدول (۶) ارائه گردیده است. با توجه به این جدول در جهت X از لنگر لغزش  $M_{FOPT-X} = 8$  T.m و در جهت Y از لنگر لغزش  $M_{FOPT-Y} = 5$  T.m استفاده شده است.

جدول ۴ تغییر مکان طبقات و لنگر لغزش در قاب مدل A

طبقه	تغییر مکان (mm)	لنگر لغزش بهینه براساس رابطی (۱) (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
۴	۴/۰	۴/۸۰	۴/۸۰
۳	۴/۴	۶/۶۵	۵/۳۵
۲	۵/۴	۸/۱۶	۵/۸۵
۱	۳/۸	۵/۷۴	۴/۹۰

جدول ۵ تغییر مکان طبقات و لنگر لغزش در قاب مدل B

طبقه	تغییر مکان (mm)	لنگر لغزش بهینه براساس رابطی (۱) (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
۳	۲/۵	۳/۰۴	۳/۱۰
۲	۴/۰	۶/۰۴	۴/۹۰
۱	۵/۲	۷/۸۶	۶/۲۰

جدول ۶ تغییر مکان طبقات و لنگر لغزش در قاب سه بعدی مدل C

طبقه	تغییر مکان X (mm)	MX (T.m)	تغییر مکان Y (mm)	MY (T.m)
۶	۵/۰	۵/۸	۲/۵	۲/۹
۵	۶/۰	۶/۷	۳/۵	۴/۲
۴	۷/۳	۸/۵	۵/۰	۵/۷
۳	۶/۵	۷/۸	۴/۵	۵/۱
۲	۵/۵	۶/۶	۳/۹	۴/۸
۱	۳/۵	۴/۷	۳/۱	۴/۰

### بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه شامل میراگر

پس از محاسبه‌ی نیروی لغزش بهینه به نحوی که قبلاً اشاره شد، مشخصات میراگر کامل می‌شود. پس از آن در سازه‌های مورد مطالعه می‌توان اثر وجود میراگر را بر روی پارامترهایی نظیر لنگر ستون‌ها، نیروی محوری ستون‌ها، برش طبقات، تغییر مکان نسبی طبقات، شتاب ماکزیمم طبقات و اتلاف انرژی در سازه مورد بررسی قرار داد. در جدول شماره‌ی (۷) نیروها و تغییر مکان‌های مربوط به سازه‌ی مدل A در دو حالت با میراگر و بدون میراگر و در جدول (۸) مقادیر مربوط به سازه‌ی مدل B ارائه شده است. هم‌چنین در جدول شماره‌ی (۹) این مقادیر برای سازه سه‌بعدی مدل C ارائه گردیده است. مطابق این جداول دیده می‌شود که در قاب مدل A که فقط شامل یک دهانه‌ی بادبندی مجهز به میراگر می‌باشد، مقدار برش پایه در حدود ۳۳ درصد و در قاب مدل B که دارای دو دهانه بادبندی مجهز به میراگر و تعداد طبقات کمتری می‌باشد، مقدار برش پایه در حدود ۶۵ درصد کاهش یافته است که تقریباً دو برابر قاب مدل A می‌باشد. هم‌چنین میزان کاهش نیروی محوری ستون‌ها و بادبندها در مدل A در حدود ۳۵ درصد و در مدل B در حدود ۷۵ درصد می‌باشد. میزان کاهش تغییر مکان‌ها نیز در قاب مدل B در حدود ۳/۵ برابر قاب مدل A می‌باشد که همگی نشان‌دهنده‌ی کارایی و عملکرد مناسب میراگر چرخشی می‌باشند. رفتار مناسب میراگرها در کاهش نیروهای داخلی و تغییر مکان‌ها و بهبود مشخصات لرزه‌ای سازه در قاب سه‌بعدی مدل C نیز کاملاً مشهود می‌باشد.

در شکل (۸) نمودار نیرو-تغییر مکان (لنگر- دوران) میراگر مربوط به مدل C رسم شده است. لنگر لغزش در این میراگر  $M=8 \text{ T.m}$  تعریف شده است. رفتار هیسترسیس و کارکرد این میراگر با توجه به لنگر لغزش معرفی شده به خوبی مشخص می‌باشد، و دیده می‌شود که سطح داخلی این منحنی که بیان‌کننده‌ی

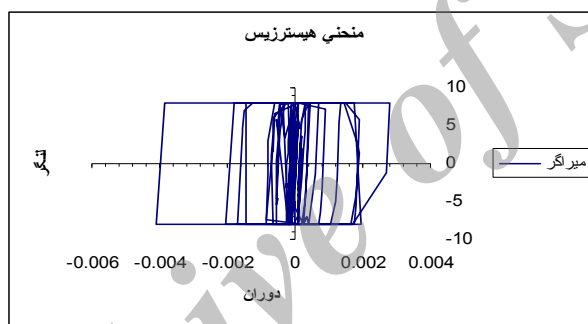
میزان اتلاف انرژی می‌باشد، بسیار قابل توجه است. منحنی هیسترسیس فوق از لحاظ شکل ظاهری و میزان اتلاف انرژی تطابق بسیار خوبی با منحنی‌های به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مؤلا و بیلینو [7] دارد.

یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها حداکثر میزان برش ناشی از زلزله در طبقات مختلف ساختمان است. در شکل (۹) نیروی برشی طبقات در سازه‌ی مدل C در جهت X و در دو حالت با میراگر (FMBD) و بدون میراگر (FMB) مقایسه شده است، به‌کمک میراگر اصطکاکی برش پایه از ۴۵۵ تن در سازه بدون میراگر به مقدار ۲۵۶ تن در سازه با میراگر کاهش یافته است. در شکل (۱۰) برای سازه‌ی مدل C تغییرات نیروی محوری یک بادبند نسبت به زمان (تاریخچه زمانی نیروی بادبند) برای دو حالت با میراگر و بدون میراگر رسم شده است. در سازه بدون میراگر (FMB) نیروی محوری بادبند در زمان ۵ ثانیه برابر با ۹۸ Ton می‌باشد در صورتی که در همین زمان در سازه با میراگر (FMBD) نیروی محوری برابر با ۵۹ Ton می‌باشد. اما در زمان ۲۵ ثانیه نیروی محوری بادبندها در هر دو سازه بدون میراگر و با میراگر برابر با ۲۲ تن می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی این است که استفاده از میراگر اصطکاکی باعث کم شدن نیروی بادبندها در زمان اوج می‌باشد و منحنی نیروی محوری بادبندها را هموارتر می‌سازد. در تمامی مدل‌ها نیروی محوری بادبندها هنگام استفاده از میراگر اصطکاکی کاهش یافته است، در مجموع عملکرد میراگر اصطکاکی در پایین آوردن نیروی محوری بادبندها کاملاً مطلوب ارزیابی می‌گردد. در تحلیل‌های فوق مشاهده گردید که با اضافه کردن میراگر اصطکاکی، علاوه بر کاهش برش پایه‌ی ساختمان، مقدار نیروی حداکثر در بادبندها نیز توسط لغزش میراگر کنترل می‌گردد و کاهش می‌یابد؛ و عملاً اعضای اصلی سازه (تیرها و ستون‌ها) دارای تغییر شکل‌های غیرخطی اندکی می‌باشند که باعث حذف یا کاهش خسارت در ساختمان می‌گردد.



جدول ۷ نیروها و تغییر مکان‌های مربوط به سازه‌ی مدل A

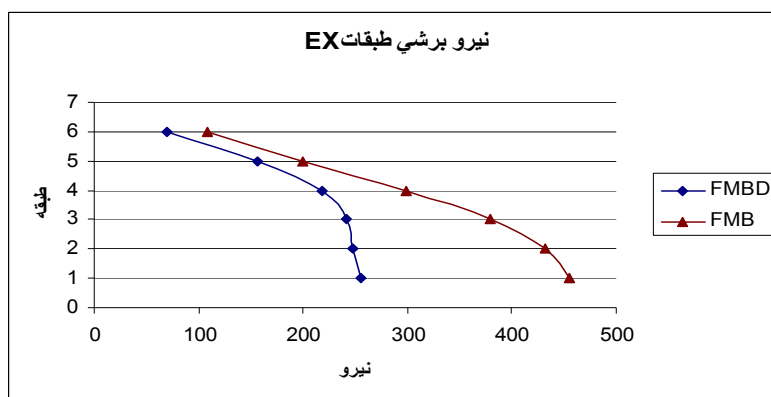
ردیف	نیروها و تغییر مکان‌های سازه	سازه با میراگر	سازه بدون میراگر	میزان کاهش در اثر میراگر (درصد)
۱	مجموع نیروی محوری بادبندها (Ton)	۶۲/۸۱	۹۴/۵	۳۴
۲	مجموع نیروی محوری ستون‌ها (Ton)	۹۶/۱۵	۱۴۹/۱۴	۳۶
۳	مجموع لنگر خمشی ستون‌ها (T.m)	۱۳/۶	۱۵/۹	۱۴
۴	تغییر مکان نسبی بام (mm)	۳/۸	۴/۹	۲۲
۵	تغییر مکان بام (mm)	۱۶/۷	۱۹/۵	۱۴
۶	برش پایه (Ton)	۴۳/۵۹	۶۵/۶	۳۳
۷	شتاب بام (m/S <sup>2</sup> )	۴	۴/۷۷	۱۶



شکل ۸ نمودار نیرو- تغییر مکان میراگر اصطکاکی

جدول ۸ نیروها و تغییر مکان‌های مربوط به سازه‌ی مدل B با میراگر و بدون میراگر

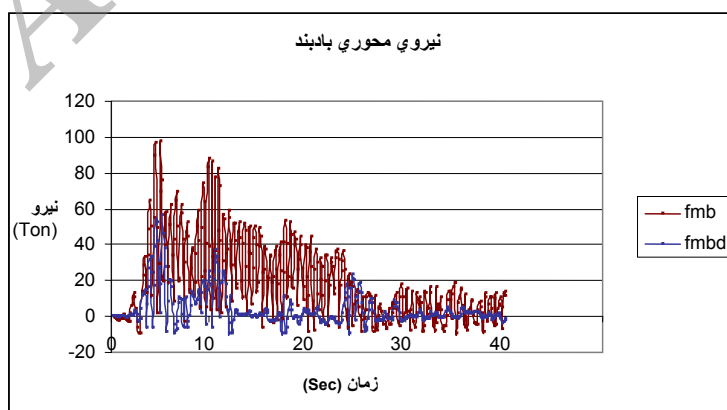
ردیف	نیروها و تغییر مکان‌های سازه	سازه با میراگر	سازه بدون میراگر	میزان کاهش در اثر میراگر (درصد)
۱	مجموع نیروی محوری بادبندها (Ton)	۱۸/۵۸	۶۵/۰۹	۷۲
۲	مجموع نیروی محوری ستونها (Ton)	۸/۳۴	۴۲/۳۲	۸۰
۳	مجموع لنگر خمشی ستونها (T.m)	۰/۹۴۵	۳/۹۵	۷۶
۴	تغییر مکان نسبی بام (mm)	۰/۸۳	۲/۷۴	۷۱
۵	تغییر مکان بام (mm)	۲/۱	۷/۱۴	۷۰
۶	برش پایه (Ton)	۱۵/۸	۴۵/۵۶	۶۵
۷	شتاب بام (m/S <sup>2</sup> )	۱/۱۲	۴/۵۸	۷۵



شکل ۹ برش طبقات در سازه‌ی مدل C

جدول ۹ نیروها و تغییر مکان‌های مربوط به سازه‌ی مدل C با میراگر و بدون میراگر

ردیف	نیروها و تغییر مکان های سازه	جهت X			جهت Y		
		با میراگر	بدون میراگر	درصد کاهش	با میراگر	بدون میراگر	درصد کاهش
۱	مجموع نیروی محوری بادبندها (Ton)	۲۲۰	۴۱۰	۴۷	۲۶۸	۶۸۸	۶۱
۲	مجموع نیروی محوری ستونها (Ton)	۸۶۸	۱۶۳۸	۶۸	۷۰۵	۱۴۸۴	۵۲
۳	مجموع لنگر خمشی ستونها (Ton.m)	۴۶۰	۷۹۱	۴۲	۹۸	۱۴۰	۳۰
۴	تغییر مکان نسبی بام (mm)	۶/۵	۸/۱۵	۲۰	۴/۷	۷/۸	۴۰
۵	تغییر مکان بام (mm)	۳۰	۴۶/۵	۳۵	۱۴	۲۵	۴۴
۶	برش پایه (Ton)	۲۵۶	۴۵۵	۴۴	۲۱۵	۲۹۹	۲۸
۷	شتاب بام (m/S <sup>2</sup> )	۴/۵	۶	۲۵	۵/۴۶	۷/۰۹	۲۳



شکل ۱۰ نیروی محوری بادبند در سازه‌ی مدل C

### بحث و نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و مقایسه‌ی دو سازه همراه با میراگر و بدون میراگر می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میراگرهای اصطکاکی چرخشی باعث کاهش نیروی داخلی اعضا و تغییر مکان جانبی سازه می‌گردد و هم‌چنین کاهش عمده‌ی وزن سازه و بهبود عملکرد لرزه‌ای آن را به دنبال دارد. از طرفی با توجه به این‌که استفاده از این میراگرها به راحتی امکان پذیر می‌باشد، بنابراین به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و یا افزایش سطح عملکرد آنها و هم‌چنین برای طرح سازه‌های جدید استفاده از این نوع میراگر بسیار مفید و کارا می‌باشد.

در این تحقیق روشی ساده و کارآمد برای مدل‌سازی میراگرهای اصطکاکی چرخشی توسط نرم‌افزارهای معمول تحلیل سازه پیشنهاد گردید. تحلیل‌ها و ارزیابی‌های انجام شده نشان دادند که روش پیشنهادی به خوبی رفتار غیرخطی میراگر را مدل می‌کند و دارای دقت کافی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان دادند که استفاده از میراگرهای اصطکاکی چرخشی در قاب‌های بادبندی ساخته شده از مقاطع معمول بادبندی (مثلاً ناودانی دویل) و بدون پیش‌تنیده کردن بادبندها، می‌تواند رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها را به مقدار زیادی بهبود بخشد.

### مراجع

1. Pall, A.S. and Marsh, C., "Response of friction damped braced frames", *J. Struc. Div., ASCE*, 108, pp. 1313–23, (1982).
2. Aiken, I. and Kelly, S., "Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy absorbing systems for multi-storey structures", Report No. UCB/EERC-90/03, EERC, Berkeley, (1990).
3. Aiken, J.D., Kelly, J.M. and Pall, A.S., "Seismic Response of a nine-story steel frame with friction damped cross-bracing", Report No. UCB/EERC-88/17, November, (1988).
4. Grigorian, C.E. and Popov, E.P., "Slotted bolted connection energy dissipaters", *J. of Earthquake Spectra, EERI*, 9(3), pp. 491–504, (1993).
5. Mualla, I.H. and Belev, B., "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", *J. of Eng. Struct.*, 24, pp. 365–371, (2002).
6. Park, J.H., Min, K.W., Chung, L., Lee, S.K., Kim, S.H. and Moon, B.W., "Equivalent linearization of a friction damper-brace system based on the probability distribution of the extremal displacement", *J. of Eng. Struct.*, 29, pp. 1226–1237, (2007).
7. Nielsen, L. and Mualla, I.H., "A friction damping system low order behavior and design", Rapport BYG.DTUR-030, Danmarks Tekniske University, (2002).

8. Mualla, I.H., "Experimental & computational evaluation of a new friction damper device", Ph.D. Thesis, Dept. of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, (2000).

Archive of SID