

Investigating the seismic behavior of reinforced concrete frames equipped with steel shear walls and yielding dampers

Mahsa Chehri¹, Reza Aghayari^{2*}

1- Master's student in Civil-Structure, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Razi University, Kwrmanshah Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Razi University, Kermanshah Iran

ABSTRACT

Using the combination of shear wall and yielding damper in the structure is one of the solutions to prevent the sudden drop in the bearing capacity of steel shear walls due to out-of-plane buckling. In this study, the seismic behavior of one-story reinforced concrete frames equipped with steel shear walls and yield dampers was investigated. The models were analyzed numerically using Abaqus software. Two laboratory models were used to ensure the results of the numerical model. Then, non-linear static analyzes were performed to investigate the concrete frame equipped with steel shear wall and yielding damper. The variables of the models include the thickness of the shear wall and the number of yielding dampers. After the analysis, non-linear force-displacement diagrams were calculated. Then, to calculate energy loss, hardness, strength and ductility, simplified two-line diagrams were extracted. Also, to estimate the strength and stiffness of the concrete frame equipped with shear wall and yield damper, approximate equations were proposed that were in good agreement with the numerical results. The results showed that by increasing the number of dampers and the thickness of the shear wall, the strength and stiffness of the frame increased almost linearly. Also, the results of ductility and energy absorption showed that the addition of 4 dampers and also in the case where the thickness of the shear wall is 2 mm increased the ductility and energy absorption of the frame by 1.4 and 2 times.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 November 2024

Revise Date: 16 February 2025

Accept Date: 06 May 2025

Keywords:

Reinforced concrete frame
steel shear wall
numerical analysis
yield damper
ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.489497.3574

*Corresponding author: Reza Aghayari.
Email address: reza_agh@razi.ac.ir

بررسی رفتار لرزه ای قاب های بتن مسلح مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی

مهسا چهری^۱، رضا آقاییاری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

استفاده از ترکیب دیوار برشی و میراگر تسلیمی در سازه یکی از راهکارهای جلوگیری از افت ناگهانی ظرفیت باربری دیوارهای برشی فولادی به دلیل کمانش خارج از صفحه می باشد. در این مطالعه رفتار لرزه ای قاب های بتن مسلح یک طبقه مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل مدل ها به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. برای صحت سنجی از نتایج مدل عددی از دو مدل آزمایشگاهی استفاده شد. سپس تحلیل های استاتیکی غیر خطی به منظور بررسی قاب بتنی مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی انجام گرفت. متغیر مدل ها شامل ضخامت دیوار برشی و تعداد میراگرهای تسلیمی در نظر گرفته شد. پس از انجام تحلیل ها نمودارهای غیر خطی نیرو-جابجایی استخراج شدند. سپس برای محاسبه اتلاف انرژی، سختی، مقاومت و شکل پذیری، نمودارهای دو خطی ساده شده استخراج شدند. برای تخمین مقاومت و سختی قاب بتنی مجهز به دیوار برشی و میراگر تسلیمی معادلاتی تقریبی پیشنهاد شد که مطابقت خوبی با نتایج عددی داشتند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد میراگر و ضخامت دیوار برشی، به صورت تقریباً خطی مقاومت و سختی قاب افزایش پیدا کرد. نتایج شکل پذیری و جذب انرژی نشان داد که اضافه شدن ۴ عدد میراگر و در حالتی که ضخامت دیوار برشی برابر ۲ میلی متر باشد باعث شد که شکل پذیری و جذب انرژی قاب ۱.۴ و ۲ برابر افزایش پیدا کند.

کلمات کلیدی: قاب بتن مسلح، دیوار برشی فولادی، تحلیل عددی، میراگر تسلیمی، شکل پذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:		دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2025.489497.3574		۱۴۰۳/۰۹/۰۸	۱۴۰۳/۱۱/۲۸	۱۴۰۴/۰۲/۱۶	۱۴۰۴/۰۲/۱۶	۱۴۰۴/۱۱/۳۰
10.22065/jsce.2025.489497.3574						
		*نویسنده مسئول:		رضا آقاییاری		
		پست الکترونیکی:		reza_agh@razi.ac.ir		

۱- مقدمه

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله موضوعی است که مستقیماً با ایمنی و جان انسان‌ها سر و کار دارد و زمینه ایست که نوآوری در آن به کندی و با احتیاط صورت می‌گیرد. دیوارهای برشی فولادی از جمله سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی همچون زلزله می‌باشند که از یک ورق فولادی که در تیر و ستون احاطه شده است تشکیل شده اند. برای مقاوم سازی لرزه ای سازه‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از اقتصادی ترین و متداول ترین روش‌ها، استفاده از سیستم‌های مستهلک کننده انرژی مانند میراگرهای تسلیمی است. مکانیزم عملکردی این گونه وسایل به گونه ای است که با انجام تغییر شکل های ویژه و اعمال مکانیکی خاصی، مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه بر اثر بارگذاری دینامیکی را جذب و مستهلک می‌سازند. عملکرد اینگونه وسایل موجب می‌شود که انرژی دریافتی سایر اعضای سازه ای کاهش یافته و در نتیجه تغییر شکل زیادی در آن‌ها ایجاد نمی‌شود. دیوار سازه ای نیز یکی از سیستم های بسیار مناسب برای مقابله با نیروهای جانبی است. از آنجا که این دیوارها، قسمت عمده نیروهای جانبی وارد بر سازه و برش حاصل از آن را جذب می‌کنند، به نام دیوارهای برشی شناخته می‌شوند. یکی از انواع دیوار برشی، دیوار برشی فولادی می‌باشد. دیوار برشی فولادی برای مقاوم سازی ساختمان‌های فولادی به کار می‌رود و با اتصالاتش سبب تقویت تیر و ستون‌های اطراف می‌شود؛ و مزایایی چون اجرای آسان، وزن کم، اقتصادی بودن، شکل پذیری زیاد، نصب سریع و جذب انرژی بالا دارد. در رفتار این سیستم اتلاف انرژی بالا و شکل پذیری مناسبی مشاهده می‌گردد که در مقایسه با سایر سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی مانند مهاربندها و دیوار برشی بتنی از عملکرد مناسب تری برخوردار است [۱]. در سال ۱۹۸۳ توربون و همکاران [۲] برای بررسی رفتار پس از کمانش دیوار برشی فولادی ورق نازک، یک مدل نوار کششی طراحی کردند. آن‌ها دریافتند که دیوار برشی فولادی با ورق نازک دارای مقاومت پس از کمانش بالاتر و رفتار شکل پذیری مناسب تری می‌باشد.

تاسی و همکاران در سال ۱۹۹۳، مطالعاتی را در مورد تاثیرگذاری استفاده از صفحات مثلثی فولادی که به عنوان دستگاه میرایی و سختی اضافه شده (TADAS) برای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله جوش داده شده بود انجام دادند. نتایج تجربی حاصل از تحقیقات نشان داد که یک افزاینده میرایی و سختی فولادی می‌تواند تعداد بسیاری از بازده‌های معکوس را بدون سختی و تنزل حفظ کند [۳].

هریس و همکاران در سال ۱۹۹۷، روی چندین مدل با سیستم دیوار برشی فولادی همبند مطالعه انجام دادند، آن‌ها دریافتند که اگر تیرهای همبند به اندازه قابل قبول و کافی، سخت باشند؛ به گونه ای که پیش از دیوارهای اطراف، تسلیم گردند تا سیستم رفتاری شکل پذیر و خصوصیت جذب انرژی خوبی از خود نشان دهد [۴].

یکی از دغدغه‌های امروزی پژوهشگران کنترل ارتعاشات سازه ای و مقاوم سازی سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی زلزله می‌باشد. از این رو پژوهشگران با روی آوردن به سیستم‌های مستهلک کننده انرژی و بکارگیری ترکیبی وسایل مستهلک کننده انرژی وابسته به تغییر مکان که از طریق جاری شدن فلز باعث استهلاک انرژی در سازه می‌شود. سیستم‌های مستهلک کننده انرژی در مقاوم سازی و بهسازی سازه نقش مفیدی را ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها ظرفیت شکل پذیری غیرالاستیک سازه را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند. یکی از این سیستم‌ها میراگرهای تسلیمی می‌باشند. این میراگرها با رسیدن به ناحیه پلاستیک باعث اتلاف انرژی ورودی به سازه می‌شوند. یکی از انواع میراگرهای تسلیمی، میراگرهای ADAS^۱ و TADAS می‌باشند. نحوه عملکرد میراگرهای فلزی ADAS و TADAS به این صورت می‌باشد که در هنگام اعمال بار جانبی، حرکت نسبی طبقات نسبت به یکدیگر، موجب حرکت نسبی ورق بالایی میراگر نسبت به ورق پایینی آن شده که این عمل موجب جاری شدن تعداد زیادی از ورق‌های فلزی میراگر می‌گردد که این جاری شدن موجب مستهلک نمودن مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه می‌شود.

¹ Triangular Added Damping and Stiffness

² Added Damping And Stiffness

محمودی و عبدی (۲۰۱۲) در پژوهشی، ضرایب اصلاح پاسخ در قاب‌های فولادی مجهز به میراگر TADAS را مورد مطالعه قرار دارند. در این پژوهش، سه معیار بیش مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه‌های قاب خمشی ویژه مجهز به میراگر TADAS، توسط تحلیل‌های دینامیکی فزاینده و استاتیکی غیرخطی مورد محاسبه قرار گرفت و اثر ارتفاع بر این پارامترها، مورد سنجش واقع شد. محمودی و عبدی، تأثیر میراگر TADAS را بر نیاز لرزه‌های سازه‌های فولادی با تعداد طبقات ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ بررسی کردند و ضریب رفتار این سازه‌ها را تعیین نمودند [۵].

چراغی و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر میراگرهای تسلیمی با حد تسلیم پایین را بر روی قاب‌های فولادی بررسی کردند. در این تحقیق با انجام تحلیل‌های عددی تأثیر تعداد ورق تسلیمی و نیروی محوری ستون بر پارامترهای لرزه‌ای قاب ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میراگر می‌تواند تا حد قابل قبولی پارامترهای لرزه‌ای سازه را بهبود بخشد. همچنین، اگر سختی و مقاومت تسلیم تمام LYD های اضافه شده به قاب به ترتیب ۳.۲۵ و ۰.۱۳ برابر قاب خالی باشد، قاب بهترین عملکرد خود را خواهد داشت [۶].

خوشکلام و همکاران (۲۰۲۱) یک روش اصلاحی پیشنهادی برای حذف نیروی محوری و بهبود لرزه‌ای و کارایی میراگرهای ADAS ارائه کردند. در این تحقیق ابتدا برای اطمینان از مدل عددی، مدل تجربی و مدل نرم افزاری مقایسه شد. سپس معادلات پیشنهادی برای محاسبه تعداد صفحات میراگرهای MADAS^۳ و بررسی عملکرد یکنواخت و چرخه‌ای آن در قاب یک طبقه ارائه شد. نتایج نشان داد میراگرهای پیشنهادی عملکرد خوبی در اتلاف انرژی دارند. همچنین تحت بارگذاری جانبی درز لرزه‌های شدید، افزایش سطح نیرو در ADAS منجر به کماتش مهاربندها و رفتار غیرخطی شدید در آنها می‌شود، در حالی که استفاده از MADAS پیشنهادی می‌تواند چنین پدیده‌هایی را به درستی کنترل کند [۷].

طلوعی و همکاران (۲۰۲۳) رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی سه طبقه مجهز به میراگرهای فزاینده میرایی و سختی (ADAS) را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با انجام تحلیل‌های عددی تأثیر افزایش ضخامت میراگر و ضخامت ورق پرکننده دیوار برشی فولادی بر روی قاب ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان داد میراگرهای ADAS با تغییر شکل‌های خاص خود، باعث افزایش قابل توجه استهلاک انرژی و شکل‌پذیرتر شدن دیوار برشی فولادی شده و با جذب مقدار زیاد انرژی، باعث کاهش نیروی وارد شده به اجزاء اصلی و مانع از تخریب سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود [۸].

هوشمند سروستانی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی و میراگر ADAS پرداختند. در این تحقیق ترکیب میراگر ADAS با دیوار برشی فولادی باعث افزایش سختی، ظرفیت شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در سیستم دیوار برشی فولادی گردید. نتایج این تحقیق نشانگر افزایش شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی و نسبت میرایی معادل بود [۹]. همچنین میراگرهای تسلیمی متنوعی همچون X شکل [۱۰]، U شکل زاویه‌دار [۱۱]، D شکل [۱۲] و S شکل [۱۳، ۱۴] نیز توسط دیگر محققین معرفی شده است.

در این مطالعه هدف از ترکیب دیوارهای برشی فولادی و میراگرهای تسلیمی و استفاده از میراگرهای تسلیمی یکبار در دوضلع قائم دیوار برشی، یکبار در ضلع افقی و یکبار دیوار برشی بدون میراگر تسلیمی این است که مقاومت حداکثری سازه در مقابل زمین لرزه‌های مختلف در حالات ذکر شده مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. قیود مسئله بهینه‌سازی شامل بررسی و مقایسه مقاومت، میرایی و بسکوز، سختی جذب انرژی و نتایج نمودار نیرو جابه‌جایی مدل‌ها با تغییر تعداد میراگر و ضخامت دیوار برشی صورت گرفته شده است.

۲- نوآوری تحقیق و روش تحلیل

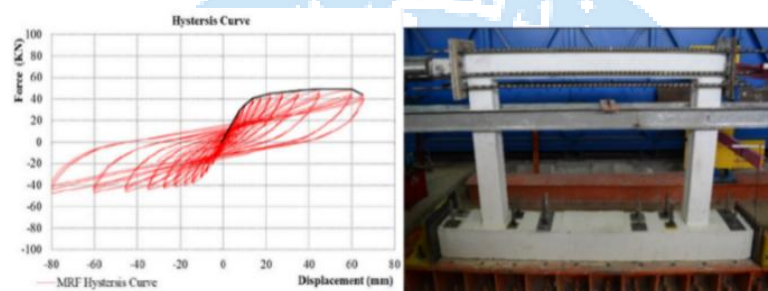
با توجه به انجام تحقیقات متعدد در مورد دیوارهای برشی فولادی و میراگرهای تسلیمی به صورت مجزا و استفاده آن در سازه جهت جلوگیری از افت ناگهانی ظرفیت باربری دیوارهای برشی فولادی، در این مطالعه به ترکیب دیوارهای برشی فولادی و میراگرهای تسلیمی پرداخته شد. در این پژوهش رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح یک طبقه مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی مورد

³ Modified Added Damping and Stiffness

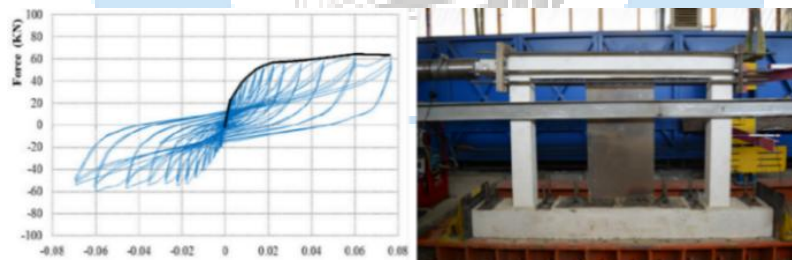
بررسی قرار گرفت و میراگرهای تسلیمی یکبار در دو ضلع قائم دیواربرشی، یکبار در ضلع افقی قرار گرفتند و یکبار دیواربرشی بدون میراگر تسلیمی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن‌ها مقایسه گردید. تحلیل مدل‌ها به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. بارگذاری به صورت چرخه ای و تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی به منظور بررسی قاب بتنی مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی نیز انجام گرفت.

۳- صحت سنجی و مشخصات مدل‌های مورد بررسی

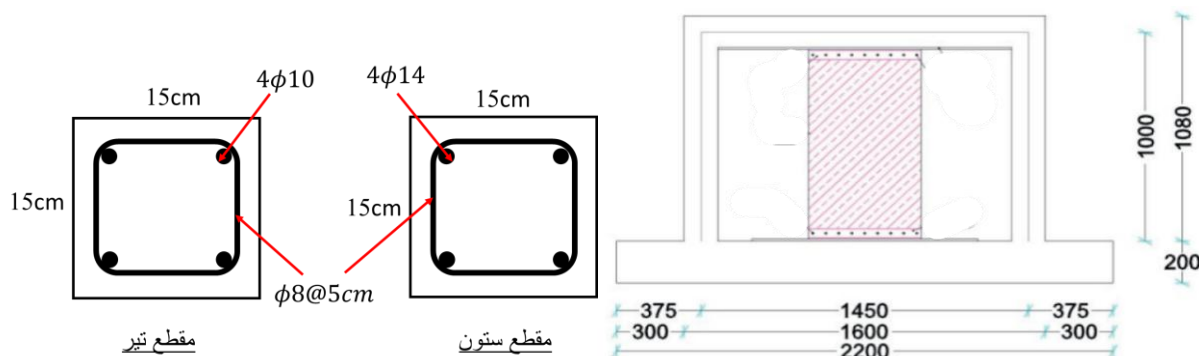
به منظور صحت سنجی قاب بتنی از تحقیقات آزمایشگاهی تحملی رودسری و همکاران [۱۵] که به مطالعه دیوارهای برشی نیمه پیوسته فولادی بر روی قاب‌های بتنی پرداخته شد. برای اعتبارسنجی، دو نمونه از مدل‌های آزمایش شده (شکل ۱) در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه اول شامل یک قاب بتنی بدون دیوار برشی بوده و در نمونه دوم، یک دیوار برشی با عرض ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۱ سانتی‌متر برای تقویت قاب بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد قاب مدل آزمایشگاهی در (شکل ۲) آمده است.



شکل ۱: نمونه قاب خالی آزمایشگاهی تحملی رودسری و همکاران به همراه نتایج [۱۵]



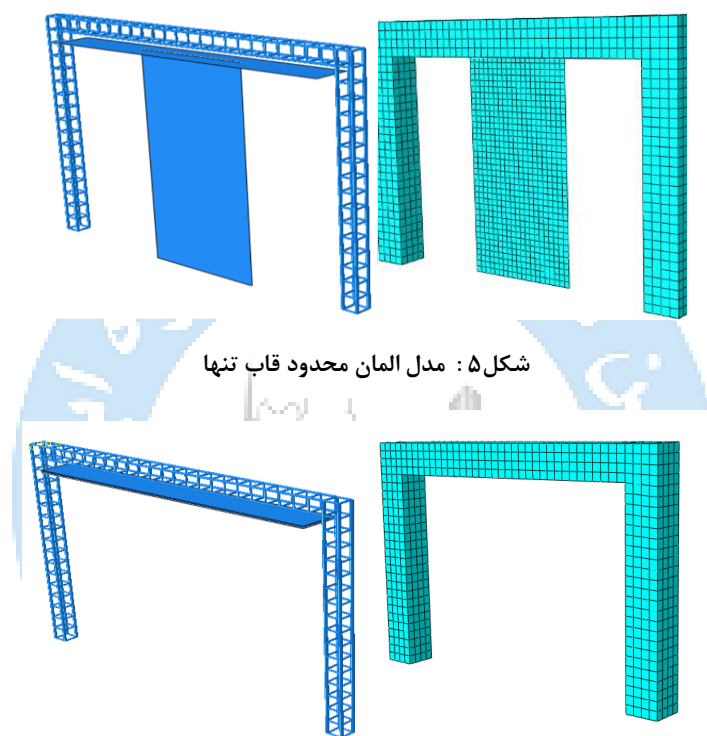
شکل ۲: نمونه قاب مجهز به دیوار برشی نیمه پیوسته تحملی رودسری و همکاران همراه نتایج [۱۵]



شکل ۳: شماتیک قاب بتنی آزمایشگاهی [۱۵]

شکل ۴: مقطع تیر و ستون

برای مدل‌سازی قسمت بتن و میلگرد در نرم‌افزار آباکوس، از المان‌های حجمی برای بتن و المان خرابی برای میلگرد استفاده شده است. به دلیل ضخامت کم ورق اتصال و دیوار برشی، این قسمت‌ها با المان صفحه مدل‌سازی شدند [۱۶]. تحلیل‌ها به صورت استاتیکی انجام شده و در مدل عددی، علاوه بر عملکرد هندسی غیرخطی، تغییر شکل زیاد نیز در نظر گرفته شده است. از آنجا که در آزمایش‌های گزارش شده هیچ‌گونه آسیبی به پی و اتصال ستون به پی مشاهده نشده بود [۱۵] مدل‌سازی پی حذف شد. مدل عددی و شبکه بندی قاب آزمایشگاهی در شکل ۳ و ۲ نشان داده شده‌اند. ابعاد شبکه بندی برای قاب، میلگردها و دیوار برشی، بر اساس تحلیل حساسیت، به ترتیب ۴، ۵ و ۲.۵ سانتی‌متر تعیین شد.



شکل ۵: مدل المان محدود قاب تنها

شکل ۶: مدل المان محدود قاب مجهز به دیوار برشی

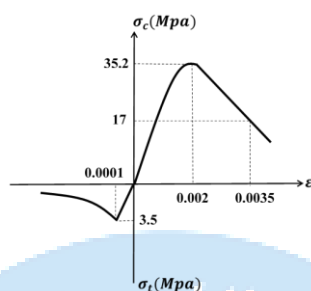
برای شبیه‌سازی خرابی بتن در نرم‌افزار آباکوس، از مدل رفتاری $^{\circ}CDP$ استفاده شد. این مدل رفتاری قادر است رفتارهای خرابی بتن را به طور دقیق شبیه‌سازی کند و همچنین می‌تواند برای شبیه‌سازی خرابی بتن تحت بارگذاری‌های پیچیده نیز به کار رود [۱۷]. در مدل عددی، دو فرض خرد شدن مصالح بتن در فشار و ترک خوردگی در کشش در نظر گرفته شد. مقادیر استفاده شده در این مدل رفتاری در جدول ۱ معرفی شده‌اند [۱۸]. مشخصات تنش-کرنش بتن در کشش و فشار و همچنین مشخصات رفتاری دیوار برشی فولادی در قاب، در جدول ۱ آمده است. سایر مشخصات مصالح مورد استفاده نیز در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند.

در مدل‌سازی، اندرکنش بین میلگردها و بتن به صورت مدفون^۴ شبیه‌سازی شد. اتصال دیوار برشی به تیر و پی به صورت کاملاً گیردار^۶ در نظر گرفته شد. تحلیل‌های انجام‌شده بر روی مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس به صورت جابجایی کنترل بود، به طوری که جابجایی نهایی ۷/۵ سانتی‌متر برای قاب مجهز به دیوار برشی و ۶ سانتی‌متر برای قاب بدون دیوار برشی به صورت جانبی اعمال شد و نمودار نیرو-جابجایی آن استخراج گردید. پارامترهای به کاررفته در مدل عددی برای مشخصات خرابی بتن در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

4-Embedded
5- Concrete Damaged Plasticity
6- Tie

جدول ۱: پارامترهای به کاررفته شده در پارامتر خرابی بتن

Dilation Angel	Eccentricity	Fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
۳۴	۰/۱	۰/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۰۱



شکل ۷: نمودار تنش کرنش بتن

جدول ۲: مشخصات مصالح

مشخصات بتن در فشار (مگاپاسکال)		مشخصات بتن در کشش (مگاپاسکال)		مشخصات تنش دیوار پرشی (مگاپاسکال)	
کرنش	تنش	کرنش	تنش	تنش	کرنش
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶/۶۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۶۶۵	۷۵/۴۸	۰/۰۰۹۳
۱۲/۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۱/۲۶	۱۶۶/۰۶	۰/۰۲۶
۱۷/۸۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۱/۷۸۵	۲۰۲/۲۹	۰/۰۴۱۲
۲۲/۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۲/۲۴	۲۱۷/۳۹	۰/۰۵۹۳
۲۶/۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۲/۶۲۵	۲۴۱/۵۵	۰/۰۸۰۸
۲۹/۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۲/۹۴	۲۵۹/۶۶	۰/۱۰۴۶
۳۱/۸۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۳/۱۸۵	۲۷۶/۳۹	۰/۱۳۳۵
۳۳/۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۶	۳/۳۶	۲۸۳/۸۲	۰/۱۵۸۵
۳۴/۶۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۸	۳/۴۶۵	۲۸۹/۸۵	۰/۱۹۰۳
۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۳/۵	۲۹۳/۵۷	۰/۲۲۸۳
۳۴/۶۵	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۲	۳/۴۶۵	۲۹۴/۲۶	۰/۲۶۷۵
۳۳/۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۴	۳/۳۶	۲۹۱/۲۴	۰/۳۱۳
۳۱/۸۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۶	۳/۱۸۵	۲۶۱/۵	۰/۳۴۱
۲۹/۴	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۲/۹۴	۲۱۴/۳۷	۰/۳۵۳۹
۲۶/۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۲/۶۲۵		

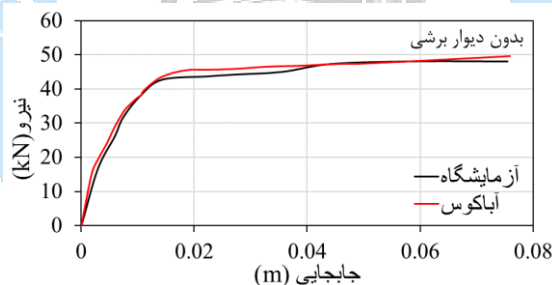
۲۲/۴	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۲	۲/۲۴
۱۷/۸۵	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۳۴	۱/۷۸۵

جدول ۳: مدول یانگ و نسبت پواسون مصالح

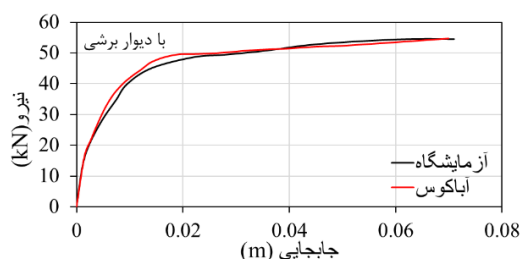
دیوار برشی	میلگرد	بتن	مدول یانگ (N/mm ²)
۲x۱۰ ^۵	۲x۱۰ ^۵	۲۶۴۷۸/۷۶	
۰/۳	۰/۳	۰/۲۴	نسبت پواسون

پس از تحلیل قاب، نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده و با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. این نمودارها در شکل ۶ به ترتیب برای قاب بدون دیوار برشی و قاب مجهز به دیوار برشی نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی تا حد قابل قبولی نزدیک هستند و می‌توان از آن‌ها برای تحلیل‌های بیشتر استفاده کرد. برای صحت‌سنجی مدل عددی، از نمودار بک‌بون مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. این روش صحت‌سنجی و تحلیل، بر اساس مقالات دیگر [۱۸-۲۰] به نتایج قابل قبولی می‌رسد.

در نمودارهای شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که نتایج مدل عددی در جابجایی‌های خاص در زیر منحنی آزمایشگاهی قرار دارد و در برخی از جابجایی‌های دیگر در بالای آن قرار گرفته است. در مدل عددی مواردی همچون همگن بودن بتن، محصور بودن بتن در بین خاموت‌ها و خطاهای ساخت در نظر گرفته نشده است. این موارد موجب ایجاد خطاهایی ناچیزی می‌شود که در جابجایی‌های متفاوت قاب، تاثیر آن متفاوت بوده است و موجب ایجاد خطا در نتایج عددی شده است.



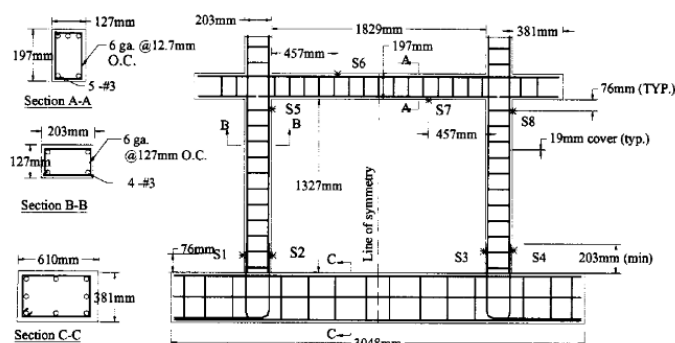
شکل ۸: مقایسه نتایج مدل عددی و پوش منحنی آزمایشگاهی برای قاب تنها



شکل ۹: مقایسه نتایج مدل عددی و پوش منحنی آزمایشگاهی برای قاب مجهز به دیوار برشی

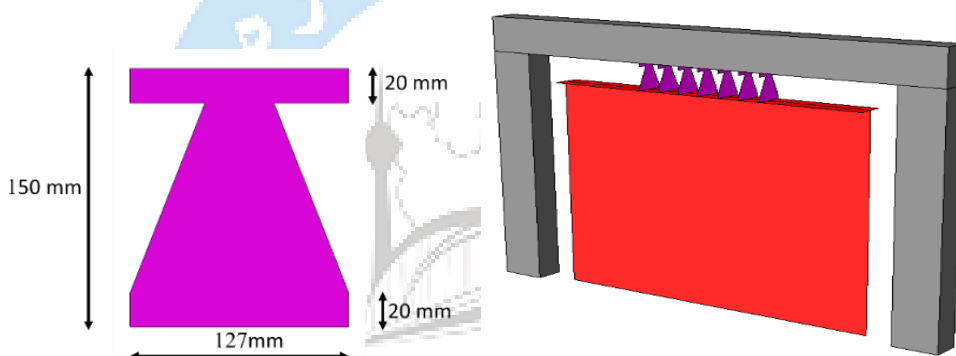
۳-۱ - مشخصات مدل اصلی

در مدل اصلی، قاب بتنی با مشخصات شکل ۹ به عنوان مدل اصلی در نظر گرفته شد.



شکل ۱۰: ابعاد قاب تنها در نظر گرفته برای مدل های اصلی [۲۱]

ابعاد میراگرهای تسلیمی ثابت در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ و ۱۲ مشخصات مدل اصلی و ابعاد این میراگرها را نشان می‌دهد. متغیرهای مدل شامل تعداد میراگرها و همچنین ضخامت دیوار برشی لحاظ شد. به همین ترتیب تمامی مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: ابعاد میراگر (ضخامت ۱۰ میلیمتر)

شکل ۱۱: مشخصات مدل اصلی

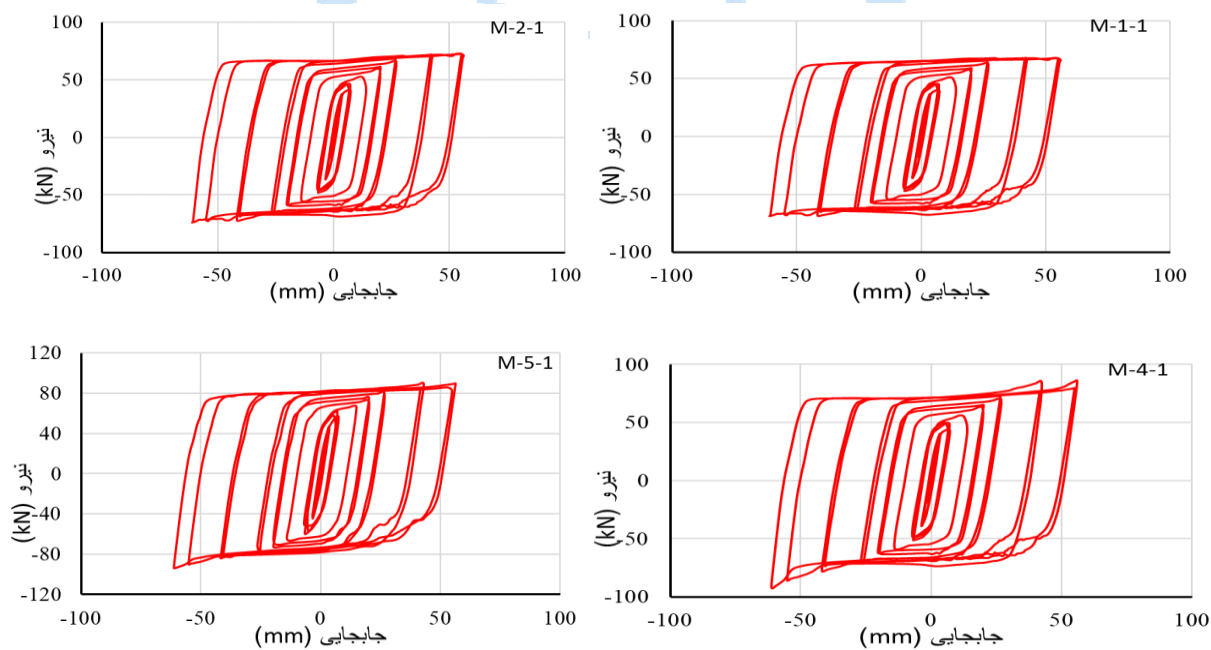
جدول ۴: معرفی مدل های اصلی

ردیف	نام مدل	تعداد میراگر	ضخامت دیوار برشی (mm)
۱	M-1-1	۱	۱
۲	M-2-1	۲	۱
۳	M-3-1	۳	۱
۴	M-4-1	۴	۱
۵	M-5-1	۵	۱
۶	M-6-1	۶	۱

۱	۷	M-7-1	۷
۲	۱	M-1-2	۸
۲	۲	M-2-2	۹
۲	۳	M-3-2	۱۰
۲	۴	M-4-2	۱۱
۲	۵	M-5-2	۱۲
۲	۶	M-6-2	۱۳
۲	۷	M-7-2	۱۴
۳	۱	M-1-3	۱۵
۳	۲	M-2-3	۱۶
۳	۳	M-3-3	۱۷
۳	۴	M-4-3	۱۸
۳	۵	M-5-3	۱۹
۳	۶	M-6-3	۲۰
۳	۷	M-7-3	۲۱

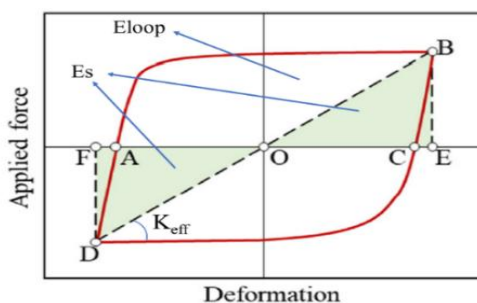
۳-۲- بررسی نتایج

پس از تحلیل نتایج، نمودارهای هیستریزیس برای تمامی مدل‌های معرفی شده در جدول ۴ محاسبه شد. در ادامه برخی از این نمودارها در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نتایج نیرو-جابجایی چند نمونه از مدل‌ها

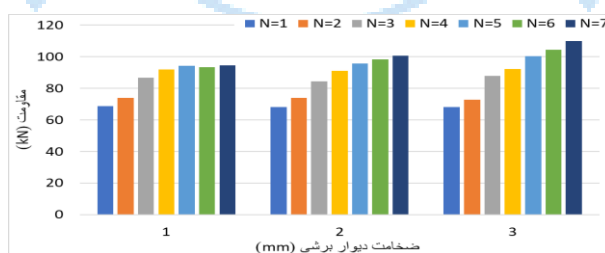
برای انجام مقایسه بهتر بین نتایج، پارامترهای لرزه‌ای طبق شکل زیر محاسبه شدند. بر همین اساس جذب انرژی در یک دوره بارگذاری برابر مساحت داخلی حلقه هیستریزس تعریف می‌شود. سختی مؤثر برابر شیب خط تقارن این منحنی هیستریزس است. همچنین، نحوه محاسبه میرایی ویسکوز معادل نیز در ادامه نشان داده شده است.



شکل ۱۴: معرفی پارامترهای منحنی هیستریزس

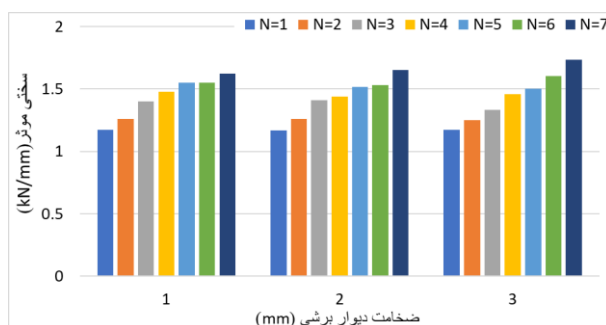
$$\xi = \frac{E_{loop}}{2\pi E_s} \quad (1)$$

در شکل ۱۵ مقاومت مدل‌ها نشان داده شده است. محور افقی در این نمودار نشان‌دهنده ضخامت دیوار برشی می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که در حالتی که دیوار برشی دارای ضخامت یک میلی‌متر است، افزایش تعداد میراگرها تا ۴ عدد باعث افزایش مقاومت گردیده است. پس از آن، نتایج تقریباً یکسان بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که زمانی که تعداد میراگرها بیشتر از ۴ عدد باشد، به دلیل ضخامت کم دیوار برشی، ابتدا دیوار برشی تسلیم می‌شود. در حالتی که ضخامت دیوار برشی برابر ۳ میلی‌متر باشد، با افزایش تعداد میراگرها، مقاومت جانبی قاب نیز تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا کرده است.



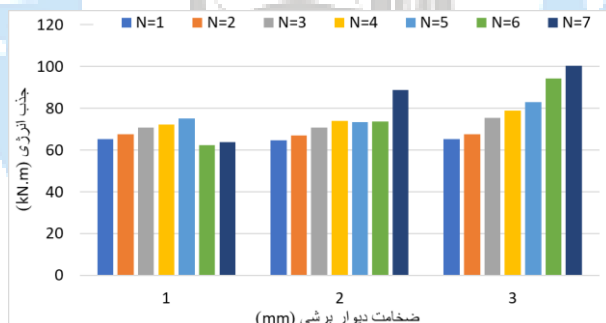
شکل ۱۵: نتایج مقاومت نهایی مدل‌ها

در شکل ۱۶ نتایج سختی مدل‌ها نشان داده شده است. تقریباً در تمامی حالات، با افزایش تعداد میراگرها، سختی نیز افزایش پیدا کرده است. ضخامت دیوار برشی تأثیر زیادی بر روی سختی مؤثر نداشته است.



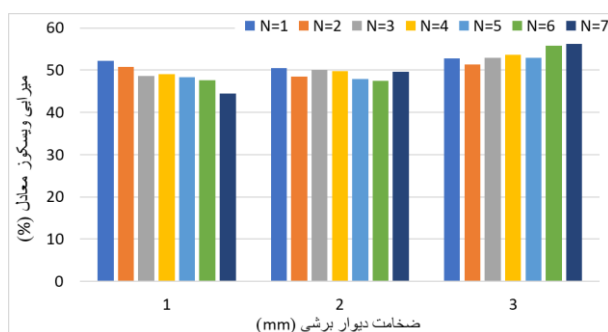
شکل ۱۶: نتایج سختی موثر

مساحت داخل حلقه‌های هیستریزیس به صورت شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که ضخامت دیوار برشی برابر یک میلی‌متر است، افزایش تعداد میراگرها تا ۵ عدد تقریباً باعث افزایش جذب انرژی شده است، ولی پس از آن کاهش شدیدی در جذب انرژی مشاهده می‌شود. در مدلی که ضخامت دیوار برشی برابر ۲ میلی‌متر است، این کاهش شدید جذب انرژی مشاهده نمی‌شود، به طوری که بیشترین جذب انرژی مربوط به مدل با ۷ عدد میراگر می‌باشد. در این حالت، به دلیل اینکه میراگرها در فواصل نزدیک‌تری به هم بودند، از کمانش صفحه فوقانی جلوگیری کرده و جذب انرژی بیشتری داشته‌اند. در مدل‌هایی با دیوار برشی ضخامت ۳ میلی‌متر، بیشترین جذب انرژی مربوط به مدل‌هایی با تعداد ۶ و ۷ عدد میراگر می‌باشد. در این مدل‌ها، افزایش تعداد میراگرها تقریباً به صورت خطی باعث افزایش جذب انرژی شده است.



شکل ۱۷: نتایج جذب انرژی مدل‌ها

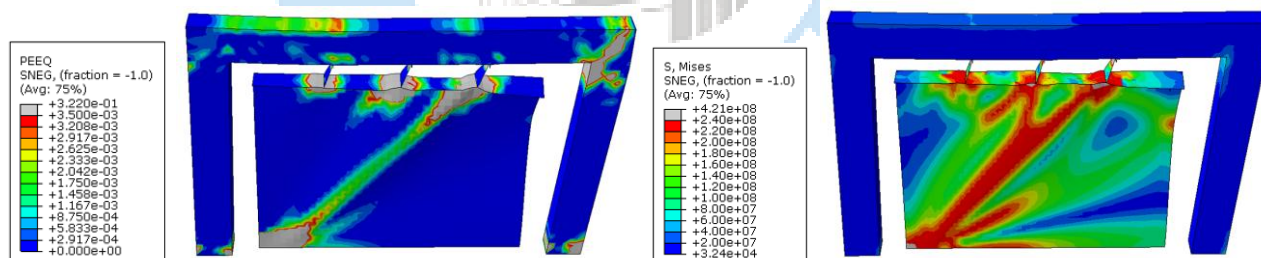
نتایج میرایی ویسکوز مدل‌ها به صورت شکل ۱۸ نشان داده شده است. در مدل‌های با ضخامت یک میلی‌متر، افزایش تعداد میراگرها باعث کاهش میرایی ویسکوز معادل شده است. در مدل‌های با دیوار برشی ضخامت ۲ میلی‌متر، نتایج تقریباً یکسان بوده است. در مدل‌های با ضخامت دیوار برشی برابر ۳ میلی‌متر، مدل‌های دارای ۱ تا ۵ عدد میراگر دارای میرایی ویسکوز معادل کمتری بودند. اما مدل‌های دارای ۶ و ۷ عدد میراگر بیشترین میرایی ویسکوز معادل را داشته‌اند.



شکل ۱۸: نتایج میرایی ویسکوز معادل

۳ - ۳ - نتایج تنش

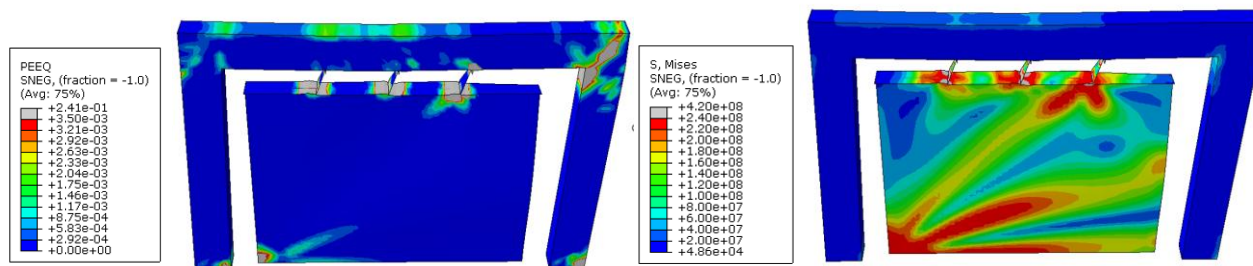
در این بخش، توزیع تنش در مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به همین ترتیب، در چندین نمونه از مدل‌ها، نمودار تنش و کرنش در جابجایی حداکثر محاسبه و بررسی شده است. در شکل زیر، نمودار تنش مدلی که دارای ۳ عدد میراگر می‌باشد و ضخامت دیوار برشی آن برابر با یک میلی‌متر است، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل ضخامت کم دیوار برشی، تنش‌های زیادی در آن ایجاد شده است. در شکل ۱۹، نمودار کرنش پلاستیک مدل دارای ۳ عدد میراگر نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که حداکثر کرنش‌ها در محل اتصال دیوار برشی و میراگر ایجاد شده است. همچنین، حداکثر کرنش‌های ایجاد شده در قاب بتنی، در محل اتصال آن و در پای ستون‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۲۰: نمودار کرنش مدل M-3-1

شکل ۱۹: نمودار تنش مدل M-3-1

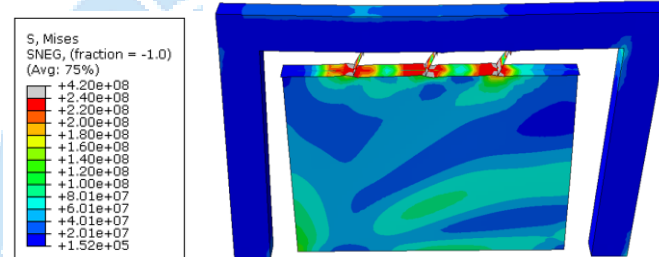
در شکل ۲۱، نمودار تنش مدل با ۳ عدد میراگر و ضخامت دیوار برشی ۲ میلی‌متر نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که تنش‌های موجود در دیوار برشی کمتر از حالت قبل است. حداکثر تنش‌ها در محل اتصال دیوار برشی و میراگرها ایجاد شده است. همچنین در شکل ۲۲، می‌توان مشاهده کرد که حداکثر کرنش‌ها در محل اتصال میراگر و دیوار برشی ایجاد شده است. همچنین، در اتصال قاب نیز به صورت مورب، کرنش حداکثر بوده است.



شکل ۲۲: نمودار کرنش مدل M-3-2

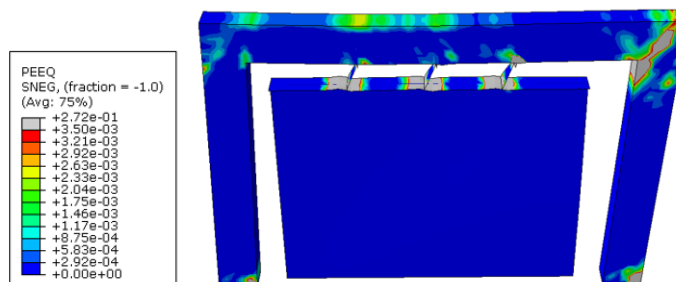
شکل ۲۱: نمودار تنش مدل M-3-2

شکل ۲۳، نمودار تنش مدل با دیوار برشی ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که به دلیل ضخامت، تنش‌های حداکثر فقط در محل اتصال آن به میراگر بوده است.



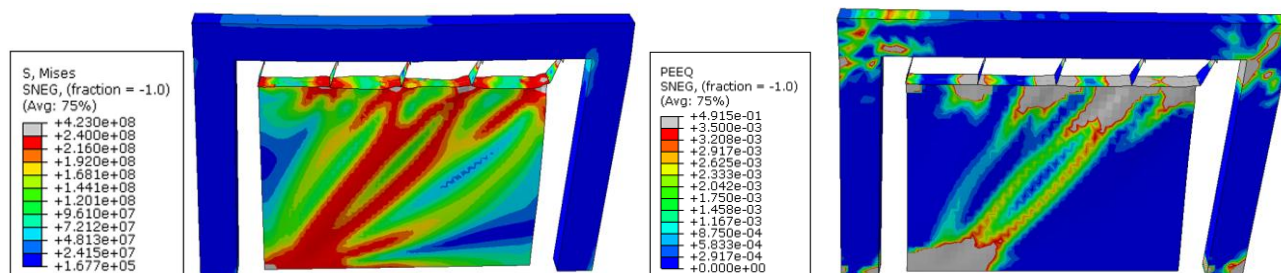
شکل ۲۳: نمودار تنش مدل M-3-3

در شکل ۲۴ نیز، نمودار کرنش این مدل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کرنش‌های ایجاد شده در قاب و همچنین کرنش‌های ایجاد شده در محل اتصال میراگر به دیوار برشی حداکثر بوده است.



شکل ۲۴: نمودار کرنش مدل M-3-3

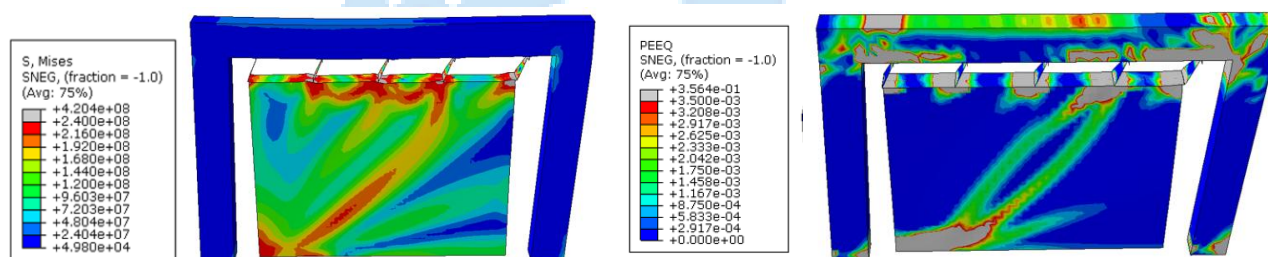
در شکل ۲۵، به بررسی مدل دارای ۵ عدد میراگر پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل ضخامت کم دیوار برشی، تنش‌های زیادی در آن ایجاد شده است و در داخل دیوار برشی به صورت مورب، تنش حداکثر بوده که برابر با همان محدوده میدان کششی است. همچنین، فقط در سمت فوقانی تسلیم شده‌اند. در شکل ۲۶، می‌توان نمودار کرنش این مدل را مشاهده کرد. کرنش‌های ایجاد شده در دیوار برشی و در محل اتصال میراگرها به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین، در محل اتصال قاب بتنی نیز می‌توان حداکثر کرنش را مشاهده کرد.



شکل ۲۵: نمودار تنش مدل M-5-1

شکل ۲۶: نمودار کرنش مدل M-5-1

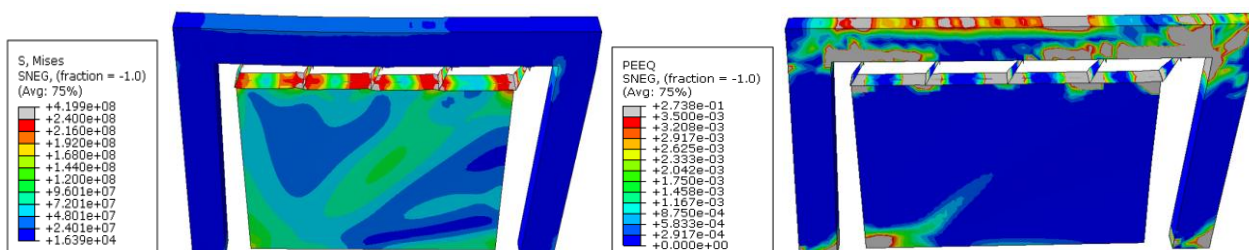
با اضافه شدن ضخامت دیوار برشی، تنش‌های ایجاد شده در آن نیز مقداری کاهش پیدا کرده است که در شکل زیر این پدیده را می‌توان مشاهده کرد، به طوری که نواحی قرمز رنگ داخل دیوار به میزان قابل توجهی کمتر از حالت قبل بوده است. در نمودار کرنش این مدل که در شکل ۲۷ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که مانند حالت‌های قبلی، حداکثر کرنش در محل اتصال دیوار و میراگر ایجاد شده است.



شکل ۲۷: نمودار تنش مدل M-5-2

شکل ۲۸: نمودار کرنش مدل M-5-2

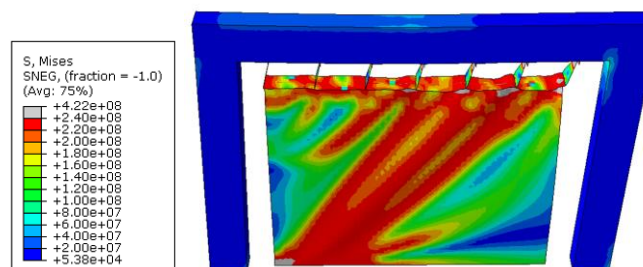
در نهایت، نتایج تنش مدل با دیوار برشی دارای ضخامت ۳ میلی‌متر به صورت شکل زیر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تنش‌های موجود در دیوار برشی تقریباً هیچگونه ناحیه قرمزی ندارد و بیشترین تنش در محل اتصال میراگرها به دیوار برشی است. توزیع کرنش پلاستیک این مدل به صورت شکل زیر نتیجه شده است. می‌توان مشاهده کرد که کرنش‌های ایجاد شده در اتصال، بیشتر از مدل‌های پیشین بوده است که نشان می‌دهد به علت زیاد بودن تعداد میراگرها، نیروی بیشتری نیز به قاب اعمال می‌شود.



شکل ۲۹: نمودار تنش مدل M-5

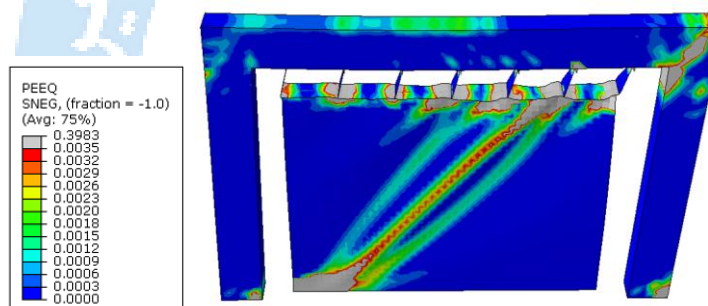
شکل ۳۰: نمودار کرنش مدل M-5-3

توزیع تنش و کرنش مدل‌های دارای ۷ عدد میراگر در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳۱، می‌توان مشاهده کرد که به دلیل ضخامت کم دیوار برشی، تنش‌های قابل توجهی در آن ایجاد شده است، به طوری که بخش عمده میانی دیوار برشی در محدوده میدان کششی آن به طور کامل به رنگ قرمز درآمد است.



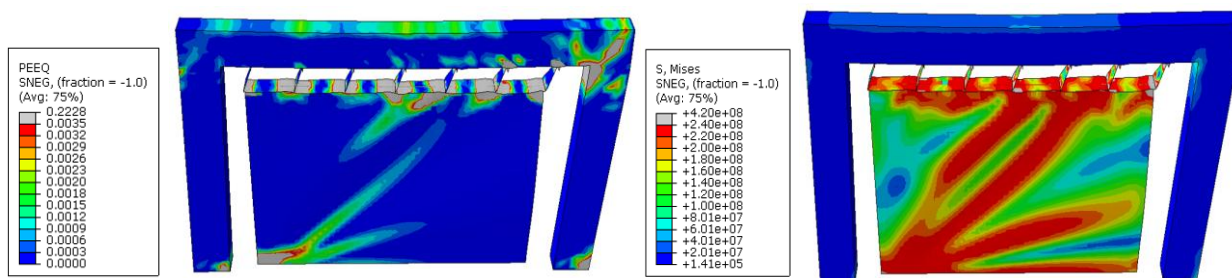
شکل ۳۱: نمودار تنش مدل M-5-1

نتایج کرنش پلاستیک این مدل به صورت شکل ۳۲ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که در نوار کششی دیوار برشی، حداکثر کرنش ایجاد شده است. بیشترین کرنش در پایین و سمت چپ که ابتدای این نوار کششی است و همچنین در طرف دیگر آن ایجاد شده است. با مقایسه این مدل با مدل‌های دارای تعداد میراگر کمتر، نتیجه می‌شود که نتایج کرنش این مدل‌ها در ناحیه قاب بتنی تقریباً یکسان بوده است.



شکل ۳۲: نمودار کرنش مدل M-7-1

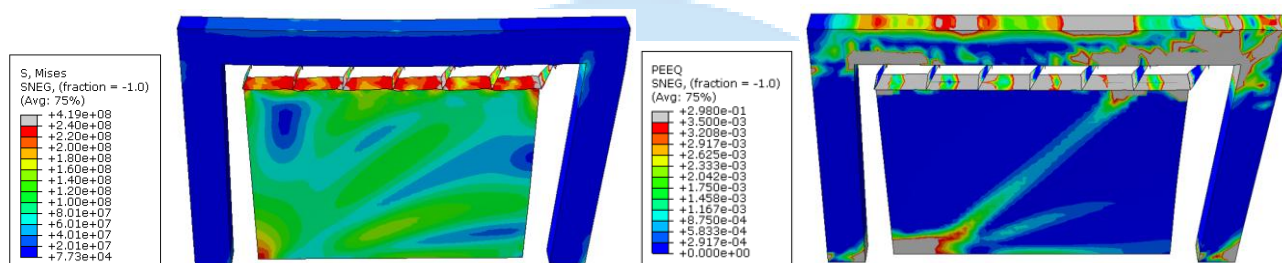
با اضافه شدن ضخامت دیوار برشی (شکل‌های ۳۳ و ۳۴)، محدوده قرمز رنگ میانی آن کاهش یافته که در شکل زیر نشان داده شده است. با این وجود، همچنان محدوده با رنگ قرمز در دیوار برشی قابل توجه است، که نشان می‌دهد میراگرها نیروی زیادی به دیوار برشی وارد می‌کنند. همچنین در نمودار کرنش پلاستیک، می‌توان مشاهده کرد که کرنش‌های ایجاد شده در بخش میانی دیوار برشی کمتر از حالت قبل بوده است و همچنین کرنش در قاب بتنی مشابه حالت قبل نتیجه شده است.



شکل ۳۴: نمودار کرنش مدل M-7-2

شکل ۳۳: نمودار کرنش مدل M-7-2

با افزایش ضخامت دیوار برشی، تنش‌های ایجاد شده در آن به حداقل مقدار خود رسیده است که در شکل ۳۵ قابل مشاهده است. نمودار مدل در شکل ۳۶ نیز نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت دیوار برشی، کرنش آن به حداقل مقدار خود رسیده است.



شکل ۳۶: نمودار کرنش مدل M-7-3

شکل ۳۵: نمودار تنش مدل M-7-3

در مقالات مشابه پیشین به تأثیر میراگرهای تسلیمی در کاهش ارتعاشات سازه‌های اشاره شده است. در برخی از مطالعات مشابه، افزایش تعداد میراگرها نیز باعث بهبود عملکرد لرزهای می‌شود، مشابه به نتایج مطالعه حاضر که نشان می‌دهد افزایش تعداد میراگرها بهبودهایی در جذب انرژی، سختی موثر و مقاومت ایجاد می‌کند. در این مطالعه اضافه شدن میراگرها به مدل‌های مختلف منجر به افزایش مقاومت و سختی در قاب‌ها شده است، که با نتایج قبلی همخوانی دارد. در بسیاری از تحقیقات گذشته، دیوار برشی با ضخامت‌های مختلف باعث تغییراتی در نحوه توزیع تنش و رفتار سازه تحت بارهای لرزهای شده است. در این مطالعه همانند مطالعات گذشته افزایش مقاومت و سختی هم راستا با افزایش ضخامت دیوار برشی مشهود است. در جدول ۵، عملکرد انواع مختلف میراگرهای فولادی از جمله میراگر انحنادار زانویی فولادی [۲۲]، میراگر میله‌ای [۲۳]، ADAS [۱۹]، میراگر فولادی با هندسه U شکل [۱۰]، میراگر U شکل با زاویه [۲۴] و دیوار برشی نیمه‌متصل [۲۵] بررسی شده است.

جدول ۵: مقایسه نتایج مدل تحقیق حاضر و سیستم‌های مقاوم جانبی مشابه در مطالعات پیشین

نتایج	میراگر منحنی فولادی	میراگر میله‌ای	ADAS	میراگر U شکل	دیوار برشی نیمه	سیستم پیشنهادی
سختی الاستیک	۱/۷۹	۱/۲۳	۱/۳	۲/۹۳	۵/۵	۱/۹۱
مقاومت حداکثر	۲/۵۸	۱/۲۷	۱/۰۶	۱/۴۱	۲/۲	۲/۷۵
جذب انرژی	۱/۷۵	۱/۲۴	۱/۰۹	۱/۵۵	۱/۱	۱/۴۸

جدول ۵ حداکثر مقدار مقاومت، سختی و جذب انرژی قاب همراه با دیوار برشی نسبت به قاب تنها را نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کند که در قاب همراه با دیوار برشی فولادی، مقاومت، سختی و جذب انرژی افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت حداکثر، مدل در مطالعه حاضر بیشتر از تمامی مدل‌هایی است که به قاب مجهز شده‌اند.

۴ - نتیجه‌گیری

استفاده از المان‌های تسلیمی در سازه‌های مجهز به دیوار برشی باعث می‌شود که این المان‌ها همانند یک فیوز سازه‌ای، نیروهای انتقال‌یافته به دیوار برشی را محدود کنند. به همین منظور، موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای این نوع سازه‌ها می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، مطالعات عددی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی مجهز به دیوار برشی فولادی و میراگرهای تسلیمی انجام گرفت. در ابتدا، با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل عددی صحت‌سنجی شد. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل قاب فولادی مجهز به دیوار برشی فولادی و قاب بتنی با و بدون دیوار برشی فولادی بود. سپس، با انجام تحلیل‌های چرخه‌ای، تأثیر تعداد میراگر و همچنین ضخامت دیوار برشی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. تعداد میراگرها در مدل از ۱ تا ۷ عدد متغیر در نظر گرفته شد. ضخامت دیوار برشی نیز در سه حالت ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. خروجی‌های این مطالعه شامل نمودارهای هیستریزس بود. سپس، برای مقایسه بهتر بین نمونه‌ها، پارامترهای اساسی از این منحنی‌ها استخراج شد. این پارامترها به ترتیب شامل جذب انرژی، مقاومت، سختی موثر و میرایی ویسکوز معادل بود. توزیع تنش و کرنش در نمونه‌هایی از مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی نتایج، خلاصه آن‌ها در بندهای زیر ارائه شده است:

۱. نتایج نمودارهای هیستریزس در شکل ۱۳ برای تمامی مدل‌ها به صورت منظم و تقریباً متقارن محاسبه شد که نشان می‌دهد در طول زلزله، در نیروهای رفت و برگشتی، رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند.
۲. نتایج مقاومت مدل‌ها که در شکل ۱۵ ارائه شده است نشان می‌دهد اگر ضخامت دیوار برشی برابر ۳ میلی‌متر باشد، اضافه شدن هر میراگر باعث افزایش میانگین ۸ درصدی مقاومت می‌شود. در مدل‌هایی که ضخامت دیوار برشی برابر ۲ میلی‌متر بود، اضافه شدن هر میراگر باعث افزایش ۶ درصدی مقاومت قاب گردید. در مدل‌هایی که ضخامت دیوار برشی برابر ۱ میلی‌متر بود، اضافه شدن میراگرها تا ۴ عدد باعث افزایش مقاومت شد و پس از آن، به دلیل کماتش دیوار برشی، نتایج تقریباً یکسان بود.
۳. نتایج سختی موثر (شکل ۱۶) مدل‌ها نشان می‌دهد که در حالتی که ضخامت دیوار برشی برابر ۳ میلی‌متر باشد، اضافه شدن هر میراگر باعث افزایش ۶ درصدی سختی موثر قاب گردید. این در حالی است که اگر ضخامت دیوار برشی ۲ میلی‌متر باشد، افزایش سختی برابر ۵.۵ درصد حاصل شد. در مدل‌هایی که ضخامت دیوار برشی برابر ۱ میلی‌متر بود، افزایش تعداد میراگرها تا ۵ عدد موجب افزایش سختی موثر قاب شد و پس از آن، نتایج تقریباً یکسان بود.
۴. نتایج حاصل از جذب انرژی (شکل ۱۷) مدل‌ها نشان می‌دهد که در قاب بتنی مجهز به دیوار برشی ۳ میلی‌متری، اضافه شدن هر میراگر باعث می‌شود که به طور میانگین ۸.۳ درصد جذب انرژی قاب افزایش یابد. در مدل‌هایی که ضخامت دیوار برشی برابر ۲ میلی‌متر بود، اضافه شدن میراگرها تا ۴ عدد موجب افزایش جذب انرژی شد و تا تعداد ۶ عدد ثابت بود. اما در مدل با ۷ میراگر، ۶ درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به مدل با ۶ میراگر مشاهده شد. بیشترین جذب انرژی مربوط به مدلی بود که دارای ۷ میراگر و همچنین ضخامت دیوار برشی برابر ۳ میلی‌متر بود.
۵. نتایج میرایی ویسکوز معادل (شکل ۱۸) مدل‌ها متفاوت نسبت به دیگر نتایج لرزه‌ای بود، به طوری که در مدل‌های با ضخامت دیوار برشی ۱ میلی‌متر، افزایش تعداد میراگر باعث کاهش میرایی ویسکوز معادل گردید. در مدل‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر، تأثیر تعداد میراگر بر نتایج تقریباً ناچیز بود. در مدل‌هایی که ضخامت دیوار برشی ۳ میلی‌متر بود، افزایش تعداد میراگر باعث افزایش میرایی ویسکوز معادل قاب شد.

۶. نتایج نمودار تنش و کرنش مدل‌ها که در شکل‌های ۱۹ تا ۳۶ ارائه شد، نشان می‌دهد که در حالت‌هایی که ضخامت دیوار برشی کم است، افزایش تعداد میراگر موجب کمانش کلی دیوار برشی می‌شود. حداکثر تنش‌های ایجاد شده در اکثر مدل‌ها در یک نوار کششی بین قسمت زیرین میراگر و گوشه دیوار برشی رخ داد. به‌طور کلی، حداکثر تنش‌ها در محل اتصال دیوار برشی به میراگرها و حداکثر کرنش‌ها نیز در همین ناحیه ایجاد شد.

با توجه به محدودیت‌های مطالعه حاضر، و با تحلیل‌های انجام شده و مشخص شدن این موضوع که نتایج برخی از مدل‌ها نشانگر این است که تعداد میراگرها و افزایش ضخامت دیوار از یک حد مشخصی فراتر شود، تاثیری در بهبود عملکرد لرزه ای سازه ندارد، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به بررسی و طراحی سیستم‌های ترکیبی دیوار برشی فولادی و میراگر تسلیمی با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی برای عملکرد بهتر در برابر زلزله پرداخته شود. استفاده از الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی (مانند ابعاد دیوار برشی، ویژگی‌های میراگر تسلیمی و می‌تواند به طراحی بهینه سیستم‌های ترکیبی کمک کند تا عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را بهبود بخشند.

مراجع

- [1] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O., ghazvini, s. (2019). Specification of Response modification factor for Steel Plate Shear Wall by Incremental Dynamic Analysis Method [IDA]. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 6(Special Issue 2), pp. 211-224. [10.22065/jsce.2018.100459.1346](https://doi.org/10.22065/jsce.2018.100459.1346).
- [2] Thorburn, L.J., Montgomery, C., Kulak, G.L. (1983). Analysis of steel plate shear walls.
- [3] Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., Su, Y.-F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*. 9(3), pp. 505-528. <https://doi.org/10.1193/1.1585727>.
- [4] Harries, K.A., Mitchell, D., Redwood, R.G., Cook, W.D. (1997). Seismic design of coupled walls-a case for mixed construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 24(3), pp. 448-459. <https://doi.org/10.1139/196-130>.
- [5] Mahmoudi, M., Abdi, M.G. (2012). Evaluating response modification factors of TADAS frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 71, pp. 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.015>.
- [6] Cheraghi, K., Tavana, M.H., Aghayari, R. (2023). Investigating the Effect of Low-Yield Yielding Dampers on the Seismic Behavior of Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 67(3), pp. 925-935. <https://doi.org/10.3311/PPci.21804>.
- [7] Khoshkalam, M., Mortezaagholi, M.H., Zahrai, S.M. (2021). Proposed Modification for ADAS Damper to Eliminate Axial Force and Improve Seismic Performance. *Journal of Earthquake Engineering*. pp. 1-23. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1859419>.
- [8] Tolouei, I., Maleki, A., Lotfollahi-Yaghin, M. (2023). Evaluation of Cyclic Behavior of Steel Plate Shearwall Equipped with Added Damping and Stiffness (ADAS) Dampers. *Modares Civil Engineering journal*. 23(2), pp. 21-37. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-56878-en.html>.
- [9] Houshmand-Sarvestani, A., Totonchi, A., Shahmohammadi, M.A., Salehipour, H. (2021). 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), pp. 1626-1644. <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1875328>.
- [10] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S. (2023). Numerical and analytical investigation of U-shape dampers and its effect on steel frames. *Structures*. 55, pp. 498-509. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.037>.

- [11] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2025). Parametric study of the innovative model of angled U-shape damper with multiphase yielding mechanism. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 170, pp. 104998. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104998>.
- [12] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Cheraghi, K. (2024). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of D-Shape yielding damper. *Structural Engineering and Mechanics*. 89(4), pp. 411. <https://doi.org/10.12989/sem.2024.89.4.411>.
- [13] Zhai, Z., Guo, W., Yu, Z., He, C., Zeng, Z. (2020). Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application. *Engineering Structures*. 221, pp. 111006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111006>.
- [14] Guo, W., Li, S., Zhai, Z., Li, Z., Tan, S., Ding, F. (2022). Seismic performance of a new S-shaped mild steel damper with varied yielding cross-sections. *Journal of Building Engineering*. 45, pp. 103508. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103508>.
- [15] TahamouliRoudsari, M., Torkaman, M., Entezari, A.R., Rahimi, H., Niazi K, K. (2019). Experimental investigation of strengthening reinforced concrete moment resisting frames using partially attached steel infill plate. *Structures*. 19, pp. 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.009>.
- [16] Jiang, L., Orabi, M.A., Jiang, J., Usmani, A. (2021). Modelling concrete slabs subjected to fires using nonlinear layered shell elements and concrete damage-plasticity material. *Engineering Structures*. 234, pp. 111977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111977>.
- [17] Le Minh, H., Khatir, S., Abdel Wahab, M., Cuong-Le, T. (2021). A concrete damage plasticity model for predicting the effects of compressive high-strength concrete under static and dynamic loads. *Journal of Building Engineering*. 44, pp. 103239. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103239>.
- [18] TahamouliRoudsari, M., Cheraghi, K., Habibi, M.R. (2019). Investigation of retrofitting RC moment resisting frames with ADAS yielding dampers. *Asian Journal of Civil Engineering*. 20(1), pp. 125-133. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0092-6>.
- [19] Kahrizi, M., TahamouliRoudsari, M. (2021). 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), pp. 773-794. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1543057>.
- [20] Saingam, P., Matsuzaki, R., Nishikawa, K., Sitler, B., Terazawa, Y., Takeuchi, T. (2021). Experimental dynamic characterization of friction brace dampers and application to the seismic retrofit of RC buildings. *Engineering Structures*. 242, pp. 112545. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112545>.
- [21] Aghayari, R., Dardaei, S. (2018). Evaluating the Effect of the Thickness and Yield Point of Steel on the Response Modification Factor of RC Frames Braced with Steel Plate. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 22(5), pp. 1865-1871. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1750-z>.
- [22] Hsu, H.L., Halim, H. (2018). Brace performance with steel curved dampers and amplified deformation mechanisms. *Engineering Structures*. 175, pp. 628-644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.052>.
- [23] Ghaedi, K., Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Gordan, M., S. M. Rashid, R., Khatibi, H., Vaghei, R. (2023). Experimental and numerical studies on the cyclic performance of structural frames equipped with bar dampers. *Structures*. 50, pp. 707-722. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.070>.
- [24] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Esfandiari, J. (2024). Numerical Investigation of Cyclic Behavior of Angled U-shaped Yielding Damper on Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 68(2), pp. 426-434. <https://doi.org/10.3311/PPci.23213>.
- [25] Cheraghi, K., Darbandkahi, M., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S. (2023). Seismic behavior of RC frames with partially attached steel shear walls: A numerical study. *Earthquakes and Structures*. 25(6), pp. 443. <https://doi.org/10.12989/eas.2023.25.6.443>.