

ارزیابی پارامترهای مقاومتی قاب فولادی با سیستم مهاربندی Y شکل مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی

محمدرضا سلیمانی نژاد^{۱*}، موسی محمودی صاحبی^۲

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

*soleimani.m@abhariau.ac.ir، ۱۶۷۸۵-۱۳۶، صندوق پستی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷)

چکیده

مهاربندهای Y شکل فولادی یکی از سیستم‌های باربر جانبی به حساب می‌آیند. این مهاربندها علی‌رغم دارا بودن عملکرد معماری مناسب، مقاومت و سختی قابل قبول، دارای ظرفیت شکل‌پذیری خوبی نیستند. استفاده از میراگرها از جمله میراگر اصطکاکی دورانی می‌تواند ظرفیت شکل‌پذیری آن‌ها را افزایش دهد. هدف این مقاله ارزیابی لرزه‌ای مهاربندهای Y شکل مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی است. برای این منظور یک قاب یک طبقه و یک دهانه با مهاربند Y شکل انتخاب شد و در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی دورانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی این دو قاب ظرفیت‌های سختی، مقاومت و جذب انرژی مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مقاومت و سختی در حالت با میراگر به ترتیب حدود ۲۰ و ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند ولی جذب انرژی حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

میراگر اصطکاکی دورانی، قاب Y شکل، استهلاک انرژی، سختی، مقاومت و شکل‌پذیری

Evaluation of resistive parameters of steel frame with Off-centre Bracing (y-shape) Equipped with Rotating Friction Damper

M. Solaimani Nezhad, M. Mahmoudi

Abstract

y-shaped steel braces one of the systems is the lateral load. These braces, despite having the performance good architecture and resistance and hardness acceptable, they are not ductility. The use of dampers, such a rotary friction damper can increase their ductility capacity. The purpose of this paper is to evaluate the seismicity of y-shaped braces with rotary frictional damper. For this purpose, a frame of a floor and a span with y-shaped brace was selected and evaluated in two cases with and without rotary frictional damper. In evaluating these two frame, the stiffness, strength and energy absorption were considered. The results show that the strength and stiffness in the case with the damper decreases by 20% and 35%, but the energy absorption increases by 50%.

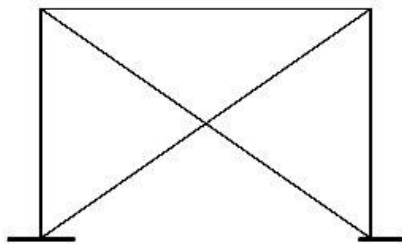
Keywords

Rotary friction damper, y-shape frame, Depreciation of energy, Stiffness, Strength and ductility

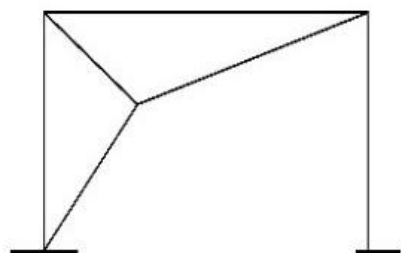
محافظت از سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز در برابر آسیب دیدگی و کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها در مقابل زلزله یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه مهندسی عمران در دهه‌های گذشته بوده است. سیستم‌های مقاوم لرزه‌ای مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که هرکدام دارای معایب و مزایایی هستند. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای مقابله با نیروهای جانبی در سازه‌های فولادی استفاده از مهاربند است. مهاربندها به شکل‌های گوناگونی اجرا می‌شوند. پیکربندی سیستم‌های مهاربندی عموماً از نوع هم‌مركز (هم‌محور) (شکل ۱)) و یا خارج از مركز (برون‌محور) است (شکل ۲)). مهاربندهای هم‌مركز دارای سختی بیشتری نسبت به قاب خمشی هستند لذا تغییر مکان جانبی سازه را بهتر محدود می‌نمایند. سیستم مهاربندی برون‌محور سختی کمتری نسبت به هم‌محور دارند ولی جذب انرژی آنها بالاتر است. در سیستم مهاربندی هم‌محور (x شکل) به دلیل اینکه نیروهای جانبی توسط اعضاء به صورت محوری منتقل می‌شوند، سیستمی اقتصادی هستند ولی علی‌رغم سختی بالا دارای اشکالاتی هستند که مهمترین آنها مشکلات عملکرد معماری و ایجاد محدودیت برای اجرای درب‌ها و پنجره‌ها و از لحاظ سازه‌ای کمانش اعضای مهاربندی است. کمانش مهاربندها منجر به شکل‌پذیری کم و ظرفیت کم اتلاف انرژی می‌شود. لذا برای رفع این معایب ایده‌هایی مانند کاربرد مهاربندهای γ شکل ارائه شده است که البته مشکل کمانش عضو و کاهش شکل‌پذیری همچنان باقی است که با استفاده از تجهیزات جدیدی می‌توان آنها را جبران کرد. این تجهیزات با عنوان تجهیزات کنترل سازه‌ها معروف هستند.

انواع سیستم‌های کنترلی سازه‌ها به دو دسته مستهلک کننده‌های انرژی و جداسازهای لرزه‌ای تقسیم می‌شوند. این تجهیزات به صورت یک فیوز شکل‌پذیر عمل می‌نمایند. در این سیستم تجهیزات نصب شده از وارد شدن نیروی بیش از حد به مهاربندها و کمانش اعضای آنها جلوگیری می‌کنند. این تجهیزات با تغییر شکل‌های پلاستیک در مود خمشی یا برشی، مقدار زیادی از انرژی وارد شده را مستهلک می‌نمایند. مستهلک کننده‌های انرژی را می‌توان به سه دسته فعال، نیمه فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد که عمده استهلاك کننده‌های غیرفعال میراگرها هستند همانند میراگر تسلیمی، ویسکوز و اصطکاکی، که بعضی از آنها مانند میراگر تسلیمی بعلت تعمیر یا تعویض آن بعد از یک زلزله شدید مشکل و پرهزینه می‌باشد و بعضی دیگر مانند میراگر اصطکاکی مشکلات کمتری دارند. میراگرهای

اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب کف‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند و آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات داخل آن را به حداقل می‌رسانند. این میراگرها مکانیسم ساده‌ای دارند به‌طوری‌که ساخت، نصب و نگهداری آنها آسان می‌باشد و فضای کمتری را در سازه اشغال می‌کنند. همه این مزایا باعث می‌شود هزینه اولیه ساخت سازه جدید یا بهسازی یک سازه موجود کاهش یابد [۱].



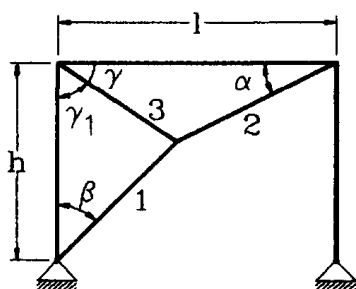
شکل ۱- مهاربند هم‌محور (مانند x شکل)



شکل ۲- مهاربند برون‌محور (مانند γ شکل)

در سال ۲۰۰۰ Mualla نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی را با عملکرد دورانی ارائه کرد [۲]. رفتار هیسترتیک و پایداری میراگر وابسته به نوع صفحات اصطکاکی به‌کاررفته است. آزمایش‌هایی برای یافتن پارامترهای مؤثر مانند تعداد دفعات بارگذاری، دامنه جابه‌جایی، نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها و پیش‌تندگی مهاربندها بر روی مدل قاب مجهز به میراگر اصطکاکی انجام شده است. Mualla و Bellev با تحلیل‌های عددی نشان دادند که در یک لنگر لغزشی 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 جابه‌جایی قاب می‌شود. به‌علاوه این‌که نیروی پیش‌تندگی در مهاربندها تأثیر چندانی در پاسخ قاب ندارد [۳].

در سال ۲۰۱۱ Kim و همکارانش، یک بررسی تحلیلی از اثربخشی میراگرهای اصطکاکی دورانی برای افزایش ظرفیت



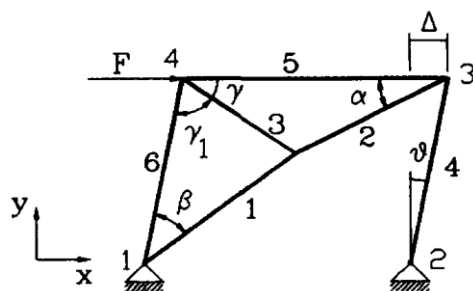
شکل ۳- مهاربند برون محور [۸]

$$\gamma_1 = 2 \tan^{-1} + \frac{K_2}{S_2 - l_1} \quad (5)$$

و زاویه چرخش θ بعد از اعمال نیرو برابر:

$$\theta = \gamma_1 + \gamma - \pi/2 \quad (6)$$

می باشد که در شکل (۴) (قاب بعد از اعمال نیرو) مشاهده می شود.



شکل ۴- مهاربند بعد از اعمال نیرو [۸]

و همچنین:

$$S_1 = \frac{l_2 + l_3 + l}{2} \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{l_1 + l_3 + h}{2} \quad (8)$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{(S_1 - l_3)(S_1 - l_2)(S_1 - l)}{S_1}} \quad (9)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{(S_2 - l_3)(S_2 - l_1)(S_2 - h)}{S_2}} \quad (10)$$

با تعیین زوایای فوق مقدار نیروی اعضای قاب با هندسه تغییر شکل یافته با روابط زیر میسر خواهد بود:

$$-(F_4 \cos \theta)l = Fh \cos \theta \rightarrow F_4 = \frac{-Fh}{l} \quad (11)$$

و در گره ۳:

$$\sum F_y = 0 \therefore F_2 = \frac{-F_4 \cos \theta}{\sin \alpha} \quad (12)$$

مقاومت در برابر زلزله و مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده‌ی سازه‌های موجود بتن‌آرمه ارائه دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که به‌طور کلی سازه‌های مقاوم‌سازی شده با میراگرهای اصطکاکی دورانی، اهداف عملکردی تعیین‌شده در برابر بار لرزه‌ای را برآورده می‌کنند. همچنین میراگرهای اصطکاکی دورانی می‌توانند در افزایش ظرفیت مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده‌ی سازه‌ها مؤثر باشند [۴].

در سال ۲۰۱۳ Monir و همکارانش پیکربندی جدیدی برای میراگرهای اصطکاکی دورانی در مهاربندهای قطری که شامل پیچ‌های اصطکاکی بود، ارائه دادند [۵].

Gholizad و همکارانش در سال ۲۰۱۳، عملکرد قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده دارای المان زانویی را که با میراگرهای اصطکاکی دورانی تجهیز شده‌اند بررسی کردند. آنها نشان دادند که با به‌کارگیری میراگر اصطکاکی دورانی قابل تنظیم به‌عنوان عضو زانویی می‌توان از کماتش عضو قطری جلوگیری کرد و شکل‌پذیری و جذب انرژی را افزایش داد [۶].

Mirzabagheri و همکارانش در سال ۲۰۱۴، از طریق بررسی آزمایشگاهی، عملکرد میراگرهای اصطکاکی دورانی با یک، دو و سه واحد صفحات اصطکاکی را بررسی کردند. و مشاهده شد که با افزایش تعداد واحدها، انرژی بیشتری به‌وسیله‌ی میراگرها در قاب فولادی مجهز به این میراگرها تلف می‌شود [۷].

همین‌طور در زمینه قاب‌های مهاربندی y شکل نیز تحقیقات زیادی انجام شده که ازجمله آنها در سال ۱۹۹۵ Moghaddam و Estekanchi ویژگی‌های هندسی یک قاب با مهار بندی y شکل با رفتار غیرخطی و حالت بهینه محل اتصال سه عضو مهاربند را بررسی کردند و نحوه توزیع نیرو بین اعضا، بعد از اعمال بار را به شرح زیر ارائه نمودند [۸].

در قاب نشان داده شده در شکل (۳) تغییر طول اعضا با رابطه زیر بدست می‌آید که در آن طول اولیه و l_i طول نهایی عضو، A_i مساحت مقطع و F_i نیروی هر عضو می‌باشد.

$$l_i = l_{i0} + \frac{F_i l_{i0}}{EA_i} \quad (1)$$

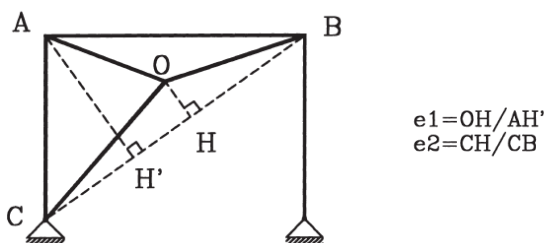
و زوایای اعضای مهاربند با روابط زیر بدست می‌آیند [۸]:

$$\beta = 2 \tan^{-1} + \frac{K_2}{S_2 - l_3} \quad (2)$$

$$\gamma = 2 \tan^{-1} + \frac{K_1}{S_1 - l_2} \quad (3)$$

$$\alpha = 2 \tan^{-1} + \frac{K_1}{S_1 - l_3} \quad (4)$$

و استهلاک انرژی را دارا است و سختی عضو سوم مهاربندی باید نسبت به دو مهاربند دیگر به صورت قابل توجهی کوچکتر باشد تا رفتار غیرخطی حاصل شود. همچنین وقتی خروج از مرکزیت (شکل ۶) به اندازه کافی زیاد باشد به طور مثال $e_1 = 0.3$ آنگاه کاهش مشخصی در نیروهای لرزه‌ای اتفاق می‌افتد که با افزایش زیادی در تغییر مکان همراه است [۱۰].



شکل ۶- خروج از مرکز محل اتصال مهاربندها

در سال ۲۰۱۲، Majid Zamani و همکارانش رفتار چهار نمونه قاب مهاربندی شده γ شکل در مقیاس واقعی را بررسی کردند. مهاربندهای γ شکل، سیستم مقاوم جانبی مرسوم هستند که مهندسان در طراحی و استفاده از آنها در پی رفع مشکلات معماری سیستم‌های مهاربندی نظیر x شکل هستند. در حقیقت این سیستم برای این به وجود آمده تا بتواند تعامل بیشتری بین نیازهای معماری و الزامات سازه‌ای ایجاد کند. این نمونه‌ها در هندسه قاب و محل قرارگیری نقطه اتصال سه عضو مهاربند و مقطع المان‌های مهاربندی باهم تفاوت داشتند. بارگذاری استاتیکی تا زمان تسلیم و شکست نمونه‌ها اعمال شد. نتایج نشان دارد که با طراحی مناسب اتصالات و مقطع مهاربندها می‌توان کمانش خارج از صفحه تک انحنایی را با کمانش داخل صفحه دو انحنایی جابه‌جا کرد. استهلاک انرژی هیستریتیک و میرایی نمونه‌ها به خاطر انحنای غیرارتجاعی اعضای مهاربندی نیز افزایش یافته است [۱۱].

در مهاربندهای γ شکل طول بعضی از اعضای مهاربندی بلند می‌باشد و به علت نیروی محوری قابل توجه در این اعضا، خطر کمانش مزایای این سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۲]، بنابراین می‌توان با استفاده از میراگرهای اصطکاکی دورانی، محدودیت‌های این سیستم مهاربندی را رفع کرد و کارایی سیستم را افزایش داد. در این مقاله رفتار مهاربندهای γ شکل همراه با میراگرهای اصطکاکی دورانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بررسی رفتار قاب‌ها ظرفیت‌های مقاومت، سختی و جذب انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_5 = -F_2 \cos \alpha - F_4 \sin \theta \quad (13)$$

و در گره ۴ داریم:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_3 = \frac{-F_6 \sin(\gamma_1 + \gamma)}{\sin \gamma} \quad (14)$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow \quad (15)$$

$$F + F_5 + F_3 \cos \gamma + F_6 \cos(\gamma + \gamma_1) = 0$$

با جاگذاری در رابطه ۳:

$$F_6 = \frac{F_5 + F}{\frac{\sin(\gamma + \gamma_1) \cos \gamma}{\sin \gamma} - \cos(\gamma + \gamma_1)} \quad (16)$$

یا

$$F_6 = \frac{F_5 + F \sin \gamma}{\sin \gamma_1} \quad (17)$$

$$F_3 = \frac{-(F_5 + F) \sin(\gamma + \gamma_1)}{\sin \gamma} \quad (18)$$

و در گره ۱:

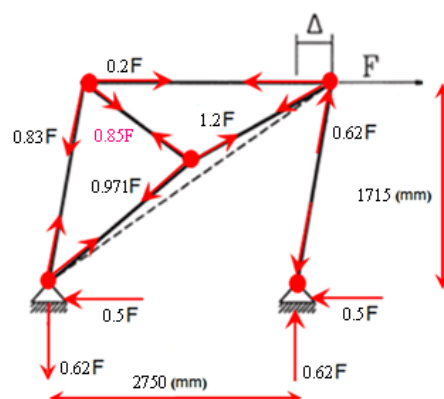
$$\sum F_x = 0 \rightarrow \quad (19)$$

$$-F + F_4 \sin \theta + F_1 \sin(\beta + \theta) + F_6 \sin \theta = 0$$

$$F_1 = \frac{-F_6 \sin \theta + F - F_4 \sin \theta}{\sin(\beta + \theta)} \quad (20)$$

بنابراین با حل این معادلات غیرخطی پارامترهای مجهول قابل دستیابی می‌باشند [۸].

که Bazzaz و همکارانش در سال ۲۰۱۲ آن را بررسی و نیروی اعضای قاب را به صورت شکل (۵) ارائه نمودند [۹].

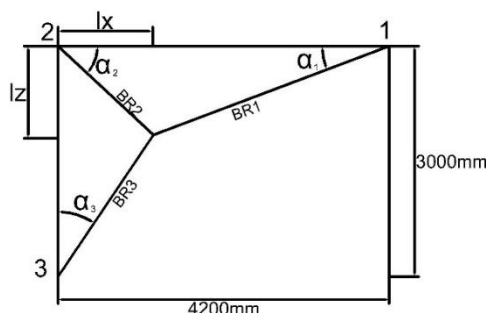


شکل ۵- نسبت مقادیر نیروی اعضا بعد از اعمال نیروی جانبی

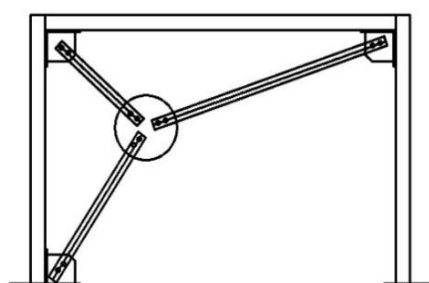
در سال ۱۹۹۹، Moghaddam و Estekanchi نشان دادند که درجه و میزان غیرخطی بودن عمدتاً به مقدار خروج از مرکزیت و سختی نسبی عضو سوم مهاربند وابسته است. این سیستم مهاربندی توانایی ایجاد مقدار مشخصی عملکرد جداساز لرزه‌ای

۲- روش تحقیق

برای جلوگیری از وقوع کمانش خارج از صفحه و افزایش شعاع ژیراسیون مقطع، صفحات فولادی در وجوه مهاربندهای BR1 و BR3 تعبیه شده‌اند که هندسه آنها در شکل (۸) و مشخصات مصالح مصرفی و مقاطع استفاده شده در جدول (۱) تا (۳) آمده است [۱۱].

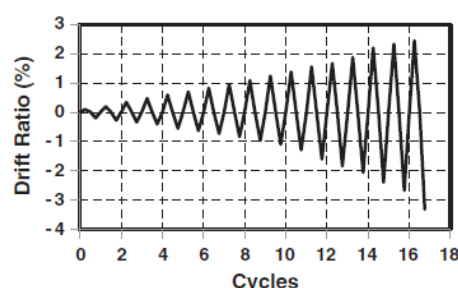


(الف) هندسه‌ی نمونه‌ی ۷ شکل



(ب) نمونه‌ی اجرایی ۷ شکل

سازه مورد بررسی یک قاب یک طبقه و یک دهانه دارای مهاربند ۷ شکل با هندسه مورد استفاده توسط Majid Zamani و همکارانش [۱۲] است که به یک میراگر اصطکاکی دورانی پیشنهادی Mualla [۳] مجهز شده است. جزییات این دو سیستم و سایر مشخصات در بخش بعدی بیان می‌شود. دلیل انتخاب هندسه و قاب مرجع [۱۲] مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و قاب بدون میراگر Majid Zamani و همکارانش می‌باشد. روش‌های تحلیل بکار رفته در این پژوهش بارگذاری سیکلی (شکل (۷)) و روش پوش‌اور می‌باشد که با نرم‌افزار opensees انجام گردید و سپس ظرفیت‌های مقاومت، سختی و جذب انرژی آنها مقایسه شد.



شکل ۷- بارگذاری سیکلی (چرخه‌ای)

۲-۱- مهاربند ۷ شکل

در انجام کارهای تحقیقاتی یکی از مسائل مهم، ایجاد ارتباط مناسب و منطقی بین مطالعات انجام‌شده در گذشته و هدف تحقیق جاری است. برای رسیدن به این هدف، از مدل قاب مهاربندی‌شده (۷ شکل) Majid Zamani و همکارانش [۱۲] به‌عنوان مدل معیار استفاده شد. این قاب به‌صورت آزمایشگاهی و در ابعاد واقعی ساخته‌شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای (شکل (۴))، مورد آزمایش قرارگرفت. در این نمونه، با توجه به محدودیت‌های طراحی قاب بدون مهاربندی و در نظر گرفتن اینکه نیروی محوری قابل‌توجهی در تیر به وجود می‌آید مقطع تیر از نوع بال‌پهن IPB200 و مقطع ستون‌ها هم به‌صورت IPE180 استفاده شده است. طراحی این قاب‌ها به‌گونه‌ای است که مود اصلی خرابی، ناشی از کمانش داخل صفحه‌ی مهاربندها باشد. بدین منظور انتخاب مقاطعی که مقاومت مناسبی در برابر کمانش خارج از صفحه داشته باشند، ضروری به نظر می‌رسد. مقاطع مهاربندها به‌صورت دو مقطع ناودانی ۱۰۰ که به‌صورت پشت‌به‌پشت به هم متصل شده‌اند، انتخاب شده است. همچنین

شکل ۸- مشخصات مهاربند مورد استفاده [۱۱]

جدول ۱- پارامترهای هندسی نمونه‌ی ۷ شکل

α_3 (deg)	α_2 (deg)	α_1 (deg)	l_z (mm)	l_x (mm)
۲۷/۵	۳۵/۵	۱۴/۸	۸۱۰	۱۱۴۰

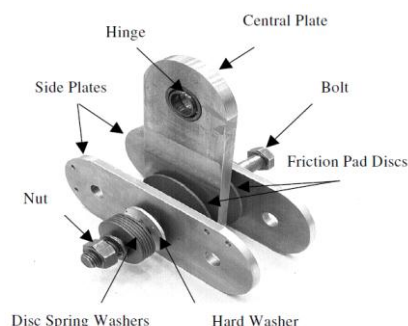
جدول ۲- مشخصات مصالح اعضای مهاربندها

اعضا	مقطع	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)
جان	۲UNP۱۰۰	۳۵۷	۴۲۰
بال	UNP۱۰۰	۲۷۱	۳۸۵
ورق اتصالات	---	۲۵۷	۴۰۴

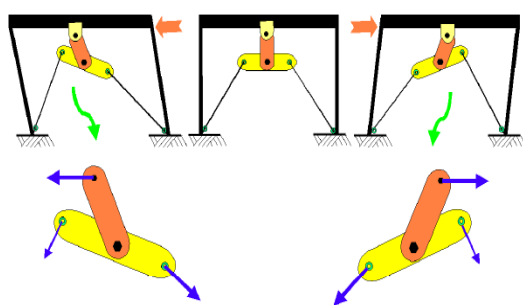
۲-۲- میراگر اصطکاکی دورانی

این میراگر بسیار ساده است و در انواع مختلف سیستم‌های مهاری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (شکل (۹)). اجزای اصلی

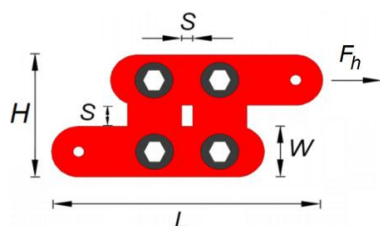
نوع دوم دارای ۲ صفحه اصطکاکی هستند که توسط یک پین به هم متصل شده‌اند و بر روی یکدیگر می‌لغزند (شکل (۱۲)). مشخصات هندسی و مکانیکی میراگرهای نوع اول و دوم در جدول (۴) و (۵) آورده شده است که در آن F_h ظرفیت میراگر، t ضخامت ورق، nu تعداد لایه ورق‌ها و Δ دامنه نوسان می‌باشند.



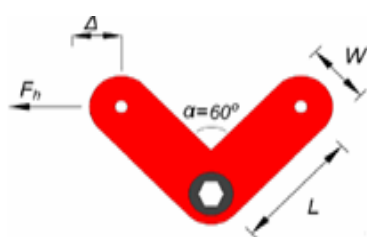
شکل ۹- اجزای میراگر اصطکاکی دورانی Mualla [۲]



شکل ۱۰- مکانیسم عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی Mualla [۲]



شکل ۱۱- میراگر اصطکاکی دورانی نوع اول



شکل ۱۲- میراگر اصطکاکی دورانی نوع دوم

جدول ۳- مشخصات اعضای قاب اصلی

اعضا	مقطع	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)
ستون	۲IPB۱۸۰	۷۸۱۰	۲۳۹۰
تیر	۲IPB۲۰۰	۷۸۱۰	۲۳۹۰
مهاربند BR1 و BR3	۲ UNP ۱۰۰ + ۲ PL ۵۰×۸	۳۱۱۰	۲۳۹۰
مهاربند BR	۲UNP۱۰۰	۳۱۱۰	۲۳۹۰

میراگر اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد که شامل یک صفحه عمودی و دو صفحه افقی است. لایه‌های اصطکاکی بین این صفحات قرار می‌گیرند. صفحه عمودی به تیر بالایی خود مفصل می‌شود. عملکرد میراگر و اتلاف انرژی آن، به واسطه دوران صفحات افقی در کنار صفحه قائم است که ناشی از حرکت تیر بالایی قاب است. صفحات افقی و قائم و لایه اصطکاکی با یک پیچ به هم متصل می‌شوند این اتصال مفصلی به منظور افزایش مقدار چرخش نسبی صفحات مرکزی و جانبی است و به منظور افزایش شکل‌پذیری سازه و افزایش اتلاف انرژی می‌باشد. برای ثابت نگه‌داشتن 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. زمانی که یک نیروی خارجی، قاب سازه را تحریک می‌کند، تیر اصلی شروع به تغییر مکان افقی ناشی از این نیرو می‌نماید. نیرو در سیستم مهاربندی و نیروی اصطکاکی بین سطوح اصطکاکی صفحات فولادی افزایش یافته و لایه اصطکاکی در مقابل حرکت از خود مقاومت نشان می‌دهد. این روند حرکتی با تغییر جهت ادامه خواهد داشت و انرژی ورودی را مستهلک می‌کند. شکل (۱۰) مکانیسم کار این میراگر اصطکاکی را در جهات مختلف نشان می‌دهد [۲].

۳- المان‌بندی

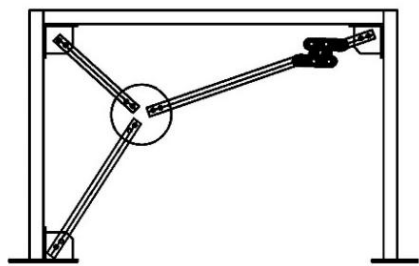
با هدف ترکیب مهاربند γ شکل و میراگر اصطکاکی، برای تجهیز قاب از دو نوع میراگر اصطکاکی دورانی استفاده شد. میراگر اصطکاکی دورانی نوع اول، دارای ۴ صفحه اصطکاکی می‌باشد هنگامی که نیروی میراگر به حد ظرفیت خود می‌رسد، لینک‌ها نسبت به هم حرکت کرده و باعث ایجاد اصطکاک در صفحات مستهلک کننده انرژی می‌شوند (شکل (۱۱)). میراگر

جدول ۴- مشخصات میراگرهای نوع اول

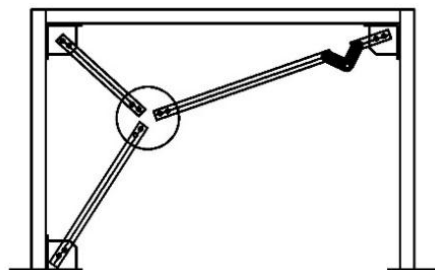
Δ (mm)	nu	S (mm)	t (mm)	W (mm)	L (mm)	H (mm)	F_h (kN)
۱۰۰	۱	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۵۰۰
۱۰۰	۲	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۱۰۰۰
۱۰۰	۳	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۱۵۰۰
۱۰۰	۴	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۲۰۰۰
۱۰۰	۵	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۲۵۰۰
۱۰۰	۶	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۳۰۰۰

جدول ۵- مشخصات میراگرهای نوع اول

Δ (mm)	nu	t (mm)	W (mm)	L (mm)	F_h (kN)
۵۰	۱	۱۰	۱۵۰	۲۵۰	۱۵
۵۰	۱	۱۰	۱۵۰	۲۵۰	۳۰
۵۰	۲	۱۰	۱۵۰	۲۵۰	۵۰
۵۰	۲	۱۲	۱۵۰	۲۵۰	۷۵
۵۰	۳	۱۲	۱۵۰	۲۵۰	۱۰۰
۵۰	۴	۱۲	۱۵۰	۲۵۰	۱۲۵
۵۰	۴	۱۵	۱۵۰	۲۵۰	۱۵۰
۵۰	۴	۱۵	۲۰۰	۲۵۰	۱۷۵
۵۰	۵	۱۵	۲۰۰	۲۵۰	۲۰۰
۵۰	۵	۱۵	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰



(الف) قاب ۷ شکل با میراگر اصطکاکی دورانی نوع اول



(ب) قاب ۷ شکل با میراگر اصطکاکی دورانی نوع دوم

شکل ۱۳- قاب ۷ شکل همراه با میراگر اصطکاکی

۴- صحت سنجی

به‌طور خاص در شاخه مهندسی زلزله، یکی از مرسوم‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی و تحلیل، نرم‌افزار OpenSees است که توانمندی‌های بسیاری در خصوص شبیه‌سازی انواع مسائل سازه‌ای و ژئوتکنیکی و انجام تحلیل‌های متنوع استاتیکی و دینامیکی را دارد. در این مطالعه نیز برای مدل‌سازی قاب‌ها از این نرم‌افزار استفاده شده است. برای اطمینان از مدل‌سازی‌هایی که انجام گردید نیاز به صحت سنجی آن با استفاده از مقالات معتبر می‌باشد که برای این منظور در این مطالعه از مدل استفاده شده در مقاله‌ی Mualla و Bellev بهره گرفته شده است. مدل مربوطه یک قاب فولادی (شکل ۶) با دهانه ۷/۶ متر و ارتفاع ۴/۶ متر است. تیر قاب صلب فرض شده و پایه ستون گیردار در نظر گرفته شده است. ممان اینرسی ستون‌ها $34 \times 10^6 \text{ mm}^4$ است. برای وزن فرضی ۴۵۰ کیلو نیوتن، پریود ارتعاش یک ثانیه و نسبت میرایی ۵ درصد مقدار بحرانی است. این قاب با میراگری با مشخصات زیر:

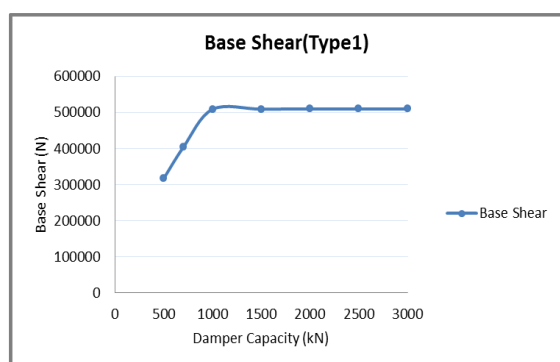
$$h_a = 0.7 \text{ m} ; \quad M_f = 7.0 \text{ kNm}$$

$$r = 0.165 \text{ m} ; \quad A_b = 201 \text{ mm}^2$$

مجهز شد و قاب مربوطه تحت مولفه شمالی- جنوبی

برای جای‌گذاری میراگر، آرایش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت محل قرارگیری بهینه میراگر در قسمت انتهایی مهاربند بلندتر انتخاب گردید (شکل ۱۳). دلیل این انتخاب هم این بود که میراگرهای اصطکاکی حساس به تغییر مکان هستند و چون در انتهای مهاربند بلندتر بیشترین تغییر مکان وجود داشت، این میراگرها عملکرد بهتری از لحاظ کاهش نیروهای وارده به سازه از خود نشان دادند و پس از آن میراگرهای با ظرفیت مختلف بر روی قاب ۷ شکل قرارداد شد و اثر افزایش ظرفیت میراگر بر روی قاب‌ها بررسی گردید.

قاب نتایج یکسانی را حاصل ندادند و در بعضی حالات اثر بهینه (میراگر با ظرفیت‌های کم) و در بعضی دیگر تاثیر مناسبی نداشتند (میراگر با ظرفیت‌های بالا) که علت آن می‌تواند بالابودن نیروی آستانه لغزش آنها باشد و چون نیرو به حد مورد نظر نمی‌رسد لذا حرکت نکرده و اثر اتلاف انرژی در سیستم را ندارد. نمودار نیروی برشی پایه (مقاومت) نسبت به ظرفیت میراگرها در شکل (۱۶) ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای میراگرهای کمتر از ظرفیت ۱۰۰۰ kN، کاهش مقاومت زیاد و پس از آن تأثیری نداشته است.



شکل ۱۶- بررسی اثر افزایش ظرفیت میراگر نوع اول روی برش پایه

با توجه به این نمودار می‌توان رابطه رگرسیون برای کاهش مقاومت را به صورت رابطه (۲۱) و (۲۲) پیشنهاد نمود:

$$v = 382.9F_n + 129857; \quad F_n < 1000 \quad (21)$$

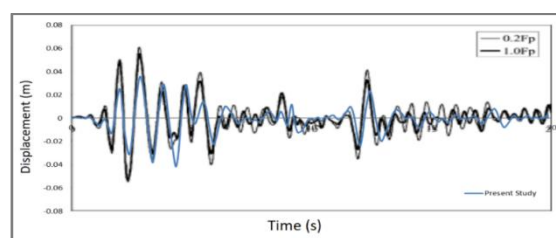
$$v = 510272; \quad F_n > 1000 \quad (22)$$

که در آن v نیروی برش پایه (مقاومت) و F_n ظرفیت میراگر می‌باشد.

لذا باتوجه به این موضوع و بررسی رفتار چرخه‌ای زیر پیشنهاد می‌شود از میراگرهای با ظرفیت کمتر از ۱۰۰۰ کیلو نیوتن به علت زود فعال شدن آنها، جذب انرژی مناسب و اثر بهینه در کاهش مقاومت استفاده گردد.

نمونه‌ای از این میراگرها با ظرفیت ۵۰۰ kN تحت بارافزون درحالت قاب با میراگر و قاب اصلی (بدون میراگر) مطابق شکل (۱۷) مقایسه شده است که میزان برش پایه در زمان تسلیم در حالت با میراگر ۲۴۰ kN و بدون میراگر ۳۰۰ kN می‌باشد که ۲۰ درصد کاهش و برای سختی نیز ۳۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد و همینطور درحالت با میراگر افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی قابل رویت می‌باشند. نتایج مربوط به مقایسه‌ی رفتار چرخه‌ای قاب‌های با میراگر و قاب اصلی

رکورد زلزله‌ال‌سنترو $3/417 \text{ m/s}^2$ قرار گرفت [۳]. از آنجایی که نیروی پیش کشیدگی در مهاربند مایل، در پاسخ سازه تاثیر دارد در مقاله Mualla برای دو نیروی $0.2F_p$ و $1.0F_p$ بررسی شده است که در این بررسی برای حالت $1.0F_p$ نتیجه صحت‌سنجی و انطباق جابه‌جایی بام در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در بعضی نقاط منحنی این شکل اختلاف جزئی ملاحظه می‌شود و آن به علت ارائه نتایج Mualla بر اساس یک کار آزمایشگاهی است و مدل مورد مقایسه مقاله حاضر یک کار عددی می‌باشد و از طرفی نیز مشخصات استفاده شده نمونه آزمایشگاهی Mualla در مقاله‌های منتشر شده به طور کامل و دقیق ارائه نشده است.



شکل ۱۴- پاسخ تغییر مکان مقاله Mualla و Bellev و مطالعه حاضر

۵- نتایج تحلیل

۵-۱- به کارگیری میراگر اصطکاکی دورانی نوع اول در قاب مهاربندی شده‌ی Y شکل

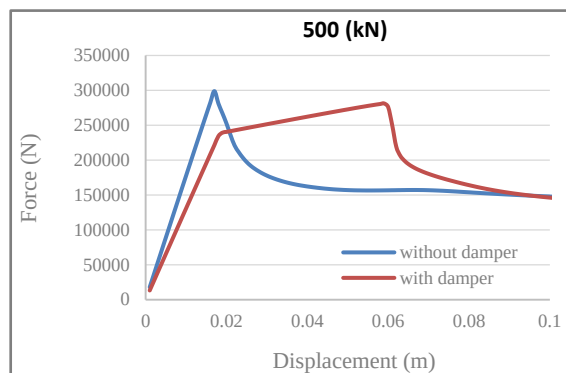
این میراگر دارای ۴ صفحه اصطکاکی می‌باشد که هنگام حرکت جانبی وقتی نیروی میراگر به حد ظرفیت خود می‌رسد، لینک‌ها نسبت به هم حرکت کرده و باعث ایجاد اصطکاک در صفحات مستهلک کننده انرژی می‌شوند. نمونه‌ای از نحوه اجرا در شکل (۱۵) ملاحظه می‌گردد.



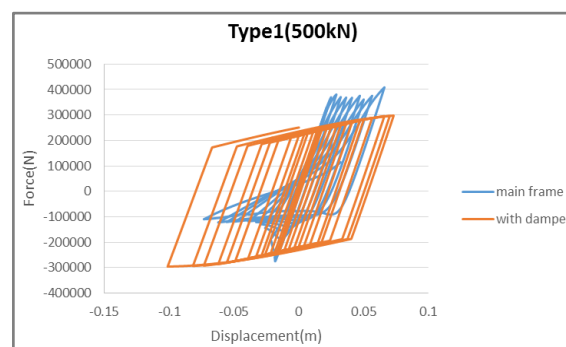
شکل ۱۵- نحوه قرارگیری میراگر نوع اول در قاب مهاربندی Y

از آنجایی که این میراگرها دارای ظرفیت‌های مختلف از ۵۰۰ kN تا ۳۰۰۰ kN می‌باشند (جدول (۴)) با قرار گرفتن در

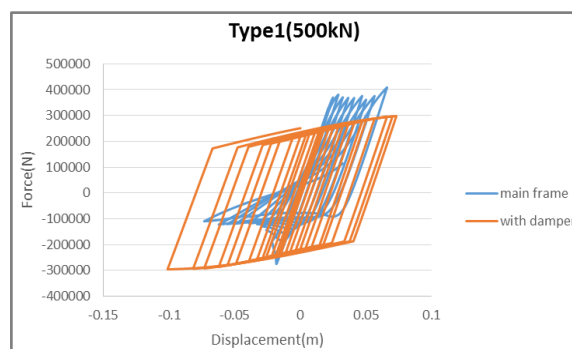
(بدون میراگر) در دو ظرفیت ۵۰۰ kN و ۷۰۰ kN در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) آورده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه منحنی بارافزون قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن



شکل ۱۸- مقایسه منحنی چرخه‌ای قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن



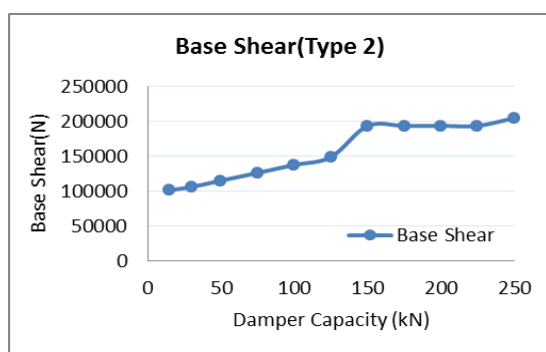
شکل ۱۹- مقایسه منحنی چرخه‌ای قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۷۰۰ کیلونیوتن

بدون میراگر در آنها دیده نمی‌شود. این حلقه‌های متقارن و منظم با داشتن سطح بزرگ‌تر نشان دهنده‌ی جذب انرژی بیشتر نمونه‌های دارای میراگر هستند. جذب انرژی در قاب با میراگر ۷۰۰ kN بیشتر از قاب دارای میراگر ۵۰۰ kN می‌باشد. همچنین با بررسی شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ملاحظه می‌شود که در قسمت فشاری چرخه‌ای بدلیل کاهش نیروی داخلی، مهاربند به کماتش نمی‌رسد و نمودار چرخه‌ای کامل و بدون شکست می‌باشد در صورتی که در حالت بدون میراگر مهاربند کماتش می‌کند و عملکرد مناسبی در حالت فشاری ندارد.

۲-۵- به کارگیری میراگر اصطکاکی دورانی نوع دوم در قاب مهاربندی شده‌ی ۷ شکل

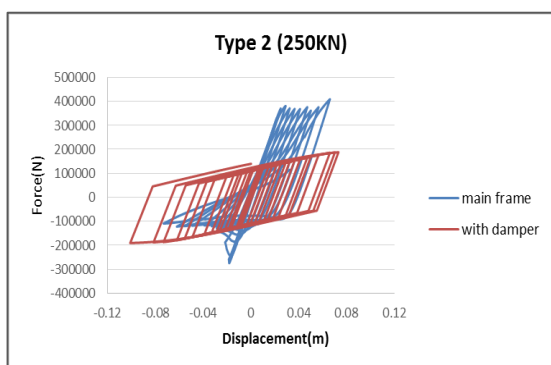
در این حالت نیز ظرفیت‌های متفاوت میراگر نوع دوم مطابق جدول (۵) بررسی گردید و مشاهده شد که عملکرد آنها نیز یکسان نیست به طوری که با افزایش ظرفیت میراگر از ۱۵۰ kN تا ۲۵۰ kN اگرچه بر روی میزان برش پایه اثر افزایشی داشته است ولی این اثر بعد از ظرفیت ۱۵۰ kN چندان قابل توجه نیست و افزایش ظرفیت میراگر تأثیر چندان بر روی برش پایه ندارد که در شکل (۲۰) به خوبی قابل مشاهده می‌باشد و رابطه رگرسیون (۲۳) برای آن پیشنهاد می‌گردد:

$$v = 486.8 F_n + 93872 \quad (23)$$

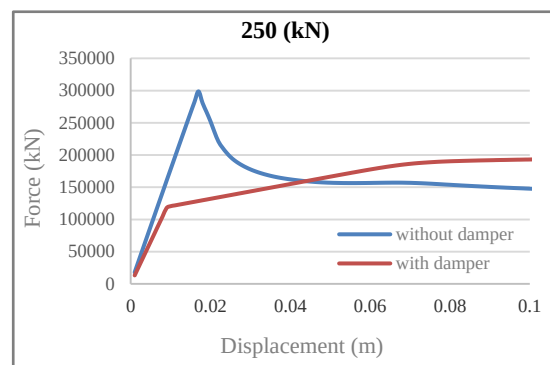


شکل ۲۰- بررسی اثر افزایش ظرفیت میراگر نوع دوم بر روی برش پایه

در این حالت نیز برای یک نمونه میراگر با ظرفیت ۲۵۰ kN، نیروی برشی پایه مطابق شکل (۲۱) ترسیم و مقایسه شده است. مقدار نیروی برشی قاب (مقاومت) در حالت با میراگر کمتر از برش پایه بدون میراگر می‌باشد و در حدود ۶۰ درصد کاهش و سختی نیز ۳۲ درصد کاهش یافته است.



شکل ۲۳- مقایسه‌ی منحنی چرخه‌ای قالب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن



شکل ۲۱- مقایسه‌ی منحنی بار افزون قالب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن

نکته مهم دیگری که در شکل‌های (۱۶) و (۲۰) ملاحظه می‌شود هرچه ظرفیت میراگر کاهش یابد مقدار برش پایه نیز کاهش می‌یابد به عبارت دیگر استفاده از میراگر با ظرفیت کمتر در کاهش اثر برش مناسب‌تر است ولی از آنجایی که مقدار جذب انرژی و شکل پذیری نیز از اهداف مهم تحقیق می‌باشد لذا حالت بهینه، انتخاب میراگرهای میانی است (مانند محدوده ۱۵۰ کیلو نیوتن برای نوع اول و محدوده ۵۰۰ کیلو نیوتن برای نوع دوم) تا به هر دو هدف ذکر شده نائل گردیم.

۶- نتیجه‌گیری

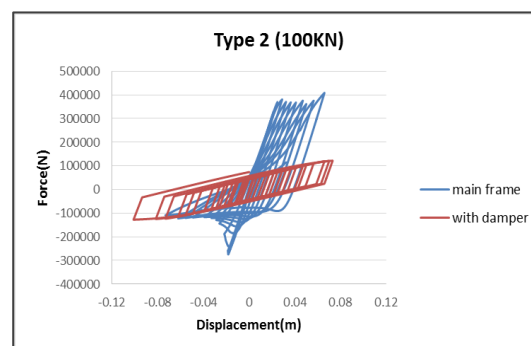
هدف این مقاله ارزیابی لرزه‌ای مهاربندهای Y شکل مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی است که با انتخاب یک قالب یک طبقه و یک دهانه با مهاربند Y شکل در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی دورانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی این دو قالب ظرفیت‌های سختی، مقاومت و جذب انرژی مورد توجه قرار گرفتند و با توجه به این بررسی نتایج زیر حاصل گردید:

۱- در این مطالعه دیده شد که اثر ظرفیت‌های مختلف میراگرها روی کاهش مقاومت و نیز استهلاک انرژی تأثیر یکسانی ندارند و برای ظرفیت‌های متوسط اثر بهینه دارد و برای ظرفیت‌های بالای میراگر، به علت عدم فعال شدن آنها بی اثر می‌باشند.

۲- برای میراگر تک مفصل اصطکاکی، با افزایش ظرفیت میراگر از ۱۵ kN تا ۲۵۰ kN اثر افزایشی بر روی میزان برش پایه داشته است ولی این اثر افزایش بعد از ظرفیت ۱۵۰ kN چندان قابل توجه نیست و همچنین ملاحظه گردید مقدار استهلاک انرژی در میراگر ۱۰۰ kN کمتر از حالت بدون میراگر و با افزایش ظرفیت میراگر بهبود یافته و در

نتایج مقایسه‌ی رفتار چرخه ای میراگر با ظرفیت‌های مختلف نشان داد که میراگر با ظرفیت ۲۵۰ kN کارایی بهتری از لحاظ مقاومت و افزایش اتلاف انرژی را دارد که این بررسی برای قالب با میراگر ۱۰۰ kN در (شکل (۲۲)) و ۲۵۰ kN در (شکل (۲۳)) مقایسه گردیده‌اند. افزودن این میراگرها موجب شده است که رفتار چرخه‌ای قالب به صورت چرخه‌های نسبتاً متقارنی باشد که افت ناگهانی مقاومت در آنها دیده نمی‌شود. همچنین ملاحظه می‌گردد که در میراگر با ظرفیت کم (۱۰۰ kN) جذب انرژی مطلوب نبوده (شکل (۲۲)) ولی با افزایش ظرفیت میراگر (۲۵۰) این وضعیت بهبود یافته است (شکل (۲۳)).

در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) برای میراگر نوع اول (با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن) و اشکال (۲۱) و (۲۳) میراگر نوع دوم (با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن) مغایرت نقاط تسلیم سازه در حالت با و بدون میراگر، به این دلیل است که به علت پایین بودن نیروی آستانه لغزش میراگر از نیروی تسلیم سازه، در سیستم با میراگر ابتدا میراگر تسلیم می‌گردد و همچنین ملاحظه می‌شود که با ظرفیت‌های متفاوت میراگر این نقطه نیز در حال تغییر است.



شکل ۲۲- مقایسه‌ی منحنی قالب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن

میراگر ۲۵۰ kN بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.

۳- برای میراگر چهار مفصل اصطکاکی با افزایش ظرفیت میراگر از ۵۰۰ kN تا ۱۰۰۰ kN اثر افزایشی بر روی میزان برش پایه داشته است ولی این اثر افزایش بعد از ظرفیت ۱۰۰۰ kN چندان قابل توجه نیست و همچنین ملاحظه گردید مقدار استهلاک انرژی در میراگر ۱۰۰۰ kN و به بالا بدلیل نرسیدن نیرو به آستانه لغزش اصطکاکی و فعال نشدن آنها تاثیر مناسبی ندارند.

۴- بررسی نتایج نشان می‌دهد افزودن میراگر به قاب موجب شده است که رفتار چرخه‌ای قاب به صورت چرخه‌های نسبتاً متقارنی باشند که افت ناگهانی مقاومت در آن‌ها دیده نمی‌شود. این حلقه‌های متقارن و منظم نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر می‌باشد که در میراگر با ظرفیت ۲۵۰ kN حدود ۱۰ درصد، در نمونه ۵۰۰ kN حدود ۵۰ درصد و ۷۰۰ kN حدود ۷۰ درصد بیشتر می‌باشد.

۵- مقدار نیروی برشی (مقاومت) در حالتی که میراگر به قاب اضافه شده است کمتر از برش پایه قاب بدون میراگر است بطوری که در میراگر ۵۰۰ kN معادل ۲۰ درصد و در میراگر ۲۵۰ kN حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.

۶- مقدار سختی در قاب با میراگر نسبت به حالت بدون میراگر کاهش نشان می‌دهد که برای میراگر با ظرفیت ۵۰۰ kN حدود ۳۵ درصد و ۲۵۰ kN حدود ۳۰ درصد تقلیل می‌یابد.

۷- نتیجه کلی نشان می‌دهد که استفاده از میراگر در قاب، باعث کاهش نیروهای وارده به المان‌های سازه‌ای (ستون-تیر-مهاربند) می‌شود به طوری که باعث می‌شود اعضای سازه تقریباً در ناحیه الاستیک باقی بمانند و میراگر تغییرات پلاستیک زیادی را تحمل نماید و خرابی به آن معطوف گردد به طوری که در بعضی نمونه‌ها مقدار مقاومت و سختی در حالت با میراگر به ترتیب ۲۰ و ۳۵ درصد کاهش و جذب انرژی حدود ۵۰ درصد افزایش یافت.

۸- با توجه به کاهش برش پایه به علت استفاده از میراگر اصطکاکی رابطه رگرسیون برای آن به صورت زیر حاصل شد:

الف- برای میراگر نوع اول:

$$v = 382.9F_n + 129857; \quad F_n < 1000 \text{ kN}$$

$$v = 510272; \quad F_n > 1000 \text{ kN}$$

ب- برای میراگر نوع دوم:

$$v = 486.8F_n + 93872; \quad 25 < F_n < 250 \text{ kN}$$

که در آن v نیروی برش پایه (مقاومت) و F_n ظرفیت میراگر می‌باشد.

همچنین دیده شد میراگرهای با ظرفیت کمتر از ۱۰۰۰ کیلو نیوتن در نوع اول و ظرفیت کمتر از ۱۵۰ کیلو نیوتن در نوع دوم در کاهش مقاومت مناسب‌تر می‌باشند.

۹- از آنجایی که استفاده از میراگر با ظرفیت کمتر در کاهش اثر برش مناسب‌تر است ولی مقدار جذب انرژی و شکل پذیری نیز از اهداف مهم تحقیق می‌باشد لذا حالت بهینه انتخاب میراگرهای میانی است (مانند محدوده ۵۰۰ کیلو نیوتن برای نوع اول و محدوده ۱۵۰ کیلو نیوتن برای نوع دوم) تا به هر دو هدف نائل گردد.

۱۰- در مجموع می‌توان گفت استفاده از میراگرهای اصطکاکی رفتار سازه قاب مهاربندی شده با γ شکل را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد لذا می‌تواند تا تحقیقات تحلیلی و آزمایشگاهی برای بررسی همه جانبه این نوع سیستم‌ها انجام شود. برای این منظور تحقیقات تکمیلی در خصوص کاربردی کردن استفاده از میراگرها در مهاربندهای γ شکل در حال انجام است. و قرار است سه نوع میراگر اصطکاکی، تسلیمی قطری و تسلیمی دایره‌ای در مهاربند γ شکل مورد ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گیرد.

۷- مراجع

[۱] میرزا باقری، س. و آقا کوچک، ع.ا. (۱۳۹۰)، "بررسی تفاوت عملکرد میراگرهای اصطکاکی دورانی در قاب‌های خمشی و قاب‌های ساده فولادی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.

[2] Mualla, I.H. (2000), "Parameters influencing the behavior of a new friction damper device", Smart Structures and Materials, Vol. 3988, pp. 64-74.

[3] Mualla, I.H. and Bellev, B. (2002), "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 365-371.

[4] Kim, J., Choi, H. and Min, K.W. (2011), "Use of rotational friction dampers to enhance seismic and progressive collapse resisting capacity of structures", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 20, 515-537.

[5] Monir, H.S. and Zeynali, K. (2013), "A modified friction damper for diagonal bracing of structures", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 87, pp. 17-30.

[6] Gholizad, A. and Kamrani Moghaddam, P. (2014), "Friction damper dynamic performance in seismically excited knee braced steel frames", International Journal of Civil Engineering, Vol. 12, pp. 32-40.

[7] Mirzabagheri, S., Sanati, M., Aghakouchaka, A.A. and Khademb, S.E. (2015), "Experimental and numerical

investigation of rotational friction dampers with multi units in steel frames subjected to lateral excitation", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 15, pp. 479-491.

- [8] Moghaddam, H.A. and Estekanchi, H. (1995), "On the characteristics of an off centre bracing system", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 35, pp. 361-376.
- [9] Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and Andalib, Z. (2012), "Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames", Steel and Composite Structures, Vol. 12, pp. 445-464.
- [10] Moghaddam, H.A. and Estekanchi, H.E. (1999), "Seismic behaviour of offcentre bracing systems", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 51, pp. 177-196.
- [11] Majid Zamani, S., Vafaei, A., Desai, C. and Rasouli, M. (2012), "Experimental investigation of behavior of steel frames with y-shaped concentric bracing", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 70, pp. 12-27.
- [12] Majid Zamani, S. and Rasouli, M. (2006), "Analytical investigation of behavior of y-shaped concentric bracing", Modarres Technical and Engineering Journal, Vol. 25, pp. 69-87.

[۱۳] میرزا باقری، س. و آقا کوچک، ع.ا. (۱۳۸۹)، "بررسی کارایی میراگرهای اصطکاکی دورانی در بهبود رفتار لرزه‌های سازه‌های فولادی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

