

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

محمد رضا 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

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

(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

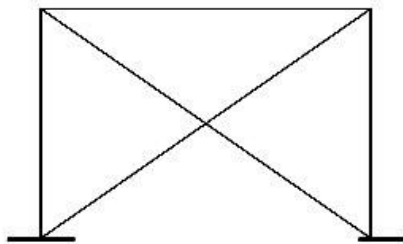
Abstract

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%.

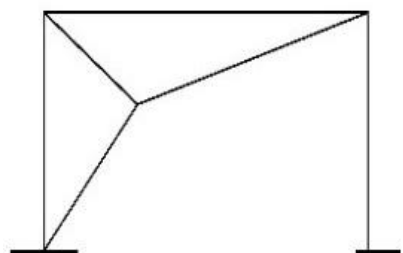
Keywords

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

اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب کفها را به طور قابل توجهی کاهش می دهند و آسیب پذیری سازه و تجهیزات داخل آن را به حداقل می رسانند. این میراگرها مکانیسم ساده ای دارند به طوری که ساخت، نصب و نگهداری آنها آسان می باشد و فضای کمتری را در سازه اشغال می کنند. همه این مزایا باعث می شود هزینه اولیه ساخت سازه جدید یا بهسازی یک سازه موجود کاهش یابد [۱].



شکل ۱- مهاربند هم محور (مانند x شکل)



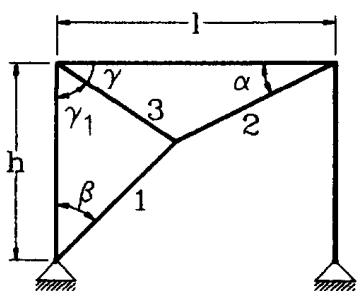
شکل ۲- مهاربند برون محور (مانند y شکل)

محافظة از سازه ها در مناطق لرزه خیز در برابر آسیب دیدگی و کاهش پاسخ دینامیکی سازه ها در مقابل زلزله یکی از مهم ترین موضوعات مورد توجه مهندسی عمران در دهه های گذشته بوده است. سیستم های مقاوم لرزه ای مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند. یکی از متداول ترین روش ها برای مقابله با نیروهای جانبی در سازه های فولادی استفاده از مهاربند است. مهاربندها به شکل های گوناگونی اجرا می شوند. پیکربندی سیستم های مهاربندی عموماً از نوع هم مرکز (هم محور) (شکل (۱)) و یا خارج از مرکز (برون محور) است (شکل (۲)). مهاربندهای هم مرکز دارای سختی بیشتری نسبت به قاب خمشی هستند لذا تغییر مکان جانبی سازه را بهتر محدود می نمایند. سیستم مهاربندی برون محور سختی کمتری نسبت به هم محور دارند ولی جذب انرژی آنها بالاتر است. در سیستم مهاربندی هم محور (x شکل) به دلیل اینکه نیروهای جانبی توسط اعضاء به صورت محوری منتقل می شوند، سیستمی اقتصادی هستند ولی علی رغم سختی بالا دارای اشکالاتی هستند که مهمترین آنها مشکلات عملکرد معماری و ایجاد محدودیت برای اجرای دربها و پنجره ها و از لحاظ سازه ای کماتش اعضای مهاربندی است. کماتش مهاربندها منجر به شکل پذیری کم و ظرفیت کم اتلاف انرژی می شود. لذا برای رفع این معایب ایده هایی مانند کاربرد مهاربندهای لا شکل ارائه شده است که البته مشکل کماتش عضو و کاهش شکل پذیری همچنان باقی است که با استفاده از تجهیزات جدیدی می توان آنها را جبران کرد. این تجهیزات با عنوان تجهیزات کنترل سازه ها معروف هستند.

انواع سیستم های کنترلی سازه ها به دو دسته مستهلک کننده های انرژی و جداسازهای لرزه ای تقسیم می شوند. این تجهیزات به صورت یک فیوز شکل پذیر عمل می نمایند. در این سیستم تجهیزات نصب شده از وارد شدن نیروی بیش از حد به مهاربندها و کماتش اعضای آنها جلوگیری می کنند. این تجهیزات با تغییر شکل های پلاستیک در مود خمشی یا برشی، مقدار زیادی از انرژی وارد شده را مستهلک می نمایند. مستهلک کننده های انرژی را می توان به سه دسته فعال، نیمه فعال و غیرفعال تقسیم بندی کرد که عمده استهلاک کننده های 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 می باشد و بعضی دیگر مانند میراگر اصطکاکی مشکلات کمتری دارند. میراگرهای

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 به کاررفته است. آزمایش هایی برای یافتن پارامترهای مؤثر مانند تعداد دفعات بارگذاری، دامنه جابه جایی، نیروی پیش تنیدگی پیچها و پیش تنیدگی مهاربندها بر روی مدل قاب مجهز به میراگر اصطکاکی انجام شده است. Mualla و Bellev با تحلیل های 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 جابه جایی قاب می شود. به علاوه این که نیروی پیش تنیدگی 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



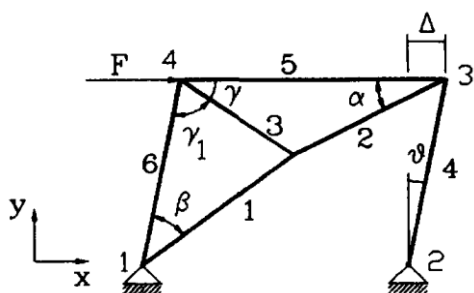
شکل ۳- مهاربند برون محور [۸]

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

و زاویه چرخش θ بعد از اعمال نیرو برابر:

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

می‌باشد که در شکل (۴) (قاب بعد از اعمال نیرو) مشاهده می‌شود.



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 بت‌آرمه 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 از جمله 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 l_{i0} طول اولیه و l_i طول نهایی عضو، A_i مساحت مقطع و F_i نیروی هر عضو می‌باشد.

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

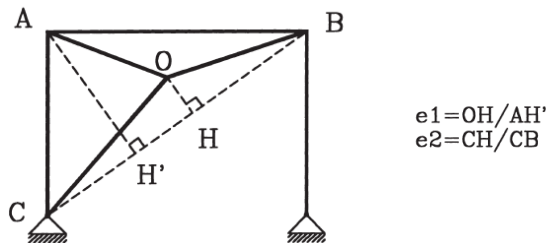
و زوایای اعضای مهاربند با روابط زیر بدست می‌آیند [۸]:

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

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

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

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 ۷ شکل در مقیاس واقعی را بررسی کردند. مهاربندهای ۷ 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 کماتش خارج از صفحه تک انحنایی را با کماتش 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 ۷ شکل طول بعضی از اعضای مهاربندی بلند می‌باشد و به علت نیروی محوری قابل توجه در این اعضا، خطر کماتش 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 ۷ 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 درگره 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:

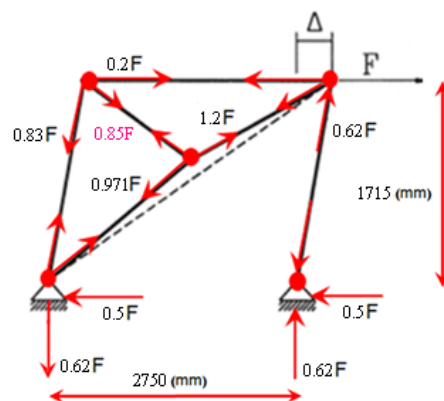
$$\sum F_x = 0 \rightarrow \quad (19)$$

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

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

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].

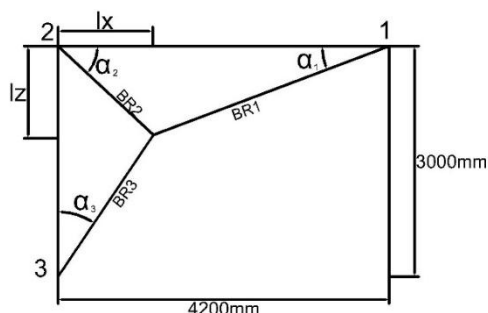


شکل ۵- نسبت مقادیر نیروی اعضا بعد از اعمال نیروی جانبی

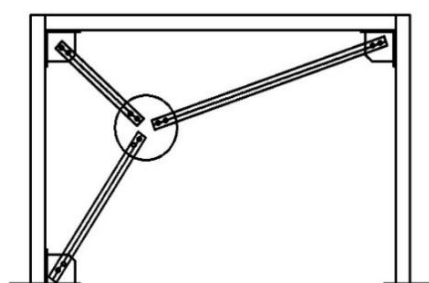
در سال ۱۹۹۹، **Moghaddam** و **Estekanchi** نشان دادند که درجه و میزان غیرخطی بودن عمدتاً به مقدار خروج از مرکزیت و سختی نسبی عضو سوم مهاربند وابسته است. این سیستم مهاربندی توانایی ایجاد مقدار مشخصی عملکرد جداساز لرزه‌ای

۲- روش تحقیق

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



الف) هندسه‌ی نمونه‌ی ۷ شکل



ب) نمونه‌ی اجرایی ۷ شکل

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

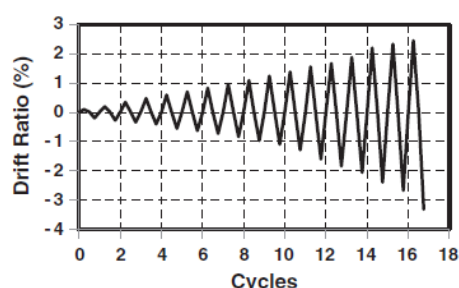
جدول ۲- مشخصات مصالح اعضای مهاربندها

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

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. جزئیات 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.

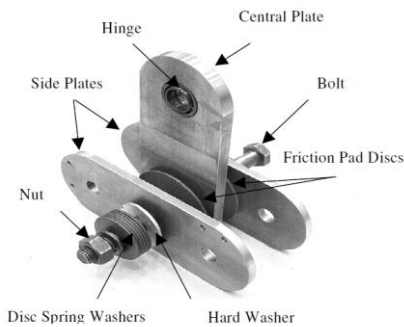


شکل ۷- بارگذاری سیکلی (چرخه‌ای)

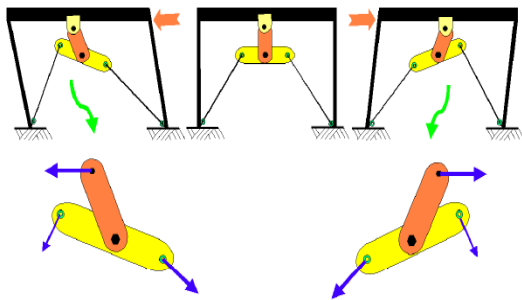
۲-۱- مهاربند ۷ شکل

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 ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای (شکل (۸))، مورد آزمایش قرار گرفت. 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 **IPB۲۰۰** و مقطع ستون‌ها هم به‌صورت **۲IPE۱۸۰** 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

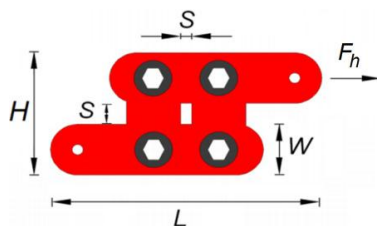
نوع دوم دارای ۲ صفحه اصطکاکی هستند که توسط یک پین به هم متصل شده‌اند و بر روی یکدیگر می‌لغزند (شکل (۱۲)). مشخصات هندسی و مکانیکی میراگرهای نوع اول و دوم در جدول (۴) و (۵) آورده شده است که در آن F_h ظرفیت میراگر، t ضخامت ورق، n تعداد لایه ورق‌ها و Δ دامنه نوسان می‌باشند.



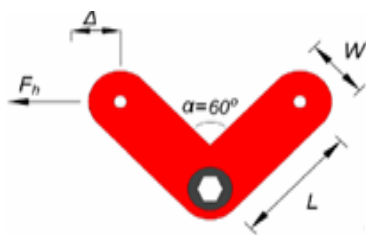
شکل ۹- اجزای میراگر اصطکاکی دورانی Mualla [۲]



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



شکل ۱۱- میراگر اصطکاکی دورانی نوع اول



شکل ۱۲- میراگر اصطکاکی دورانی نوع دوم

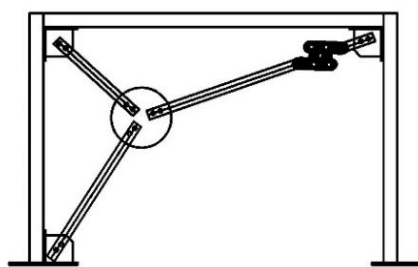
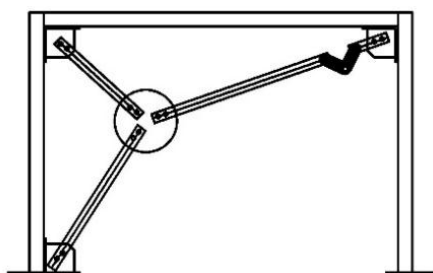
جدول ۳- مشخصات اعضای قاب اصلی

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 + ۲PL 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 فنی استفاده می‌شود و برای جلوگیری از اثر این واشرهای فنی 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

الف) قاب γ شکل با میراگر اصطکاکی دورانی نوع اولب) قاب γ شکل با میراگر اصطکاکی دورانی نوع دومشکل ۱۳- قاب γ شکل همراه با میراگر اصطکاکی

۴- صحت سنجی

به طور خاص در شاخه مهندسی زلزله، یکی از مرسوم ترین نرم افزارهای مدل سازی و تحلیل، نرم افزار OpenSees است که توانمندی های بسیاری در خصوص شبیه سازی انواع مسائل سازه ای و ژئوتکنیکی و انجام تحلیل های متنوع استاتیکی و دینامیکی را دارد. در این مطالعه نیز برای مدل سازی قاب ها از این نرم افزار استفاده شده است. برای اطمینان از مدل سازی هایی که انجام گردید نیاز به صحت سنجی آن با استفاده از مقالات معتبر می باشد که برای این منظور در این مطالعه از مدل استفاده شده در مقاله ی *Mualla* و *Bellev* بهره گرفته شده است. مدل مربوطه یک قاب فولادی (شکل ۶) با دهانه $7/6$ مترو ارتفاع $4/6$ متر است. تیر قاب صلب فرض شده و پایه ستون گیردار در نظر گرفته شده است. ممان اینرسی ستون ها $34 \times 10^6 \text{ mm}^4$ است. برای وزن فرضی 450 کیلو نیوتن، پرید ارتعاش یک ثانیه و نسبت میرایی 5 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

جدول ۴- مشخصات میراگرهای نوع اول

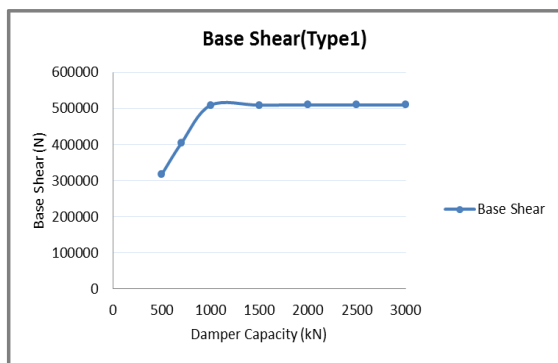
Δ (mm)	nu	S (mm)	t (mm)	W (mm)	L (mm)	H (mm)	F_h (kN)
۱۰۰	۱	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۵۰۰
۱۰۰	۲	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۱۰۰۰
۱۰۰	۳	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۱۵۰۰
۱۰۰	۴	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۲۰۰۰
۱۰۰	۵	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۲۵۰۰
۱۰۰	۶	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۱۴۰	۶۳۰	۳۰۰۰

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

برای جای گذاری میراگر، آرایش های 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 γ شکل قرارداد شد و اثر افزایش ظرفیت میراگر بر روی قاب ها 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:

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

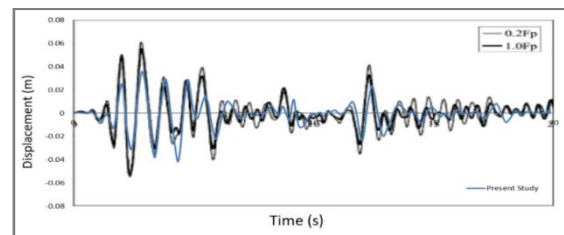
$$v = 510272; \quad F_n > 1000 \quad (22)$$

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 زلزله‌السنتر و $3/417 \text{ m/s}^2$ 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 تحلیلی

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

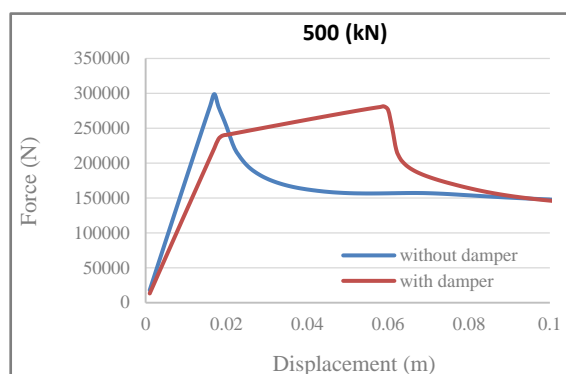
این میراگر دارای ۴ صفحه اصطکاکی می‌باشد که هنگام حرکت جانبی وقتی نیروی میراگر به حد ظرفیت خود می‌رسد، لینک‌ها نسبت به هم حرکت کرده و باعث ایجاد اصطکاک در صفحات مستهلک کننده انرژی می‌شوند. نمونه‌ای از نحوه اجرا در شکل (۱۵) ملاحظه می‌گردد.



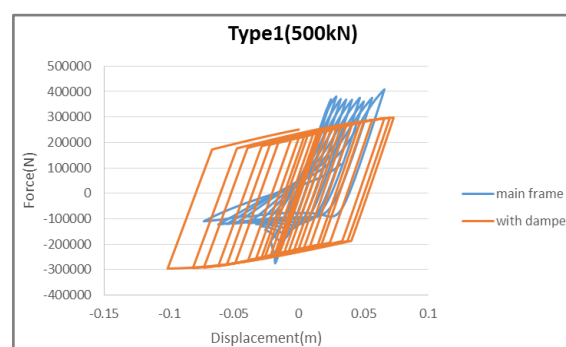
شکل ۱۵- نحوه قرارگیری میراگر نوع اول در قاب مهاربندی y

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 ۷۰۰ kN و ۵۰۰ kN در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) آورده شده است.



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



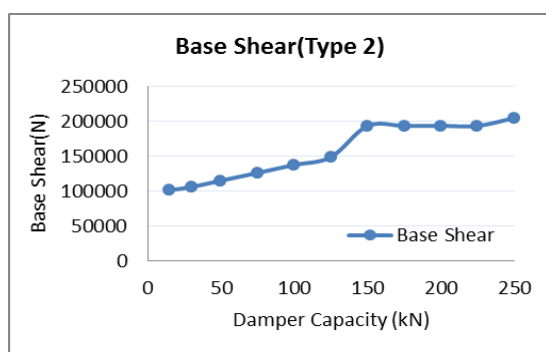
شکل ۱۸- مقایسه منحنی چرخه‌ای قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن

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

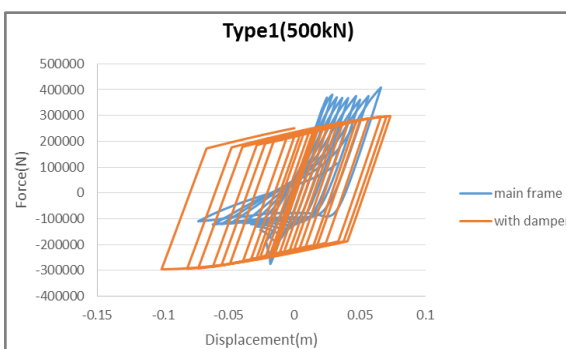
در این حالت نیز ظرفیت‌های متفاوت میراگر نوع دوم مطابق جدول (۵) بررسی گردید و مشاهده شد که عملکرد آنها نیز یکسان نیست به طوری که با افزایش ظرفیت میراگر از ۱۵ kN تا ۲۵۰ kN اگرچه بر روی میزان برش پایه اثر افزایشی داشته است ولی این اثر بعد از ظرفیت ۱۵۰ kN چندان قابل توجه نیست و افزایش ظرفیت میراگر تأثیر چندانی بر روی برش پایه ندارد که در شکل (۲۰) به خوبی قابل مشاهده می‌باشد و رابطه رگرسیون (۲۳) برای آن پیشنهاد می‌گردد:

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



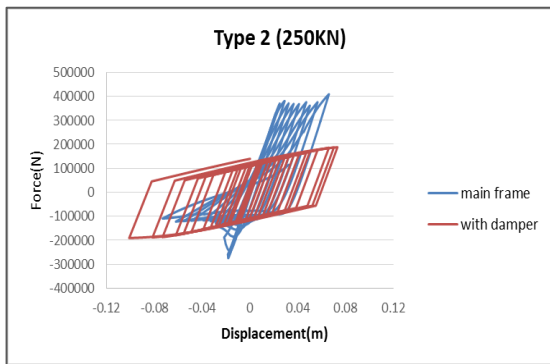
شکل ۲۰- بررسی اثر افزایش ظرفیت میراگر نوع دوم بر روی برش پایه

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.

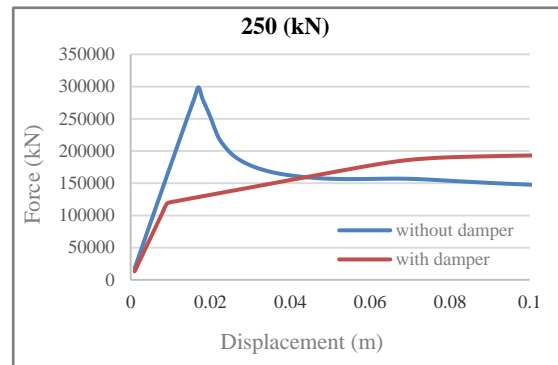


شکل ۱۹- مقایسه منحنی چرخه‌ای قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۷۰۰ کیلو نیوتن

همه‌ی قاب‌ها تحت پروتکل بارگذاری یکسان قرار گرفته‌اند و تحلیل چرخه‌ای روی آنها انجام شده است. بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد افزودن میراگر، باعث رفتار هیستریتیک نسبتاً متقارنی در قاب می‌شود که افت ناگهانی مقاومت همانند حالت



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



شکل ۲۱- مقایسه‌ی منحنی بار افزون قاب‌های 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

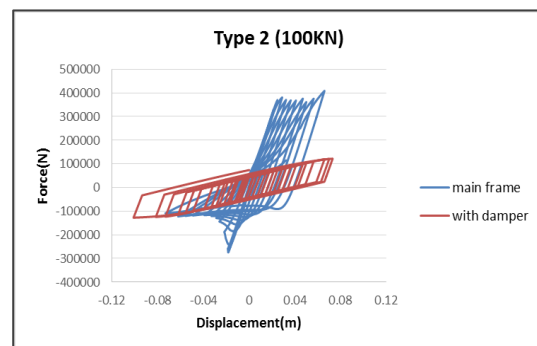
هدف این مقاله ارزیابی لرزه‌ای مهاربندهای شکل مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی است که با انتخاب یک قاب یک طبقه و یک دهانه با مهاربند شکل در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی دورانی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی این دو قاب ظرفیت‌های سختی، مقاومت و جذب انرژی مورد توجه قرار گرفتند و با توجه به این بررسی 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 قاب با میراگر ۱۰۰ kN در (شکل ۲۲) و ۲۵۰ kN در (شکل ۲۳)) مقایسه گردیده‌اند. افزودن این میراگرها موجب شده است که رفتار چرخه‌ای قاب 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 قاب‌های با و بدون میراگر با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن

میراگر 250 kN بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.

۳- برای میراگر چهار مفصل اصطکاکی با افزایش ظرفیت میراگر از 500 kN تا 1000 kN اثر افزایشی بر روی میزان برش پایه داشته است ولی این اثر افزایش بعد از ظرفیت 1000 kN چندان قابل توجه نیست و همچنین ملاحظه گردید مقدار استهلاک انرژی در میراگر 1000 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 250 kN حدود 10% درصد، در نمونه 500 kN حدود 50% درصد و 700 kN حدود 70% 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 500 kN معادل 20% درصد و در میراگر 250 kN حدود 60% درصد کاهش می‌یابد.

۶- مقدار سختی در قاب با میراگر نسبت به حالت بدون میراگر کاهش نشان می‌دهد که برای میراگر با ظرفیت 500 kN حدود 35% درصد و 250 kN حدود 30% 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 20% و 35% درصد کاهش و جذب انرژی حدود 50% 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 1000 کیلو نیوتن در نوع اول و ظرفیت کمتر از 150 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 500 کیلو نیوتن برای نوع اول و محدوده 150 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 شکل را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد لذا می‌طلبد 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 شکل در حال انجام است. و قرار است سه نوع میراگر اصطکاکی، تسلیمی قطری و تسلیمی دایره‌ای در مهاربند شکل مورد ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گیرد.

۷- مراجع

- [1] 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 لرزهای سازه‌های فولادی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

