



http://journaliss.ir

ارزیابی عملکرد میراگر اصطکاکی-لغزشی جدید و مقایسه رفتار آن با مهاربند همگرای متداول

محمدرضا کبیری^۱، سید رسول میرقادر^۲، سمیرا ابراهیمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گروه سازه، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دکتری مهندسی عمران، گروه سازه، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، دکتری مهندسی عمران، گروه سازه، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، mirghaderi@ut.ac.ir

چکیده

در سیستم‌های باربر جانبی مهاربندی همگرای متداول، مهاربندها و گاست‌پلیت‌ها نقش فیوز سازه‌ای را ایفا می‌کنند؛ به نحوی که مهاربندها در حالت کششی، تسلیم‌شدگی و در حالت فشاری به همراه گاست‌پلیت‌ها، کمانش و تغییر شکل‌های خارج از صفحه را تجربه می‌کنند. همچنین به دلیل تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مهاربندی و گاست‌پلیت‌ها، در این اعضا افت مقاومت و سختی محوری و آسیب‌های سازه‌ای مانند تغییر شکل‌های ماندگار، چین‌خوردگی و اعوجاج رخ می‌دهد. بدین ترتیب در سازه‌های مجهز به سیستم مهاربندی همگرای متداول، پس از تجربه زلزله‌های متوسط و یا شدید نیاز به تعویض و یا تعمیر اعضای آسیب‌دیده وجود دارد. در این مطالعه، با هدف جلوگیری از کمانش و تسلیم مهاربندها و رخ‌ندادن آسیب‌های سازه‌ای در اعضا، یک میراگر اصطکاکی-لغزشی جدید معرفی گردید و جهت ارزیابی عملکرد آن و مقایسه با سیستم مهاربندی همگرای متداول، سه مقطع مهاربندی در نظر گرفته شد و هر کدام یک‌بار به صورت میراگر اصطکاکی-لغزشی و یک‌بار به صورت مهاربند همگرای متداول طراحی و در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شدند. میراگرهای اصطکاکی-لغزشی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قبل از ظرفیت کمانشی یا کششی مهاربندها، لغزش در اتصالات اصطکاکی-لغزشی رخ دهد. نتایج نشان‌دهنده رخ‌ندادن هرگونه تسلیم‌شدگی، تغییر مکان خارج از صفحه، تغییر شکل‌های ماندگار، اعوجاج و دیگر آسیب‌های سازه‌ای در میراگر می‌باشد. در سیستم پیشنهادی به دلیل فعال‌شدن اتصال اصطکاکی-لغزشی قبل از ظرفیت بحرانی کمانشی و یا تسلیم مقطع، کمانش خارج از صفحه و تسلیم‌شدگی و در نتیجه افت مقاومت و سختی محوری رخ نمی‌دهد. همچنین با به کارگیری میراگر پیشنهادی در سازه به جای سیستم مهاربندی همگرای متداول، اتلاف انرژی لرزه‌ای به صورت میانگین ۱۳۹/۹ درصد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

میراگر اصطکاکی-لغزشی، سیستم مهاربندی همگرای متداول، کمانش خارج از صفحه

Evaluating the performance of a new friction-slip damper and comparing it with the conventional concentrically braces

M. Kabiri, S.R. Mirghaderi, S. Ebrahimi

Abstract

In the lateral resistance systems of conventional concentrically bracing, braces and gusset plates play the role of a structural fuse; in such a way that the braces experience yielding in the tension and buckling and out-of-plane deformations in the compression. Additionally, due to the formation of plastic hinges in braces and gusset plates, these members experience a decrease in axial strength and stiffness as well as structural damage such as permanent deformations, creases, and distortions. Hence, in structures equipped with a conventional concentrically bracing system, after experiencing moderate or severe earthquakes, there is a need to replace or repair the damaged members. In this study, to prevent buckling and yielding in braces and not to occur structural damages in the members, a new friction-slip damper was introduced. To evaluate and compare the performance of the new friction-slip damper with that of the conventional concentrically bracing system, three cross-sections were considered for braces. In other words, once these three cross-sections were considered in conventional concentrically braces and once again they were utilized in friction-slip dampers. These braces were simulated in finite element software. The friction-slip dampers were designed in such a way that the slip occurs in the friction-slip connections before the brace achieves its critical buckling or yielding capacity. The results showed no yielding, out-of-plane displacement, permanent deformation, distortion, and other structural damage in the dampers. In the proposed system, due to the activation of the frictional connection before the critical buckling or yielding capacity of the braces, out-of-plane buckling and yielding and as a result the degradation of axial strength and stiffness do not occur. Also, using the proposed damper brace in the structural systems instead of the conventional concentrically bracing system, increases the seismic energy dissipation capacity by 139.9% on average.

Keywords

Slip-Friction Damper, Conventional Concentrically Bracing System, Out -of-Plane Buckling



تشکیل مفصل پلاستیک، آزمایش‌هایی با مقیاس بزرگ بر روی مهاربندهای با مقاطع جعبه‌ای^۴، لوله‌ای^۵ و H شکل^۶ انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده کماتش خارج از صفحه مهاربندها و ایجاد مفاصل پلاستیک در گاست‌پلیت‌ها و وسط مهاربندها بود.

یکی از معایب سیستم‌های مهاربندی همگرا، ظرفیت پایین اتلاف انرژی لرزه‌ای می‌باشد. لازم به ذکر است که مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی یک عضو، بیانگر انرژی جذب‌شده توسط آن عضو می‌باشد. در سیستم مهاربندی همگرا به دلیل کماتش مهاربندها در فشار و در نتیجه افت مقاومت آن‌ها، مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی مهاربندها و کل سازه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

از دیگر معایب سیستم‌های مهاربندی همگرا، ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار و آسیب‌های سازه‌ای نظیر اعوجاج و چین‌خوردگی در اثر کماتش در مهاربندها است. به همین دلیل در سازه‌های مجهز به مهاربندهای همگرا، پس از تجربه زلزله‌های متوسط و شدید، نیاز به تعویض یا تعمیر مهاربندها و قطعات آسیب‌دیده وجود دارد که امری هزینه‌بر و اغلب از لحاظ اجرایی دارای مشکلات است.

یکی از راه‌های رفع مشکلات سیستم‌های باربر جانبی متداول، استفاده از میراگرهای اصطکاکی در سازه می‌باشد. در میراگرهای اصطکاکی، اتلاف انرژی عموماً از طریق اصطکاک صفحات لغزنده بر روی هم انجام می‌شود و انرژی لرزه‌ای وارد به سازه به انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد. **پال**^۷ و **همکاران** [۶]، اتصالات لغزشی-اصطکاکی را جهت استفاده در سازه‌های پانلی بزرگ معرفی کردند. همچنین **پال** و **مارش**^۸ [۷]، از پیشگامان این عرصه، یک میراگر اصطکاکی قابل استفاده در سیستم‌های مهاربندی همگرا با آرایش ضربدری را معرفی کردند. در این سیستم، مهاربندها برای حالت کششی طراحی می‌شوند و در فشار کماتش را تجربه می‌کنند. طی سال‌های بعد، **پال** و **مارش** [۸] با انجام اصلاحاتی بر روی میراگر قبلی نظیر اضافه کردن پدهای اصطکاکی و رفع مشکل کماتش مهاربندها در حالت فشاری، میراگر جدیدی معرفی کردند که به «میراگر پال»^۹ معروف است. این میراگر قابل استفاده در سیستم‌های مهاربندی با آرایش ضربدری و k شکل بود. همچنین **پال** [۹-۱۳]، استفاده از میراگر پال را جهت بهسازی ساختمان‌های

در هنگام زلزله‌های متوسط و یا شدید، انرژی لرزه‌ای قابل توجهی به سازه وارد می‌شود که می‌تواند منجر به خرابی و آسیب دیدن اعضای سازه گردد. در طراحی لرزه‌ای سیستم باربر جانبی سازه‌ها، در کنار دو عامل مقاومت^۱ و سختی^۲، شکل‌پذیری نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل‌پذیری در عضو به معنای توانایی تحمل تغییرشکل‌های فراتر از حدی بدون از دست دادن مقدار قابل توجه مقاومت می‌باشد [۱]. در فرآیند طراحی لرزه‌ای، اعضای مشخصی از سازه که دارای خاصیت شکل‌پذیری هستند به عنوان فیوز سازه‌ای انتخاب می‌شوند و در هنگام زلزله با پلاستیک شدن و تغییرشکل‌های ماندگار، انرژی لرزه‌ای را جذب می‌نمایند. در سیستم مهاربندی همگرای ویژه، مهاربندها، نقش فیوز سازه‌ای را ایفا می‌کنند. به نحوی که در هنگام زلزله در کشش، تسلیم و در فشار، کماتش خارج از صفحه را تجربه می‌کنند. سازه مجهز به سیستم مهاربندی همگرا دارای سختی بیش‌تری نسبت به سازه مشابه با سیستم قاب خمشی است. به همین دلیل در سیستم مهاربندی همگرا، امکان کنترل بهتر دریافت طبقات و ارضای محدودیت‌های مربوط به آن وجود دارد.

در سیستم مهاربندی همگرا، به دلیل تغییرشکل خارج از صفحه مهاربند، یک خروج از محوریت در انتقال نیروی محوری مهاربند و در نتیجه آن یک لنگر خمشی با مقدار بیشینه در وسط مهاربند ایجاد می‌شود. هم‌زمان با کماتش مهاربند و افزایش تغییرشکل خارج از صفحه آن، مقدار لنگر خمشی نیز افزایش می‌یابد. به دلیل اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی، با افزایش لنگر خمشی، ظرفیت محوری مهاربند کاهش می‌یابد. در نتیجه، مهاربندها با کماتش کردن در حالت فشاری، دچار افت شدید مقاومت و سختی می‌شوند. این امر سبب کاهش سختی جانبی طبقات پس از کماتش مهاربندها شده و پتانسیل ایجاد طبقه نرم در سازه را تشدید می‌کند. مطابق مطالعات آزمایشگاهی **ابراهیمی و همکاران** [۲-۴] بر روی سیستم‌های مهاربندی همگرا، مهاربندها حتی در صورت پرشدن با بتن و تبدیل شدن به لوله‌های پرشده با بتن، کماتش خارج از صفحه را تجربه می‌کنند و دچار افت مقاومت و سختی قابل توجهی می‌شوند. **فل**^۳ و **همکاران** [۵] با هدف رفتارسنجی مهاربند در کماتش و شکست آن در محل

^۴ Box Section

^۵ Pipe Section

^۶ H-Shaped

^۷ Pall

^۸ Marsh

^۹ Pall Damper

^۱ Strength

^۲ Stiffness

^۳ Fell

موجود مورد بررسی قرار داد. وو^۱ و همکاران [۱۴]، با انجام اصلاحاتی بر روی میراگر پال، «میراگر پال بهبودیافته»^۲ را معرفی کردند. مزیت این میراگر نسبت به میراگر پال، در تحلیل، طراحی و سهولت در اجرا بود.

فیتزجرالد^۳ و همکاران [۱۵]، کاربرد اتصالات پیچی لویایی را در سازه‌های مهاربندی همگرا گسترش دادند. به نحوی که اتلاف انرژی در آن از طریق لغزش صفحات فولادی نسبت به هم و اصطکاک ناشی از آن انجام می‌شد. همچنین در این تحقیق، وشرهایی جهت ثابت ماندن نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در طی چرخه‌های رفت و برگشتی معرفی گردید. موآلا^۴ و بلف^۵ [۱۶]، یک میراگر اصطکاکی جدید معرفی کردند و تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی را با هدف یافتن جنس مناسب جهت پدهای اصطکاکی، تأثیر پارامتر فرکانس بارگذاری، دامنه حرکت و نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها انجام دادند.

کاربرد میراگرهای اصطکاکی به سازه‌های جدید محدود نمی‌شود بلکه در سال‌های اخیر تحقیقاتی جهت گسترش کاربرد این میراگرها در سازه‌های موجود و یا آسیب‌دیده انجام شده است. در این راستا، کریستوپولس^۶ و همکاران [۱۷]، یک سیستم مهاربندی خودمركزگرا را با قابلیت اتلاف انرژی و قابل استفاده در سازه‌های موجود و آسیب‌دیده معرفی کردند. پارونسو^۷ و لیگنوس^۸ [۱۸]، با هدف کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها در هنگام زلزله، ۶۲ آزمایش بر روی میراگرهای اصطکاکی با پنج نوع پد اصطکاکی با جنس غیرفلزی انجام دادند.

میراگرهای اصطکاکی عموماً از دو صفحه فولادی به همراه پدهای اصطکاکی که از طریق اتصال پیچی به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شوند. لازم به ذکر است که مقدار اتلاف انرژی این میراگرها به نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها وابسته است. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی بر روی میراگرهای اصطکاکی نیمه فعال انجام شده است [۱۹ و ۲۰]. در این نوع از میراگرها می‌توان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها، نیروی به هم فشردگی صفحات اصطکاکی و در نتیجه رفتار میراگر را کنترل نمود.

نوع دیگری از میراگرهای اصطکاکی، میراگر سیلندری معرفی شده توسط میرطاهری و همکاران [۲۱] می‌باشد. این میراگر به جای صفحات فولادی و اتصالات پیچی، از یک شفت که درون

یک سیلندر می‌لغزد تشکیل شده است. قربانی و رفوعی [۲۲]، یک میراگر اصطکاکی دو مرحله‌ای قابل استفاده در سیستم مهاربندی همگرا با آرایش قطری معرفی کردند. این میراگر دارای دو اتصال پیچی با سطح نیروی پیش‌تنیدگی متفاوت می‌باشد. عملکرد این میراگر به گونه‌ای است که در طی زلزله‌های متوسط، ابتدا اتصال با نیروی لغزش کوچک‌تر فعال می‌شود و با شدیدتر شدن زلزله و افزایش تغییر مکان جانبی نسبی طبقه، اتصال با نیروی لغزش بزرگ‌تر نیز فعال گردیده و شروع به لغزیدن می‌نماید.

ابراهیمی و میرقادر [۱]، با هدف جلوگیری از کاهش مقاومت و سختی محوری مهاربند و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه، یک میراگر لغزشی-اصطکاکی قابل استفاده در سیستم مهاربندی همگرا با آرایش قطری و شورون معرفی کردند. آن‌ها پیکربندی میراگر را برای مقاطع جعبه‌ای و H شکل ارائه نمودند. همچنین جهت ارزیابی عملکرد این میراگر، آن را در نرم‌افزار آباکوس^۹ شبیه‌سازی کرده و رفتار و نمودار هیستریزس آن را با سیستم مهاربندی همگرا مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده عدم کاهش سختی و مقاومت مهاربند، عدم تشکیل مفصل پلاستیک در سیستم و رخ‌دادن کمانش موضعی و کلی در مجموعه میراگر و مهاربند است. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند به دلیل یکسان بودن نیروی مهاربندهای کششی و فشاری در سیستم‌های مهاربندی شورون مجهز به میراگر پیشنهادی، نیروی نامتعادل‌کننده در تیرهای دهانه مهاربندی شورون رخ نمی‌دهد و در نتیجه نیروی برشی و لنگر خمشی بزرگ در تیر دهانه مهاربندی ایجاد نمی‌گردد.

در بررسی مطالعات پیشین که در این مطالعه انجام شده است، خلأهای تحقیقاتی زیر یافت شده است:

- ۱- مدل‌سازی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در مقیاس عضو و مقایسه آن با مهاربند همگرای متداول
- ۲- جانمایی مناسب اتصالات اصطکاکی در مجموعه مهاربندی: در اغلب مطالعات انجام‌شده، مکان اتصالات اصطکاکی در وسط طول مهاربند قرار دارد. به دلیل افزایش اثرات خطای ساخت در وسط مهاربند، امکان ناپایداری و تغییر مکان خارج و داخل صفحه در

⁹ Abaqus

¹ Wu

² Modified Pall Damper

³ Fitzgerald

⁴ Mualla

⁵ Belev

⁶ Christopoulos

⁷ Paronesso

⁸ Lignos

اتصالات اصطکاکی وجود دارد. در این مطالعه با هدف به حداقل رساندن اثرات خطای ساخت بر عملکرد میراگر اصطکاکی-لغزشی، اتصالات اصطکاکی در یکی از ورق‌های گاست قرار داده شده است.

در این مطالعه با هدف بهبود عملکرد و گسترش میراگر معرفی شده توسط **ابراهیمی و میرقادری [۱]**، یک میراگر اصطکاکی-لغزشی قابل استفاده در سیستم مهاربندی همگرا با آرایش قطری و شورون معرفی می‌گردد. به دلیل عملکرد بهتر و سهولت در اجرا، محل میراگر از وسط مهاربند به یکی از گاست‌پلیت‌ها منتقل می‌شود. همچنین با هدف ارزیابی عملکرد میراگر در طی چرخه‌های رفت و برگشتی، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و با مهاربندهای همگرای متداول مقایسه می‌شود.

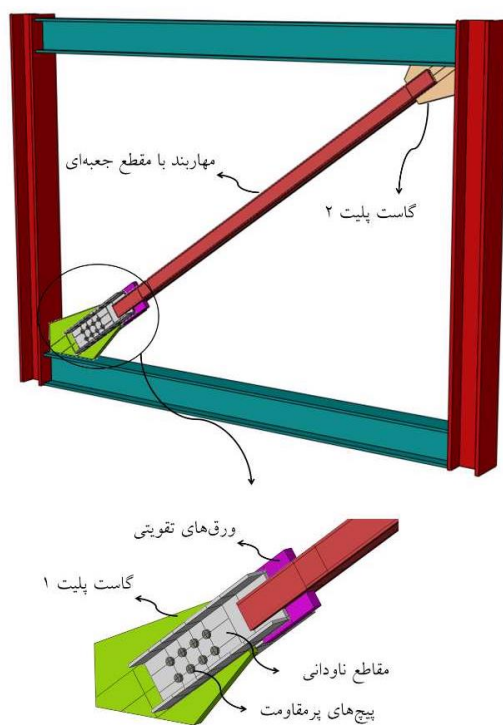
۲- میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی

در این مطالعه با هدف جلوگیری از کمانش‌های کلی و محلی، ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار و افت مقاومت و سختی در مهاربندها، یک میراگر اصطکاکی-لغزشی قابل استفاده در سیستم‌های مهاربندی همگرا با آرایش قطری و مقطع جعبه‌ای معرفی می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، به دلیل تأثیر کم‌تر نقص ساخت مهاربند بر عملکرد میراگر، مقرون به صرفه بودن و سهولت در اجرا، موقعیت میراگر بر روی یکی از گاست‌پلیت‌ها در نظر گرفته شده است. مطابق این شکل، اجزای اصلی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی عبارتند از: (۱) گاست‌پلیت شماره ۱ با شکاف‌های لوبیایی تعبیه شده جهت اتصال لغزشی-اصطکاکی؛ (۲) دو مقطع ناودانی جهت لغزش بر روی گاست‌پلیت شماره ۱؛ (۳) تعدادی پیچ پرمقاومت مناسب پیش‌تندگی به منظور اتصال دو مقطع ناودانی به گاست‌پلیت شماره ۱؛ (۴) مهاربند با مقطع جعبه‌ای؛ (۵) دو ورق تقویتی فولادی جهت متصل نمودن مهاربند به دو مقطع ناودانی و (۶) گاست‌پلیت شماره ۲ با اتصال جوشی به مهاربند.

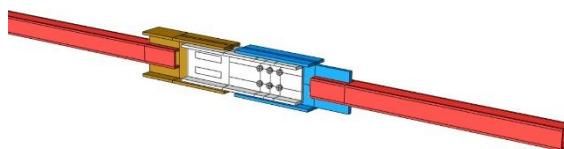
در میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، لغزش در اتصال پیچی، فیوز سازه‌ای می‌باشد و در نتیجه باید به صورت تغییر مکان-کنترل در نظر گرفته شود و سایر اعضا و اتصالات باید به صورت نیرو-کنترل و بر اساس نیروی لغزش و ظرفیت مهاربند طراحی و تناسب‌بندی شوند. بدین ترتیب، ورق گاست شماره ۱ که دارای شکاف لوبیایی است، مطابق روش پیشنهادی **ابراهیمی و همکاران [۲۳]**، طراحی شده و نیروهای اتصال آن به تیر و ستون به دست می‌آید. علاوه بر این، به دلیل وجود شکاف‌های

لوبیایی در ورق گاست ۱، ابعاد آن از ورق گاست معمولی مقداری بزرگ‌تر است که تأثیر مثبتی در پایداری آن دارد. در تحلیل‌های عددی انجام شده در این مطالعه نیز، هیچ‌گونه ناپایداری در ورق گاست دارای شکاف دیده نشد. همچنین جهت اطمینان بیش‌تر از پایداری در ورق گاست، می‌توان دو ورق تقویتی به دو وجه آزاد ورق گاست اضافه کرد.

مطابق مطالعات پیشین انجام شده، اثرات ناشی از خطای ساخت و نقص اولیه، در وسط طول مهاربند بیش‌ترین مقدار را نسبت به ورق‌های گاست و سایر نواحی دارد. به نحوی که در مطالعات عددی، جهت منظور نمودن نقص اولیه در مهاربند، مقدار تغییر مکان خارج و یا داخل صفحه را به وسط طول مهاربند اعمال می‌نمایند. در این مطالعه، مطابق شکل (۲)، ابتدا مکان اتصال اصطکاکی در وسط مهاربند جانمایی گردید. در ادامه با انجام تحلیل‌های مونوتونیک و چرخه‌ای بر روی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، مشاهده شد که اتصال اصطکاکی به دلیل آزاد بودن در هر دو وجه داخل و خارج صفحه، ناپایدار بوده و در طی حرکات رفت و برگشتی، مقداری تغییر مکان خارج و داخل صفحه در آن به وجود می‌آید. این امر پتانسیل قفل‌شدگی اتصال پیچی و عمل نکردن میراگر را تشدید می‌نماید.



شکل ۱- موقعیت اتصال لغزشی-اصطکاکی در میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی



شکل ۲- موقعیت اتصال لغزشی-اصطکاکی در میراگر
اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در طرح اولیه

مراحل طراحی و ساخت میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی
به شرح زیر است:

۱- ابتدا مطابق شکل (۳-الف)، ابعاد گاست پلایت شماره ۱ مطابق روش ارائه شده توسط ابراهیمی و همکاران [۲۳]، طراحی و ساخته می شود. لازم به ذکر است که ابعاد این گاست پلایت، به دلیل تعبیه شکاف های لوبیایی در آن، کمی بزرگ تر از گاست پلایت های معمول است. طول هر شکاف لوبیایی در گاست پلایت شماره ۱، برابر با مجموع فواصل بین پیچ ها (Δ_1) و دو برابر طول لغزش پیچ ها (Δ_2) می باشد. فاصله بین پیچ ها، سه برابر قطر هر پیچ در نظر گرفته شده است. همچنین، طول لغزش نیز از حاصل ضرب مقدار تغییر مکان جانبی نسبی مجاز طبقه (که در اینجا معادل ۳ درصد در نظر گرفته شده است) در کسینوس زاویه مهاربند نسبت به افق به دست می آید. عرض هر شکاف لوبیایی نیز برابر قطر هر پیچ به علاوه ۲ میلی متر رواداری است.

۲- در مرحله دوم، مطابق شکل (۳-ب)، دو مقطع ناودانی با اتصال پیچی به گاست پلایت شماره ۱ متصل می شوند. ابعاد ناودانی ها باید به گونه ای انتخاب شوند که مساحت و ممان اینرسی مقطع دوپل ناودانی بزرگ تر یا مساوی مساحت و ممان اینرسی مهاربند باشد. تعداد پیچ ها و مقدار نیروی پیش تنیدگی آن ها بر اساس حداقل ظرفیت کمانشی و کششی مهاربند تعیین می شود. شایان ذکر است که اتصالات اصطکاکی-لغزشی باید به گونه ای طراحی شوند که قبل از رسیدن مهاربند به ظرفیت کششی یا ظرفیت کمانشی، لغزش در اتصال رخ دهد و در نتیجه مهاربند ظرفیت کششی و کمانشی خود را تجربه نکند. با این رویکرد، به دلیل عدم تجربه ظرفیت کششی و کمانشی در مهاربند، هیچ گونه تسلیم شدگی، کمانش کلی و کمانش محلی در مهاربند ها به وقوع نمی پیوندد. نیروی لغزش اصطکاکی در میراگر اصطکاکی-لغزشی

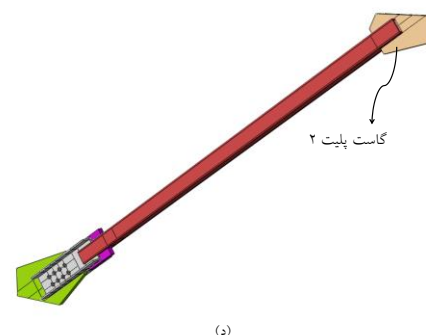
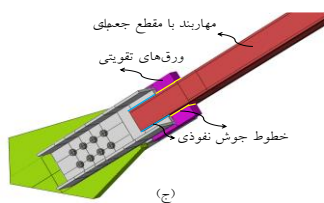
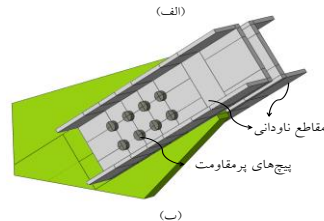
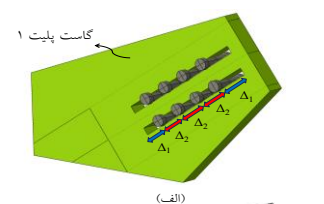
پیشنهادی، از رابطه (۱) به دست می آید. در این فرمول، (T_b) نیروی پیش تنیدگی هر پیچ، (n) تعداد پیچ های تعبیه شده در اتصال اصطکاکی و (μ)، ضریب اصطکاک می باشد. ضریب ۲ در فرمول نیز به دلیل وجود دو سطح اصطکاک در اتصال است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، میزان نیروی لغزش در اتصال پیشنهادی بین ۸۵ تا ۹۰ درصد حداقل مقدار ظرفیت کششی و کمانشی مهاربند در نظر گرفته شد. به این ترتیب، قبل از رسیدن نیروی محوری مهاربند به نیروی کششی یا نیروی بحرانی کمانشی خود، اتصال اصطکاکی-لغزشی فعال شده و شروع به لغزیدن می نماید. در نتیجه این امر، نیروی محوری مهاربند به نیروی لغزش اتصال اصطکاکی محدود شده و از رخ دادن کمانش خارج از صفحه و در نتیجه افت مقاومت و سختی مهاربند جلوگیری می شود.

$$F_{Slip} = 2 \times n \times \mu \times T_b \quad (1)$$

۳- در مرحله سوم، مطابق شکل (۳-ج)، با ایجاد شکاف هایی در بال های قطعه مهاربند، این قطعه با اتصال جوشی به دو مقطع ناودانی متصل می گردد. طول شکاف ها برابر طول خط جوش اتصال قطعه مهاربند به دو مقطع ناودانی و عرض هر شکاف برابر با مجموع دو برابر ضخامت جان مقاطع ناودانی و ضخامت گاست پلایت است. اتصالات شکاف دار باعث ایجاد مقطع خالص کاهش یافته در انتهای شکاف می شوند. در نتیجه این مقطع خالص کاهش یافته مستعد شکست در بار کششی است. جهت جبران مقطع خالص کاهش یافته و عدم کاهش ظرفیت گسیختگی کششی نسبت به ظرفیت تسلیم مقطع، دو ورق فولادی در محل اتصال به دو مقطع ناودانی و قطعه مهاربند جوش داده می شوند. ارتفاع ورق ها باید به گونه ای انتخاب شوند که امکان ایجاد خط جوش در محل اتصال دو ورق فولادی با بال مقاطع ناودانی فراهم شود. همچنین ضخامت هر ورق تقویتی برابر فاصله پشت به پشت مقاطع ناودانی است. طول و ضخامت خط جوش های اتصال ورق های تقویتی به قطعه مهاربند و خط جوش های اتصال قطعه مهاربند به مقاطع ناودانی باید به گونه ای باشند که مجموع ظرفیت آن ها، بزرگ تر یا مساوی ظرفیت محوری مهاربند باشد.

۴- در مرحله آخر، مطابق شکل (۳-د)، در بال‌های انتهایی دیگر قطعه مهاربند شکاف‌هایی ایجاد شده و این مقطع به وسیله اتصال جوشی به گاست پلایت شماره ۲ متصل می‌گردد. طول و ضخامت خط جوش‌ها باید طوری انتخاب شوند که ظرفیت جوش‌ها بزرگ‌تر یا مساوی ظرفیت محوری قطعه مهاربند باشد.

در فرآیند طراحی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، کلیه جوش‌ها بر اساس ظرفیت محوری قطعه مهاربند طراحی می‌شوند. با توجه به محدود شدن نیروی لغزش اتصال اصطکاکی به مقداری کوچک‌تر از ظرفیت محوری مهاربند، طراحی کلیه جوش‌ها به صورت نیرو-کنترل بوده و احتمال گسیختگی و پارگی در جوش‌ها از بین می‌رود.

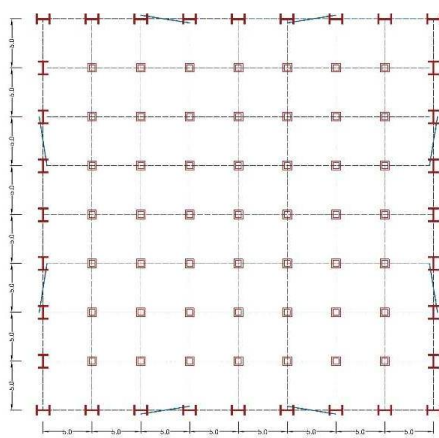


شکل ۳- مراحل ساخت و طراحی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی
الف) ساخت گاست پلایت شماره ۱ (ب) ساخت دو مقطع ناودانی و اتصال آن به گاست پلایت شماره ۱ با پیچ‌های پرمقاومت (ج) اتصال مهاربند به همراه دو ورق تقویتی به دو مقطع ناودانی (د) اتصال گاست پلایت شماره ۲ به قطعه مهاربند

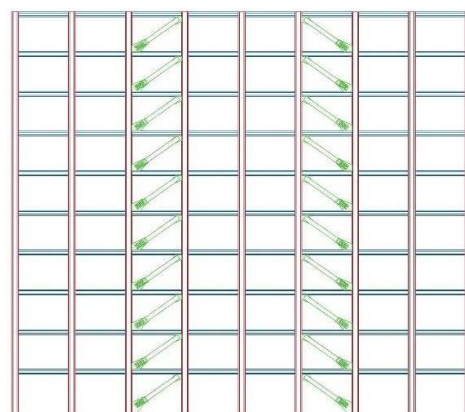
۳- هندسه سازه و قاب مورد نظر

به منظور ارزیابی عملکرد میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی و مقایسه آن با سیستم مهاربندی همگرای متداول، یک سازه ۱۰ طبقه با پلان نشان داده شده در شکل (۴)، در نظر گرفته شده است. موقعیت ساختمان، در شهر لس‌آنجلس آمریکا فرض شده است. سیستم باربر جانبی سازه به صورت قاب مهاربندی همگرا با شکل‌پذیری ویژه و با ضریب رفتار ۵ در نظر گرفته شده است. سازه به صورت سه‌بعدی و با اعمال اثرات ثانویه در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و اعضای آن مطابق آیین‌نامه AISC 360-22 طراحی شده‌اند. قاب‌های مهاربندی پیرامونی در پلان سازه، نقش سیستم باربر جانبی را ایفا می‌کنند و ستون‌های وسط پلان نیز به صورت ثقلی عمل می‌نمایند. مطابق شکل (۵)، یکی از قاب‌های مهاربندی پیرامونی استخراج و اعضای آن طراحی شده‌اند. به منظور بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی پیشنهادی در ترازهای مختلف نیروی، مهاربند های طبقات اول، پنجم و دهم سازه مورد بررسی به عنوان مهاربند های با ظرفیت نیرویی بزرگ، متوسط و کوچک، یک‌بار به صورت میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی و یک‌بار به صورت مهاربند همگرای متداول در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. تقاضای نیروی محوری در مدل‌های مجهز به مهاربند همگرای متداول و میراگر اصطکاکی-لغزشی، در تراز ظرفیتی بزرگ، متوسط و کوچک به ترتیب ۷۷۸۹، ۹۵۲۰ و ۱۹۳۰/۹ کیلونیوتن می‌باشد.

به منظور بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در سه تراز نیرویی بزرگ، متوسط و کوچک، مهاربند های طبقات اول، پنجم و دهم یک‌بار به صورت میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی و یک‌بار به صورت مهاربند همگرای متداول در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شوند.



شکل ۴- پلان ساختمان در نظر گرفته شده در مطالعه



شکل ۵- قاب پیرامونی استخراج شده از پلان

۴- مشخصات مقاطع

ابعاد و مشخصات مقطع مهاربندهای مدل شده در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که در هر تراز نیرویی به دلیل برابری ظرفیت محوری میراگر اصطکاکی-لغزشی و مهاربند همگرایی متداول، مقطع قطعه مهاربند در میراگر اصطکاکی-لغزشی با مقطع مهاربند همگرایی متداول یکسان است. همچنین از فولاد با تنش تسلیم ۹۰۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۱۰۰۰ مگاپاسکال برای پیچها استفاده شد. مشخصات و نیروی پیش‌تنیدگی پیچهای میراگر هر طبقه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مقاطع مهاربندی استفاده شده در مدل سازی

طبقه	مقطع	طول مهاربند (mm)	ارتفاع مقطع (mm)	ضخامت مقطع (mm)
10	140×12	4250	140	12
5	250×30	4250	250	30
1	330×28	4250	350	25

جدول ۲- مشخصات و نیروی پیش‌تنیدگی پیچهای میراگر هر طبقه

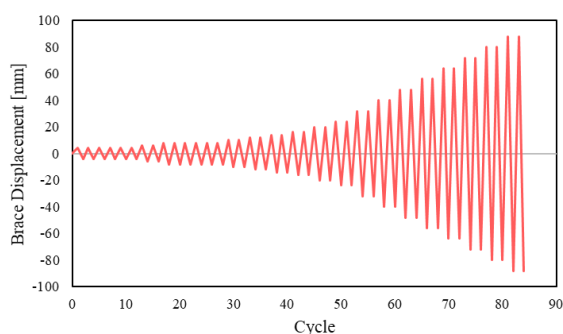
Story	F_{brace} (kN)	Bolt	n	T_b (kN)
10	1730.9	M27	8	270
9	3288.7	M36	8	514
8	4673.5	M36	10	584
7	5885.1	M36	16	460
6	6923.6	M36	18	481
5	7789.1	M36	18	541
4	8481.5	M36	20	530
3	9000.7	M36	20	563
2	9346.9	M36	20	584
1	9520.0	M36	20	595

۴-۱- مدل سازی در نرم افزار آباکوس

مطابق شکل‌های (۷) و (۸)، سه مدل مهاربند مجهز به میراگر پیشنهادی و سه مدل مهاربند همگرایی متداول، در نرم افزار اجرای محدود آباکوس شبیه سازی شدند. به منظور ساخت هر مدل در نرم افزار، از المان‌های سالید^۱، شکل پذیر و سه بعدی استفاده گردید. مصالح به کاررفته برای گاست پلیت‌ها، قطعه مهاربند، ورق‌های تقویتی و مقاطع ناودانی، ASTM A500 Gr-b می‌باشد. مشخصات این مصالح در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین پروتکل بارگذاری اعمالی بر روی مدل‌های ساخته شده در نرم افزار آباکوس، در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مصالح ASTM A500 Gr-b

ضریب پواسون	مقاومت نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)
0.3	400	315	200



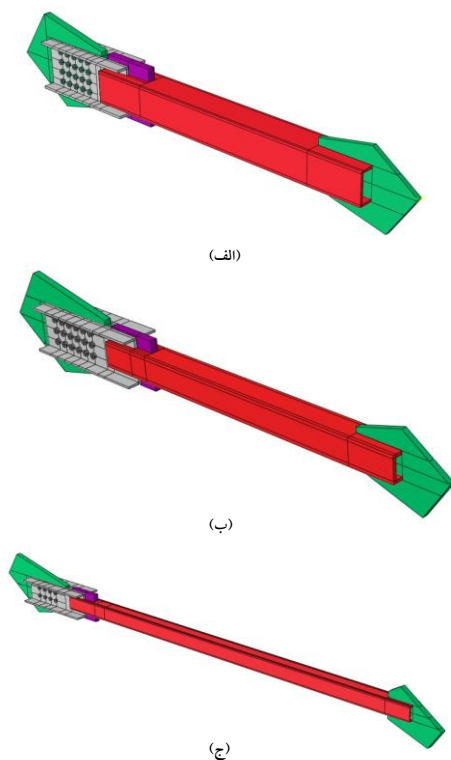
شکل ۶- بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده به مدل‌های ساخته شده در نرم افزار آباکوس

بارگذاری مدل‌های مجهز به میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، در سه مرحله انجام شد. در مرحله اول، پیش‌تنیدگی پیچها، در مرحله دوم، ایجاد خروج از مرکزیت در وسط مهاربندها به منظور شبیه سازی کردن نقص اولیه در مهاربندها و در مرحله سوم، تغییر مکان محوری چرخه‌ای مهاربند صورت گرفت. لازم به ذکر است، در مدل‌های مهاربندی همگرایی متداول، به دلیل عدم وجود پیچها، مرحله اول بارگذاری حذف می‌گردد. در مرحله دوم بارگذاری (اعمال کردن نقص اولیه به وسط مهاربندها)، یک جابه‌جایی کوچک برابر با $L/500$ ، که L طول عضو مهاربندی است، به وسط طول مهاربند در جهت خارج از صفحه وارد می‌شود.

¹ Solid

بارگذاری و در همه درجات آزادی مقید باشد. انتهای گاست پلایت شماره ۲ نیز در مرحله پیش تنیدگی پیچ ها و در مرحله تغییر مکان اولیه، به صورت کاملاً مقید در برابر درجات آزادی انتقالی ولی در مرحله سوم، درجه آزادی انتقالی در جهت مهاربند باز بوده و به صورت چرخه ای حرکت می کند.

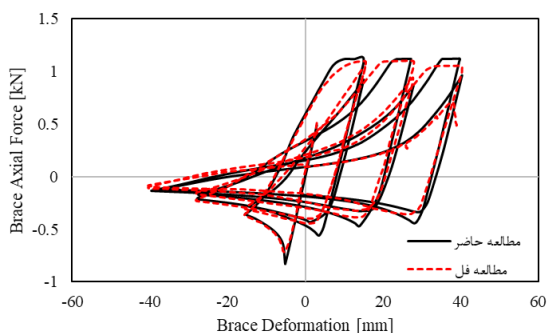
در انتها، به منظور مش بندی المان های ساخته شده، از مش نوع C3D8R استفاده شد. مش بندی اعضا از ابعاد بزرگ تر شروع شد و با کوچک تر کردن ابعاد مش ها، آنالیز حساسیت مش انجام گرفت.



شکل ۷- مدل های مجهز به میراگر اصطکاکی-لغزشی ساخته شده در نرم افزار الف) مقطع 330×28 ب) مقطع 250×30 ج) مقطع 140×12

پایداری در وضعیت تماس بین صفحات لغزنده بر روی هم و ثابت ماندن ضریب اصطکاک بین آنها یک مسئله مهم جهت اطمینان از عملکرد مورد انتظار در میراگرهای اصطکاکی است. در صورتی که در میراگر اصطکاکی معرفی شده در این مطالعه، ضریب اصطکاک در واقعیت بیش تر از مقدار در نظر گرفته شده در فرآیند طراحی باشد، اتصالات اصطکاکی در میراگر پیشنهادی در سطح نیروی مورد انتظار در زلزله فعال نشده و شروع به لغزش نمی کنند و در نتیجه میراگر همانند یک مهاربند همگرای متداول عمل می نماید. از سوی دیگر، در صورتی که ضریب اصطکاک در واقعیت کم تر از مقدار در نظر گرفته شده در فرآیند طراحی باشد، در طی زلزله، اتصالات اصطکاکی در سطح نیرویی پایین تر فعال شده و بدین ترتیب مقدار اتلاف انرژی لرزه ای کم تر از حد انتظار خواهد بود. یکی از راه های رسیدن به ضریب اصطکاک مورد انتظار در واقعیت، استفاده از پدهای اصطکاکی با جنس غیر فلزی است. در سال های گذشته، تحقیقات متعددی جهت بررسی عملکرد میراگرهای اصطکاکی مجهز به پدهای اصطکاکی با جنس های مختلف انجام شده است. مطابق این تحقیقات [۱۶، ۱۸، ۲۴-۲۶]، پدهای برنجی، عملکرد قابل قبولی را در تأمین پایداری در ضریب اصطکاک بین صفحات لغزنده از خود نشان داده اند. بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی میراگرهای اصطکاکی مجهز به پد [۲۴]، ضریب اصطکاک پدهای برنجی در بازه ۰/۳۵ تا ۰/۴ است. در این مطالعه با فرض استفاده از پدهای برنجی در میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، ضریب اصطکاک بین صفحات لغزنده بر روی هم، برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

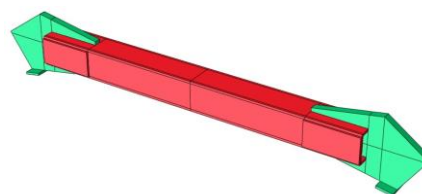
در فرآیند مدل سازی، تماس و اندرکنش صفحات به دو صورت "پنالتی" و "بدون اصطکاک" تعریف گردید. در حالت "پنالتی"، اندرکنش مماس بر صفحه تماس به صورت پنالتی و با ضریب اصطکاک ۰/۴ و اندرکنش عمود بر صفحه تماس به صورت تماس صلب تعریف شد. در حالت "بدون اصطکاک"، اندرکنش مماس بر صفحه تماس به صورت بدون اصطکاک و اندرکنش عمود بر صفحه تماس نیز به صورت تماس صلب تعریف گردید. تماس بین ورق گاست شماره ۱ و جان مقاطع ناودانی از نوع پنالتی و تماس بین پیچ با ورق گاست و مقاطع ناودانی از نوع بدون اصطکاک هستند. همچنین برای تعریف اتصال جوشی بین مقطع مهاربند و گاست پلایت شماره ۲، ورق های تقویتی و مقاطع ناودانی از گزینه Tie استفاده گردید. شرایط تکیه گاهی برای نقاط انتهایی گاست پلایت ها تعریف شد. به نحوی که انتهای گاست پلایت شماره ۱، در همه مراحل



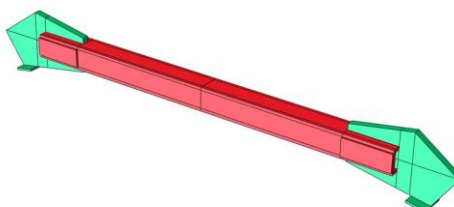
شکل ۹- مقایسه بین نتایج مدل سازی در نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی فل [۲۷]

۵-۲- صحت سنجی مدل سازی اتصال اصطکاکی-لغزشی

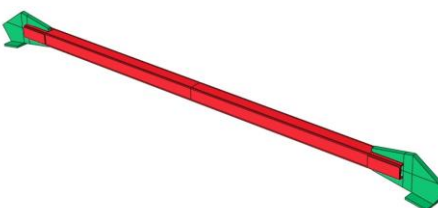
به منظور صحت سنجی مدل سازی اتصال لغزشی-اصطکاکی در نرم افزار آباکوس، از مطالعه انجام شده توسط پارانسو و لیگنوس [۱۸] استفاده شده است. آن ها ضمن معرفی یک میراگر اصطکاکی، ۶۲ آزمایش بر روی میراگر پیشنهادی خود با انواع پدهای اصطکاکی انجام دادند. اجزای این میراگر شامل دو صفحه فولادی انتهایی، دو صفحه فولادی خارجی ثابت، یک صفحه فولادی همراه با شکاف های لویبایی، دو پد اصطکاکی، دو صفحه فولادی خارجی متحرک و تعدادی پیچ پیش تنیده می باشد. در این مطالعه جهت صحت سنجی مدل سازی اتصالات پیچی در نرم افزار آباکوس، میراگر معرفی شده توسط پارانسو و لیگنوس در حالت مجهز به پد اصطکاکی M4 در نرم افزار شبیه سازی شد و تحت بارگذاری چرخه ای با دامنه ثابت ± 50 میلی متر قرار گرفت. نیروی لغزش مورد انتظار در این آزمایش برابر با ۳۰۰ کیلو نیوتن است. در شکل (۱۰-الف) میراگر معرفی شده توسط پارانسو و لیگنوس و در شکل (۱۰-ب) مدل ساخته شده این میراگر در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱۰-ج) مطابقت خوبی بین نتایج تحلیل عددی انجام شده در این مطالعه و نتایج آزمایشگاهی پارانسو و لیگنوس وجود دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- مدل های مهاربند های همگرای متداول ساخته شده در نرم افزار (الف) مقطع 330×28 (ب) مقطع 250×30 (ج) مقطع 140×12

۵-۱- صحت سنجی مدل سازی اجزای محدود

۵-۱-۱- صحت سنجی مدل سازی مهاربند همگرا

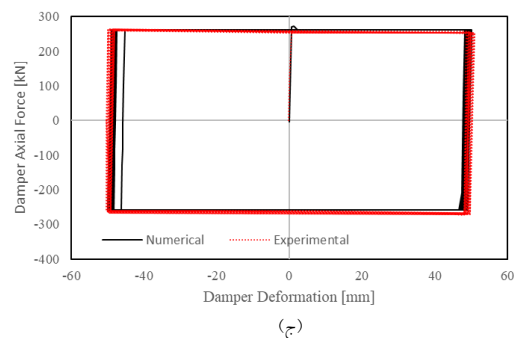
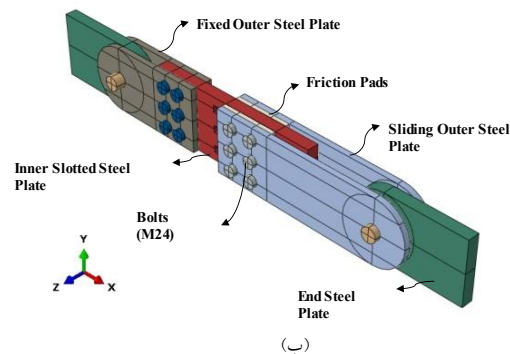
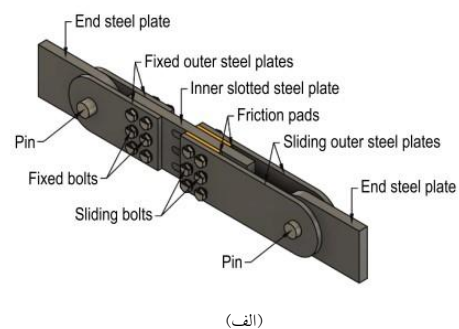
جهت صحت سنجی مدل سازی مهاربند همگرای متداول در نرم افزار آباکوس، مطالعه انجام شده توسط فل [۲۷] انتخاب شده و آزمایش HSS1-1 این مطالعه، در نرم افزار شبیه سازی شده است. اجزای اصلی این آزمایش شامل مهاربند با مقطع جعبه ای با بعد خارجی ۴ اینچ، ضخامت ۰/۲۵ اینچ و طول ۹ فوت و ۹/۵ اینچ، دو گاست پلایت و دو ورق تقویتی هستند. مجموعه مهاربند شبیه سازی شده تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته و نتایج آن استخراج شده است. با توجه به شکل (۹)، مطابقت بسیار خوبی بین مدل شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

گاست‌پلیت‌ها پس از تجربه زلزله‌های متوسط و شدید، نیاز به تعمیر و یا تعویض دارند که امری هزینه‌بر و اغلب دارای صعوبت اجرایی خواهد بود. به دلیل کماتش خارج از صفحه مهاربندهای همگرای متداول در حالت فشاری، یک خروج از مرکزیت در انتقال نیروی محوری و در نتیجه یک لنگر خمشی با مقدار بیشینه در وسط مهاربند ایجاد می‌گردد. با ادامه یافتن کماتش و افزایش تغییر مکان خارج از صفحه در وسط مهاربند، لنگر خمشی نیز افزایش می‌یابد. هم‌زمان با افزایش لنگر خمشی، به دلیل اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی، ظرفیت محوری مهاربند نیز کاهش پیدا می‌کند.

شکل‌های (۱۱-الف) الی (۱۱-ج) نشان می‌دهند که میراگرهای اصطکاکی-لغزشی برخلاف مهاربندهای همگرای متداول، در حالت فشاری، کماتش خارج از صفحه و در حالت کششی تسلیم را تجربه نمی‌کنند و در نتیجه دچار افت مقاومت و سختی نمی‌شوند. همچنین مقایسه منحنی‌های هیستریزس میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی با منحنی‌های هیستریزس مهاربندهای همگرای متداول نشان می‌دهد که میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، برخلاف مهاربندهای همگرای متداول، دارای رفتار هیستریزس پایدار هستند و هیچ‌گونه افت مقاومت و سختی را تجربه نمی‌کنند. در نتیجه، میراگرهای اصطکاکی-لغزشی بعد از تجربه زلزله‌های شدید و متوسط نیاز به تعویض یا تعمیر ندارند و فقط لازم است که پیچ‌ها یک‌بار باز و مجدد بسته شوند.

از مقایسه شکل‌های (۱۱-الف) الی (۱۱-ج)، می‌توان نتیجه گرفت که در مهاربندهای همگرای متداول، هرچه ابعاد مقطع مهاربند کوچک‌تر باشد، درصد افت مقاومت و سختی در حالت فشاری بیش‌تر خواهد بود. این در صورتی است که در میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، صرف‌نظر از ابعاد مقطع مهاربند، کاهش مقاومت و سختی محوری رخ نخواهد داد.

مطابق شکل (۱۱)، در میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی این مطالعه، همانند میراگرهای معرفی‌شده توسط پارانسو و لیگنوس [۱۸] و ابراهیمی و میرقادر [۱]، هیچ‌گونه افتی در سختی و مقاومت محوری مهاربند بر اثر کماتش دیده نمی‌شود.



شکل ۱۰- مقایسه بین نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی پارانسو و لیگنوس [۱۸]: الف) پیکربندی میراگر پارانسو و لیگنوس ب) نمای میراگر شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ج) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

۶- نتایج تحلیل عددی

۶-۱- مقایسه رفتار هیستریزس دو سیستم مورد مطالعه

در شکل‌های (۱۱-الف) الی (۱۱-ج)، رفتار هیستریزس میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی با رفتار هیستریزس مهاربندهای همگرای متداول در سه سطح نیرویی مقایسه شده است. مطابق این شکل‌ها، مهاربندهای همگرای متداول با رسیدن به ظرفیت کششی و فشاری خود، به ترتیب تسلیم و کماتش خارج از صفحه را تجربه می‌کنند. به دلیل ایجاد مفاصل پلاستیک در مهاربندهای همگرا و گاست‌پلیت‌ها، این مهاربندها دچار افت مقاومت و سختی قابل‌توجهی می‌شوند. همچنین به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار و آسیب‌های سازه‌ای، مهاربندها و

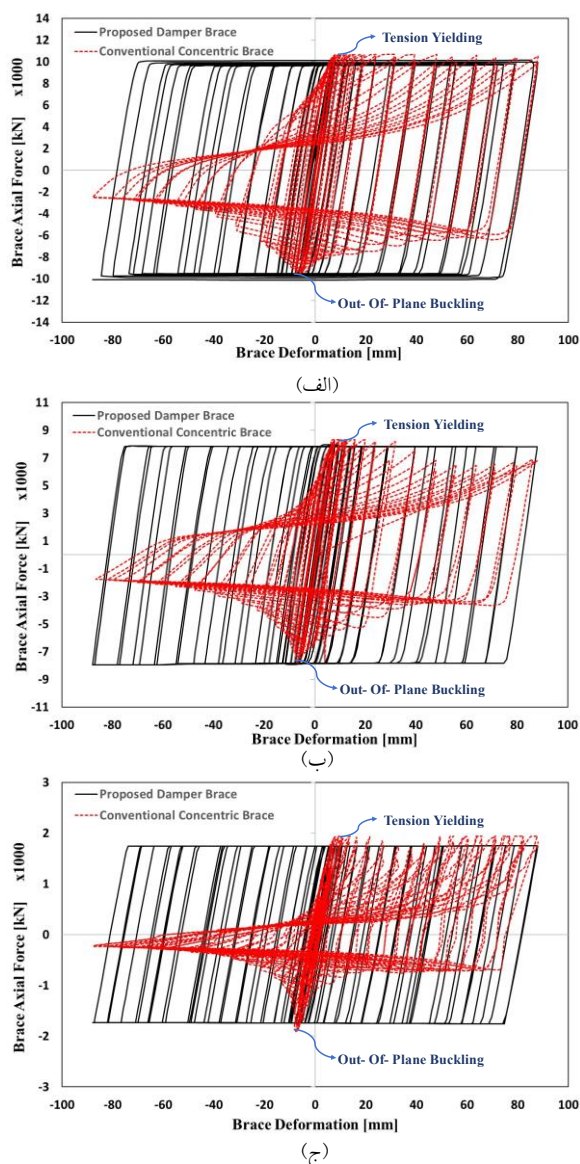
می توان نتیجه گرفت که هرچه ابعاد مقطع مهاربند کوچک تر و در نتیجه ضریب لاغری بزرگ تر باشد، مقدار کاهش در اتلاف انرژی بیش تر می شود. به عبارت دیگر هر چه ابعاد مقطع مهاربند کوچک تر باشد، مقدار درصد افزایش اتلاف انرژی بر اثر به کارگیری میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی افزایش می یابد.

جدول ۴- مقادیر اتلاف انرژی در شش مدل ساخته شده در نرم افزار

مقدار انرژی تلف شده			
مقطع	سیستم مهاربندی همگرای متداول		سیستم میراگر پیشنهادی
	مقدار افزایش اتلاف انرژی		
(mm.kN)	(mm.kN)	(mm.kN)	(%)
140×12	1560.8	4886.3	213.1
250×30	7567.3	16784.6	121.8
330×28	11012.8	20354.5	84.8
میانگین			139.9

۶-۳- مقایسه مقدار تنش در دو سیستم مورد مطالعه

تنش فون میسز^۱ مدل های مجهز به میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی و مدل های مهاربندی همگرای متداول در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۲)، مهاربندهای همگرای متداول در هر سه مقطع، کماتش خارج از صفحه را تجربه کرده اند. همچنین در وسط مهاربندها و ابتدای گاست پلیت ها مفاصل پلاستیک تشکیل شده و تغییر مکان های فرار تجمعی را تجربه کرده اند. مطابق شکل (۱۳)، میراگرهای اصطکاکی-لغزشی مطابق انتظار عمل کرده و در طی حرکات رفت و برگشتی دچار کماتش یا تسلیم نشده و هیچ گونه اعوجاج و تغییر مکان ماندگاری در آن ها ایجاد نشده است.



شکل ۱۱- مقایسه رفتار هیستریزس میراگر اصطکاکی-لغزشی با مهاربند همگرای متداول: (الف) مقطع 330×28 (ب) مقطع 250×30 (ج) مقطع 140×12

۶-۲- مقایسه مقدار انرژی تلف شده توسط دو سیستم مورد مطالعه

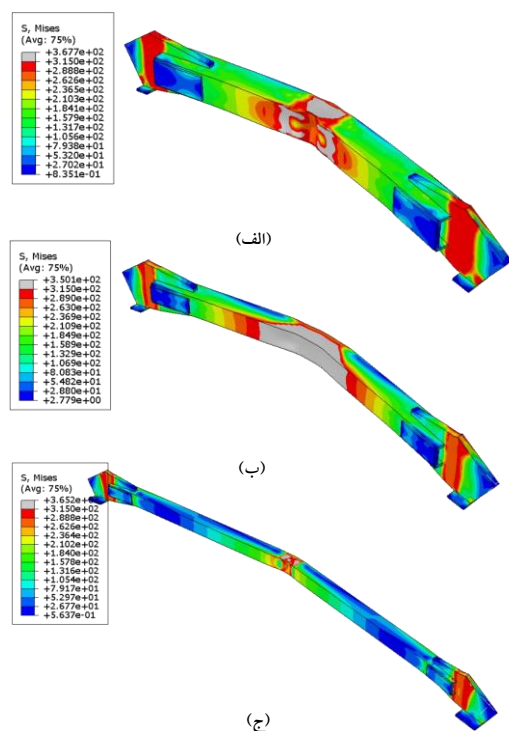
مقدار سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی هر عضو بیانگر مقدار انرژی تلف شده توسط آن است. جدول (۴) مقدار این انرژی را در شش مدل تحلیل شده در نرم افزار نشان می دهد. مطابق این جدول، با به کارگیری میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی به جای مهاربندهای همگرای متداول، مقدار اتلاف انرژی به صورت میانگین ۱۳۹/۹ درصد افزایش می یابد. همچنین با بررسی اتلاف انرژی مقاطع مختلف مهاربندهای همگرای متداول،

¹ von Mises

۴-۶- مقایسه کرنش معادل پلاستیک در دو سیستم مورد

مطالعه

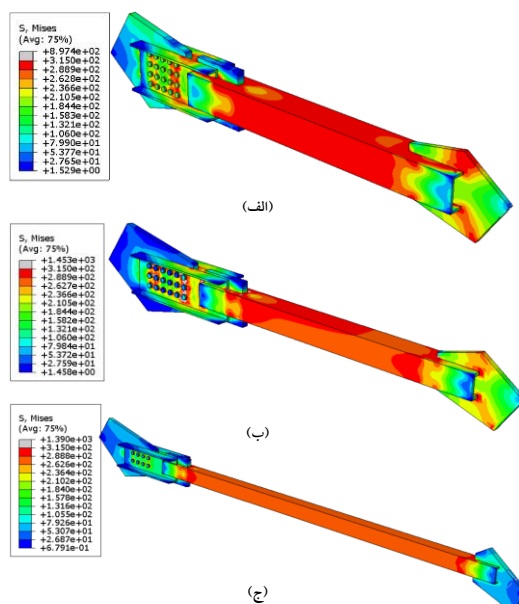
بر اساس مطالعات انجام شده توسط بوا^۱ و ویرزبکی^۲ [۲۸] و همچنین لی^۳ و ویرزبکی [۲۹]، سه محوریت تنش و میزان کرنش معادل پلاستیک (که در نرم افزار آباکوس با PEEQ نشان داده می شود)، دو عامل مهم در تشخیص شکست در سازه و اجزای آن می باشد. مطابق تحقیق انجام شده توسط کج باف و همکاران [۳۰]، شروع شکست در اجزا هنگامی اتفاق می افتد که میزان کرنش معادل پلاستیک در آن ها از حد ۱ فراتر رود. به همین دلیل، در این مطالعه، کرنش پلاستیک معادل به عدد ۱ محدود شد. شکل های (۱۴) و (۱۵)، کرنش معادل پلاستیک را در مدل های مجهز به مهاربندهای همگرای متداول و مدل های مجهز به میراگر اصطکاکی پیشنهادی نشان می دهند. در این شکل ها، نواحی خاکستری رنگ، نشان دهنده شکست است. نتایج نشان می دهند که مهاربندهای اصطکاکی-لغزشی دارای کرنش پلاستیک معادل کم تر از ۱ هستند یعنی هیچ گونه شکستی را تجربه نمی کنند. از سوی دیگر با دقت در نتایج کرنش پلاستیک معادل در مهاربندهای همگرای متداول می توان دریافت که این مهاربندها به صورت میانگین در تغییر شکل محوری؛ شکست و گسیختگی را تجربه می کنند. در واقع می توان این گونه بیان نمود که به دلیل وقوع شکست و گسیختگی در مهاربندهای همگرای متداول در تغییر شکل محوری کم تر و همچنین عدم وقوع شکست و گسیختگی در مهاربندهای اصطکاکی-لغزشی، مقایسه های انجام شده در این مطالعه محافظه کارانه بوده و میزان اتلاف انرژی در مهاربندهای همگرای متداول کم تر از مقدار بیان شده در این تحقیق است.



شکل ۱۲- تنش فون میسز مدل های مهاربندی همگرای متداول:

الف) مقطع 330×28 ب) مقطع 250×30

ج) مقطع 140×12



شکل ۱۳- تنش فون میسز مدل های مجهز به میراگر اصطکاکی-لغزشی

پیشنهادی: الف) مقطع 330×28 ب) مقطع 250×30

ج) مقطع 140×12

¹ Bao

² Wierzbicki

³ Lee

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف جلوگیری از کمناش مهاربند در حالت فشاری، افت در مقاومت و سختی و ایجاد آسیب‌های سازه‌ای، یک میراگر اصطکاکی-لغزشی جدید معرفی گردید. جهت ارزیابی عملکرد میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی و مقایسه آن با سیستم مهاربندی همگرای متداول، سه مقطع مهاربندی جعبه‌ای با ابعاد مختلف، یک بار به صورت میراگر اصطکاکی-لغزشی و یک بار به صورت مهاربند متداول طراحی و در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند. هر شش مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و نمودار هیستریزیس و مقدار اتلاف انرژی آن‌ها استخراج شد. نتایج بررسی مدل‌ها به شرح زیر است:

۱- مشابه با سایر تحقیقات انجام‌شده، در سیستم‌های

مهاربندی همگرای متداول، مهاربندها در حالت فشاری

و کششی، کمناش خارج از صفحه و تسلیم‌شدگی و

در نتیجه افت قابل‌توجه در مقاومت و سختی محوری

را تجربه می‌کنند. مشابه با نتایج مطالعه ابراهیمی و

میرقادر، با به‌کارگیری میراگر اصطکاکی-لغزشی

پیشنهادی، هیچ‌گونه کمناش، تسلیم، اعوجاج،

تغییرشکل‌های ماندگار و افت مقاومت و سختی در

مهاربند و دیگر اعضای سازه رخ نمی‌دهد.

۲- به دلیل تشکیل مفاصل پلاستیک و تغییرشکل‌های

ماندگار در سیستم مهاربندی همگرای متداول، پس از

تجربه زلزله‌های متوسط و شدید نیاز به تعویض و یا

تعمیر اعضای آسیب‌دیده وجود دارد که امری هزینه‌بر

است. این در صورتی است که در سیستم میراگر

اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، همه اعضا در حالت

الاستیک خود باقی مانده و هیچ‌گونه تغییرشکل ماندگار

و فراررتجاعی را تجربه نمی‌کنند.

۳- مقایسه منحنی‌های هیستریزیس میراگرهای

اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی با منحنی‌های هیستریزیس

مهاربندهای همگرای متداول نشان می‌دهد که

میراگرهای اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، برخلاف

مهاربندهای همگرای متداول، دارای رفتار هیستریزیس

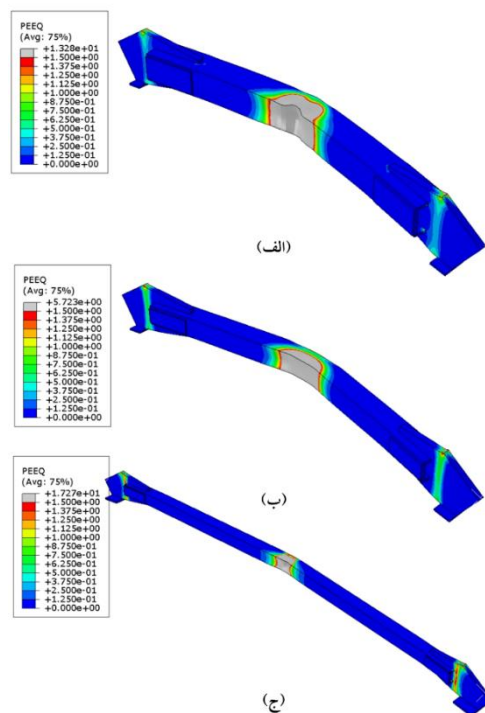
پایدار هستند و هیچ‌گونه افت مقاومت و سختی را

تجربه نمی‌کنند. در نتیجه، میراگرهای

اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی بعد از تجربه زلزله‌های

شدید و متوسط نیاز به تعویض یا تعمیر ندارند و فقط

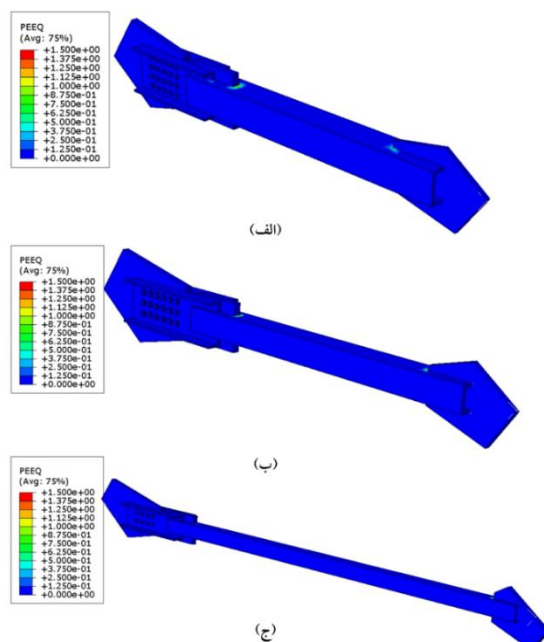
لازم است که پیچ‌ها یکبار باز و مجدداً بسته شوند.



شکل ۱۴- کرنش معادل پلاستیک مدل‌های مهاربندی همگرای متداول:

الف) مقطع 28×330 ب) مقطع 28×250

ج) مقطع 12×140



شکل ۱۵- کرنش معادل پلاستیک مدل‌های مجهز به میراگر

اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی: الف) مقطع 28×330 ب) مقطع 28×250

ج) مقطع 12×140

۴- با به کارگیری میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی، مقدار اتلاف انرژی به صورت میانگین ۱۳۹/۹ درصد افزایش می یابد. مقدار افزایش اتلاف انرژی در اثر به کارگیری میراگر معرفی شده توسط **ابراهیمی و میرقادرى**، برابر ۱۸۶ درصد بوده که نزدیک به مقدار به دست آمده در این مطالعه است.

۵- نتایج نشان می دهد که استفاده از میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی به جای مهاربندهای همگرای متداول در مهاربندهای با مقاطع عرضی کوچک تر و ضریب لاغری بزرگ تر، منجر به بهبود بیش تر ظرفیت اتلاف انرژی می شود.

لازم به ذکر است که نتایج این مطالعه، حاصل مطالعات عددی در مقیاس عضو بر روی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی می باشد. بدیهی است که به منظور بررسی کامل و جامع عملکرد لرزه ای میراگر پیشنهادی، ارزیابی رفتار آن در مقیاس سازه و انجام تحلیل های تاریخچه زمانی و پوش اور الزامی است. همچنین انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در مقیاس عضو و سازه، به بررسی بهتر عملکرد آن کمک شایانی می کند.

۷- پیشنهادها

جهت مطالعات آتی، موارد زیر پیشنهاد می گردند:

- ۱) انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در مقیاس عضو و سازه
- ۲) انجام مطالعات عددی بر روی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی در مقیاس سازه
- ۳) طراحی پیکربندی میراگر اصطکاکی-لغزشی پیشنهادی برای به کار بستن آن در آرایش مهاربندی ضربدری



- [14] Wu, B., Zhang, J., Williams, M.S., and Ou, J. (2005), "Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers", *Engineering Structures*, Vol. 27(8), pp. 1258-1267.
- [15] Fitzgerald, T.F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T. (1989), "Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections", *Earthquake Spectra*, Vol. 5(2), pp. 383-391.
- [16] Mualla, I.H., and Belev, B. (2002), "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", *Engineering Structures*, Vol. 24(3), pp. 365-371.
- [17] Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.J., and Lacerte, M. (2008), Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134(1), pp. 96-107.
- [18] Paronesso, M., and Lignos, D.G. (2021), "Experimental study of sliding friction damper with composite materials for earthquake resistant structures", *Engineering Structures*, Vol. 248, pp. 113063.
- [19] Samani, H.R., Mirtaheri, M., and Zandi, A.P. (2015), "Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 112, pp. 354-362.
- [20] Pardo-Varela, J., and De la Llera, J.C. (2015), "A semi-active piezoelectric friction damper", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 44(3), pp. 333-354.
- [21] Mirtaheri, M., Zandi, A.P., Samadi, S.S., and Samani, H.R. (2011), "Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers", *Engineering Structures*, Vol. 33(12), pp. 3647-3656.
- [22] Ghorbani, H.R., and Rofooei, F.R. (2020), "A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures", *Engineering Structures*, Vol. 225, pp. 111273.
- [23] Ebrahimi, S., Mirghaderi, S.R., and Zahrai, S.M. (2019), "Proposed design procedure for gusset plate dimensions and force distribution at its interfaces to beam and column", *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 554-572.
- [24] Mualla, I.H. (2000), "Parameters influencing the behavior of a new friction damper device", In *Smart Structures and Materials Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 3988, pp. 64-74.
- [25] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhosseini, S.M., and Zeighami, E. (2021), "Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper", In *Structures* Vol. 32, pp. 2073-2087.
- [26] Golondrino, J.C., MacRae, G., and Clifton, C. (2012), "Behaviour of asymmetrical friction connections using different shim materials", In *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*.
- [1] Ebrahimi, S., and Mirghaderi, S.R. (2023), "A new friction-slip brace damper to improve seismic performance of braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 207, pp. 107945.
- [2] Ebrahimi, S. (2019), "Numerical and Experimental Investigation on Load Transfer Mechanism at Brace Connection of Frames with Hollow Structural Section (HSS) and Concrete-Filled Tube (CFT) Columns", (Doctoral dissertation. University of Tehran).
- [3] Ebrahimi, S., Mirghaderi, S.R., and Zahrai, S.M. (2022), "Cyclic Behavior of SCBFs with Through-Gusset Plate Connections and Concrete-Filled Tube Columns", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 26(8), pp. 3885-3913.
- [4] Ebrahimi, S., Zahrai, S.M., and Mirghaderi, S.R. (2019), "Numerical study on force transfer mechanism in through gusset plates of SCBFs with HSS columns and beams", *Steel and Composite Structures, An International Journal*, Vol. 31(6), pp. 541-558.
- [5] Fell, B.V., Kanvinde, A.M., and Deierlein, G.G. (2010), "Large-Scale testing and simulation of earthquake-induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling", *University of California, Davis*.
- [6] Pall, A.S., and Marsh, C., Fazio, P. (1980), "Friction joints for seismic control of large panel structures", *Journal of Prestressed Concrete Institute*, Vol. 25(6), pp. 38-61.
- [7] Pall, A.S., and Marsh, C. (1981), "Friction-damped concrete shearwalls", *Journal Proceedings*, vol. 78, No. 3, pp. 187-193.
- [8] Pall, A.S., and Marsh, C. (1982), "Response of friction damped braced frames", *Journal of the Structural Division*, Vol. 108(6), pp. 1313-1323.
- [9] Pall, A.S. and Pall, R. (1996), "June. Friction-dampers for seismic control of buildings—a Canadian experience", In *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.
- [10] Pall, A.S., and Pall, R. (1993), "March. Friction-dampers used for seismic control of new and existing buildings in Canada", In *Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, pp. 675-686.
- [11] Pall, A., Vezina, S., Proulx, P., and Pall, R. (1993), "Friction-dampers for seismic control of Canadian space agency headquarters", *Earthquake Spectra*, Vol. 9(3), pp. 547-557.
- [12] Vezina, S., Proulx, P., Pall, R., and Pall, A. (1992), "Friction-dampers for aseismic design of Canadian Space Agency", In *10th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 4123-4128.
- [13] Pall, A.S. (1983), "Friction devices for aseismic design of buildings", In *4th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, pp. 475-484.



- [27] Fell, B.V. (2008), "Large-scale testing and simulation of earthquake-induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling", University of California, Davis.
- [28] Bao, Y., and Wierzbicki, T. (2004), "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46(1), pp. 81-98.
- [29] Lee, Y.W., and Wierzbicki, T. (2004), "Quick fracture calibration for industrial use", *Massachusetts Institute of Technology, Impact and Crashworthiness Laboratory Report*, (115).
- [30] Al Kajbaf, A., Fanaie, N., and Najarkolaie, K.F. (2018), "Numerical simulation of failure in steel posttensioned connections under cyclic loading", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 91, pp. 35-57.
- [31] Gugerli, H., and Goel, S.C. (1980), "LARGE SCALE TESTS FOR THE HYSTERESIS BEHAVIOR OF INCLINED BRACING MEMBERS I II".
- [32] Zayas, V.A., Popov, E.P., and Mahin, S.A. (1980), "Cyclic inelastic buckling of tubular steel braces. University of California", *Earthquake Engineering Research Center*.