

# مطالعه عددی و آزمایشگاهی اتصال نوآورانه فولادی مجهز به میراگر تسلیمی از نوع

## صفحات فلزی

سجاد ملکی<sup>۱</sup>، مهرزاد تحملی رودسری<sup>۲\*</sup>، محمدرضا قطب<sup>۳</sup>، بهرخ حسینی هاشمی<sup>۴</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. [tahamouli@iaau.ac.ir](mailto:tahamouli@iaau.ac.ir)

۳- گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۴- پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

### چکیده

اتصالات در سیستم‌های سازه‌ای به عنوان حیاتی‌ترین اجزا در زنجیره انتقال بار و حفظ انسجام کلی سازه تحت انواع بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی شناخته می‌شوند. استفاده از سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی به عنوان فیوزهای سازه‌ای قابل تعویض، راهکاری مناسب برای محافظت از سازه در برابر نیروهای زلزله است. با این وجود، وابستگی عملکرد چرخه‌ای فیوزهای تسلیمی به ابعاد مقطع تیر و ریسک آسیب‌دیدگی اعضای باربر اصلی، از چالش‌های اساسی در مطالعات پیشین محسوب می‌شود. برای رفع این چالش، این پژوهش یک اتصال نوآورانه مجهز به مفصل پینی معرفی می‌کند که با تبدیل دوران تیر به تسلیم میراگر تعویض‌پذیر، آسیب‌ها را در این ناحیه متمرکز می‌کند. این مکانیزم علاوه بر محافظت از تیر و ستون، رفتار چرخه‌ای اتصال را از ابعاد مقطع تیر مستقل می‌سازد. در ابتدا، رفتار لرزه‌ای سه نوع عملکرد تسلیم شامل حالات خمشی، برشی و میراگر ADAS به صورت آزمایشگاهی و تحت بارگذاری چرخه‌ای مقایسه شد. سپس، با توجه به عملکرد مطلوب‌تر میراگر ADAS، مدل عددی اتصال صحت‌سنجی گردید و مطالعه پارامتریک بر روی ۱۲ مدل با تغییر عرض حداقل و ضخامت میراگر انجام شد تا اثر این پارامترها بر پاسخ لرزه‌ای اتصال ارزیابی شود. نتایج نشان داد که میراگر ADAS با دستیابی به دوران نهایی ۰/۰۸ رادیان، شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. همچنین افزایش عرض و ضخامت میراگر موجب افزایش سختی، لنگر حداکثر و انرژی جذب‌شده اتصال شد. بررسی اثر ابعاد مقطع تیر نشان داد که در صورت ثابت ماندن بازوی نیرو، تغییر سایز تیر تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر پاسخ چرخه‌ای اتصال ندارد.

### کلمات کلیدی

اتصال فولادی، میراگر تسلیمی، مطالعه آزمایشگاهی، رفتار چرخه‌ای، جذب انرژی.

در پی وقوع زلزله‌های نورثریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵)، تعدادی از ساختمان‌های فولادی با اتصالات سنتی دچار آسیب‌های جدی شدند. بررسی‌های دقیق سازه‌های آسیب‌دیده نشان داد که این ساختمان‌ها از لحاظ شکل‌پذیری و توانایی اتلاف انرژی عملکرد ضعیفی دارند. در بسیاری از موارد، شکست‌های شکننده در اتصالات تیر به ستون مشاهده شد که ناشی از ظرفیت چرخشی پلاستیکی ناکافی تیرها بود. این آسیب‌ها موجب شد تا تلاش‌هایی برای طراحی راهکارهایی جهت بهبود شکل‌پذیری اتصالات لحظه‌ای آغاز شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های پیشنهادی، طراحی اتصالات با رفتار پلاستیکی تیر در فاصله‌ای مشخص از ستون یا استفاده از اعضای اضافی نظیر میراگرها است. این روش‌ها نه تنها به ایجاد دوران کافی و جذب انرژی می‌پردازند، بلکه از حفظ سختی و استحکام اتصال در سطحی مناسب نیز اطمینان حاصل می‌کنند. یکی دیگر از راهکارها استفاده از المان‌های تسلیمی در اتصال تیر به ستون است که می‌تواند به بهبود جذب انرژی اتصال کمک کند [۱، ۲].

در سال‌های اخیر، استفاده از میراگرهای تسلیمی به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۳]. این میراگرها با جذب انرژی و کاهش پاسخ سازه، می‌توانند عملکرد سازه را در برابر نیروهای جانبی بهبود بخشند و از آسیب‌های جدی جلوگیری کنند [۴]. به همین ترتیب پیکربندی‌های زیادی برای این میراگرها پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ای که توسط سو و هالیم [۱] (۲۰۱۸) انجام شد، عملکرد جدیدی از طراحی اتصال را با استفاده از میراگرهای فولادی منحنی شکل تقویت‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفت [۵]. آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی میراگرها و اتصالات را با ابعاد مختلف میراگر، تحت بارگذاری‌های افزایشی انجام شد. نتایج نشان داد که این طراحی قادر است تا حدود ۳۷٪ انرژی لرزه‌ای را جذب کرده و با ارائه تغییرشکل‌های بزرگ بدون کماتش محلی میراگر، به بهبود ویژگی‌های لرزه‌ای سازه‌ها کمک کند. در مطالعه‌ای که توسط لور و همکاران [۶] (۲۰۱۹) انجام شد، اتصالات جدیدی معرفی گردید که تیر را به ستون با میراگرهای شیاردار متصل می‌کردند [۶]. این میراگرها به عنوان فیوز عمل کرده و از ایجاد آسیب‌های پلاستیکی در ستون، تیر، جوش‌ها و ناحیه پانل جلوگیری می‌کنند. دو نمونه آزمایشی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اتصال با دو میراگر شیاردار عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به نمونه با یک میراگر دارد و انرژی بیشتری را در طول بارگذاری جذب می‌کند. آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مطابقت خوبی با داده‌های تجربی داشتند و نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالا و ظرفیت جذب انرژی اتصالات پیشنهادی بودند. در مطالعه‌ای که توسط ناظران و همکاران [۷] (۲۰۲۴) انجام شد [۷]، رفتار عددی و تجربی قاب‌های بتنی با میراگر TADAS<sup>۲</sup> تحت بارگذاری جانبی بررسی گردید. نتایج نشان داد که این میراگر می‌تواند موجب تقویت سازه‌های بتنی آسیب‌دیده شود. همچنین، افزایش ضخامت و تعداد صفحات خمشی میراگر باعث افزایش نیروی برشی پایه شد. در تحقیق دیگر، چراغی و تحملی‌رودسری [۸] (۲۰۲۴) به بررسی رفتار سیکلی میراگر TADAS و تأثیر نیروی محوری بر عملکرد آن پرداخته‌اند [۸]. نتایج نشان داد که کاهش ارتفاع و افزایش عرض این میراگر، موجب بهبود جذب انرژی، افزایش سختی مؤثر و تقویت استحکام نهایی آن می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط خوشکلام و همکاران [۹] (۲۰۲۱) انجام شد، میراگر ۳ADAS را طوری اصلاح کردند که نیروی محوری آن در طول تغییرشکل حذف شود [۹]. این میراگر با ویژگی‌های مشابه میراگر ADAS با شرایط مرزی جدید ساخته شده و نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میراگر اصلاح شده می‌تواند در مقایسه با میراگر ADAS، نیروی محوری کمتری ایجاد کند و ظرفیت جذب انرژی آن در تغییرشکل‌های بزرگ به‌طور چشمگیری افزایش یابد. همچنین، در تحقیقی دیگر که توسط چراغی و همکاران [۱۰] انجام شد، به تأثیر نیروی محوری بر عملکرد میراگر ADAS پرداخته شده است. در این تحقیق، کاهش مساحت بازشو و ارتفاع، و همچنین افزایش عرض میراگر، موجب بهبود جذب انرژی و افزایش سختی مؤثر آن گردید. میراگرهای TADAS و ADAS در مطالعاتی دیگر بر روی قاب‌های بتنی و فولادی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۱-۱۴]. این تحقیقات نشان دادند که این میراگرها موجب افزایش سختی الاستیک، مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب سازه‌ای می‌شوند.

<sup>۱</sup> Hsu and Halim

<sup>۲</sup> TADAS ( Triangular-plate Added Damping and Stiffness)

<sup>۳</sup> ADAS (Added Damping and Stiffness)

در مطالعه‌ای که توسط ژوانگ و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، نوع جدیدی از میراگر فلزی چرخشی برای اتصالات تیر-ستون ارائه شد که ظرفیت جذب انرژی و تغییر شکل اتصالات را بهبود می‌بخشد [۱۵]. این میراگر که در ناحیه اتصال نصب می‌شود، به راحتی قابل مونتاژ و جداسازی است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این میراگر با استفاده از فولادهای با نقطه تسلیم پایین و فولادهای با استحکام بالا، رفتار هیستریزس پایدار دارد و ظرفیت بالایی برای جذب انرژی در تغییر شکل‌های بزرگ و کوچک نشان می‌دهد. تحلیل‌ها نشان داد که این میراگر می‌تواند به طور قابل توجهی ظرفیت تغییر شکل و عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر-ستون را بهبود بخشد. در مطالعه‌ای که توسط لی و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد، یک اتصال جدید تیر-ستون پیش‌ساخته با استفاده از میراگر فلزی به عنوان اتصال‌دهنده پیشنهاد گردید [۱۶]. دو نوع میراگر فلزی، یکی با طراحی استخوانی و دیگری با طراحی دو لبه، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میراگر دو لبه دارای مقاومت خمشی و ظرفیت تغییر شکل بهتری نسبت به میراگر استخوانی بود و توانست انرژی بیشتری جذب کند. همچنین، آزمایش‌ها نشان داد که این اتصال پیش‌ساخته به راحتی قابل مونتاژ و جداسازی است و آسیب‌های پلاستیکی عمدتاً در میراگر فلزی متمرکز می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، برای بهبود اتصالات سازه‌های فولادی، یک میراگر جدید مورد بررسی قرار گرفت که به طور خاص برای ناحیه اتصال تیر به ستون طراحی شده است. این میراگر که از هسته‌ای ترکیبی از فولاد و لاستیک تشکیل شده، به جذب آسیب‌های لرزه‌ای و افزایش میرایی هیستریزس در اتصالات کمک می‌کند. آزمایش‌های چرخه‌ای مختلف برای ارزیابی تأثیر پارامترهای میراگر انجام شد و نتایج آن به طور جامع تحلیل گردید [۱۷]. در مطالعه‌ای دیگر، اثرگذاری یک میراگر فلزی جدید به نام میراگر میله‌ای در بهبود عملکرد چرخه‌ای یک قاب نیمه‌صلب بررسی شد. میراگر میله‌ای از میله‌های جامدی تشکیل شده است که بین دو صفحه بالایی و پایینی قرار دارند و انرژی خارجی اعمال‌شده را از طریق تغییر شکل‌های پلاستیکی دفع می‌کنند. برای ارزیابی اثرگذاری میراگر میله‌ای، تحلیل اولیه بارافزون بر روی یک قاب نیمه‌صلب مجهز به این میراگرها انجام شد و با قاب‌های صلب و نیمه‌صلب بدون میراگر مقایسه گردید تا تأثیر میراگر میله‌ای بر توزیع تنش در قاب‌ها مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، آزمایش‌های چرخه‌ای شبه‌استاتیک بر روی قاب‌های نیمه‌صلب با و بدون میراگر میله‌ای انجام شد. نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با استفاده از اجزای محدود، تأثیر قابل توجه میراگر میله‌ای در بهبود مقاومت، سختی مؤثر، نسبت میرایی و ظرفیت جذب انرژی قاب‌ها را نشان داد [۱۸]. چراغی و همکاران در سال ۲۰۲۵ به بررسی عددی اثر لینک‌های برشی ساخته‌شده از فولاد با تنش تسلیم پایین بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی پرداختند [۱۹]. نتایج تحلیل‌های عددی و پوش‌آور نشان داد که استفاده از این لینک‌ها موجب افزایش سختی، مقاومت جانبی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی قاب می‌شود و می‌تواند راهکاری مؤثر در بهبود طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتنی باشد. در پژوهشی دیگر [۲۰] در سال ۲۰۲۵، رفتار چرخه‌ای میراگرهای U شکل زاویه‌دار تسلیمی، تحت اثر جهت‌های مختلف بارگذاری به صورت عددی و تحلیلی ارزیابی شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، اثر ابعاد میراگر بر ظرفیت جذب انرژی، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و ضریب میرایی معادل بررسی گردید. نتایج نشان داد که جهت بارگذاری پیشنهادی می‌تواند پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای میراگر را بهبود دهد. چراغی و همکاران در سال ۲۰۲۵ اثر نیروی محوری بر عملکرد لرزه‌ای میراگر میله‌ای را مطالعه کردند [۲۱]. در این پژوهش، پس از صحت‌سنجی مدل عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی، اثر درصدهای مختلفی از بار کمانشی بر رفتار چرخه‌ای میراگر بررسی شد. نتایج نشان داد که نیروی محوری باعث کاهش سختی و مقاومت می‌شود، در حالی که اثر آن بر اتلاف انرژی ناچیز بوده و نسبت میرایی معادل را افزایش می‌دهد. در یک مطالعه آزمایشگاهی در سال ۲۰۲۵ [۲۲]، عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون قاب فولادی مجهز به میراگرهای حلقوی بررسی شد. نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی و شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داد که این میراگرها با انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک و کنترل شکست، موجب بهبود ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی اتصال می‌شوند و می‌توانند در طراحی اتصالات مقاوم لرزه‌ای کاربرد داشته باشند. الصادون، لبلوبا و فقیری در سال ۲۰۲۳ عملکرد یک میراگر فولادی خمیده نوین را برای قاب‌های فولادی با اتصالات تیر به ستون انعطاف‌پذیر به صورت آزمایشگاهی ارزیابی کردند. در این پژوهش، سه قاب فولادی نیم‌مقیاس تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی کنترل‌شده با جابه‌جایی آزمایش شد که یکی به عنوان نمونه شاهد و دو نمونه دیگر مجهز به میراگر بودند. نتایج نشان داد که استفاده از این ابزار اتلاف انرژی موجب کاهش آسیب، افزایش حدود ۱٫۵ برابری شکل‌پذیری جابه‌جایی و افزایش ۸۴ تا ۱۱۳ درصدی اتلاف انرژی تجمعی نسبت به قاب شاهد می‌شود.

علی‌رغم گسترش استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی، موضوع تعمیرپذیری (ترمیم‌پذیری) اتصالات پس از زلزله همچنان به عنوان یک حلقه مفقوده در مهندسی زلزله شناخته می‌شود. مرور مطالعات موجود حاکی از آن است که اغلب پژوهش‌ها بر عملکرد کلی میراگرها در سطح قاب سازه‌ای تمرکز داشته‌اند، در حالی که انتقال کنترل‌شده دوران تیر به میراگر به عنوان ابزاری برای مدیریت آسیب، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. شکاف اصلی مطالعات فعلی، عدم هم‌سوسازی دو هدف تمرکز ایزوله آسیب و حفظ رفتار الاستیک اعضای اصلی تحت رویکردهای مختلف بارگذاری است. نوآوری این پژوهش در ارائه یک سیستم اتصال نوین است که با بهره‌گیری از مفصل پینی، دوران تیر را به یک تغییرشکل هدفمند در میراگر تبدیل می‌کند. این رویکرد، پدیده جاری شدن را به قطعه‌ای تعویض‌پذیر محدود کرده و فرآیند طراحی اتصال را از قید ابعاد مقطع تیر رها می‌سازد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا عملکرد سه مکانیزم تسلیم شامل رویکردهای خمشی، برشی و ADAS در شرایط آزمایشگاهی یکسان مقایسه شد. سپس، با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی شده، تأثیر پارامترهای هندسی میراگر بر پارامترهای لرزه‌ای از طریق یک مطالعه پارامتریک گسترده مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار و کارایی این سیستم در شرایط مختلف ارزیابی شود.

## ۲- متدولوژی

روند کلی انجام پژوهش در شکل ۲ به صورت فلوچارت نشان داده شده است. مطابق این شکل، پژوهش از توضیح مبنای شکل‌گیری اتصال پیشنهادی آغاز شده و سپس با طراحی اتصال، ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، انجام آزمایش‌های چرخه‌ای، انتخاب نمونه مناسب، توسعه و صحت‌سنجی مدل عددی، مطالعه پارامتریک و تحلیل نهایی نتایج ادامه یافته است. مدل پیشنهادی با هدف کنترل مسیر انتقال نیرو و تمرکز آسیب در یک میراگر قابل تعویض شکل گرفته است. در اتصالات رایج، دوران تیر و تمرکز تنش در محل اتصال می‌تواند باعث آسیب در تیر، ستون، جوش‌ها یا ناحیه اتصال شود و ترمیم سازه پس از زلزله را دشوار کند. در این پژوهش، از مفصل پینی به عنوان مرکز دوران استفاده شد تا دوران تیر به صورت کنترل‌شده به تغییرشکل پلاستیک میراگر منتقل شود. هدف اصلی این طرح، حفظ رفتار الاستیک تیر و ستون و متمرکز کردن آسیب در میراگر تسلیمی است. برای بررسی عملکرد اتصال، سه نمونه آزمایشگاهی با سازوکارهای تسلیم متفاوت شامل خمشی، برشی و ADAS طراحی و ساخته شد. این نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی آزمایش شدند و پاسخ آن‌ها بر اساس منحنی هیستریزس، سختی الاستیک، لنگر نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی تجمعی و میرایی ویسکوز معادل مقایسه شد. پس از مقایسه نتایج، نمونه مجهز به میراگر ADAS به دلیل رفتار پایدارتر و ظرفیت جذب انرژی بیشتر برای ادامه مطالعه انتخاب گردید. در ادامه، مدل عددی اتصال در نرم‌افزار Abaqus توسعه داده شد و رفتار آن با تحلیل استاتیکی غیرخطی بررسی گردید. در مدل‌سازی، اجزای اتصال با المان‌های حجمی شبیه‌سازی شدند و اثرات غیرخطی هندسی و مصالح در نظر گرفته شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، مطالعه پارامتریک بر روی ۱۲ مدل با تغییر ضخامت و عرض حداقل میراگر ADAS انجام شد. در پایان نیز اثر تغییر ابعاد مقطع تیر با ثابت نگه داشتن بازوی انتقال نیرو بررسی گردید.

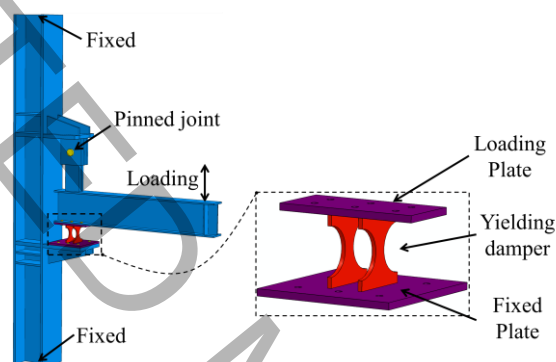


شکل ۱ فلوچارت مراحل انجام پژوهش

Fig. 1 Research procedure flowchart

### ۳- معرفی مدل پیشنهادی

پیکربندی و عملکرد اتصال نوین پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است که در آن، برای تمرکز دوران و انتقال نیرو از یک مفصل پینی به عنوان مرکز دوران استفاده می‌گردد. در این سیستم، المان مستهلک‌کننده انرژی شامل یک میراگر تسلیمی است که به منظور حفظ یکپارچگی، به دو صفحه فولادی فوقانی و تحتانی جوش شده و این مجموعه به واسطه اتصالات پیچی به اجزای اصلی سازه متصل می‌شود. سازوکار عملکردی به گونه‌ای طراحی شده است که با اعمال بارگذاری، ورق فوقانی هم‌گام با دوران تیر تحت جابه‌جایی و بار قرار گرفته در حالی که ورق تحتانی در وضعیت ثابت باقی می‌ماند؛ این اختلاف حرکت منجر به جاری شدن پلاستیک در میراگر و استهلاک انرژی ورودی می‌گردد تا اعضای باربر اصلی شامل تیر و ستون فاقد آسیب جدی باقی مانده و در محدوده عملکرد الاستیک حفظ شوند. به منظور تأمین فضای لازم جهت دوران بدون مانع تیر و جلوگیری از برخورد آن با وجه ستون، فاصله ۵۰ میلی‌متر در انتهای تیر در نظر گرفته شده است؛ همچنین، در ستون از چندین ورق سخت‌کننده جهت تقویت موضعی و ممانعت از کمناش جان در نواحی تحت بارگذاری و اتصال استفاده شده است. اتصال صفحات واسط میراگر به اجزای اصلی سازه توسط ۱۲ عدد بولت با قطر ۱۲ میلی‌متر انجام شده است تا فرآیند نصب و تعویض قطعات به سهولت صورت پذیرد.



شکل ۲ اجزای تشکیل‌دهنده مدل پیشنهادی

Fig. 2 Components of the proposed model

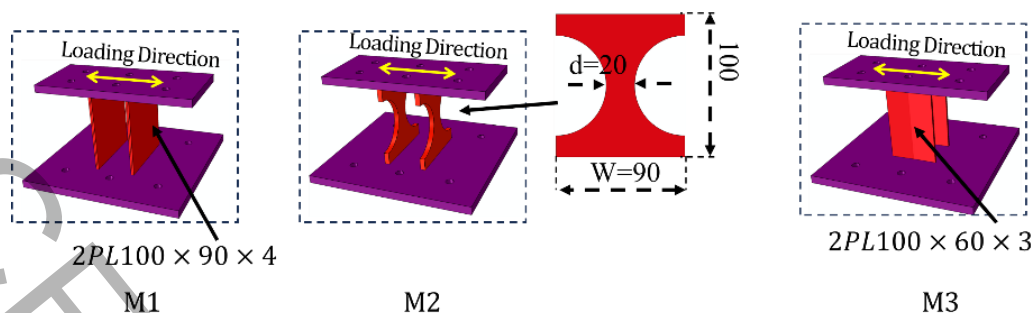
### ۴- مطالعه آزمایشگاهی

در این بخش، جزئیات مربوط به برنامه آزمایشگاهی، ویژگی‌های هندسی اجزا و مشخصات مصالح مصرفی تشریح می‌شود. تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مهندسی سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه به اجرا درآمده است. به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی، سه پیکربندی مختلف برای میراگرهای تسلیمی طراحی و ساخته شد. برای رعایت معیار ستون قوی تیر ضعیف، مقطع ستون از نوع IPB200 به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و مقطع تیر از نوع IPE180 به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر انتخاب گردید. تفاوت اصلی نمونه‌ها در هندسه میراگر نهفته است که در شکل ۴ با شناسه‌های M1، M2 و M3 نمایش داده شده‌اند. در این اتصال از یک پین به قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است که به منظور تأمین دوران آزادانه تیر و فاقد اصطکاک در مرکز دوران تعبیه گردیده است. در تمامی مدل‌ها، هدف اصلی تمرکز جابه‌جایی‌های غیرخطی در این اجزا و ممانعت از ورود تیر و ستون به فاز پلاستیک است. فاصله مرکز پین تا سطح فوقانی تیر برابر ۲۲۰ میلی‌متر می‌باشد. جزئیات ابعادی میراگرها در شکل ۴ ارائه شده است که بر این اساس مشخصات هر نمونه به شرح زیر تعریف می‌گردد:

نمونه M1 (رویکرد خمشی): این واحد از دو ورق با ابعاد ۱۰۰ در ۹۰ در ۴ میلی‌متر تشکیل شده است که به صورت افقی در تراز بالا و پایین تعبیه شده‌اند تا تحت لنگر خمشی ناشی از دوران تیر به تسلیم برسند.

نمونه M2 (میراگر ADAS): این میراگر با هندسه ویژه خود دارای عرض کل ۹۰ میلی‌متر و عرض حداقل ۲۰ میلی‌متر در ناحیه میانی است. ارتفاع این قطعه ۱۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است.

نمونه M3 (رویکرد برشی): در این پیکربندی از دو ورق با ابعاد ۱۰۰ در ۶۰ در ۳ میلی‌متر استفاده شده است. این ورق‌ها به گونه‌ای در اتصال جایگذاری شده‌اند که استهلاک انرژی از طریق جاری‌شدن برشی محقق گردد.



شکل ۳ پیکربندی و ابعاد هندسی میراگرهای آزمایشگاهی (واحد میلی‌متر)

Fig. 3 Configuration and geometric dimensions of experimental dampers (unit: mm)

### ۳-۱- الگوسازی تجربی

به منظور اطمینان از صحت نتایج و ایجاد شرایط یکسان در فرآیند مقایسه، تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از مصالحی با مشخصات کاملاً یکسان و تحت یک رویه استاندارد و واحد ساخته شدند. پیش از اعمال هرگونه بارگذاری، تمامی اتصالات جوشی در بخش‌های کلیدی شامل ستون، تیر و ورق‌های سخت‌کننده با بهره‌گیری از روش‌های بازرسی غیرمخرب مورد ارزیابی قرار گرفتند تا از کیفیت اجرا و عدم وجود عیوب ساختاری اطمینان حاصل گردد. مصالح به‌کاررفته در ساخت تمامی اجزای سازه‌ای از جمله ستون، بال و جان تیر، میراگرهای تسلیمی و سخت‌کننده‌ها، از نوع فولاد ساختمانی بودند.

برای تعیین دقیق خواص مکانیکی و رفتاری فولاد مصرفی، آزمایش‌های کشش طبق ضوابط استاندارد ASTM A370 [۲۳] بر روی نمونه‌های استاندارد انجام گرفت. مقادیر مندرج در جدول ۱، حاصل میانگین سه آزمایش مجزا برای هر جزء می‌باشد که پارامترهای اساسی شامل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، تنش نهایی و درصد افزایش طول را پوشش می‌دهد. همچنین، پیچ‌های مورد استفاده در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایشگاهی، دارای تنش تسلیم و نهایی بسیار بالایی هستند که آن‌ها را در رده پیچ‌های پرمقاومت قرار می‌دهد.

Table 1 Mechanical properties of materials used in the study

جدول ۱ مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده در مطالعه

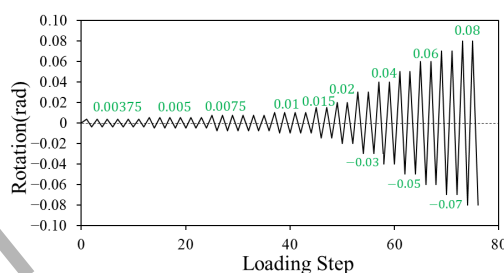
| نام جزء   | مدول الاستیسیته (GPa) | تنش تسلیم (MPa) | تنش نهایی (MPa) | درصد افزایش طول (%) |
|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| جان تیر   | ۱۹۸/۸                 | ۳۲۹/۱           | ۴۸۲/۱           | ۲۲/۳                |
| بال تیر   | ۱۹۵/۹                 | ۳۱۷/۷           | ۴۸۱/۴           | ۲۵/۱                |
| سخت‌کننده | ۱۹۶/۵                 | ۲۸۰             | ۴۱۳/۱           | ۲۰/۲                |
| جان ستون  | ۱۹۴                   | ۳۰۶/۴           | ۴۸۱/۸           | ۱۸/۸                |
| بال ستون  | ۱۹۱                   | ۳۱۱/۸           | ۴۸۴/۱           | ۲۱/۱                |
| پیچ‌ها    | ۲۰۲/۴                 | ۹۰۵             | ۱۰۹۲            | -                   |
| میراگرها  | ۱۹۹/۶                 | ۲۸۱/۴           | ۴۱۲             | ۲۰/۱                |

### ۳-۲- نتایج و بحث

به منظور بررسی دقیق رفتار لرزه‌ای و حذف اثرات دینامیکی، تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با کنترل جابه‌جایی مورد آزمون قرار گرفتند. در این فرآیند، بارگذاری توسط یک جک هیدرولیکی با سرعت کم و ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه

اعمال گردید تا دقت ثبت داده‌ها در تمامی مراحل تغییرشکل افزایش یابد. الگوی اعمال بار به صورت رفت و برگشتی (چرخه‌ای) و بر اساس پروتکل استاندارد FEMA 350 [۲۴] و مطابق شکل ۴ تنظیم شد که چارچوبی معتبر برای ارزیابی عملکرد اتصالات تحت اثر زلزله فراهم می‌آورد.

فرآیند آزمایش برای هر نمونه تا زمان وقوع یکی از معیارهای شکست ادامه یافت؛ این معیارها شامل کاهش محسوس در ظرفیت تحمل بار اتصال، مشاهده کمانش موضعی در اجزاء و یا بروز گسیختگی نهایی در هر یک از قطعات تشکیل‌دهنده ناحیه اتصال (به ویژه میراگرها) بود.

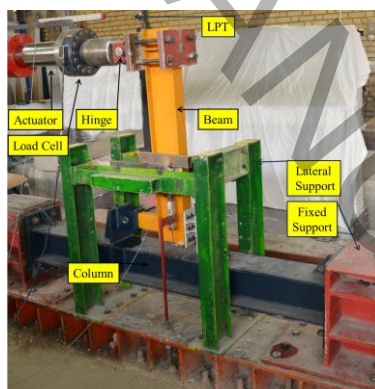


شکل ۴ الگوی بارگذاری

Fig. 4 Loading protocol

### ۳-۳- چیدمان آزمایشگاهی

مطابق با چیدمان نمایش داده شده در شکل ۵، نمونه‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه مورد آزمون قرار گرفتند. در این چیدمان، ستون نمونه به صورت افقی توسط تکیه‌گاه‌های صلب به کف آزمایشگاه مهار شده و تیر در وضعیت قائم قرار گرفته است. بارگذاری توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن اعمال می‌گردد که از یک سو به تکیه‌گاه صلب و از سوی دیگر توسط یک مفصل به انتهای تیر متصل شده است. برای ثبت دقیق مقدار نیروی اعمال شده، یک مبدل نیرویی<sup>۱</sup> در تراز اتصال جک به تیر نصب گردید.



شکل ۵ جزئیات چیدمان آزمایشگاهی، تجهیزات بارگذاری

Fig. 5 Details of experimental setup and loading equipment

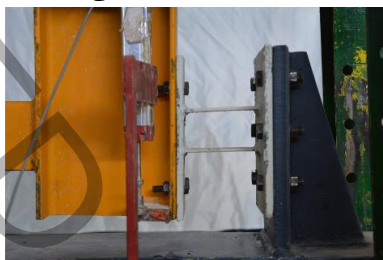
به منظور اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی در انتهای تیر، از سنسور جابه‌جایی خطی LPT با ظرفیت ۱۰۰ میلی‌متر و دقت  $\pm 0.01$  میلی‌متر استفاده شده است. همچنین جهت اطمینان از پایداری نمونه در حین بارگذاری و جلوگیری از کمانش خارج از صفحه تیر،

<sup>۱</sup> - Load Cell

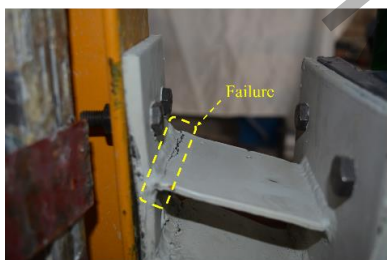
قاب‌های مهاربندی جانبی در دو سمت تیر تعبیه شده‌اند. تمامی تجهیزات اندازه‌گیری پیش از شروع آزمایش کالیبره شدند تا صحت داده‌های استخراج شده تضمین گردد. محور جک هیدرولیکی نیز دقیقاً هم‌راستا با محور جان تیر تنظیم گردید تا از بروز هرگونه پیچش ناخواسته در مقطع جلوگیری شود.

#### ۳-۴ نتایج و ارزیابی نمونه‌های آزمایشگاهی

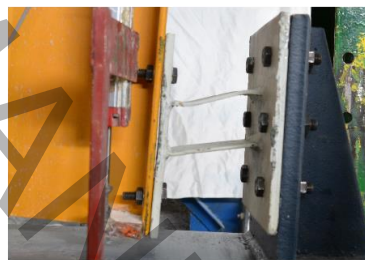
در این بخش، ارزیابی پاسخ لرزه‌ای نمونه M1 که مجهز به میراگر با رویکرد تسلیم خمشی است، ارائه می‌گردد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، سیستم تا دورانی  $0.05$  رادیان در محدوده خطی باقی مانده و سختی اولیه خود را حفظ کرد که نمای تغییرشکل یافته اتصال در پایان این مرحله در شکل ۶الف نمایش داده شده است. با پیشروی بارگذاری و ورود به ناحیه غیرخطی، میراگرها علاوه بر خمش، تحت اثر نیروهای کششی محوری نیز قرار گرفتند که این پدیده موجب توسعه شاخه صعودی در منحنی پاسخ و افزایش ظرفیت باربری اتصال گردید. وضعیت اجزای مستهلک‌کننده در دوران  $0.05$  رادیان در شکل ۶ب ارائه شده است که به وضوح نشان‌دهنده تغییرشکل‌های بزرگ میراگر تحت اثر توأم نیروهای خمشی و کششی یا فشاری می‌باشد. در نهایت، با افزایش جابه‌جایی در دوران  $0.07$  رادیان، رشد ترک خوردگی در مجاورت محل اتصال میراگر منجر به بروز گسیختگی در مقطع ورق گردید (شکل ۶ج) به‌طوری که در سیکل بعدی یعنی  $0.08$  رادیان به دلیل گسیختگی در محل تکیه‌گاه میراگر، بارگذاری متوقف شد.



(الف)



(ب)

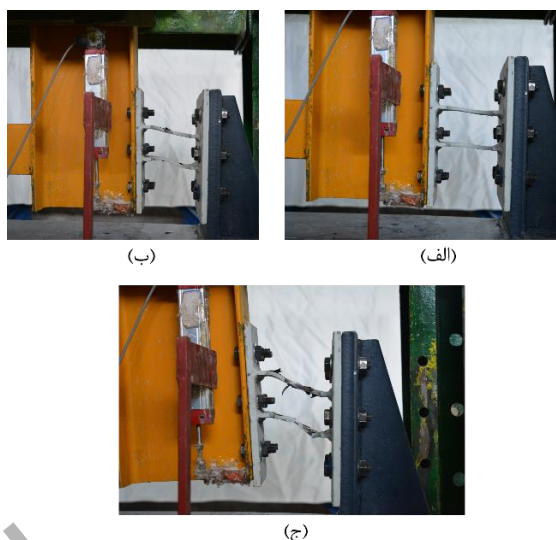


(ج)

شکل ۶ توالی تغییرشکل و الگوی خرابی در نمونه M1: (الف) پایان محدوده الاستیک، (ب) تغییرشکل میراگر در دوران  $0.05$  رادیان، (ج) گسیختگی نهایی در دوران  $0.07$  رادیان

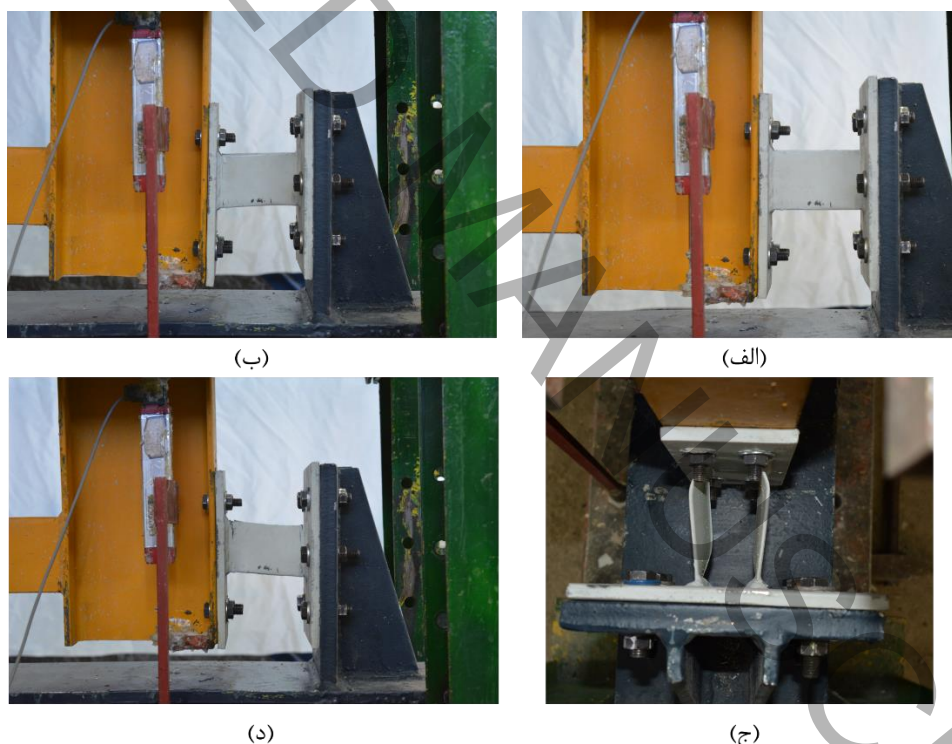
**Fig. 6 Deformation sequence and failure pattern of specimen M1: (a) End of elastic range, (b) Damper deformation at 0.05 radian rotation, (c) Final failure at 0.07 radian rotation**

رفتار اتصال مجهز به میراگرهای ADAS (مدل M2) در شکل ۷ نشان داده شده است. در ابتدای بارگذاری و تا دوران  $0.01$  (شکل ۷الف)، نمودار لنگر دوران روندی خطی داشت. پس از آغاز تسلیم میراگرها، پاسخ مدل رفتاری مشابه مدل M1 پیدا کرد؛ به‌طوری که در هر سیکل، یکی از میراگرها تحت کشش قرار گرفت (شکل ۷ب) و این موضوع باعث افزایش لنگر اتصال شد. با ادامه دوران تیر، انتقال نیرو به میراگرها ادامه یافت. در نهایت، بارگذاری در پایان سیکل دوم و در دوران  $0.08$  (شکل ۷ج) متوقف شد، زیرا تغییرشکل زیاد در میراگرها امکان تحمل بار بیشتر را از بین برد.



شکل ۷ مراحل تغییر شکل نمونه M2 شامل: (الف) رفتار الاستیک در دوران  $0.01$  رادیان، (ب) ورود به تسلیم، و کشش میراگر، و (ج) تغییر شکل نهایی در دوران  $0.08$  رادیان

**Fig. 7 Deformation stages of specimen M2 including: (a) Elastic behavior at 0.01 radian rotation, (b) Yielding and damper tension, and (c) Final deformation at 0.08 radian rotation**



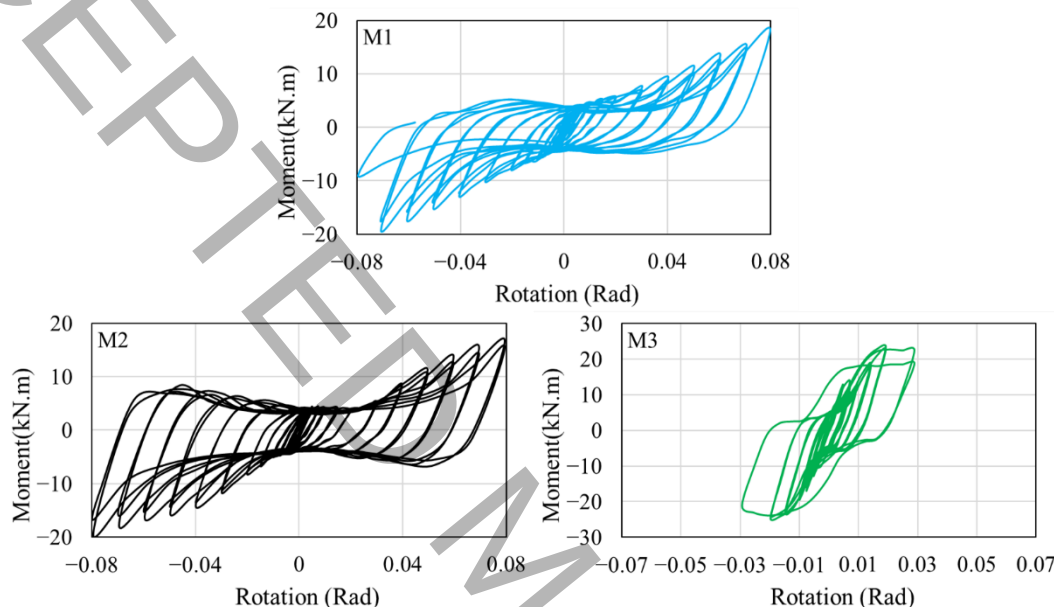
شکل ۸ توالی تغییر شکل در نمونه M3: (الف) فاز الاستیک، (ب) شروع ترک خوردگی در محل اتصال، (ج) کمانش خارج از صفحه و (د) گسیختگی و اعوجاج در دوران  $0.03$  رادیان

**Fig. 8 Deformation sequence of specimen M3: (a) Elastic phase, (b) Crack initiation at the connection region, (c) Out-of-plane buckling, and (d) Failure and distortion at 0.03 radian rotation**

در این بخش، رفتار آخرین نمونه آزمایشگاهی یعنی مدل M3 بررسی شده است. در این مدل، به دلیل قرارگیری ورق‌های تسلیمی به صورت برشی در اتصال، مقاومت آن نسبت به سایر میراگرها بیشتر بود. تا دوران  $0.0075$  (شکل ۸الف)، پاسخ اتصال ماهیت

الاستیک داشت. با افزایش بار، ترک خوردگی در محل اتصال میراگر شروع شد (شکل ۸ب) و تا دوران ۰/۰۲ روند افزایش مقاومت ادامه یافت. همچنین میراگرها در انتهای بارگذاری دچار پیچش نیز شدند که کمانش خارج از صفحه آن‌ها در شکل ۸ج نشان داده شده است. در نهایت، به علت گسیختگی میراگر در ناحیه اتصال و ایجاد اعوجاج در مدل، بارگذاری در دوران ۰/۰۳ متوقف گردید (شکل ۸د).

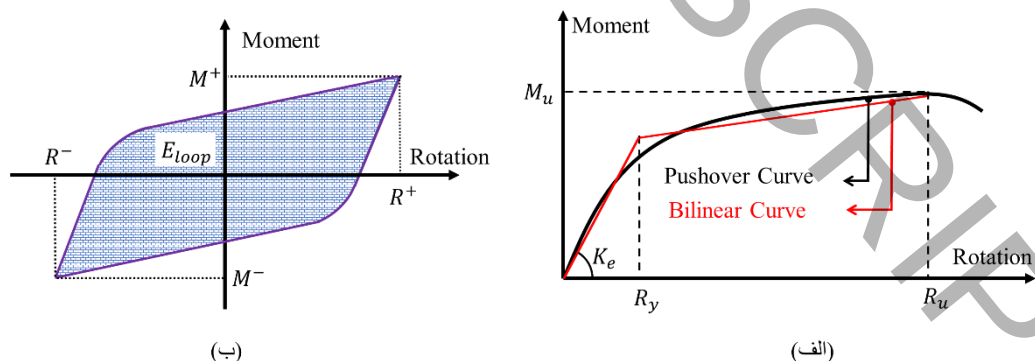
نتایج حلقه‌های هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۹ ارائه شده است. منحنی‌های مربوط به مدل‌های M1 و M2 رفتار بسیار نزدیکی داشته و در هر دو نمونه، شاخه نزولی نمودار تا پایان بارگذاری به‌وضوح دیده می‌شود. در مقابل، نتایج مدل M3 نشان می‌دهد که این اتصال شکل‌پذیری کمتری داشته و منحنی آن تا دوران ۰/۰۲ روند افزایشی را طی می‌کند. همچنین، در میان نمونه‌ها، مدل M2 با ثبت دوران نهایی ۰/۰۸، بیشترین ظرفیت دوران تا مرحله گسیختگی را از خود نشان داده است.



شکل ۹ نتایج هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی

Fig. 9 Hysteresis results of experimental specimens

برای معرفی خروجی‌های نمونه‌های آزمایشگاهی، شکل ۱۰ ارائه شد. در این شکل نتایج حاصل از نمودار هیستریزس و پوش منحنی و دو خطی آن ارائه شده است. منحنی دو خطی معادل بر اساس آیین‌نامه FEMA-440 [۲۵] و اصل انرژی برابر استخراج شد. بر همین اساس  $M_u$  معادل لنگر نهایی و ضریب شکل‌پذیری نیز بر اساس معادله ۱ قابل محاسبه است. شکل ۱۰ب شماتیک یک حلقه هیستریزس و پارامترهای معادل آن را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل  $E_{loop}$  معرف جذب انرژی در یک حلقه هیستریزس است. میرایی ویسکوز معادل برای این حلقه هیستریزس بر اساس معادله ۲ قابل محاسبه است.



شکل ۱۰ نمودار شماتیک (الف) پوش منحنی و (ب) پارامترهای یک حلقه هیستریزس

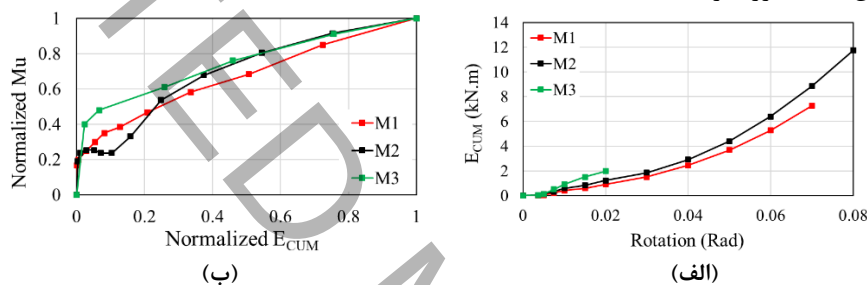
Fig. 10 Schematic diagram of (a) envelope curve and (b) parameters of a hysteresis loop

$$Ductility = \frac{R_u}{R_y} \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = \frac{E_{loop}}{2\pi M^+ R^+} \quad (2)$$

شکل ۱۱ الف روند تغییرات جذب انرژی تجمعی ( $E_{CUM}$ ) نمونه‌های آزمایشگاهی را بر حسب دوران نمایش می‌دهد. این شاخص از طریق جمع‌زدن مساحت محصورشده در حلقه‌های هیستریزس تا سطح دورانی مورد نظر به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که در دوران‌های ابتدایی، مدل M3 به دلیل سختی اولیه بیشتر، انرژی بالاتری را نسبت به دو نمونه دیگر جذب کرده است. با پیشروی بارگذاری و افزایش دوران، مدل M2 (مجهز به میراگر ADAS) به واسطه حلقه‌های هیستریزس پهن‌تر و ظرفیت دورانی بالاتر، به تدریج عملکرد برتر پیدا کرده و در نهایت بیشترین انرژی تجمعی را تا پایان بارگذاری مستهلک نموده است.

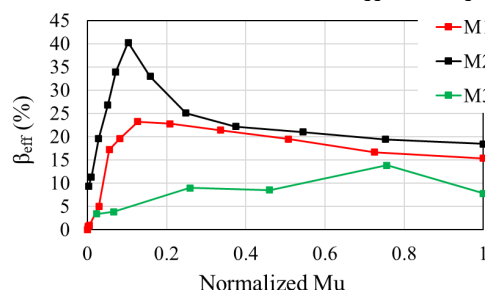
شکل ۱۱ ب تغییرات لنگر نرمال‌شده را نسبت به جذب انرژی تجمعی نرمال‌شده نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار می‌توان تخمین زد که هر مدل چه مقدار از انرژی کل خود را در سطوح مختلف مقاومت، جذب کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مقادیر پایین جذب انرژی، برای مثال در محدوده کمتر از ۲۰٪ جذب انرژی کل، مدل M3 به لنگر بیشتری نسبت به حداکثر خود رسیده است که قابلیت این میزان جذب انرژی را داشته است.



شکل ۱۱ (الف) جذب انرژی تجمعی (ب) تغییرات لنگر حداکثر نرمال‌شده به جذب انرژی نرمال‌شده

Fig. 11 (a) Cumulative energy dissipation, (b) Variation of normalized maximum moment with normalized energy absorption

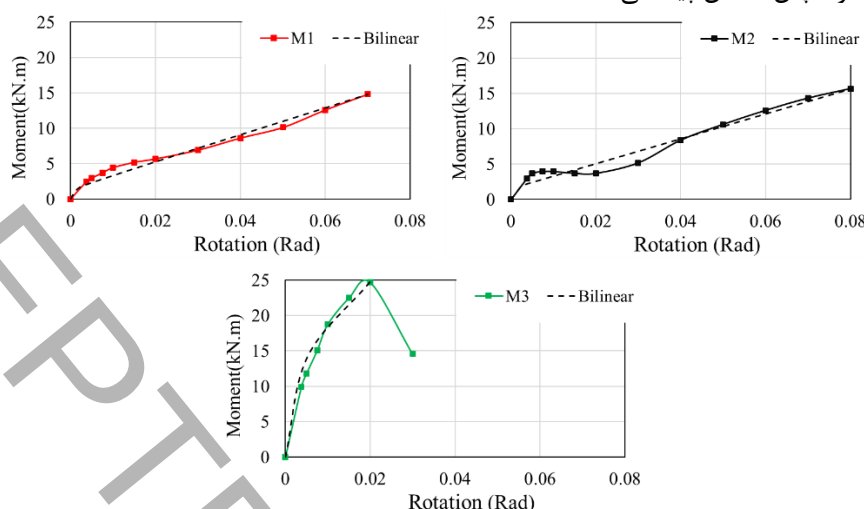
شکل ۱۲ روند تغییرات نسبت میرایی ویسکوز معادل را بر حسب لنگر نرمال‌شده برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. با آغاز مرحله تسلیم در میراگرها، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد و این موضوع باعث می‌شود نمودار میرایی در تمامی مدل‌ها روندی صعودی پیدا کند. در میان نمونه‌ها، مدل M2 با رسیدن به میرایی ویسکوز معادل حدود ۴۰٪ در ۰/۱ لنگر حداکثر خود، بیشترین نسبت میرایی را نشان داده است. در مقابل، مدل M3 به دلیل سختی اولیه بالا و محدود بودن ظرفیت دورانی، کمترین میزان میرایی ویسکوز معادل را تجربه کرده و بازده کمتری در جذب انرژی داشته است.



شکل ۱۲ نتایج میرایی ویسکوز معادل نسبت به لنگر حداکثر نرمال‌شده

Fig. 12 Equivalent viscous damping results versus normalized maximum moment

شکل ۱۳ پوش منحنی لنگر دوران سه نمونه M1، M2 و M3 را همراه با منحنی دوطبقی معادل آن‌ها نشان می‌دهد. در نمونه‌های M1 و M2 افزایش لنگر به صورت تدریجی با دوران ادامه یافته است. در نمونه M3 ابتدا لنگر تا مقدار بیشینه در دوران ۰/۰۲ رادیان افزایش یافته و سپس کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۳ نتایج پوش منحنی نتایج به همراه نمودار دو خطی معادل نمونه‌های آزمایشگاهی

Fig. 13 Envelope curve results along with equivalent bilinear curves of experimental specimens

در جدول ۲، نتایج حاصل از نمودار دو خطی معادل شامل لنگر نهایی، سختی الاستیک و شاخص شکل‌پذیری برای سه نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است. مطابق داده‌های جدول، بیشترین مقدار لنگر نهایی مربوط به مدل M3 است که افزایشی معادل ۵۸٪ نسبت به مدل M2 دارد. بررسی سختی الاستیک نیز نشان می‌دهد که مدل M3 سختی بسیار بیشتری نسبت به مدل‌های M1 و M2 ایجاد می‌کند که بیانگر صلبیت بالای رفتار برشی آن است. با این حال، مقادیر ارائه شده برای شاخص شکل‌پذیری رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به طوری که مدل M3 کمترین شکل‌پذیری را ثبت کرده است، در حالی که مدل M2 بیشترین ظرفیت شکل‌پذیری را داراست و پس از آن مدل M1 قرار می‌گیرد. مجموعه این نتایج نشان می‌دهد که میراگرهای خمشی و صفحات ADAS با وجود مقاومت و سختی اولیه کمتر نسبت به نمونه برشی، توانایی بالاتری در تحمل دوران‌های پلاستیک و بارگذاری چرخه‌ای دارند.

Table 2 Experimental specimen test results summary

| جدول ۲ خلاصه نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی |                   |                     |                |                     |                                |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------------------|
| نمونه                                           | لنگر نهایی (kN.m) | سختی الاستیک (kN.m) | شاخص شکل‌پذیری | جذب انرژی کل (kN.m) | حداکثر میرایی ویسکوز معادل (%) |
| M1                                              | ۱۴/۸              | ۶۵۹                 | ۲۵             | ۷/۲۶                | ۲۳                             |
| M2                                              | ۱۵/۶              | ۷۹۱                 | ۳۲             | ۱۱/۷۴               | ۴۰                             |
| M3                                              | ۲۴/۷              | ۲۷۳۱                | ۴              | ۱/۹۸                | ۱۳                             |

#### ۴- مطالعات عددی

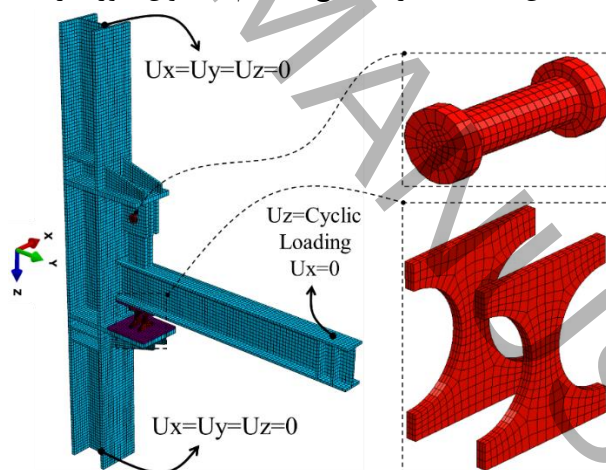
بر پایه نتایج به دست آمده از ارزیابی‌های آزمایشگاهی، نمونه M2 به دلیل ترکیب متعادل از ظرفیت دورانی، شکل‌پذیری مناسب و تحمل دوران قابل توجه، گزینه‌ای مناسب برای تعمیم‌پذیری و مطالعه‌ی عمیق‌تر رفتار اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای محسوب می‌شود. بر همین اساس، در بخش تحلیل عددی این پژوهش، تمرکز بر بررسی حساسیت رفتار M2 نسبت به پارامترهای هندسی قرار

گرفته است. در ادامه نیز، فرآیند صحت‌سنجی مدل عددی با اتکا بر داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که مدل‌سازی قادر است رفتار واقعی اتصال را با دقت قابل قبول بازتولید کند.

## ۴-۲ صحت‌سنجی

برای ارزیابی میزان تطابق مدل‌سازی عددی با رفتار واقعی، اجزای اتصال با استفاده از المان‌های حجمی<sup>۱</sup> هشت‌گه‌ای و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی شبیه‌سازی شدند. در این فرایند، به‌منظور بازتولید دقیق پاسخ اتصال در محدوده تغییرشکل‌های بزرگ، هر دو اثر غیرخطی هندسی و مصالح در مدل لحاظ گردید. بر اساس تحلیل حساسیت مش‌بندی، اندازه المان‌های ناحیه میراگر ۴ میلی‌متر انتخاب شد و برای اعضای اصلی مانند تیر، ستون و سخت‌کننده‌ها مش با ابعاد ۱۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای دستیابی به توزیع دقیق تنش و شبیه‌سازی صحیح رویکرد خمشی، مش‌بندی در راستای ضخامت میراگر در قالب سه لایه تعریف شد. شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری نیز مطابق آرایش آزمایشگاهی تنظیم گردید که جزئیات آن در شکل ۱۴ ارائه شده است. تعاملات بین سطوح مختلف به صورت تماس سطح‌به‌سطح مدل شد و ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱۵، مطابق استاندارد GB 50017 [۲۶] منظور گردید تا از هرگونه نفوذ یا لغزش غیرواقعی جلوگیری شود. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها آسیبی در پیچ‌ها مشاهده نشد، مدل‌سازی صریح پیچ‌ها حذف شده و پیوستگی بین قطعات با اعمال قیدهای صلب<sup>۲</sup> تأمین گردید.

مقایسه منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش در شکل ۱۵ الف نشان می‌دهد که مدل عددی با اختلاف ۴/۴٪ در سختی اولیه، ۳/۵٪ در مقاومت نهایی و ۳/۱٪ در انرژی جذب‌شده، دقت مناسبی در بازتولید رفتار چرخه‌ای اتصال دارد. اختلاف‌های محدود مشاهده‌شده را می‌توان ناشی از ساده‌سازی شرایط تماس، ایده‌آل‌سازی قیود مرزی، حذف نواقص اولیه ساخت و جوشکاری، فرض یکنواختی خواص مکانیکی مصالح، و عدم مدل‌سازی صریح رفتار پیچ‌ها دانست؛ زیرا در مدل عددی، به دلیل عدم مشاهده آسیب در پیچ‌ها طی آزمایش، اتصال اجزا با قیود Tie شبیه‌سازی شد و بنابراین لغزش احتمالی پیچ‌ها به‌طور مستقیم لحاظ نگردید. شکل ۱۵ ب نیز کانتور تنش فون‌میسز<sup>۳</sup> را در دوران نهایی ۰/۰۸ نشان می‌دهد. خروجی‌ها بیان می‌کنند که در این سطح تغییر مکان، هر دو میراگر به‌طور کامل وارد ناحیه تسلیم شده‌اند که نشان‌دهنده عملکرد صحیح سیستم به عنوان فیوز سازه‌ای است.



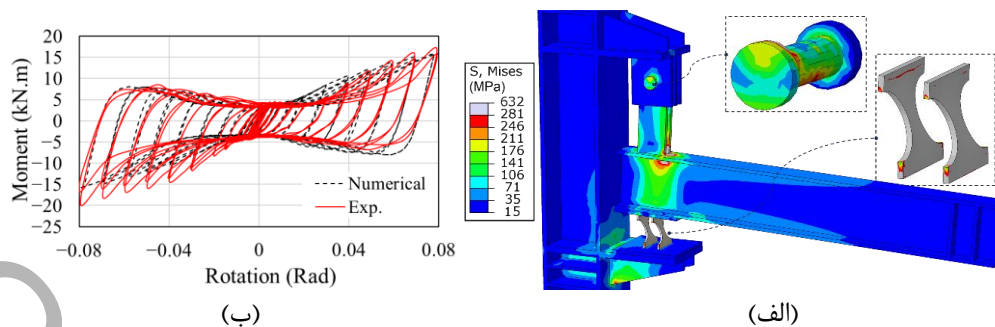
شکل ۱۴ جزئیات مدل عددی مش‌بندی شده برای صحت‌سنجی

Fig. 14 Meshed numerical model details for validation

<sup>1</sup> - Solid

<sup>2</sup> - Tie

<sup>3</sup> - Von Mises

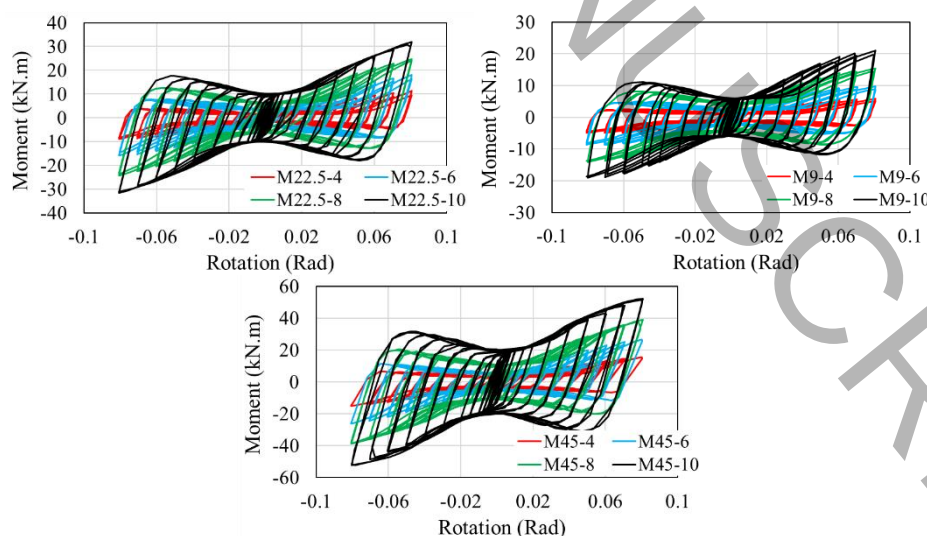


شکل ۱۵ (الف) مقایسه نتایج هیستریزیس حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی (ب) توزیع تنش مدل در دریفت ۰/۰۸

**Fig. 15 (a) Comparison of hysteresis results obtained from numerical and experimental models, (b) Stress distribution of the model at 0.08 drift**

در این بخش، تأثیر ابعاد هندسی میراگر بر پارامترهای لرزه‌ای اتصال مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای فراهم شدن امکان مقایسه دقیق بین مدل‌ها، ابعاد اعضای اصلی شامل تیر و ستون در تمامی تحلیل‌های عددی ثابت نگه داشته شده است. همچنین تمامی فرضیات مدل‌سازی، مشخصات مصالح و پروتکل بارگذاری چرخه‌ای کاملاً مطابق با مدل صحت‌سنجی شده بخش پیشین در نظر گرفته شده تا تغییرات مشاهده‌شده صرفاً ناشی از تغییرات ابعادی میراگر باشد. در این مطالعه، دو متغیر اصلی شامل عرض میانی و ضخامت ورق میراگر انتخاب شده‌اند که نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار آن دارند. ضخامت میراگر در چهار مقدار ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر تحلیل شده و عرض حداقل نیز در سه مقدار ۹، ۲۲/۵ و ۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس این دو نسبت انجام شده و شناسه Mw-t برای هر مدل تعریف گردیده است؛ به عنوان نمونه، مدل M9-6 بیانگر حالتی است که عرض حداقل میراگر برابر ۹ میلی‌متر و ضخامت آن برابر ۶ میلی‌متر است. این دامنه گسترده پارامترها با هدف پوشش طیف متنوعی از پاسخ‌های سازه‌ای، انجام تحلیل حساسیت دقیق و ارزیابی جامع عملکرد اتصال در سطوح مختلف بارگذاری انتخاب شده است.

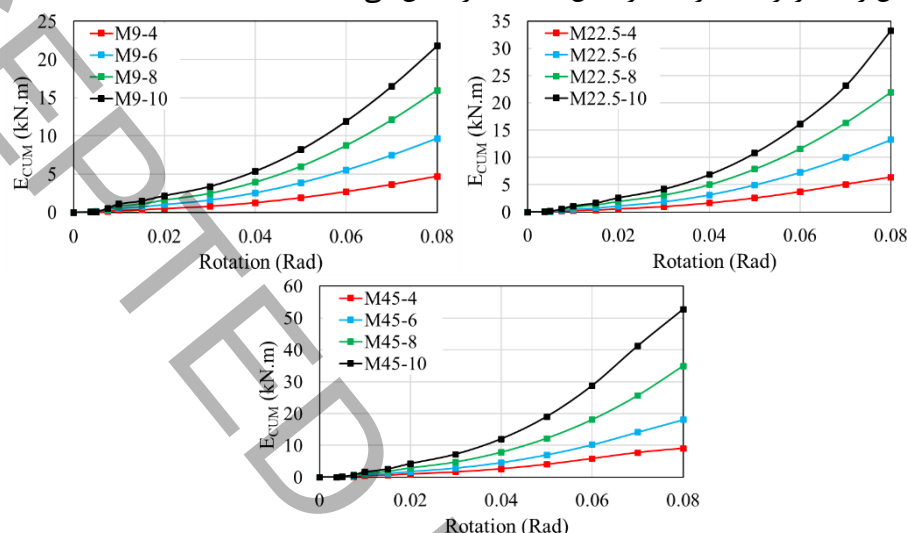
در شکل ۱۶، منحنی‌های هیستریزیس لنگر دوران مربوط به تمامی مدل‌های ارائه گردیده است. این نمودارها نشان می‌دهند که تمامی پیکربندی‌ها رفتار چرخه‌ای با روندی صعودی از خود نشان داده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد و ضخامت ورق‌های میراگر، مساحت حلقه‌های هیستریزیس بزرگ‌تر شده که بیانگر افزایش ظرفیت جذب انرژی اتصال است. علاوه بر این، عدم مشاهده افت مقاومت در دوران‌های بزرگ نشان می‌دهد که این سیستم در برابر بارگذاری‌های رفت‌وبرگشتی عملکرد مناسبی داشته است.



شکل ۱۶ نتایج هیستریزیس مدل‌های عددی

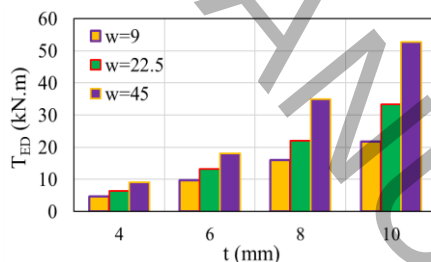
**Fig. 16 Hysteresis results of numerical models**

شکل ۱۷ مجموع انرژی جذب شده ( $E_{CUM}$ ) در مدل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. این مقدار برابر با مساحت تجمعی حلقه‌های هیستریزیس بوده و محور افقی نمودار، دوران را برحسب رادیان بیان می‌کند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی با ضخامت بیشتر، شیب منحنی به صورت غیرخطی تری افزایش یافته است؛ پدیده‌ای که بیانگر جذب انرژی تجمعی بیشتر در این مدل‌هاست. همچنین با افزایش عرض حداقل میراگر، میزان انرژی مستهلک‌شده در اتصال نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت و عرض حداقل میراگر موجب بهبود ظرفیت جذب انرژی می‌شود. این امر به دلیل افزایش مدول مقطع پلاستیک و حجم بیشتر مصالح درگیر در ناحیه تسلیم است که در نهایت باعث گسترش حلقه‌های هیستریزیس و اتلاف مؤثرتر انرژی می‌گردد. شکل ۱۸ جذب انرژی کل را که برابر حداکثر مقادیر شکل ۱۷ است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷ نتایج جذب انرژی تجمعی مدل‌های عددی

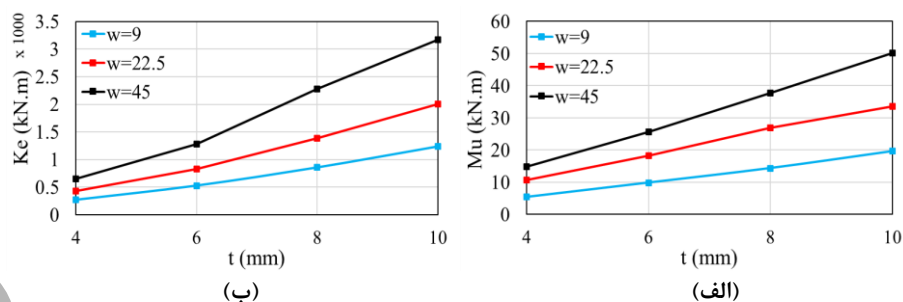
Fig. 17 Cumulative energy absorption results of numerical models



شکل ۱۸ نتایج جذب انرژی کل

Fig. 18 Total energy absorption results

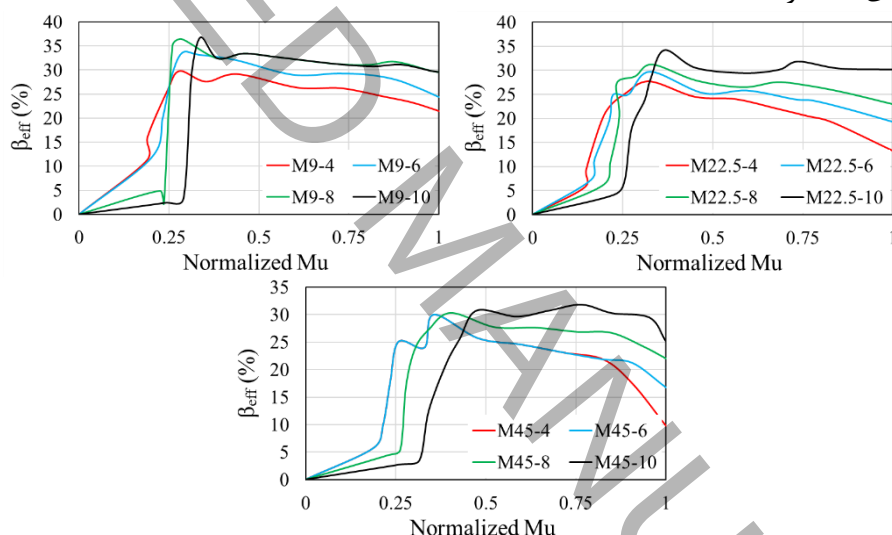
شکل ۱۹ الف نتایج سختی الاستیک حاصل از تحلیل‌های عددی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت میراگر ( $t$ )، مقدار سختی الاستیک در هر سه عرض روند افزایشی دارد. علاوه بر این، نرخ رشد سختی در مدل‌هایی با عرض بزرگ‌تر بیشتر بوده و این نمونه‌ها افزایش قابل توجه‌تری را نسبت به سایر مدل‌ها تجربه کرده‌اند. شکل ۱۹ ب تغییرات لنگر بیشینه را بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت میراگر باعث رشد تدریجی ظرفیت لنگر در هر سه مقدار عرض می‌شود. همچنین نمونه‌هایی با عرض بزرگ‌تر، افزایش چشمگیرتری را در مقدار لنگر بیشینه تجربه کرده‌اند و نسبت به مدل‌های باریک‌تر، نرخ رشد بالاتری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۱۹ نتایج (الف) سختی الاستیک و (ب) لنگر حداکثر حاصل از مدل‌های عددی

Fig. 19 Results of (a) elastic stiffness and (b) maximum moment obtained from numerical models

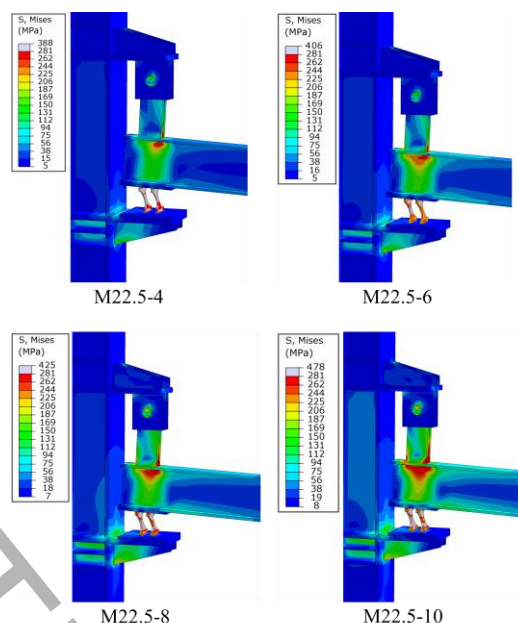
شکل ۲۰ تغییرات میرایی ویسکوز معادل را بر اساس نتایج لنگر نرمال شده نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان برآورد کرد که بیشترین مقدار میرایی در چه بازه‌ای از رفتار مدل رخ می‌دهد. به بیان ساده، با دانستن نسبت لنگر نمونه به لنگر بیشینه آن، می‌توان مقدار میرایی ویسکوز معادل را تخمین زد. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها، با عبور لنگر از حدود ۲۵٪ مقدار بیشینه، میرایی ویسکوز معادل روند افزایشی پیدا کرده و به مقدار حداکثر خود می‌رسد. همچنین افزایش ضخامت میراگر موجب بزرگ‌تر شدن مقدار این پارامتر در محدوده‌های حداکثر شده است.



شکل ۲۰ تغییرات نسبت میرایی معادل نسبت به لنگر نرمال شده

Fig. 20 Variation of equivalent viscous damping ratio with normalized moment

شکل ۲۱ توزیع تنش فون میسز را در تعدادی از مدل‌های پارامتریک در دوران نهایی برابر با ۰/۰۸ رادیان نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ضخامت میراگر، مقدار تنش‌های وارد بر بال تیر و اجزای اتصال افزایش می‌یابد. با این حال، سطح تنش در این اعضای اصلی در تمامی حالت‌ها کمتر از حد تسلیم بوده و به مقادیری نرسیده است که منجر به کمانش موضعی یا جاری شدن تیر و ستون شود. این موضوع بیانگر آن است که اعضای باربر اصلی سازه در طول بارگذاری در محدوده عملکرد الاستیک باقی مانده‌اند. همچنین کانتورهای تنش نشان می‌دهند که در مرحله نهایی بارگذاری، میراگرهای ADAS در تمامی مدل‌ها وارد ناحیه تسلیم شده‌اند؛ که این امر عملکرد صحیح سیستم را در متمرکزسازی تغییرشکل‌های غیرخطی در المان‌های مستهلک‌کننده تأیید می‌کند.



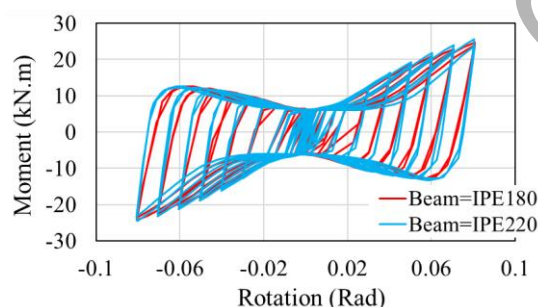
شکل ۲۱ نتایج توزیع تنش فون میسز چند نمونه از مدل‌های عددی

Fig. 21 Von Mises stress distribution results for several numerical models

#### ۴-۲ ارزیابی تاثیر ابعاد تیر بر نتایج

در این بخش، به منظور بررسی استقلال پاسخ‌های لرزه‌ای اتصال از ابعاد مقطع تیر، ارزیابی مجددی با تغییر سائز اعضای باربر انجام پذیرفته است. هدف اصلی این بخش، اثبات این فرضیه است که چنانچه فاصله هندسی میان مرکز دوران (محل قرارگیری پین) تا تراز اتصال میراگر ثابت نگه داشته شود، تغییر ابعاد تیر تاثیر معناداری بر رفتار چرخه‌ای سیستم نخواهد داشت. بر این اساس، مقطع تیر که در مدل‌سازی‌های پیشین از نوع IPE180 لحاظ شده بود، به مقطع بزرگتر IPE220 تغییر یافت. با این حال، جانمایی اجزا در این مدل به گونه‌ای تنظیم گردید که بازوی انتقال نیرو، یعنی فاصله پین تا میراگر، مشابه با مدل‌های قبلی باقی بماند.

برای ارزیابی این موضوع، مدل M22.5-8 با مقطع تیر جدید تحت همان پروتکل بارگذاری چرخه‌ای پیشین مورد تحلیل قرار گرفت. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس حاصل از این تحلیل با نتایج مدل اولیه در شکل ۲۲ ارائه شده است. روند منطبق منحنی‌ها در این شکل به روشنی نشان می‌دهد که ظرفیت باربری، مقاومت نهایی و میزان استهلاک انرژی در هر دو حالت تقریباً یکسان بوده و تفاوت قابل توجهی در پاسخ‌های سیستم مشاهده نمی‌گردد. این تطابق تایید می‌کند که عملکرد اتصال پیشنهادی به گونه‌ای است که در صورت حفظ هندسه انتقال نیرو (فاصله پین تا میراگر)، پاسخ کلی سیستم به رفتار فیوز سازه‌ای (میراگر) وابسته بوده و از سائز مقطع تیر مستقل عمل می‌کند.



شکل ۲۲ تاثیر تغییر ابعاد مقطع تیر بر پاسخ چرخه‌ای و منحنی هیستریزیس اتصال

Fig. 22 Effect of beam section dimensions on cyclic response and hysteresis curve of the connection

ارزیابی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نمونه‌های مختلف اتصال، به دلیل تفاوت در سازوکار تسلیم میراگر، رفتار لرزه‌ای متفاوتی از خود نشان داده‌اند. تحلیل فیزیکی عملکرد اتصال بیانگر آن است که تعبیه مفصل پینی به‌عنوان مرکز دوران، مسیر انتقال نیرو را به‌گونه‌ای تنظیم کرده که دوران تیر به تغییر شکل پلاستیک میراگر منتقل شود و اعضای اصلی شامل تیر و ستون در محدوده الاستیک باقی بمانند. این ویژگی موجب تمرکز آسیب در میراگرهای قابل تعویض شده و از بروز آسیب جدی در بخش‌های اصلی سازه جلوگیری کرده است. نمونه M3 با وجود سختی اولیه و مقاومت بالاتر، به دلیل ماهیت رفتاری مبتنی بر تسلیم برشی، صلبیت زیاد، تمرکز تنش در محل اتصال و کمانش خارج از صفحه، در دوران‌های پایین دچار افت عملکرد شده و ظرفیت شکل‌پذیری محدودی را تجربه کرده است. در مقابل، عملکرد برتر نمونه M2 نسبت به نمونه برشی ناشی از هندسه ADAS و توزیع مناسب‌تر کرنش‌های پلاستیک در طول میراگر است. این ویژگی موجب گسترش تدریجی ناحیه تسلیم، تشکیل حلقه‌های هیستریزیس پایدارتر، افزایش ظرفیت دوران پلاستیک، جذب انرژی بیشتر و دستیابی به میرایی و اسکوز معادل بالاتر شده است. بنابراین، در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصال، مقاومت اولیه به‌تنهایی معیار کافی نبوده و پایداری چرخه‌ای، شکل‌پذیری، ظرفیت استهلاک انرژی و نحوه توزیع آسیب نقش تعیین‌کننده‌تری دارند.

نتایج مطالعه پارامتریک عددی نیز نشان می‌دهد که افزایش ضخامت و عرض حداقل میراگر ADAS موجب افزایش مدول مقطع پلاستیک، سطح مقطع مؤثر و حجم فولاد درگیر در تسلیم می‌شود. در نتیجه، سختی الاستیک، لنگر حداکثر و ظرفیت جذب انرژی تجمعی اتصال افزایش می‌یابد. با این حال، انتخاب ابعاد میراگر باید به‌گونه‌ای باشد که ضمن تأمین مقاومت و استهلاک انرژی کافی، تمرکز تسلیم همچنان در میراگر حفظ شود و نیروهای منتقل‌شده به اعضای اصلی از حد تسلیم آن‌ها فراتر نرود. همچنین، نتایج تغییر مقطع تیر نشان داد که در صورت ثابت ماندن بازوی انتقال نیرو، پاسخ چرخه‌ای اتصال عمدتاً تابع مشخصات هندسی فیوز تسلیمی بوده و وابستگی قابل‌توجهی به ابعاد مقطع تیر ندارد. این ویژگی امکان کنترل رفتار لرزه‌ای اتصال از طریق طراحی هدفمند میراگر را فراهم می‌کند.

با توجه به نتایج حاصل از تغییر مقطع تیر (پوش یکسان منحنی‌های هیستریزیس در شکل ۲۲)، اصول رفتاری اتصال پیشنهادی قابل تعمیم به مقاطع بال‌پهن نیز می‌باشد. از آنجا که مکانیزم انتقال نیرو و استهلاک انرژی کاملاً وابسته به سختی میراگر و بازوی اتصال (فاصله مرکز پین تا تراز میراگر) است، تغییر هندسه اعضای باربر به پروفیل‌های بال‌پهن، تا زمانی که معیار طراحی بر اساس ظرفیت برآورده شود، ماهیت چرخه‌ای اتصال را تغییر نخواهد داد. در واقع، صلبیت خمشی و برشی بالاتر در مقاطع بال‌پهن، احتمال بروز کمانش‌های موضعی در جان و بال تیر را به مراتب کاهش داده و صلبیت مرکز دوران (مفصل پینی) را تقویت می‌کند. با این حال، تعمیم مستقیم نتایج این پژوهش مستلزم رعایت محدودیت‌های مرزی زیر است:

حفظ محدوده خطی اعضا: لنگر پلاستیک مقطع بال‌پهن انتخاب‌شده باید به‌گونه‌ای باشد که تحت حداکثر لنگر انتقالی ناشی از ظرفیت نهایی میراگر، تیر و ستون کاملاً در فاز الاستیک باقی بمانند. پایداری تکیه‌گاه پین: ضخامت بال پروفیل بال‌پهن و ورق‌های سخت‌کننده جانبی باید به اندازه‌ای طراحی شوند که از بیضوی شدن سوراخ پین (پدیده لهیدگی موضعی) تحت بارهای متمرکز چرخه‌ای جلوگیری شود. محدودیت ابعادی بازوی نیرو: نتایج این تحقیق صرفاً در شرایطی معتبر است که نسبت بازوی انتقال نیرو به طول تیر حفظ شده و اتصالات پیچی صفحات واسط، مقاومت کافی در برابر نیروی کشش/برش برخاسته از عملکرد میراگر را دارا باشند.

## ۵- نتیجه‌گیری

اتصالات در قالب‌های فولادی به عنوان شریان‌های حیاتی انتقال بار، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها ایفا می‌کنند. با این وجود، کنترل هم‌زمان مسیر انتقال نیرو، تمرکز آسیب در یک میراگر تعویض‌پذیر و حفظ رفتار الاستیک اعضای اصلی، از چالش‌های مهمی است که در مطالعات پیشین کمتر به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری کلیدی این پژوهش، معرفی یک اتصال نوین فولادی مجهز به مفصل پینی است که با هدایت کنترل‌شده دوران تیر به تغییر شکل پلاستیک در میراگر

تعویض پذیر، ضمن تمرکز قطعی آسیب در فیوز، رفتار لرزه‌ای سیستم را از ابعاد تیر مستقل می‌سازد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا رفتار لرزه‌ای سه رویکرد تسلیم (خمشی، برشی و ADAS) به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شد. سپس با تکیه بر نتایج تجربی و صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، مطالعه پارامتریک بر روی ۱۲ مدل هندسی مختلف از میراگر ADAS و همچنین بررسی اثر ابعاد مقطع تیر تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام گرفت. خلاصه نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- ارزیابی آزمایشگاهی نمونه‌ها نشان داد که میراگر ADAS با دستیابی به دوران نهایی ۰/۰۸ رادیان و شاخص شکل‌پذیری ۳۲، پایداری لرزه‌ای و ظرفیت استهلاک انرژی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. در مقابل، نمونه برشی با وجود سختی و مقاومت اولیه بالاتر، به دلیل محدودیت در ظرفیت تغییرشکل پلاستیک، تنها تا دوران ۰/۰۳ رادیان ادامه یافت.
- تحلیل توزیع تنش در مدل‌های عددی تایید کرد که عملکرد مفصل پینی تعبیه شده به‌طور مؤثری تمامی تغییرشکل‌های غیرخطی را در میراگرها متمرکز می‌کند. در تمام حالات بررسی شده، تنش در بال و جان تیر و همچنین ستون کمتر از حد تسلیم باقی ماند که این امر بازگشت سازه به چرخه سرویس‌دهی را تنها با تعویض قطعات آسیب‌دیده فراهم می‌سازد.
- نتایج مطالعات پارامتریک بر روی ۱۲ ابعاد متفاوت میراگر نشان داد که افزایش عرض حداقل و ضخامت، تاثیر مستقیمی بر ارتقای لنگر نهایی و انرژی تجمعی دارد. این افزایش ابعاد با ارتقای مدول مقطع پلاستیک و حجم مصالح درگیر در فرآیند جاری‌شدن، سطح محصور در منحنی‌های هیستریزس را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.
- ارزیابی تاثیر ابعاد مقطع تیر نشان داد که با ثابت نگه داشتن بازوی انتقال نیرو (فاصله مفصل پینی تا تراز اتصال میراگر)، پاسخ چرخه‌ای و ظرفیت استهلاک انرژی سیستم مستقل از سائز اعضای باربر بوده و تغییر ابعاد مقطع تیر تاثیر معناداری بر عملکرد لرزه‌ای اتصال نداشت.
- علی‌رغم دستیابی به نتایج مطلوب، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی از جمله محدود بودن تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی، عدم اعمال بار محوری متغیر بر ستون در حین بارگذاری چرخه‌ای، و بررسی‌نشدن رفتار خستگی کم‌چرخه است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، عملکرد این سیستم اتصال در مقیاس قاب و تحت بارگذاری دینامیکی بررسی شود. همچنین، استفاده از مصالح مختلف در ساخت میراگر و ارزیابی اثر فاصله مفصل پینی تا محل اتصال میراگر می‌تواند به شناخت دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای این اتصال کمک کند.

مراجع:

- [1] R. Molavi, M. Izadinia, A.R. Shahidi, Numerical and Experimental Studies on Cyclic Behavior of Beam-to-Column Connection with Yielding Steel Damper, International Journal of Steel Structures, 20(2) (2020) 480–492.
- [2] O. Kohnepooshi, A. Salem, Structural behavior of steel slit damper in steel beam to column connection, Journal of Structural and Construction Engineering, 7(1) (2020) 26–40.
- [3] o. pouresmael janbaz, A. Haghollahi, S. Ghaffarpour Jahromi, Assessment of Soil–Structure Interaction Effects on Steel Frames Retrofitted with TADAS Yielding Dampers, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 57(5) (2025) 741–764.
- [4] g. pachideh, M.A. Kafi, M. Gholhaki, Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(11) (2022) 4557–4576.
- [5] H.L. Hsu, H. Halim, Brace performance with steel curved dampers and amplified deformation mechanisms, Engineering Structures, 175 (2018) 628–644.
- [6] H.A. Lor, M. Izadinia, P. Memarzadeh, Experimental evaluation of steel connections with horizontal slit dampers, Steel and Composite Structures, 32(1) (2019) 79–90.
- [7] R. Nazeran, A. Hemmati, H. Kazemi, Numerical and experimental behavior of moment concrete frame retrofitted with TADAS metal yielding damper under lateral loading, Structural Engineering and Mechanics, 89(5) (2024) 507–524.
- [8] K. Cheraghi, M. TahamouliRoudsari, Numerical and analytical study of cyclic behavior of TADAS and the impact of axial force on its performance, Steel and Composite Structures, 53(2) (2024) 195.

- [9] M. Khoshkalam, M.H. Mortezaagholi, S.M. Zahrai, Proposed Modification for ADAS Damper to Eliminate Axial Force and Improve Seismic Performance, *Journal of Earthquake Engineering*, (2021) 1–23.
- [10] K. Cheraghi, M. Tahamouli Roudsari, S. Kiasat, J. Esfandiari, Numerical and Analytical Study of the Cyclic Behavior of ADAS Damper and the Effect of Axial Force on its Behavior, *Journal of Earthquake Engineering*, (2024) 1–18.
- [11] A. Akbari Hamed, S.F. Mortazavi, M. Saeidzadeh, Evaluation of the seismic performance of structures equipped with novel multi-level TADAS dampers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(4) (2023) 969–988.
- [12] M. Kahrizi, M. TahamouliRoudsari, Experimental and numerical investigation of the parameters affecting the behavior of steel frames with masonry infill walls anchored with the ADAS yielding damper, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(5) (2021) 773–794.
- [13] A. Houshmand-Sarvestani, A. Totonchi, M.A. Shahmohammadi, H. Salehipour, Numerical assessment of the effects of ADAS yielding metallic dampers on the structural behavior of steel shear walls (SSWs), *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 51(3) (2021) 1626–1644.
- [14] M. TahamouliRoudsari, K. Cheraghi, M.R. Habibi, Investigation of retrofitting RC moment resisting frames with ADAS yielding dampers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(1) (2019) 125–133.
- [15] L.-D. Zhuang, Y. Yang, Y.-F. Li, Development and Experimental Study of a New Rotational Metallic Damper for the Beam–Column Connection, *Journal of Structural Engineering*, 148(9) (2022) 04022140.
- [16] D. Li, C. Wu, Y. Zhou, W. Luo, W. Lie, A precast beam-column connection using metallic damper as connector: Experiment and application, *Journal of Constructional Steel Research*, 181 (2021) 106628.
- [17] R. Soltanabadi, F. Behnamfar, Experimental Studies on a Combined Damper for Repairable Steel Moment Connections, *International Journal of Steel Structures*, 18(1) (2018) 211–224.
- [18] K. Ghaedi, A. Javanmardi, Z. Ibrahim, M. Gordan, R. S. M. Rashid, H. Khatibi, R. Vaghei, Experimental and numerical studies on the cyclic performance of structural frames equipped with bar dampers, *Structures*, 50 (2023) 707–722.
- [19] K. Cheraghi, M. RasouliTabar, r. khaleghi, Numerical Investigation of the Effect of Shear Links with Low Yield Strength Steel on the Seismic Performance of Concrete Frames, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 13(01) (2026) 101–119.
- [20] K. Cheraghi, M. Tahamouli Roudsari, Numerical and Analytical Study of the Effect of Force Direction on the Cyclic Performance of Angled U-Shaped Dampers, *Journal of Earthquake Engineering*, 29(15) (2025) 3164–3183.
- [21] K. Cheraghi, Z. Kahrari, M.H. Tavana, Parametric Study on the Effect of Axial Force on the Seismic Performance of the Bar Damper, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 69(4) (2025) 1298–1310.
- [22] X. Li, Y. Jia, S. Pei, P. Ren, Experimental study on seismic performance of steel-frame beam-column joints with embedded cellular dampers, *Structures*, 73 (2025) 108343.
- [23] A. International, ASTM A370–17: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A370–17, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [24] A. Federal Emergency Management, S.A.C.J. Venture, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC, 2000.
- [25] A. FEMA 440, 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA-440, Redwood City, 7(9) (2005) 11.
- [26] C. GB 50017-2017, Code for Design of Steel Structure. GB 50017-2017, in, 2017.

ACCEPTED MANUSCRIPT