

بررسی عددی میراگر دوسطحی با ورق روسری در اتصال خمشی تیر به ستون

هادی عسگری^۱، سیدمهدی زهرائی^{۲*}، مهدی وجدیان^۳، سیدمحمد میرحسینی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز

۴- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

* تهران، صندوق پستی، ۴۵۶۳۱۲-۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

زلزله‌های گذشته با تحمیل خسارت‌های زیاد، بیانگر ضعف عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در محل اتصال تیر به ستون بوده و کاربرد قطعاتی مثل میراگرهای اصطکاکی و جاری‌شونده جهت استهلاک انرژی زلزله و کاهش ارتعاشات ناشی از آن، به یکی از ضرورت‌های مهندسی عمران تبدیل گردیده است. سیستم‌های کنترل غیرفعال چندسطحی یکی از مواردی است که در دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. ایده کلی در سیستم‌های مذکور، ترکیب دو سیستم کنترل غیرفعال با سختی متفاوت بوده که تحت نیروهای با شدت مختلف، موجب تغییر در مشخصات سیستم و بروز رفتارهای متفاوت تحت سطوح انرژی است. در این تحقیق در ابتدا یک سیستم کنترل دوسطحی با میراگر غیرفعال اصطکاکی-جاری‌شونده در ورق روسری در محل اتصال گیردار تیر به ستون، با قابلیت جذب انرژی و تغییر سختی در سطوح متفاوت زلزله، جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها ارائه گردیده و با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج ارزیابی، بهبود عملکرد نمونه‌های تحلیلی با نسبت بهینه طول به ضخامت ورق روسری بوده و افزایش پایداری و مساحت زیر منحنی‌های هیستریزس و به تبع آن افزایش استهلاک انرژی از اثرات آن است. مقایسه منحنی‌های هیستریزس میراگر پیشنهادی در محل اتصال گیردار، گویای رفتار شکل‌پذیر با عملکرد دوسطحی مناسب مطابق انتظار بوده و اتلاف انرژی در سطوح مختلف نیرویی را به خوبی فراهم آورده است، طوری که ضوابط طرح لرزه‌ای برای اتصال خمشی ویژه را بر اساس آیین‌نامه AISC تأمین می‌کند. همچنین میراگر پیشنهادی به‌عنوان عضو مستهلک‌کننده انرژی در سطوح مختلف زلزله، باعث جذب انرژی شده و با تحمل لغزش و تسلیم، قادر به کنترل لرزه‌ای سازه خواهد بود.

واژگان کلیدی

کنترل دوسطحی، میراگر اصطکاکی-جاری‌شونده، ورق روسری، شکل‌پذیری، تحلیل استاتیکی غیرخطی

Numerical Analysis of a Two-Level Friction Damper with a Cover Plate in the Beam-to-Column Moment Connection

Hadi Asgari, Seyed Mehdi Zahrai*, Mehdi Vajdian, S. Mohammad Mirhosseini

Abstract

In previous earthquakes, many steel frames suffered damage to their ordinary rigid moment beam-to-column connections. As a result, the use of multi-level control systems in structures has gained attention from engineers in recent years. The main idea in this system is to combine two separate control systems with different stiffness and strength, thus creating dual seismic behaviors. In this study, a two-level friction-yielding damper passive control system is presented for beam-to-column connections, and its cyclic behavior is evaluated using nonlinear static analysis with the finite element method using ABAQUS software. The evaluation results demonstrate that the performance of the samples improves with an optimal ratio of length to thickness. This improvement is reflected in increased stability and area of the hysteresis curves, ultimately leading to higher energy absorption. Additionally, the hysteresis curves indicate a ductile behavior for the proposed damper in the moment connection. Moreover, the obtained hysteresis curves show that the system reliably dissipates energy at different earthquake levels, satisfying the seismic criteria for special moment resistant connections based on the AISC code. The proposed damper serves as an energy dissipating device, effectively dissipating energy at different levels of earthquakes by facilitating slip and yielding, thereby controlling the seismic response of the structure.

Keywords

two-level control system, friction-yielding damper, Top plates, ductility, nonlinear static analysis

۱- مقدمه

در زلزله‌های گذشته، تعداد زیادی از ساختمان‌های فولادی با اتصالات معمول و رایج در آن زمان، به‌گونه‌ای که اتصال مستقیم تیر به ستون با جوش صورت می‌گرفت، متحمل آسیب شدند. بررسی سازه‌های آسیب‌دیده، نشان از عملکرد ضعیف این سازه‌ها از نظر شکل‌پذیری و اتلاف انرژی داشت و موارد مختلفی از شکست ترد در اتصالات تیر به ستون در قاب خمشی فولادی ناشی از ظرفیت کم چرخش پلاستیک تیر مشاهده گردید. به دلیل وقوع خرابی و آسیب‌های زیاد به اعضای سازه‌ای به‌خصوص در محل اتصالات، ارائه راهکارهای مناسب جهت بهبود شکل‌پذیری در محل اتصالات خمشی، مورد توجه محققین قرار گرفت. در سال‌های اخیر رویکرد طراحی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که استهلاک انرژی در فاصله‌ای مناسب از بر ستون توسط تیر انجام شود یا این که خرابی در قطعات الحاقی در محل اتصال تیر به ستون اتفاق بیفتد. طی مطالعات انجام‌شده که منجر به تشکیل مفصل پلاستیک در تیر به فاصله‌ای مناسب از بر ستون می‌شود، عمدتاً برش در قسمتی از بال و جان تیر [۱ و ۲]، ایجاد سوراخ در بال فوقانی و تحتانی تیر [۳]، سوراخ‌کاری در بال تیر و جدا کردن بال از جان [۴]، ایجاد جان چین‌دار و جان دایره‌ای در فاصله از ستون [۵ و ۶]، کاهش نقطه تسلیم فولاد در تیر به‌صورت موضعی در نزدیکی اتصال آن به ستون توسط حرارت [۷] انجام می‌شود.

روش‌های ذکرشده اگرچه باعث کنترل خرابی و تأمین پایداری سازه‌ها در هنگام زلزله می‌شود ولیکن خسارت متحمل‌شده متمرکز بر روی تیر به‌عنوان عضو سازه‌ای خواهد بود. در این خصوص نیز راه‌حلی توسط محققین ارائه شده است. استفاده از میراگرها در اتصالات، یکی از روش‌های کنترل سازه‌ای غیرفعال است که معمولاً به‌عنوان یکی از روش‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای در سازه‌های موجود نیز استفاده می‌شود. این میراگرها به گروه‌های مختلف جاری‌شونده، اصطکاکی و ویسکوز طبقه‌بندی می‌شوند.

استفاده از میراگرهای جاری‌شونده در محل اتصال گیردار تیر به ستون، باعث استهلاک انرژی توسط این قطعات الحاقی شده و از طرفی میزان انرژی تلف‌شده توسط عناصر سازه‌ای نیز کاهش می‌یابد. استفاده از این سیستم‌های کنترل غیرفعال در محل اتصال

تیر به ستون اولین بار توسط اوه^۱ و همکاران انجام شد. آن‌ها سه نمونه تمام‌مقیاس را مورد آزمایش قرار دادند. ارزیابی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان از عملکرد ایده‌آل این نوع سیستم در محل اتصال داشت [۸]. صفری و همکاران این نوع سیستم را با ساختاری متفاوت نسبت به حالت قبلی در محل اتصال تیر به ستون معرفی کردند و رفتار چرخه‌ای را با مطالعه اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۹]. کوکن^۲ و همکاران اتصال تیر به ستون فولادی با استفاده از میراگر شکاف‌دار را مورد بررسی آزمایشگاهی و اجزای محدود قرار دادند [۱۰]. واسدراولیس^۳ و همکاران اتصال پیش‌تینده تیر به ستون فولادی با استفاده از میراگرهای تسلیمی در جان تیر را تحت بارگذاری چرخه‌ای به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۱۱].

سیوندی و همکاران نوع جدیدی از میراگرهای جاری‌شونده را در اتصالات قاب خمشی فولادی، مورد ارزیابی عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان از عملکرد مطلوب میراگر پیشنهادی در محل اتصال صلب تیر به ستون دارد [۱۲]. ایزدی نیا و همکاران رفتار چرخه‌ای اتصال تیر به ستون فولادی را با استفاده از میراگر میله‌ای فولادی تسلیم شونده در برش، مورد بررسی اجزاء محدود و آزمایشگاهی قرار دادند [۱۳].

معیارهای طراحی که در سیستم‌های میراگر جاری‌شونده استفاده می‌شوند، مبتنی بر مقاومت هستند که هدف آن‌ها افزایش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی با اعمال تغییر شکل پلاستیک، یعنی آسیب، در میراگر است. با این حال، دلایل رفاهی و اقتصادی اخیراً محققان و طراحان را به سمت سیستم‌هایی سوق داده است که می‌توانند در برابر حرکات شدید زمین، با آسیب کم یا بدون آسیب مقاومت کنند. استفاده از میراگرهای اصطکاکی راه‌حلی مناسب برای کاهش آسیب در سازه‌ها هستند، به‌طوری که انرژی ورودی به سازه از طریق اصطکاک مستهلک شود.

اولین بار استفاده از میراگر اصطکاکی در سیستم قاب خمشی توسط گریگوریان^۴ و همکاران انجام شد [۱۴]. استفاده از میراگرهای اصطکاکی در ناحیه اتصال گیردار تیر به ستون نخستین بار در نیوزلند انجام گرفت. در این اتصالات، میراگر اصطکاکی به وسیله پیچ و صفحات اصطکاکی در بال پایین تیر قرار گرفت. رفتار این سیستم عمدتاً بر اساس مکانیزم اصطکاک نامتقارن است.

² Köken³ Vasdravellis⁴ Grigorian¹ Oh

این نوع اتصال توسط محققان انجمن تحقیقاتی مهندسی نیوزلند توسعه داده شد [۱۵-۲۱]. در اروپا نوع متفاوت و جدیدتری از میراگرهای اصطکاکی در محل اتصال صلب تیر به ستون در نظر گرفته شده است [۲۲-۲۴]. طراحی این نوع اتصالات بر پایه مکانیزم متقارن اصطکاک است. چیدمان اتصالات اصطکاکی اروپایی به سادگی اتصال نیوزلندی نیست، اما به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ساخت و نصب اجزای میراگر را به‌عنوان یک بخش جداگانه فراهم کنند.

تفاوت اصلی اتصالات اروپایی نسبت به اتصالات نیوزلندی، نوع مکانیزم اصطکاک است؛ در واقع اتصالات نیوزلندی بر اساس مکانیزم اصطکاک نامتقارن است درحالی‌که اتصالات اروپایی بر اساس مکانیزم اصطکاک متقارن طراحی شده‌اند. اتصالات اصطکاکی نامتقارن در آزمایشگاه و همچنین در ساختمان‌های واقعی که در معرض زلزله‌های قوی در نیوزلند قرار گرفته‌اند، به‌طور گسترده تجزیه و تحلیل و آزمایش شدند که نتایج آن‌ها، عملکرد مطلوب این نوع اتصالات را نشان می‌دهد [۲۵-۲۸].

در اروپا اخیراً دو نوع اتصال اصطکاکی متقارن برای طراحی لرزه‌ای به‌کار برده می‌شود. در نوع اول اتصال، سطح اصطکاک به‌صورت عمودی و در نوع دوم سطح اصطکاک به‌صورت افقی تنظیم شده است که در هر دو اتصال، میراگر به وسیله پیچ به بال ستون و بال تیر متصل می‌شود [۲۹]. مطالعات عددی و آزمایشگاهی در اتصالات مذکور نشان از رفتار مطلوب با پاسخ چرخه‌ای مناسب دارد [۳۰].

میراگرهای ویسکوز نیز یکی دیگر از سیستم‌های کنترل غیرفعال است که بخش بزرگی از انرژی ورودی به سازه را جذب کرده و سبب می‌شود که تقاضای استهلاک انرژی روی المان‌های سازه‌ای کاهش یافته و در نتیجه خرابی به حداقل برسد.

سیستم‌های کنترل غیرفعال چندسطحی یکی از مواردی است که در دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته و در سازه‌ها استفاده می‌شود. ترکیب دو سیستم کنترل غیرفعال دارای سختی متفاوت، ایده اصلی در این‌گونه سیستم‌ها بوده که عملاً تحت نیروهای مختلف، موجب تغییر مشخصات سیستم و بروز رفتارهای متفاوت تحت سطوح انرژی می‌شود.

میراگرهای اصطکاکی که برای استهلاک انرژی در سازه مخصوصاً در مقابل زلزله‌های خفیف و متوسط و نیز بار باد به‌کار گرفته می‌شوند، با ایجاد حلقه‌های هیستریزس مستطیلی شکل نسبت به استهلاک انرژی ورودی به سازه، وارد عمل شده و

همچنین رفتار این میراگر تا حدود زیادی حساس به تعدد سیکل‌های بار یا تغییرات دمای محیط نبوده و مقاومت بالایی در برابر خستگی از خود نشان می‌دهد. همچنین میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده با دارا بودن مزایایی همچون عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، چرخه‌های هیستریزس پایدار، سهولت نصب و تعویض آن پس از زلزله، عدم حساسیت به تغییرات دمای و قیمت ارزان آن مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. ضمن آن که امکان توسعه و تحقیق بیش‌تر بر روی این میراگرها در اغلب کشورها به‌علت عدم نیاز به مواد خاص یا تکنولوژی‌های طراحی و ساخت پیچیده، وجود خواهد داشت.

زهرائی و همکاران سیستم کنترل دوسطحی با استفاده از ترکیب تیر پیوند قائم و المان زانویی را مورد بررسی قرار دادند. تحت نیروهای خفیف زلزله، مفاصل پلاستیک بر روی تیر پیوند قائم تشکیل شده که استهلاک انرژی را در سطح اول انجام داده و با افزایش نیروی زلزله، تغییرشکل‌های پلاستیک المان زانویی سبب افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بیش‌تر سیستم می‌گردد [۳۱]. **هاشمی و همکاران** یک سیستم کنترل دوسطحی را در قاب با استفاده از میراگرهای اصطکاکی و صفحات جاری‌شونده مثلی پیشنهاد داده‌اند. با غلبه نیروی لغزش بر اصطکاک بین سطوح، در سطح اول در زلزله‌های خفیف و متوسط، استهلاک انرژی انجام گرفته است؛ با افزایش نیروی زلزله میراگر جاری‌شونده وارد عمل شده و در سطح دوم در زلزله‌های شدید نقش خود را ایفا می‌کند [۳۲].

تحقیقاتی از این دست جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای و شکل‌پذیری سیستم‌های سازه‌ای همواره در حال انجام بوده است. استفاده از سیستم‌های کنترل دوسطحی در محل اتصال گیردار تیر به ستون تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد لرزه‌ای میراگر دوسطحی با استفاده از میراگر اصطکاکی و میراگر جاری در محل اتصال صلب تیر به ستون پرداخته خواهد شد.

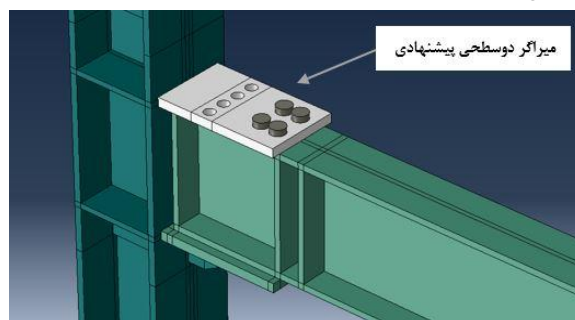
۲- دیدگاه کلی تحقیق

نیاز به افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی سازه‌ها و همچنین کنترل خرابی امری بدیهی است که در این پژوهش به معرفی و بررسی رفتار یک سیستم کنترل غیرفعال با قابلیت تغییر سختی و جذب انرژی در محل اتصال گیردار تیر به ستون، در سطوح مختلف زلزله پرداخته شده است. این سیستم از ترکیب سری دو میراگر اصطکاکی



و جاری‌شونده تشکیل یافته و طراحی آن به‌گونه‌ای است که در حین وقوع سطوح مختلف زلزله، سیستم اتصال قادر به تغییر سختی سازه بوده و به‌صورت چندسطحی عمل نماید. تحت زلزله‌های خفیف که سازه درصد کوچکی از تغییرمکان جانبی نسبی بهره‌برداری را متحمل می‌شود، میراگر اصطکاکی با نیروی لغزش، بخشی از مقاومت لازم جهت بارهای سرویس را کاهش داده و با افزایش جابه‌جایی ارتعاشات، میراگر جاری‌شونده نیز وارد عمل شده و با ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک در خود، سطح استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد. با طراحی بهینه و قرار دادن قطعات میراگر در محل اتصال، می‌توان قسمت بزرگی از اتلاف انرژی را به این قطعات اختصاص داد که به دنبال آن خسارت‌های وارده به اعضای اصلی کاهش می‌یابد.

ایده اصلی میراگر پیشنهادی به‌صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، میراگر مذکور از ترکیب سری دو میراگر اصطکاکی و جاری‌شونده تشکیل شده است.



شکل ۱- میراگر دوسطحی پیشنهادی

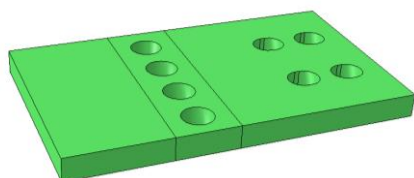
با اعمال دوران، میراگر اصطکاکی در مرحله اول وارد عمل شده و به‌واسطه غلبه نیروی لغزش بر اصطکاک بین صفحات ورق روسری و بال فوقانی تیر، موجب استهلاک انرژی می‌گردد. با افزایش نیرو و در نتیجه طی کردن طول لغزش، میراگر سطح دوم یعنی ورق جاری‌شونده روسری وارد عمل شده و با تسلیم‌شدگی محوری باعث استهلاک انرژی می‌شود. لازم به ذکر است که ابعاد ورق روسری جاری‌شونده از لحاظ تئوری دارای محدودیت نبوده و با افزایش یا کاهش مدولار آن‌ها، امکان طراحی یک سیستم کنترل غیرفعال دوسطحی در محل اتصال تیر به ستون وجود دارد، اما طول لغزش در میراگر سطح اول با توجه به دررفت مجاز طبقه در سیستم قاب خمشی ویژه در وضعیت ایمنی، مطابق با آیین‌نامه FEMA 356 (2000) در نظر گرفته شده است. علاوه بر این جهت جلوگیری از کماتش ورق روسری تحت نیروی فشاری و افزایش شکل‌پذیری، مطالعه‌ای پارامتریک انجام شده که در ادامه

مناسب‌ترین نسبت‌های عددی جهت طراحی ورق روسری ارائه خواهد شد. انتخاب صحیح نسبت‌های مذکور از مراحل تأثیرگذار بوده، به‌طوری که در صورت کاهش سختی میراگر جاری‌شونده از حد بهینه، با انعطاف‌پذیری بیش از حد مقطع، موجب کماتش ورق روسری تحت نیروی فشاری می‌شود که افت عملکرد سیستم را به دنبال دارد و در صورت افزایش سختی میراگر جاری‌شونده از حد بهینه، عملاً اتصال پیشنهادی مؤثر نبوده و مفصل پلاستیک قبل از تشکیل در ورق جاری‌شونده، در تیر اتفاق می‌افتد. در صورت طراحی مناسب انتظار می‌رود میراگر نقش فیوز را داشته و شکل‌پذیری مناسبی را از خود نشان دهد.

۳- معرفی اجزا و قطعات اتصال پیشنهادی

۳-۱- میراگر اصطکاکی

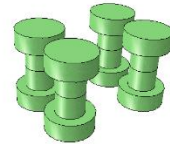
همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود ۴ عدد سوراخ لوبیایی با طول لغزش بهینه طراحی گردیده است. طول لغزش متناسب با دررفت مجاز طبقه در سیستم قاب خمشی ویژه، در وضعیت ایمنی مطابق با آیین‌نامه FEMA 356 جدول C1-3، معادل با یک درصد ارتفاع طبقه در نظر گرفته شده است. بین ورق روسری و بال فوقانی تیر، هیچ صفحه اضافه‌ای قرار نگرفته و صرفاً اصطکاک فولاد روی فولاد مدنظر است. ضریب اصطکاک ۰/۵۵ مطابق با کارهای آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است [۳۳-۳۵].



شکل ۲- نمای میراگر اصطکاکی

همچنین تعداد پیچ‌های مورد استفاده ۴ عدد می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است، پیچ‌ها از نوع M16 و گرید اسمی ۱۰.۹ طبق ISO standard [ISO, 2009] هستند. نوع، قطر و تعداد پیچ‌ها متناسب با مقاومت خواسته‌شده در نظر گرفته شده‌اند. سوراخ‌کاری با اثر لقی ۲ میلی‌متر در بال فوقانی تیر برای قرارگیری پیچ‌ها لحاظ شده است. جهت جلوگیری از تمرکز تنش در پیچ‌ها و عدم تسلیم‌شدگی پیچ‌ها و همچنین سادگی کار، سر پیچ‌ها قدری بزرگ‌تر از اندازه واقعی ساخته شده‌اند تا در عمل نقش واشر را نیز ایفا کنند.

بستگی دارد ولی با وجود همه این مشکلات، رابطه (۱) بهترین تئوری موجود برای میراگرهای اصطکاکی است.



شکل ۳- پیچ‌های میراگر اصطکاکی

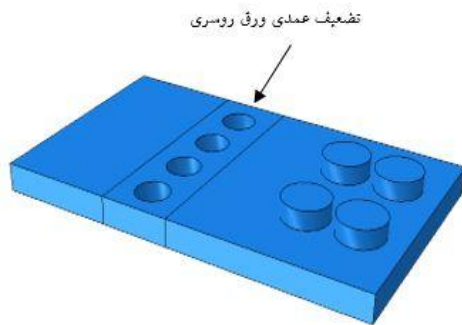
۳-۱-۲ محاسبه نیروی لغزش در اتصالات پیچی اصطکاکی
در اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی با توجه به تعداد سطوح لغزش خواهیم داشت:

$$F = n \cdot T_b \cdot N \cdot \mu \quad (2)$$

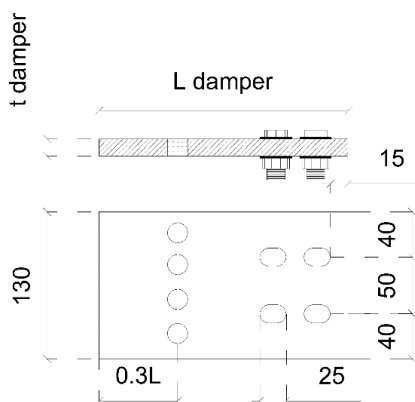
که در آن N تعداد پیچ‌ها، T_b نیروی پیش‌تندگی در یک پیچ، μ ضریب اصطکاک و n تعداد سطوح لغزش است.

۳-۲- میراگر جاری‌شونده

همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد، میراگر جاری‌شونده همان ورق روسری در اتصال گیردار تیر به ستون است که با تسلیم‌شدگی محوری نقش فیوز سطح دوم را ایفا می‌کند. بر روی ورق روسری سوراخ‌هایی برای ضعیف کردن ورق در فاصله‌ای مناسب از بر ستون به میزان 0.3 طول ورق روسری مطابق با شکل (۶) قرار گرفته که بتواند با کاهش سختی ورق مذکور، پلاستیک‌شدگی را قبل از تشکیل در تیر، در ورق ایجاد کند.



شکل ۵- نمای میراگر دوسطحی پیشنهادی



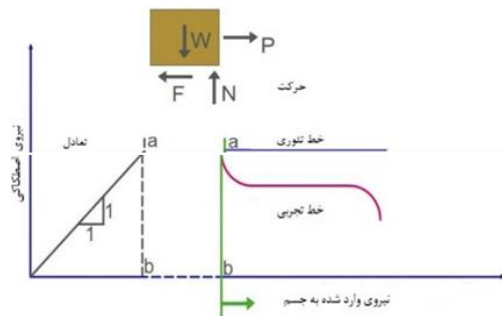
شکل ۶- جزئیات میراگر دوسطحی پیشنهادی

۳-۱-۱ تئوری میراگرهای اصطکاکی

بر اساس قوانین حاکم بر اصطکاک خشک، در لحظه شروع یا در طی لغزش رابطه زیر برقرار است:

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

که در آن F معرف نیروهای اصطکاکی، N بیانگر نیروی عمودی بوده و μ ضریب اصطکاک است. به عبارت دیگر با توجه به شکل (۴)، هنگامی که نیروی جانبی p به یک جسم وارد شود، با افزایش نیرو بیش از نیروی اصطکاک، جسم به صورت ناگهانی شروع به حرکت می‌کند. حرکت جسم و نیروی اصطکاک موجود بین سطوح، باعث تولید انرژی گرمایی در سطح بین دو جسم می‌شود. از آنجا که چندین بار مشاهده شده است ضریب اصطکاک تا حدی در هنگام شروع لغزش از حالت در حین لغزش بیش‌تر است، معمولاً ضریب اصطکاکی μ_s و ضریب جنبشی μ_k معرفی می‌شوند. در هر صورت نیروی اصطکاک به صورت مماس در سطح مشترک صفحه در جهت مخالف حرکت می‌کند. رابطه (۱) به عنوان تئوری کولمب هم شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که فرآیندهای اصطکاکی اغلب به این سادگی نیستند و در عمل تئوری کولمب تنها به صورت تقریبی واقعی است. به عنوان مثال، ضریب اصطکاک μ در هر لحظه علاوه بر ماده لغزشی، به شرایط حاضر در فصل مشترک دو سطح نیز وابسته است.

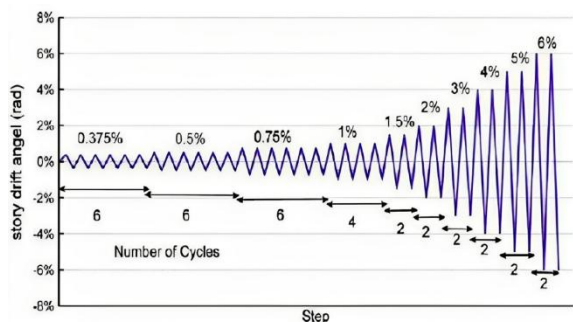


شکل ۴- رابطه نیروی اصطکاکی با نیروی عمود بر سطح

مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی میراگرهای اصطکاکی نشان می‌دهد ضریب اصطکاک به عواملی از جمله فشار تماس، سرعت لغزش، دما، تعداد چرخه‌های بارگذاری و ...



که در Step اول بارگذاری پیچ‌ها و در Step دوم اعمال تغییر مکان به سیستم انجام شده است. شرایط مرزی در مدل‌های عددی به صورت مفصل در بالا و پایین ستون فرض شده است. همچنین الگوی بارگذاری مطابق با بارگذاری عملی به روش کنترل تغییر مکان بر طبق پیشنهاد FEMA-350 مطابق شکل (۸) انجام گرفته است.



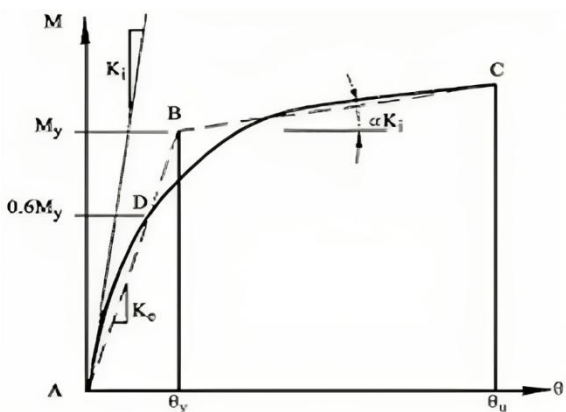
شکل ۸- پروتکل بارگذاری چرخه‌ای مطابق FEMA-350

۴-۲- مصالح به کار رفته در تحلیل

فولاد به کار رفته در مدل‌سازی‌های عددی برای تیر و ستون و ورق‌ها از نوع ST37 و برای پیچ‌ها از کلاس 10.9 با مشخصات موجود در جدول (۱) است. مصالح مورد استفاده به صورت غیرخطی مدل‌سازی و گزینه سخت‌شوندگی کینماتیکی فعال گردیده است. نمودار رفتار فولاد مورد استفاده در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول ۱ - مشخصات فولاد مصرفی

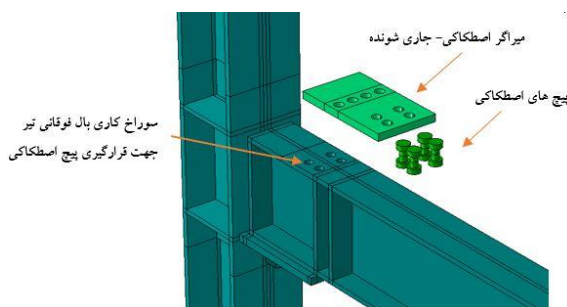
نسبت پواسون	چگالی (kg/m^3)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مقطع
۰.۳	۷۸۵۰	۳۷۰	۲۰۰۰۰۰	۲۴۰	تیر-ستون
۰.۳	۷۸۵۰	۱۰۵۰	۲۰۰۰۰۰	۹۵۰	پیچ‌ها



شکل ۹- خصوصیات فولاد مورد استفاده

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، میراگر اصطکاکی با استفاده از ۴ پیچ پر مقاومت درون میراگر جاری‌شونده قرار گرفته و موجب رفتار مرکب آن‌ها و مشارکت در توزیع نیروی جانبی تحت لنگرهای کششی و فشاری ناشی از اتصال خواهد بود.

جهت مشاهده بهتر مکانیزم رفتاری میراگر پیشنهادی در اتصال، نمای کامل آن در شکل (۷) ترسیم گردیده است. در ابتدا دو میراگر کاملاً از هم مستقل بوده و با اعمال تغییر مکان، تنها میراگر اصطکاکی بعد از غلبه نیروی لغزش بر اصطکاک بین سطوح فولادی ورق روستری و بال فوقانی تیر، وارد عمل شده و اصطکاک بین سطوح ذکر شده باعث استهلاک انرژی خواهد شد. افزایش تغییر مکان و در نتیجه دوران بیش‌تر اتصال، سبب طی شدن کامل طول لغزش توسط پیچ‌ها شده و در ادامه ورق جاری‌شونده روستری با ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در خود، باعث استهلاک انرژی بیش‌تر می‌شود. نکته حائز اهمیت در تعیین طول لغزش مناسب در سطح اصطکاک و سطح مقطع سوراخ‌های تضعیف‌کننده ورق جاری‌شونده، در محدوده رفتار مناسب هر کدام از میراگرها نهفته است به طوری که قبل از وقوع خرابی عمده در بال تیر، باید ورق روستری جاری‌شونده وارد عمل شده و با افزایش سختی، رفتار مرکب هر دو میراگر و وقوع کرنش‌های پلاستیک در ورق روستری موجب استهلاک انرژی گردد.



شکل ۷- نمای کامل میراگر دوسطحی پیشنهادی در اتصال

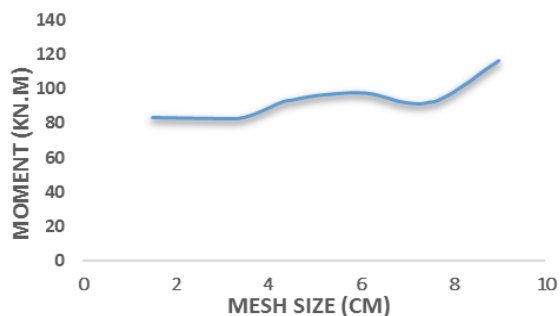
۴-۱- مدل‌سازی عددی

۴-۱-۱- شرح روش اجزای محدود

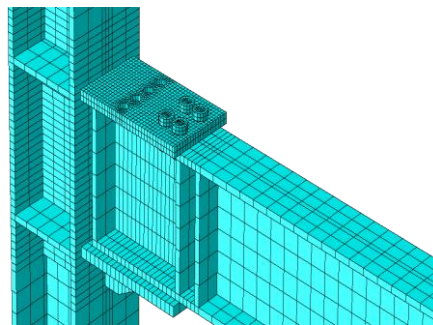
در این بخش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus و انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه‌بعدی، رفتار میراگر دوسطحی پیشنهادی در اتصال گیردار تیر به ستون مورد بررسی قرار خواهد گرفت. حلگر مورد استفاده abaqus/standard و المان‌ها از نوع Solid بوده و تحلیل در دو Step مجزا انجام شده،

۳-۴- مش بندی بهینه

برای انتخاب ابعاد بهینه مش، تحلیل حساسیت مش بندی انجام شده و مش ها در مدل به یک اندازه تغییر سایز داده شدند. مش بندی هر بخش متناسب با اهمیت و شدت تنش وارده به صورت جداگانه انجام گرفته به طوری که در محل چشمه اتصال و نواحی اطراف آن از مش بندی با سایز کوچکتری استفاده شده است. لذا جهت اطمینان بیشتر، مش بندی ورق روسری و پیچ ها با سایز کوچکتر مش لحاظ شده است. شکل (۱۰) نتایج به دست آمده برای لنگر-سایز مش ورق روسری، در محل اتصال صلب تیر به ستون برای یکی از مدل های پیشنهادی را نشان می دهد. در نمودار مشخص است با انتخاب ابعاد مش کوچکتر از ۳ سانتی متر، نتایج تغییر پیدا نمی کند. در نهایت جهت اطمینان، ابعاد مش در ورق روسری و پیچ ها ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- الف) تحلیل حساسیت مش، ب) مش بندی المان

۴-۴- طراحی مدل استاندارد

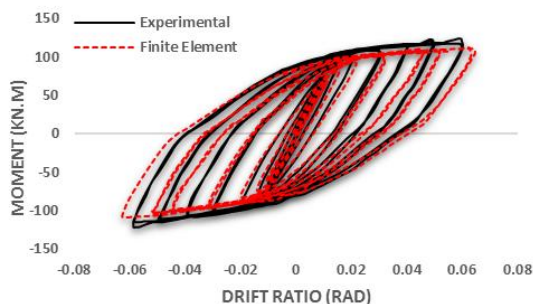
برای ستون و تیر به ترتیب پروفیل معادل IPB160 و پروفیل IPE220 در نظر گرفته شده است. حداکثر نیرو و لنگرهای قابل تحمل برای این اتصال به دست آمده و بر آن اساس، طراحی برای قطر و تعداد پیچ ها لحاظ شده است، همچنین مشخصات سایر اجزای اتصال نظیر سخت کننده ها، لچکی تیر، ورق پیوستگی، ورق مضاعف و... مشخص شدند. بر روی بال فوقانی تیر ۴ عدد

سوراخ به قطر ۱۸ میلی متر با لحاظ اثر لقی، برای قرارگیری پیچ های اصطکاکی تعبیه شده است. طول تیر و ستون به ترتیب ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده که متناسب با اندازه متداول setup در تحقیقات قبلی است [۳۶-۳۹]. جزئیات ابعاد تیر و ستون در جدول شماره (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- جزئیات مقطع تیر و ستون

	ضخامت		ارتفاع	
	عرض	ضخامت	جان	جان
تیر- IPE200	۱۰۰	۸.۵	۱۸۳	۵.۶
ستون- IPB160	۱۶۰	۱۲	۱۳۶	۸

طول سوراخ های لوبیایی در صفحه اصطکاکی به گونه ای در نظر گرفته شده که میراگر بعد از طی کردن طول لغزش، در تغییر مکان ۲ سانتی متر (دریفت مجاز طبقه در وضعیت ایمنی) در رفت و برگشت، وارد سطح دوم جاری شونده شده و در ادامه با تسلیم شدگی محوری استهلاک انرژی را انجام دهد، بنابراین طول لغزش ۲/۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. صحت سنجی مدل سازی عددی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی تحقیق قبلی انجام شده است [۳۹]. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، منحنی هیستریزس عددی انطباق بسیار مناسبی با مدل آزمایشگاهی مذکور دارد.



شکل ۱۱- صحت سنجی مدل سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی

جهت تبدیل دریفت طبقه به اعمال جابه جایی در نقطه ای خاص، نمونه ای جدا شده از وسط ارتفاع طبقات و نقطه میانی دهانه تیر در سیستم قاب خمشی مطابق با شکل (۱۲) در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مدل های عددی مشابه تحقیق قبلی [۳۹]، به صورت مفصل در بالا و پایین ستون فرض شده و تغییر مکان به انتهای تیر مطابق با پروتکل معرفی شده اعمال گردیده است. مقادیر دریفت در ارتفاع مؤثر تیر (فاصله محل اعمال بار تا مرکز ستون) یعنی طول ۱۴۲۲ میلی متر ضرب شده اند.

میراگر جاری‌شونده از جمله ضخامت، طول و سطح مقطع سوراخ‌های تضعیف‌کننده ورق روسری و همچنین با ۲ نیروی لغزش متفاوت در میراگر اصطکاکی طراحی شوند. برای این منظور از ۳ نوع طول، ۳ نوع ضخامت و همچنین ۲ نوع سطح مقطع سوراخ‌های تضعیف‌کننده در ورق روسری که همان میراگر جاری‌شونده است، استفاده شده است. ضخامت‌های در نظر گرفته شده متناسب با مقاطع ورق موجود در بازار هستند. عرض ورق روسری به صورت ثابت ۱۳۰ میلی‌متر است. مشخصات ۳۶ نمونه تحلیلی در جدول (۳) قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که سطح مقطع تضعیف‌شدگی ورق برابر با مجموع سطح مقطع دایره‌های تضعیف‌کننده روی ورق روسری و همچنین سطح مقطع کلی ورق از حاصل ضرب طول در ضخامت ورق روسری بر اساس روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است.

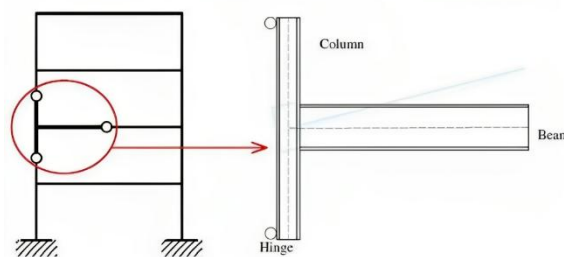
$$A_1 = \sum \pi r^2 \quad (3)$$

$$A_2 = L \cdot w \quad (4)$$

r : شعاع هر دایره تضعیف‌کننده بر روی ورق روسری

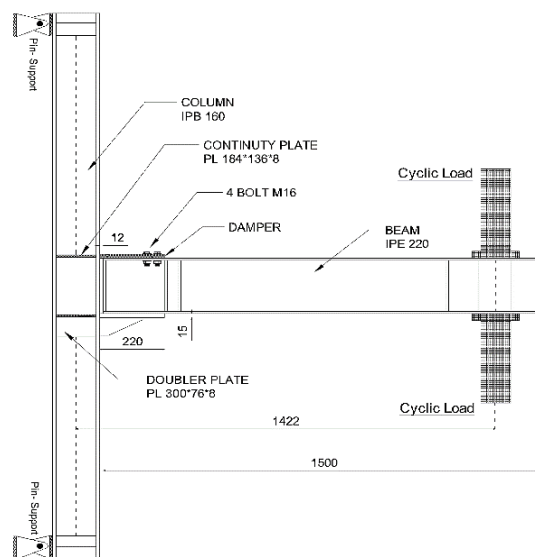
L : طول ورق روسری

w : عرض ورق روسری



شکل ۱۲- ایده‌آل‌سازی اتصال تیر به ستون

با فرض این که در مراحل اعمال بارگذاری تا مشاهده افت مقاومت در نمونه‌ها، شکستی در جوش مشاهده نگردد، از مدل‌سازی جوش صرف‌نظر شده و برای اتصال نمونه‌های یکپارچه مانند تیر، ورق زیرسری و سخت‌کننده‌های آن، همچنین اتصال ورق روسری به ستون از دستور Tie استفاده شده است. برای اتصال قطعات در محل تماس، مانند ورق روسری و بال فوقانی تیر، یا پیچ و بدنه سوراخ از ماژول اندرکنش در آباکوس استفاده شده است. اندرکنش سطوح در جهت عمودی به صورت hard contact و در جهت مماسی به صورت penalty فرض شده است. جزئیات اتصال در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- جزئیات اتصال گیردار پیشنهادی تیر به ستون (میلی‌متر)

۵- مطالعه پارامتری

۵-۱- تعداد مدل‌ها و تغییرمتغیرهای تحقیق

با لحاظ تغییرهای این تحقیق و در جهت رسیدن به یک دسته ابعاد قابل قبول و بهینه برای میراگر دوسطحی پیشنهادی در محل اتصال گیردار تیر به ستون، لازم است مدل‌هایی با ابعاد متغیر

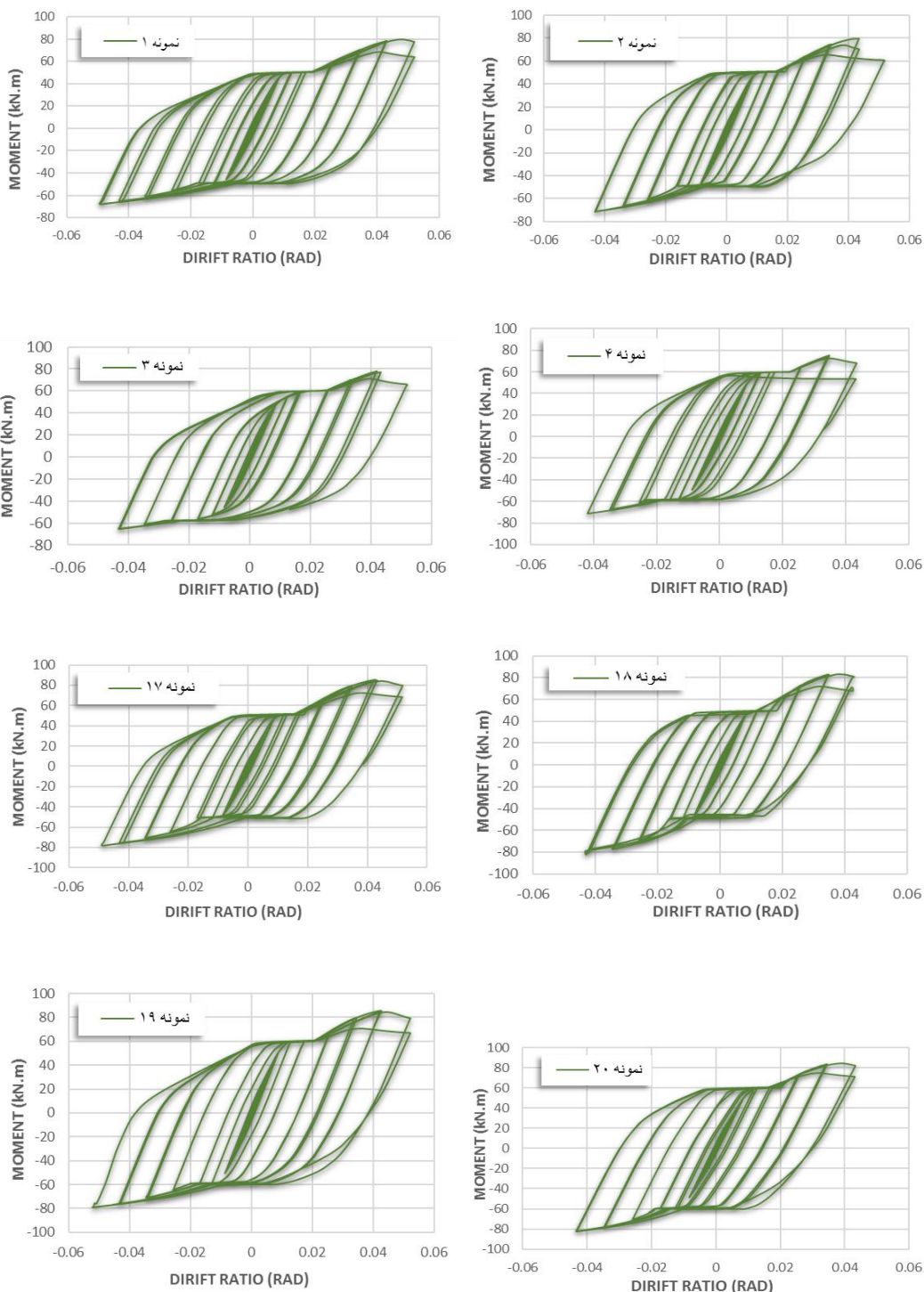
جدول ۳- مشخصات نمونه‌های تحلیلی (ابعاد به میلی‌متر)

نمونه	طول ورق (L)	ضخامت ورق (t)	(L/t)	سطح مقطع ضعیف شدگی (A ₁)	سطح مقطع کلی ورق (A ₂)	A ₂ /A ₁	نیروی لغزش (کیلو نیوتن)
نمونه ۱	۱۸۰	۱۲	۱۵	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۹۰
نمونه ۲	۱۸۰	۱۲	۱۵	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۹۰
نمونه ۳	۱۸۰	۱۲	۱۵	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۱۱۰
نمونه ۴	۱۸۰	۱۲	۱۵	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۱۱۰
نمونه ۵	۱۸۰	۱۵	۱۲	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۹۰
نمونه ۶	۱۸۰	۱۵	۱۲	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۹۰
نمونه ۷	۱۸۰	۱۵	۱۲	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۱۱۰
نمونه ۸	۱۸۰	۱۵	۱۲	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۱۱۰
نمونه ۹	۱۸۰	۲۰	۹	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۹۰
نمونه ۱۰	۱۸۰	۲۰	۹	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۹۰
نمونه ۱۱	۱۸۰	۲۰	۹	۱۲۵۶	۲۳۴۰۰	۱۸.۶	۱۱۰
نمونه ۱۲	۱۸۰	۲۰	۹	۱۰۱۷.۳	۲۳۴۰۰	۲۳	۱۱۰
نمونه ۱۳	۲۲۰	۱۲	۱۸.۳	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۹۰
نمونه ۱۴	۲۲۰	۱۲	۱۸.۳	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۹۰
نمونه ۱۵	۲۲۰	۱۲	۱۸.۳	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۱۱۰
نمونه ۱۶	۲۲۰	۱۲	۱۸.۳	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۱۱۰
نمونه ۱۷	۲۲۰	۱۵	۱۴.۶	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۹۰
نمونه ۱۸	۲۲۰	۱۵	۱۴.۶	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۹۰
نمونه ۱۹	۲۲۰	۱۵	۱۴.۶	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۱۱۰
نمونه ۲۰	۲۲۰	۱۵	۱۴.۶	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۱۱۰
نمونه ۲۱	۲۲۰	۲۰	۱۱	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۹۰
نمونه ۲۲	۲۲۰	۲۰	۱۱	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۹۰
نمونه ۲۳	۲۲۰	۲۰	۱۱	۱۲۵۶	۲۸۶۰۰	۲۲.۷	۱۱۰
نمونه ۲۴	۲۲۰	۲۰	۱۱	۱۰۱۷.۳	۲۸۶۰۰	۲۸.۱	۱۱۰
نمونه ۲۵	۲۶۰	۱۲	۲۱.۶	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۹۰
نمونه ۲۶	۲۶۰	۱۲	۲۱.۶	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۹۰
نمونه ۲۷	۲۶۰	۱۲	۲۱.۶	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۱۱۰
نمونه ۲۸	۲۶۰	۱۲	۲۱.۶	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۱۱۰
نمونه ۲۹	۲۶۰	۱۵	۱۷.۳	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۹۰
نمونه ۳۰	۲۶۰	۱۵	۱۷.۳	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۹۰
نمونه ۳۱	۲۶۰	۱۵	۱۷.۳	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۱۱۰
نمونه ۳۲	۲۶۰	۱۵	۱۷.۳	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۱۱۰
نمونه ۳۳	۲۶۰	۲۰	۱۳	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۹۰
نمونه ۳۴	۲۶۰	۲۰	۱۳	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۹۰
نمونه ۳۵	۲۶۰	۲۰	۱۳	۱۲۵۶	۳۳۸۰۰	۲۶.۹	۱۱۰
نمونه ۳۶	۲۶۰	۲۰	۱۳	۱۰۱۷.۳	۳۳۸۰۰	۳۳.۲	۱۱۰



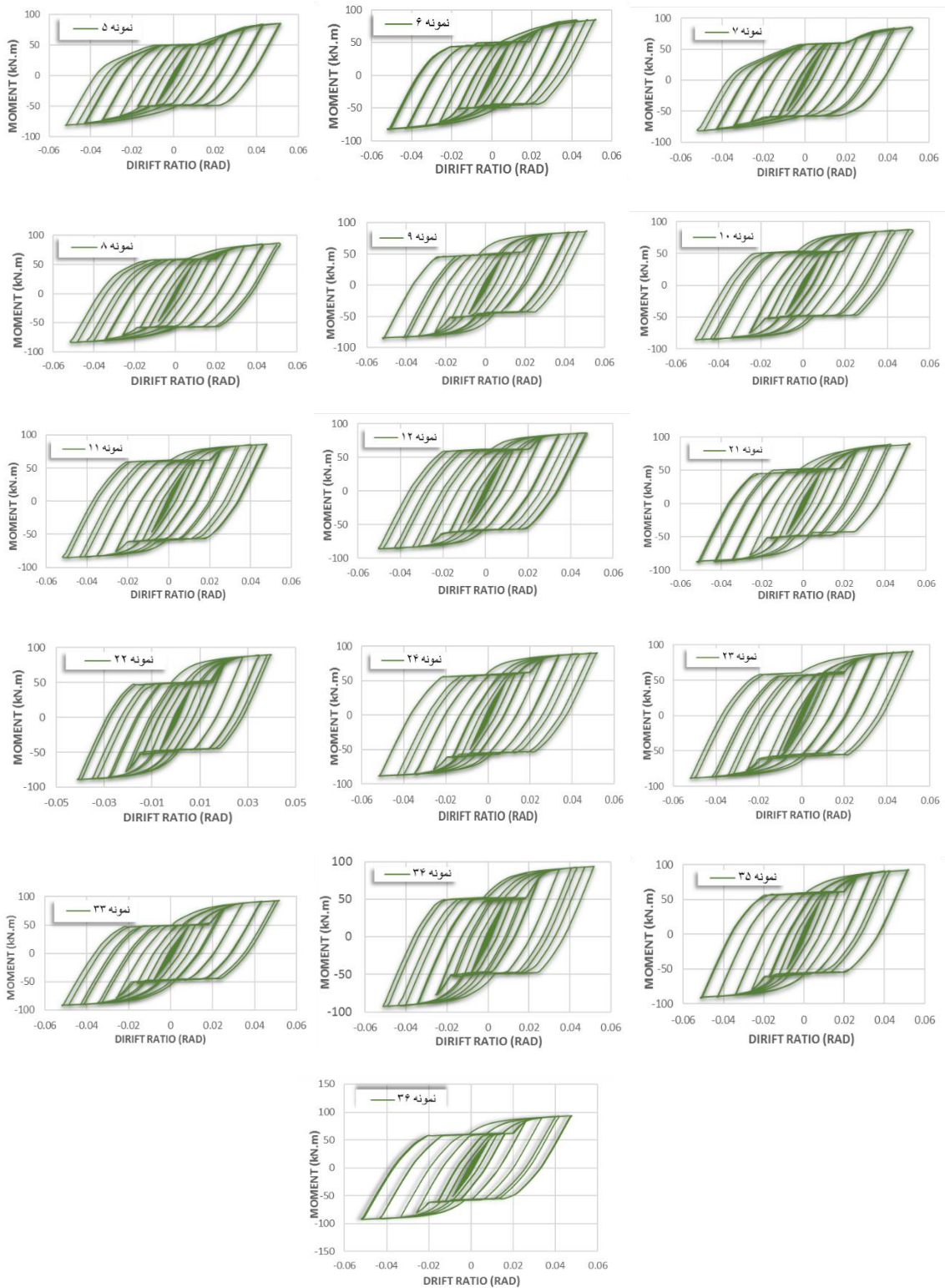
۲-۵- مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار و بررسی نتایج اولیه کلیه نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد تحلیل غیرخطی استاتیکی قرار گرفتند و بر اساس نتایج تحلیل عددی، نمودار لنگر-دریفت برای همه نمونه‌ها ترسیم گردید که در

اشکال (۱۴-۱۶) نشان داده شده است. در ادامه کلیه نمونه‌ها تشریح می‌گردد.

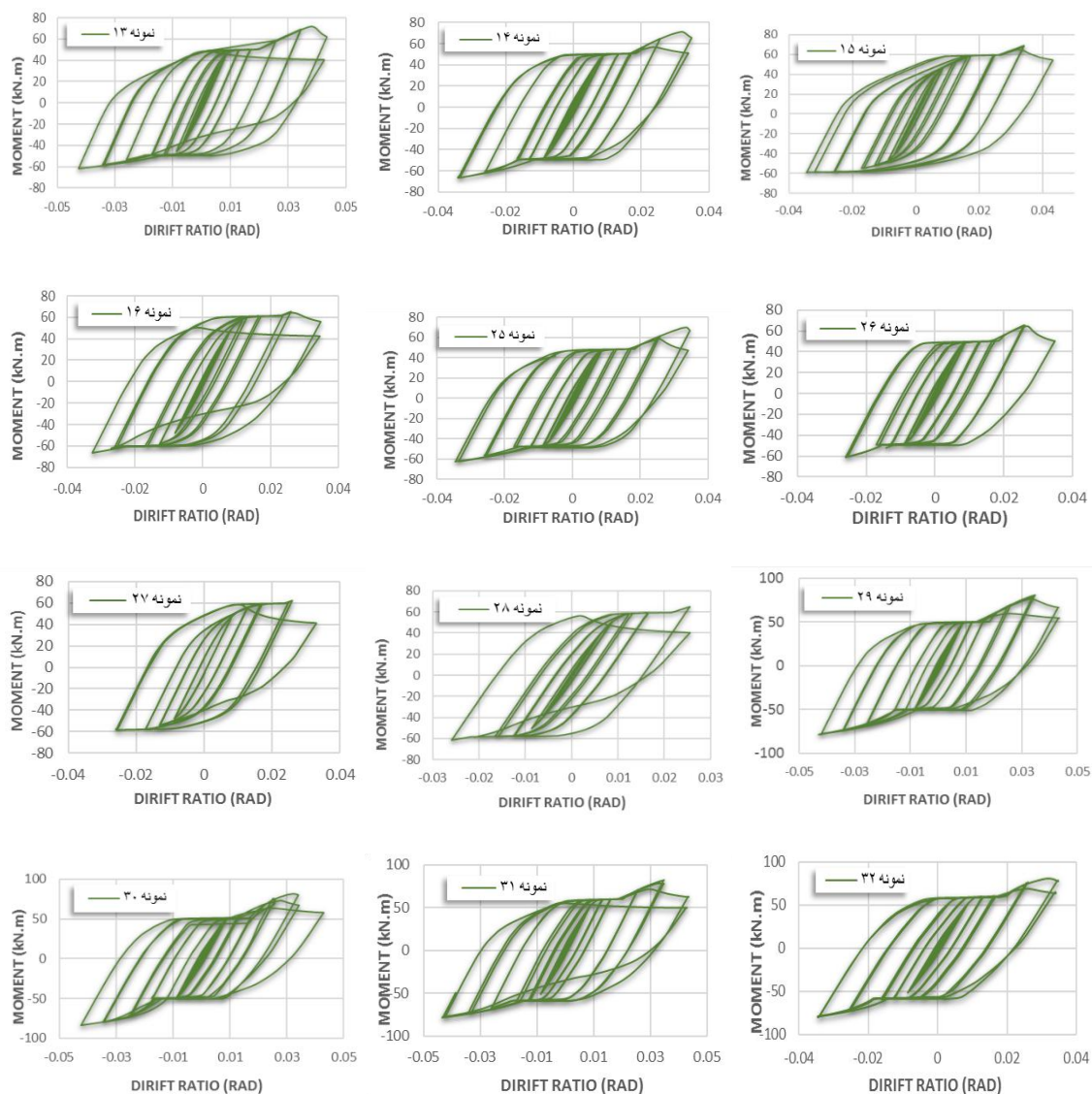


شکل ۱۴- نمودارهای لنگر-دریفت نمونه‌های عددی با نسبت طول به ضخامت ۱۵-۱۴/۶ (بخش اول)





شکل ۱۵- نمودارهای لنگر-دریفت نمونه‌های عددی با نسبت طول به ضخامت ۱۳-۹ (بخش دوم)



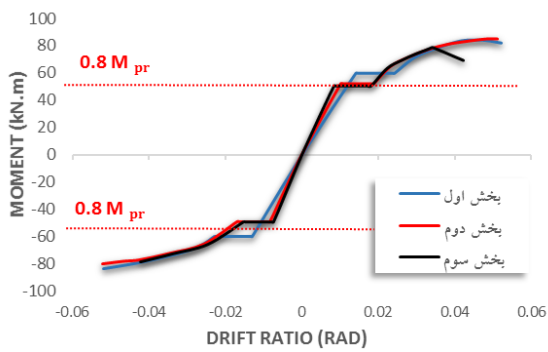
شکل ۱۶- نمودارهای لنگر-دریفت نمونه‌های عددی با نسبت طول به ضخامت ۱۷-۲۲ (بخش سوم)

هر دو شرط را ارضا می‌کنند. جذب انرژی بالا و پایداری منحنی‌ها در هر ۸ نمونه گویای عملکرد مناسب در اتلاف انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای افزایشده تا دوران مذکور است. بررسی منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های ۵ تا ۱۲ و نمونه‌های ۲۱ تا ۲۴ و همچنین نمونه‌های ۳۳ تا ۳۶ با نسبت‌های طول به ضخامت ورق بین ۹-۱۳ (شکل ۱۵) حاکی از عدم رفتار مناسب نمونه‌ها بوده به طوری که علی‌رغم داشتن منحنی‌های هیستریزس متقارن با جذب انرژی بالا، قبل از وقوع خرابی در ورق، خرابی در تیر اتفاق افتاده است. بررسی منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های ۱۳ تا ۱۶ و نمونه‌های ۲۵ تا ۳۲ با نسبت طول به ضخامت ورق بین ۱۷ تا ۲۲ (شکل ۱۶)، وقوع کماتش ورق جاری‌شونده تحت نیروهای فشاری پایین به سبب جدارنازک بودن زیاد نمونه‌ها و وقوع

۳-۵- بررسی نتایج اولیه

۳-۵-۱- تأثیر نسبت طول به ضخامت ورق جاری‌شونده

بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی، منحنی‌های لنگر-دریفت برای تمامی نمونه‌ها ترسیم گردید. نمونه‌های ۱ تا ۴ و نمونه‌های ۱۷ تا ۲۰ با نسبت طول به ضخامت ورق بین ۱۴.۶-۱۵ (شکل ۱۴) گویای رفتار تقریباً مناسب بوده و شرایط مورد نیاز را مطابق با مقررات AISC [2006] برای قاب خمشی ویژه تأمین می‌کنند. لازم به ذکر است در قاب خمشی ویژه عملکرد اتصال باید به گونه‌ای باشد که در دوران ۰/۰۴ رادیان، مقاومت خمشی مورد نیاز در بر ستون حداقل به میزان ۸۰ درصد لنگر پلاستیک مقطع تیر باشد [۴۰] که نمودارهای هیستریزس نمونه‌ها با نسبت مذکور



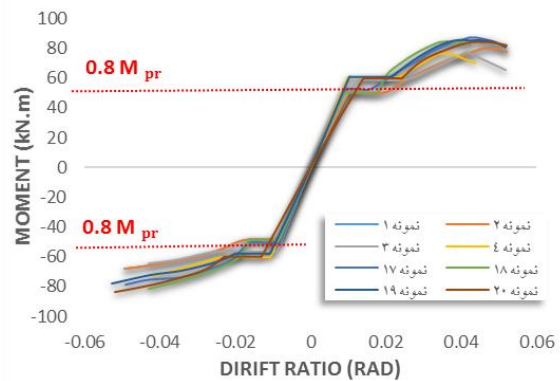
شکل ۱۸- مقایسه نمودارهای پوش نمونه‌های عددی در بخش اول، دوم و سوم

به‌عنوان جمع‌بندی برای نسبت طول به ضخامت ورق به نظر می‌رسد استفاده از ورق با نسبت بهینه طول به ضخامت بین ۱۴.۶-۱۵ دارای رفتار مناسب بوده و باید حتی‌المقدور از ورق‌های دارای نسبت مذکور جهت حصول عملکرد مناسب بهره گرفت. همچنین استفاده از ورق با نسبت‌های طول به ضخامت زیاد به دلیل رفتار غیرشکل‌پذیر و سختی پایین توصیه نمی‌گردد. علاوه بر این استفاده از ورق با نسبت‌های طول به ضخامت خیلی کم نیز به دلیل سختی بالای ورق و امکان ایجاد خرابی در تیر قبل از تشکیل آن در ورق جاری‌شونده، توصیه نمی‌شود.

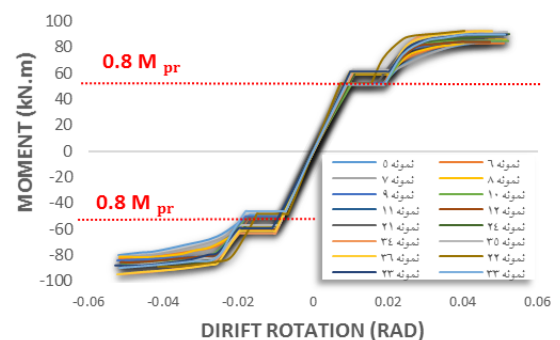
۵-۳-۲- بررسی تأثیر نسبت سطح مقطع کل به سطح مقطع ضعیف‌شدگی ورق جاری‌شونده

تعیین میزان نسبت مذکور در میراگر جاری‌شونده روسری یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی میراگر پیشنهادی است، زیرا در صورت تعیین این نسبت به میزان بیش‌تر از نسبت بهینه، عملاً قبل از وقوع کرنش‌های پلاستیک در ورق جاری‌شونده و از استهلاک انرژی در ورق جاری‌شونده به میزان قابل‌توجهی کاسته می‌شود. علاوه بر آن در صورت تعیین نسبت سطح مقطع کل به سطح مقطع ضعیف‌شدگی ورق به میزان کم‌تر از نسبت بهینه، عملاً ورق جاری‌شونده به میزان زیادی تحت تنش و تغییر مکان قرار گرفته و پلاستیک‌شدگی زیاد و وقوع خرابی عمیق در این بخش عملاً موجب از دست رفتن عملکرد مناسب میراگر می‌شود. همچنین منحنی‌های هیستریزس به‌صورت نامتقارن شده و عملکرد مناسبی را نیز در فشار و کشش ندارد. با عنایت به موارد مذکور و با بررسی منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها، سعی در تعیین نسبت بهینه می‌گردد. لذا بعد از تعیین نسبت بهینه طول به ضخامت ورق روسری و حذف کردن سایر نمونه‌ها به‌علت عدم رفتار مناسب،

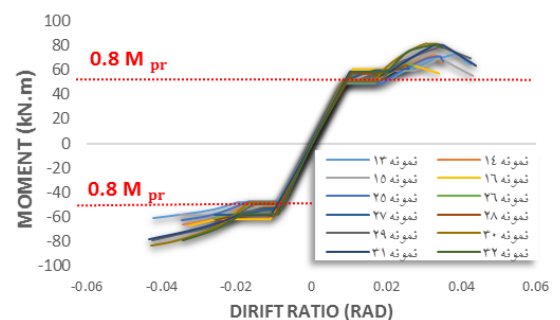
خرابی‌های موضعی از عوامل رفتار چرخه‌ای نامناسب است. با توجه به مقایسه رفتاری نمونه‌ها، افزایش طول و کاهش ضخامت ورق، موجب کاهش ظرفیت باربری تحت بارگذاری چرخه‌ای است. نکته مهم در بهبود عملکرد نمونه‌ها با نسبت بهینه طول به ضخامت بوده و افزایش پایداری و سطح مقطع منحنی‌های هیستریزس و به تبع آن افزایش استهلاک انرژی از اثرات آن است. همچنین نحوه توزیع تنش‌های فون میسر در این نمونه‌ها بیانگر وقوع تنش‌های حداکثر در سطح ورق روسری است. در ادامه با استفاده از نتایج تحلیل، منحنی‌های پوش هر سه بخش در شکل (۱۷) ترسیم و در شکل (۱۸) با یکدیگر مقایسه شد.



(الف)

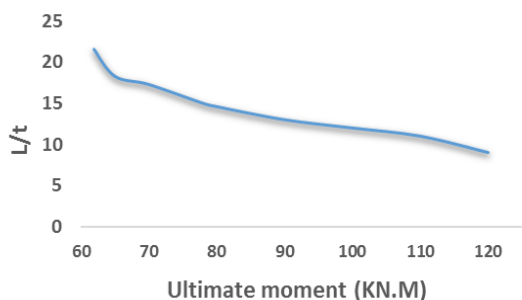


(ب)



(ج)

شکل ۱۷- نمودارهای پوش نمونه‌های تحلیلی با نسبت‌های طول به ضخامت مختلف: (الف) بخش اول، (ب) بخش دوم، (ج) بخش سوم



شکل ۱۹- نمودار تغییرات مقاومت خمشی بر اساس نسبت طول به ضخامت ورق روسری

۵-۳-۳- بررسی تأثیر نیروی لغزش در میراگر اصطکاکی

در میراگرهای اصطکاکی عملکرد به گونه‌ای است که استهلاک انرژی به واسطه نیروی لغزش انجام خواهد گرفت به طوری که به غلبه لغزش بر اصطکاک بین سطوح، نیروی ورودی زلزله مستهلاک خواهد شد. بنابراین تعیین نیروی لغزش از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در عملکرد میراگر پیشنهادی خواهد بود. با توجه به این که عملکرد میراگر پیشنهادی به صورت دوسطحی است و تضعیف عمدی در ورق جاری شونده ایجاد شده است، لذا اگر نیروی لغزش زیاد در نظر گرفته شود باعث می‌شود که خرابی در ورق روسری به واسطه تضعیف شدگی آن، قبل از وقوع لغزش در میراگر اصطکاکی انجام گیرد و همچنین باعث ایجاد پلاستیک شدگی در ناحیه سوراخ کاری تیر که محل قرارگیری پیچ‌های اصطکاکی است، می‌شود. همچنین اگر نیروی لغزش نیز خیلی کم لحاظ شده باشد عملکرد دوسطحی مطلوبی از میراگر انتظار نمی‌رود.

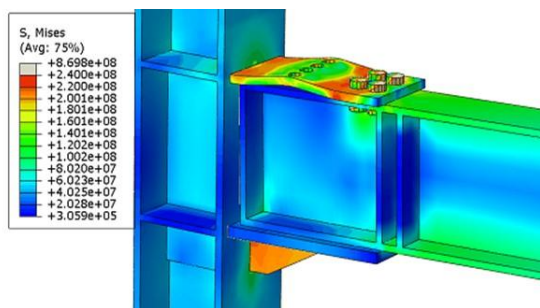
بنابراین با توجه به شرایط ذکر شده در محل اتصال و امکان به وجود آمدن مشکلاتی از این قبیل، باید نیروی لغزش بهینه طراحی شود. در تحقیق حاضر کنترل‌های لازم جهت استفاده از نیروی لغزش بهینه انجام شده و برای جلوگیری از ایجاد چنین تغییرشکل‌هایی قبل از وقوع لغزش، دو نیروی بهینه ۹۰ و ۱۱۰ کیلونیوتنی برای بررسی عملکرد دوسطحی اتصال در نظر گرفته شده است. در ادامه در نمونه‌های منتخب ۱۸ و ۲۰، میزان تأثیرگذاری دو نیروی لغزش بر عملکرد دوسطحی آن‌ها بررسی و در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

به بررسی تأثیر نسبت سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی ورق در نمونه‌های باقی‌مانده پرداخته خواهد شد.

نمونه‌های ۱ تا ۴ و نمونه‌های ۱۷ تا ۲۰، نسبت بهینه طول به ضخامت بهینه را دارند. لذا به بررسی تأثیر نسبت مذکور در نمونه‌های موجود می‌پردازیم. در نمونه‌های ۱ و ۳ با نسبت سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی ورق برابر ۱۸/۶ عدم تقارن در رفتار نمونه‌ها مشاهده شده به طوری که عملکرد مطلوبی را در کشش و فشار نشان نمی‌دهد، منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های مذکور نشان‌دهنده رفتار مورد انتظار نیستند. در نمونه‌های ۲ و ۴ با نسبت سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی ورق برابر با ۲۳ رفتار متقارن‌تری نسبت موارد قبلی مشاهده می‌شود و عملکرد در کشش و فشار در نمونه‌ها بهبود یافته است. نمونه‌های ۱۷ و ۱۹ با نسبت ۲۲/۷ مجدداً عدم تقارن را به میزان کم‌تری نسبت به نمونه‌های ۱ و ۳ نشان می‌دهند. نمونه‌های ۱۸ و ۲۰ با نسبت سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی برابر ۲۸/۱ بیانگر رفتار هیستریزس متقارن در نمونه‌ها است. نکته مهم در تعیین نسبت بهینه سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی ورق روسری، تأثیرگذار بودن نسبت طول به ضخامت ورق است به طوری که با افزایش نسبت طول به ضخامت ورق، رفتار نمونه‌ها با نسبت مذکور ثابت بهبود می‌یابد و عملکرد متناسبی را در کشش و فشار از خود نشان می‌دهد.

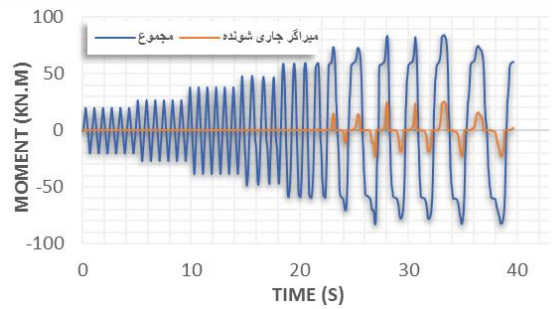
به عنوان جمع‌بندی به نظر می‌رسد استفاده از ورق با نسبت بهینه سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی برابر ۲۸/۱ و همچنین نسبت بهینه طول به ضخامت ورق برابر ۱۴/۶ دارای رفتار مناسب بوده و می‌بایست حتی‌المقدور از ورق‌های دارای نسبت مذکور جهت حصول عملکرد مناسب بهره گرفت. همچنین استفاده از ورق با نسبت‌های سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی کم و نسبت طول به ضخامت زیاد به دلیل سختی پایین توصیه نمی‌شود. علاوه بر این استفاده از ورق با نسبت‌های سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی زیاد و نسبت طول به ضخامت کم نیز به دلیل عدم سختی زیاد و امکان ایجاد خرابی در تیر قبل از تشکیل آن در ورق جاری شونده، توصیه نمی‌شود. نمودار تغییرات مقاومت خمشی بر اساس نسبت طول به ضخامت ورق روسری در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

شکل (۲۱) خروجی تنش‌های مایز در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ورق ۹-۱۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از ورق با نسبت‌های فوق‌العاده بر خرابی در میراگر جاری‌شونده، منجر به ایجاد خرابی و تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر می‌شود و همچنین اثرات خرابی را در ستون ایجاد می‌کند. رنگ خاکستری به معنای جاری شدن آن ناحیه از مدل است. همان‌طور که قبل‌تر نیز اشاره شد هدف اصلی در تحقیق حاضر، تمرکز عمده خرابی در میراگر جاری‌شونده روستری در سطح دوم است. بنابراین استفاده از ورق با چنین نسبت‌هایی به دلیل سختی بالا توصیه نمی‌شود.

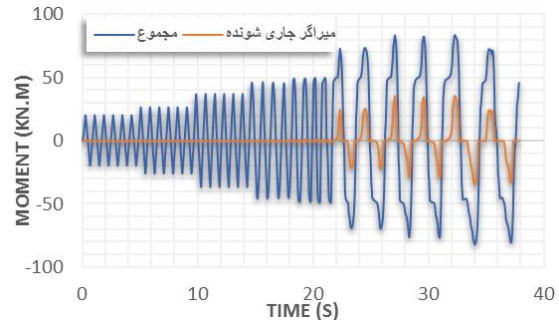


شکل ۲۲- تنش فون مایز در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ورق ۱۷-۲۲

شکل (۲۲) تنش در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ۱۷-۲۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است کماتش در ورق روستری در چرخه ۲۹ بارگذاری و قبل از دریافت ۴ درصد به واسطه جدارنازک بودن آن ایجاد شده است. استفاده از ورق‌های روستری با چنین نسبت‌هایی باعث کماتش ورق و در نتیجه کاهش ظرفیت باری اتصال می‌شود و قبل از این که خرابی در ورق اتفاق بیفتد کماتش رخ داده و عملاً میراگر هیچ نقشی را ایفا نمی‌کند. پیش‌تر نیز بررسی نمودارهای هیستریزس گویای کاهش این ظرفیت باری بوده است؛ لذا استفاده از ورق جاری‌شونده با نسبت‌های ذکر شده توصیه نمی‌شود.



الف) منحنی تغییرات نیرو در نمونه ۲۰

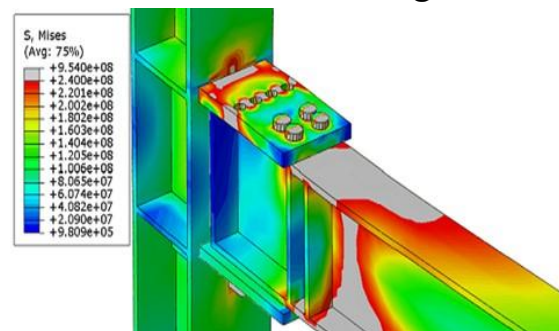


ب) منحنی تغییرات نیرو در نمونه ۱۸
شکل ۲۰- منحنی تغییرات نیرو در نمونه‌های منتخب

همان‌طور که در منحنی نمودار تغییرات نیرو در نمونه ۲۰ در شکل (۲۰-الف) مشاهده می‌شود، افزایش نیروی لغزش باعث کاهش سهم باری میراگر جاری‌شونده می‌شود به طوری که حداکثر لنگر خمشی قابل تحمل توسط آن، ۳۳ درصد از کل لنگر قابل تحمل ۸۳ کیلونیوتن متری است. اما در نمونه ۱۸ که در شکل (۲۰-ب) نشان داده شده، با کاهش نیروی لغزش، سهم باری میراگر جاری‌شونده بیش‌تر شده به طوری که ۴۵ درصد از کل لنگر خمشی فشاری ۸۳ کیلونیوتن متری اتصال را متحمل می‌شود.

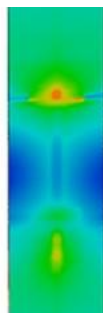
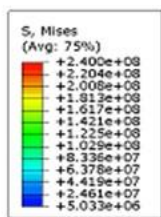
۳-۴-۵- بررسی کانتورهای تنش و کرنش در مدل‌های تحلیلی

تصاویر گرافیکی از نحوه توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در المان‌های سازه‌ای و میراگر از نرم‌افزار المان محدود آباکوس دریافت شد که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

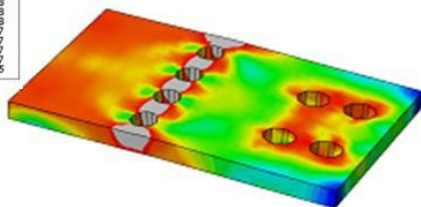
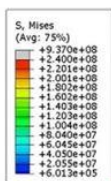


شکل ۲۱- تنش فون مایز در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ورق ۹-۱۳

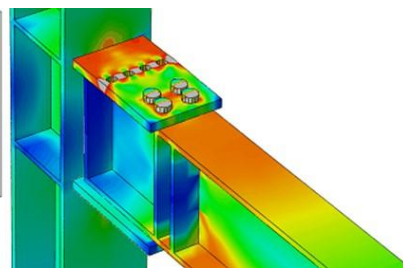
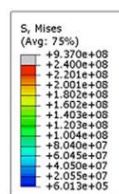
نرمال قرار می‌گیرند، با استفاده از این معیار می‌توان رسیدن یک جسم به نقطه تسلیم را بررسی کرد.



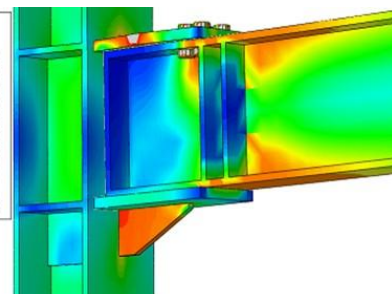
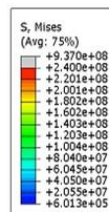
(الف)



(ب)



(الف)



(ب)

شکل ۲۳- تنش فون مایز در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ورق ۱۴/۶-۱۵

شکل ۲۴- تنش فون مایز: (الف) در بر ستون، (ب) ورق جاری‌شونده

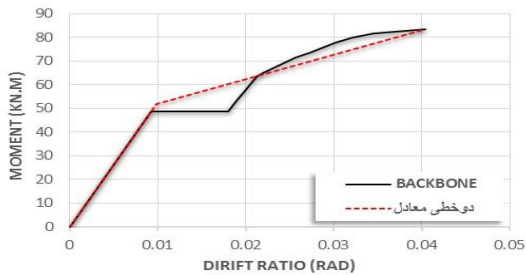
در این المان‌ها بر اساس دایره موهر، تنش‌های اصلی محاسبه می‌شود. بر این اساس اگر مقدار تنش فون مایز محاسبه شده از مقدار تنش تسلیم ماده کم‌تر باشد یعنی شکست رخ نمی‌دهد و از طرفی اگر این تنش از تنش تسلیم ماده بیش‌تر باشد به معنای رسیدن المان به نقطه تسلیم است. بنابراین برای اندازه‌گیری تنش حداکثر ایجادشده در مدل‌ها از خروجی تنش فون مایز استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۵) مشخص است، حداکثر تنش در پیچ‌های اتصال و در محل اتصال با بال فوقانی تیر I شکل ایجاد شده است. ایجاد تنش در پیچ‌ها به دلیل عملکرد بخش اصطکاکی میراگر و درگیر شدن پیچ‌ها در سوراخ لوبیایی است. مقدار تنش ایجادشده در پیچ‌ها و بال فوقانی تیر در محدوده تنش مجاز است. تصویر کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال تیر به ستون در شکل (۲۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پلاستیک‌شدگی صرفاً در ورق روسری و در محل تضعیف‌شدگی صورت گرفته و به سایر المان‌ها آسیبی وارد نکرده است.

شکل (۲۳) توزیع تنش در نمونه‌ها با نسبت طول به ضخامت ورق ۱۴/۶-۱۵ را نشان می‌دهد. کانتورهای قرمز و خاکستری در المان‌های تیر و ستون وجود ندارد و جاری‌شدگی تماماً در ناحیه سوراخ‌شدگی ورق به‌وجود آمده است و اثری از پلاستیک‌شدگی در سایر نواحی وجود ندارد. بنابراین استفاده از ورق‌های جاری‌شونده با نسبت مذکور به‌علت عملکرد مطلوب و مورد انتظار میراگر پیشنهادی توصیه می‌شود. البته سایر موارد مانند نسبت سطح مقطع کل به ضعیف‌شدگی ورق و همچنین نیروی لغزش نیز بر عملکرد میراگر دوسطمی تأثیرگذار هستند که این موارد در نمودارهای هیستریزس قبل‌تر تشریح شده است.

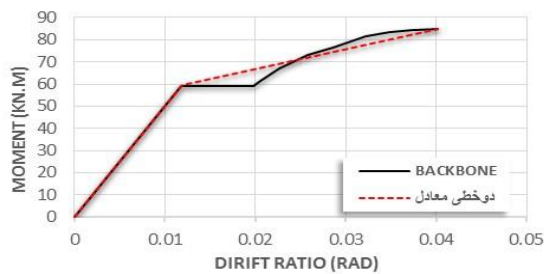
شکل (۲۴) کانتورهای تنش در بر ستون و ورق جاری‌شونده را نشان می‌دهد، خرابی به‌صورت مطلوب و ایده‌آل در ورق روسری ایجاد شده است. همچنین هیچ‌گونه خرابی و لهیدگی در محل سوراخ‌های لوبیایی در ورق روسری که محل قرارگیری پیچ‌های اصطکاکی هستند اتفاق نیفتاده است.

مدل‌های کلاسیک پلاستیسیته شامل معیار ترسکا، موهر کلمب، دراگر پراگر و فون مایز است. به دلیل فرم هندسی استوانه‌ای شکل معیار فون مایز در فضای سه‌بعدی و مطابقت با رفتار فولاد، استفاده از این معیار در تحلیل‌های اجزای محدود نسبت به سایر مدل‌ها کاربرد بیش‌تری داشته و به‌عنوان یک معیار مطلوب جهت کنترل تنش‌های وارده بر مدل‌های اجزای محدود به‌کار گرفته می‌شود. در المان‌هایی که تحت تنش ترکیبی برشی و

در شکل (۲۸) نمودارهای backbone و دوخطی معادل نمونه‌های ۱۸ و ۲۰ ترسیم شده و در شکل (۲۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

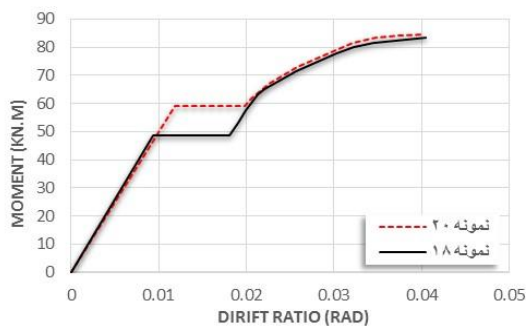


(الف)

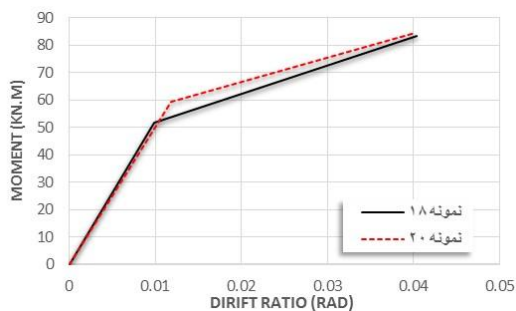


(ب)

شکل ۲۸- نمودارهای backbone و دوخطی معادل: (الف) نمونه ۱۸، (ب) نمونه ۲۰

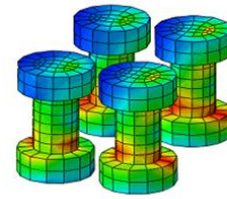
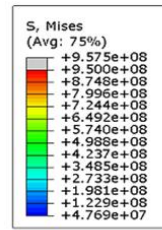


(الف)

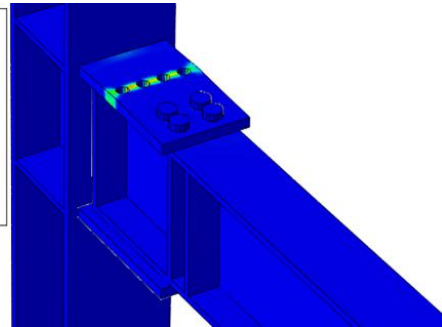
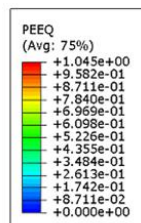


(ب)

شکل ۲۹- مقایسه نمودارهای backbone و دوخطی معادل: (الف) backbone، (ب) دوخطی معادل



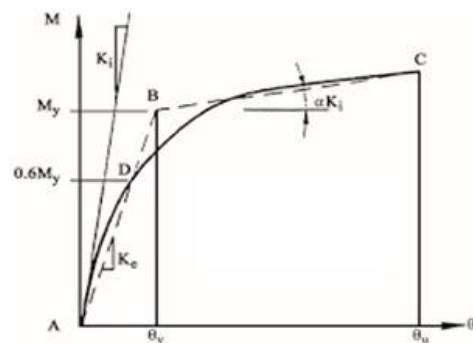
شکل ۲۵- تنش فون مایز در پیچها



شکل ۲۶- کرنش پلاستیک معادل در ناحیه اتصال

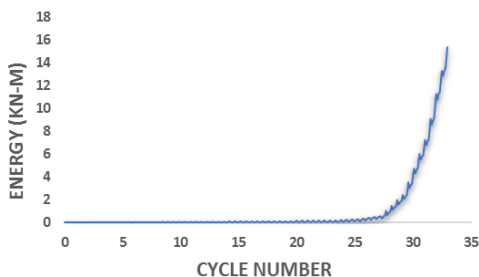
۶- نمودارهای backbone و دوخطی معادل

نمودار backbone در ناحیه مثبت منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دریفت رسم شده و در ادامه بر اساس الزامات آیین‌نامه FEMA-440 (FEMA-2005) مطابق با روش انرژی معادل، منحنی‌های دوخطی معادل ترسیم گردید. جهت ترسیم نمودار دوخطی معادل از قسمت صعودی نمودارهای backbone تا حداکثر لنگر قابل تحمل استفاده شد و از قسمت افت‌کرده منحنی صرف‌نظر گردید. بر اساس روش انرژی معادل نمودارهای دوخطی معادل به‌گونه‌ای باید ترسیم شود که مساحت زیر نمودار backbone با نمودار دوخطی برابر شود (شکل ۲۷).

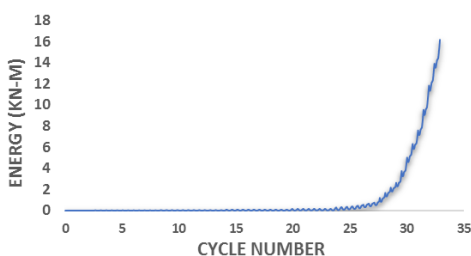


شکل ۲۷- ترسیم نمودار backbone و دوخطی معادل

انرژی بالاتری را به واسطه نیروی لغزش بیش تر نسبت به نمونه مشابه دارد. مقادیر بیشینه اتلاف انرژی کل سیستم در هر دو نمونه در جدول (۵) نیز نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳۰- نمودارهای اتلاف انرژی: الف) نمونه ۱۸، ب) نمونه ۲۰

جدول ۵- اتلاف انرژی کل در نمونه‌ها

شماره نمونه	اتلاف انرژی (kN-m)
نمونه ۱۸	۱۳.۷۴
نمونه ۲۰	۱۴.۷

جدول ۴- مشخصات لرزه‌ای نمونه‌ها بر اساس نمودار دوطرفی معادل

شماره نمونه	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	θ_y (Rad)	θ_y (Rad)	K_e (kN/Rad)	μ
نمونه ۱۸	۵۱.۷۲	۸۴.۶۵	۰.۰۰۹۸	۰.۰۴۰۴	۵۲۷۷.۵۵	۴.۱۲
نمونه ۲۰	۵۹.۳۱	۸۴.۶۵	۰.۰۱۱۸	۰.۰۴۱۵	۵۰۲۶.۲۷	۳.۴۷

گرفت. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، نتایج تحلیل را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

با عنایت به تحلیل‌های انجام شده، پارامترهای زیر جهت کسب رفتار مناسب و شکل پذیر میراگر پیشنهادی توصیه می‌شود: رعایت نسبت طول به ضخامت ورق جاری شونده روسری در محدوده (۱۴/۶-۱۵).

رعایت نسبت سطح مقطع کلی ورق روسری به سطح مقطع ضعیف‌شدگی آن برابر با ۲۸/۱.

با به دست آوردن و رسم نمودارهای دوطرفی معادل در نمونه‌ها، مشخصات لرزه‌ای از جمله دررفت تسلیم (θ_y)، دررفت نهایی (θ_u) لنگر تسلیم (M_y)، لنگر نهایی (M_u)، سختی مؤثر (K_e) و شکل پذیری (μ) حاصل شد. شکل پذیری و سختی مؤثر با روابط (۵) و (۶) محاسبه گردید. خصوصیات لرزه‌ای هر دو نمونه در جدول (۴) ارائه شده است.

$$\mu = \theta_u / \theta_y \quad (5)$$

$$K_e = M_y / \theta_y \quad (6)$$

۷- ارزیابی شکل پذیری، سختی و اتلاف انرژی

شکل پذیری مطابق با رابطه (۵) برای دو نمونه ۱۸ و ۲۰ محاسبه شده و در جدول (۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود اختلاف شکل پذیری در نمونه ۱۸ و نمونه ۲۰، به ۱۸ درصد می‌رسد. افزایش شکل پذیری بیانگر تحمل بیش تر دررفت غیرخطی توسط اتصال است و در نتیجه عملکرد مطلوب تری در زلزله‌های شدید خواهد داشت. بر اساس رابطه (۶) سختی مؤثر برای هر دو نمونه محاسبه شده است. سختی مؤثر نمونه ۱۸ بیش تر از نمونه ۲۰ شده است که نشان از عملکرد بهتر آن در زلزله‌های خفیف دارد.

اتلاف انرژی کل بر اساس سطح زیر نمودار هیستریزس به دست می‌آید، همان‌طور که در شکل (۳۰) مشاهده می‌شود اتلاف انرژی در هر دو نمونه روندی مشابه دارند، نمونه ۲۰ اتلاف

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق در ابتدا یک سیستم کنترل دوسطحی با میراگر غیرفعال اصطکاکی-جاری شونده در ورق روسری در محل اتصال گیردار تیر به ستون با قابلیت تغییر سختی و جذب انرژی در سطوح مختلف زلزله جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها ارائه گردید و با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS عملکرد آن مورد ارزیابی قرار

لازم به ذکر است که با توجه به نتایج مناسب کسب شده در تحلیل عددی، ساخت مدل و انجام کار آزمایشگاهی جهت بررسی صحت نتایج در مرحله بعدی تحقیق در دستور کار قرار خواهد گرفت.

استفاده از نیروی لغزش بهینه برای جلوگیری از تسلیم شدن ورق روسری قبل از شروع لغزش در میراگر اصطکاکی و جهت جلوگیری از تمرکز تنش در ناحیه سوراخ کاری شده در بال فوقانی تیر و همچنین جهت دستیابی به عملکرد دوسطحی مطلوب و ایده آل همراه با رعایت دو ضابطه قبل.

در دو نمونه منتخب ۱۸ و ۲۰، پارامترهای رفتاری میراگر پیشنهادی را می توان بر اساس نمودارهای به دست آمده در مراحل مختلف در موارد زیر خلاصه کرد:

- مقایسه منحنی های هیستریزس میراگر پیشنهادی گویای رفتار مناسب و شکل پذیر آن بوده به طوری که کلیه الزامات طراحی لرزه ای آیین نامه ها را تأمین می کند. حداقل دوران قابل تحمل در اتصالات تیر به ستون در قاب خمشی ویژه ۰/۰۴ رادین است، در یافت نهایی در هر دو نمونه ۱۸ و ۲۰، بیش از ۴ درصد بوده است.
- بررسی نمودارهای رفتاری میراگر پیشنهادی مطابق انتظار دارای عملکرد دوسطحی بوده که امکان اتلاف انرژی و عملکرد مناسب در سطوح مختلف نیروی زلزله را فراهم آورده است. در طراحی این سیستم، در صورت انتخاب مناسب ابعادی ورق جاری شونده روسری می توان از عدم کماتش آن تحت نیروهای فشاری اطمینان حاصل نمود. استفاده از میراگر پیشنهادی در کنترل ارتعاشات لرزه ای سازه ها باعث شده تا تغییر شکل های غیر ارتجاعی در صفحه روسری جاری شونده متمرکز شده و خسارات وارده به سازه اصلی به شدت کاهش یابد.
- نمودارهای backbone، دوخطی معادل و اتلاف انرژی برای هر دو نمونه ۱۸ و ۲۰ ترسیم گردید و بر اساس آن مقادیر شکل پذیری، سختی مؤثر، مقاومت نهایی و مقاومت تسلیم برای نمونه ها محاسبه شد. نتایج نشان داد لنگر نهایی هر دو نمونه در یک حدود هستند. شکل پذیری در نمونه ۱۸، مقدار ۱۸٪/۱۸ بیش از نمونه ۲۰ است.
- به دلیل جذب انرژی مناسب رفتار میراگر دوسطحی پیشنهادی و انعطاف پذیری آن می توان قسمت عمده ای از خرابی سازه را در هنگام وقوع زلزله از این اعضا انتظار داشت. همچنین طراحی و ساخت میراگر پیشنهادی کاملاً اجرایی بوده و اجرای آن در سیستم قاب های خمشی با هزینه کم امکان پذیر است.



- [16] MacRae, G.A., MacKinven, H., Clifton, G.C. Walpole, W., Butterworth, J. (2007), "Tests of sliding hinge joints for steel moment frames, Proceedings of 8th Pacific Structural Steel Conference - Steel Structures in Natural Hazards", 2, PSSC, pp. 109-114.
- [17] Butterworth, J., Clifton, C., MacRae, G. (2008), "Developments in steel frame joints in New Zealand", Struct. Eng 86 (16) 20-21.
- [18] Khoo, H., Clifton, C., Butterworth, J., MacRae, G., and Ferguson, G. (2012), "Influence of steel shim hardness on the sliding hinge joint performance"; Journal of Constructional Steel Research, 72, 119-129.
- [19] MacRae, G.A., Clifton, G.C., Mackinven, H., Mago, N., Butterworth, J., and Pampanin, S. (2010), "The sliding hinge joint moment connection", Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 43(3), September.
- [20] Ramhormozian, S., Clifton, G.C., and MacRae, G.A. (2014), "The Asymmetric Friction Connection with Belleville Springs in the Sliding Hinge Joint", Paper presented at the NZSEE Conference.
- [21] Ramhormozian, S., Clifton, G.C., Nguyen, H., and Cowle, K. (2015), "Determination of the Required Part-Turn of the Nut with Respect to the Number of Free Threads under the Loaded Face of the Nut in Fully Tensioned High Strength Friction Grip Property Class 8.8 Bolt", Paper presented at the Steel Innovations Conference.
- [22] Piluso, V., Montuori, R., and Troisi, M. (2014), "Innovative structural details in MR-frames for free from damage structures", Mechanical Research Communications, 58, 146-156.
- [23] Latour, M., Piluso, V., and Rizzano, G. (2018), "Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminum friction dampers", Journal of Constructional Steel Research, 146, 33-48.
- [24] Latour, M., Piluso, V., and Rizzano, G. (2015), "Free from damage beam-to-column joints: testing and design of DST connections with friction pads", Engineering Structures, 85, 219-233.
- [25] Butterworth, J.W., and Clifton, G.C. (2000), "Performance of hierarchical friction dissipating joints in moment resisting steel frames", In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper N, 718.
- [26] Borzouie, J., Macrae, G., and Chase, J. (2015), "Cyclic performance of asymmetric friction connections with grade 10.9 bolts", Bridge Structures, 45(1).
- [27] Khoo, H.-H., Clifton, C., Butterworth, J., and MacRae, G. (2013), "Experimental study of full-scale self-centering sliding hinge joint connections with friction Ring Springs", Journal of Earthquake Engineering, 17(7), 972-997.
- [28] Bruneau, M., and MacRae, G. (2017), "Reconstructing Christchurch: A Seismic Shift in Building Structural Systems", University of Canterbury, The Quake Centre.
- [29] V. Piluso, G. Rizzano, M. Latour, A. Francavilla, S. Di Benedetto, R. Landolfo, M. D'aniello, L. Simoes da Silva, A. Santiago, A. Santos, J. Jaspert, J. Demonceau, "Informative Documents of the Dissemination project FREEDAM-PLUS," GA 899321-2020. available at <https://www.steelconstruct.com/eu-projects/freedam-2/documents/>.
- [30] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., and Landolfo, R. (2018), "Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 115, 66-81.
- [1] Engelhardt, M.D. and Husain, A.S. (1993), "Cyclic-Loading Performance of Welded Flange-Bolted Web Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, pp. 3537-3550.
- [2] Hassanipour, A., Rahnavard, R., Mokhtari, A. and Rahnavard, N. (2015), "Numerical Investigation on Reduced Beam Web Section Moment Connections under the Effect of Cyclic Loading", Journal of Multidisciplinary Engineering. Science and Technology, Vol. 119, pp. 2054-2061.
- [3] Rahnavard, R., Hassanipour, A. and Siahpolo, N. (2015), "Analytical Study on New Types of Reduced Beam Section Moment Connections Affecting Cyclic Behavior", Case Studies in Structural Engineering, Vol. 3, pp. 33-51.
- [4] Fanaie, N., Kazerani, S. and Soroushnia, S. (2015), "Numerical Study of Slotted Web Drilled Flange Moment Frame Connection", Numerical Methods in Civil Engineering, Vol. 1, pp. 16-23.
- [5] Mirghaderi, S.R., Torabian, S. and Imanpour, A. (2010), "Seismic Performance of the Accordion-Web RBS Connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 277-288.
- [6] Saleh, A., Mirghaderi, S. and Zahrai, S. (2016), "Cyclic Testing of Tubular Web RBS Connections in Deep Beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 117, pp. 214- 226.
- [7] Morrison, M., Schweizer, D. and Hassan, T. (2015), "An Innovative Seismic Performance Enhancement Technique for Steel Building Moment Resisting Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 109, pp. 34-46.
- [8] Oh, S.-H., Kim, Y.-J. and Ryu, H.-S (2009), "Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers", Engineering Structures, Vol. 31, pp. 1997-2008.
- [9] Saffari, H., Hedayat, A. and Nejad, M.P. (2013), "Post-Northridge Connections with Slit Dampers to Enhance Strength and Ductility", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 80, PP. 138-152.
- [10] Köken, A., Köroglu, A. (2015), "Experimental Study on Beam-to-Column Connections of Steel Frame Structures with Steel Slit Dampers", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 29, pp. 1-11.
- [11] Vasdravellis, G., Karavasilis, T. and Uy, B. (2013), "Finite Element Models and Cyclic Behavior of Self-Centering Steel Post-Tensioned Connections with Web Hourglass Pins", Engineering Structures, Vol. 52, pp. 1-1.
- [12] Khalili, M., Sivandi-Pour, A., Farsangi, EN. (2021), "Experimental and numerical investigations of a new hysteretic damper for seismic resilient steel moment connections", Journal of Building Engineering, 1;43:102811.
- [13] Molavi, R., Izadnia, M., Shahidi, AR. (2020), "Numerical and experimental studies on cyclic behavior of beam-to-column connection with yielding steel damper", International Journal of Steel Structures, 20(2):480-92.
- [14] Grigorian, C.E., Yang, T.S., Popov, E.P. (1993), "Slotted bolted connection energy dissipators", Earthquake Spectra 9 (3) 491-504.
- [15] MacKinven, H. (2006), "Sliding Hinge Joint for Steel Moment Frames Experimental Testing", ENCI 493 Project Report, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.

- [31] Zahrai, S.M., and Vosooq, A.K. (2013), "Study of an Innovative Two-Stage Control System: Chevron Knee Bracing & Shear Panel In Series Connection", *Structural Engineering & Mechanics, An International Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 881-898. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2013.47.6.881>.
- [32] Hosseini Hashemi, B., and Moaddab, E. (2017), "Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 170(10), 722-734.
- [33] Cavallaro, G.F., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., and Rizzano, G. (2018), "Cyclic response of low yielding connections using different friction materials", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 404-423.
- [34] Zhang, P., Nagae, T., McCormick, J., Ikenaga, M., Katsuo, M., and Nakashima, M. (2008), "Friction-based sliding between steel and steel, steel and concrete, and wood and stone", In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 2008 (pp. 12-17).
- [35] Pijpers, R.J., and Slot, H.M. (2020), "Friction coefficients for steel to steel contact surfaces in air and seawater", *Journal of Physics: Conference Series*, 1669(1), 012002. IOP Publishing.
- [36] Garoosi, A., Moradi, T., Roudsari, M., and Hosseini Hashemi, B. (2018), "Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse", *Structures*, 16, Elsevier.
- [37] Garoosi, A., Moradi, T., Roudsari, M., and Hosseini Hashemi, B. (2020), "Experimental and numerical evaluation of rigid connection with reduced depth section", *Steel and Composite Structures*, 34(6), 863-875.
- [38] Roudsari, M.T., Sohaei, S., Torkaman, M., Safaei, S.A., Tahmasebi, S., Mohammadi, S., and Ghiasvand, M.M. (2020), "Presenting a new detail for the rigid connection between I-shaped beam and concrete-filled steel tube column with stiffened channel link", *International Journal of Steel Structures*, 1-13.
- [39] Solhmirzaei, A., Roudsari, M.T., and Hashemi, B.H. (2021), "A new detail for the panel zone of beam-to-wide flange column connections with endplate", *Structures*, 34, 1108-1123. Elsevier.
- [40] ANSI/AISC 358-16 (2016), "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications", American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.