



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Numerical and Analytical Investigation of the Seismic Behavior of Yielding Shear Panels with a Focus on Key Influential Parameters

Navid Naderi¹, Sahar Jalili^{2*}, Mohammad Hadi Tavana³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT

Yielding shear panels, due to features such as ease of installation, replaceability, and high energy dissipation, are considered an economical solution for enhancing seismic performance. This study numerically and analytically investigated the seismic behavior of yielding shear panels. After validating the finite element model against experimental results, a set of 54 parametric models with two different heights was developed. The primary aim of these analyses was to evaluate the influence of key parameters, including slenderness ratio, opening percentage, and axial force, on seismic performance of these dampers. At the outset, the critical buckling load of the shear plate was calculated, and a fraction of this load was applied as axial force to the models. All analyses were conducted through nonlinear static procedures, and from the force-displacement curves, seismic indices such as elastic stiffness, ultimate strength, and energy dissipation capacity were extracted. Approximate equations were proposed based on curve-fitting techniques to estimate these results. The findings revealed that increasing axial force reduces both stiffness and strength, with the effect more pronounced in thicker plate models. Increasing the opening ratio by 20% led, on average, to reductions of about 28% in both strength and energy dissipation. Under an additional axial force corresponding to 16% of the critical buckling load, this reduction was further intensified, reaching 37% in ultimate strength and 36% in elastic stiffness. The proposed analytical equations not only provided acceptable accuracy but also demonstrated the capability to extrapolate and predict structural behavior within intermediate parameter ranges, offering a practical tool for design of such dampers.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 September 2025

Revise Date: 05 December 2025

Accept Date: 05 January 2026

Keywords:

Yielding Shear Panel
Axial Force
Elastic Stiffness
Ultimate Strength
Energy Dissipation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.549805.3830>

*Corresponding author: Sahar Jalili

Email address: Saharjalili.c@iaau.ac.ir

بررسی عددی و تحلیلی رفتار لرزه‌ای پانل‌های برشی تسلیمی با تمرکز بر پارامترهای کلیدی تأثیرگذار

نوید نادری^۱، سحر جلیلی^{۲*}، محمد هادی توانا^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

پانل‌های برشی تسلیم‌شونده به دلیل ویژگی‌هایی مانند سهولت نصب، قابلیت تعویض و توان بالای استهلاک انرژی، راهکاری اقتصادی برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها هستند. این مطالعه به صورت عددی و تحلیلی رفتار لرزه‌ای پانل‌های برشی تسلیمی را مورد بررسی قرار داد. بدین منظور، پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی، مجموعه‌ای شامل ۵۴ مدل پارامتریک با دو ارتفاع مختلف تعریف گردید. هدف اصلی این تحلیل‌ها، بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی نظیر نسبت لاغری ورق، درصد سطح بازشو و نیروی محوری بر عملکرد لرزه‌ای این میراگرها بود. در ابتدای مطالعه، بار بحرانی کماتشی ورق برشی محاسبه شد و سپس درصدی از آن به عنوان نیروی محوری به مدل‌ها اعمال گردید. تمامی تحلیل‌ها به صورت استاتیکی غیرخطی انجام گرفت و از منحنی‌های نیرو-جابجایی، شاخص‌های کلیدی شامل سختی الاستیک، مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی استخراج شد. سپس به منظور برآورد این نتایج، معادلاتی تقریبی بر اساس برازش منحنی پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که افزایش نیروی محوری موجب کاهش سختی و مقاومت شده و این اثر در مدل‌های با ضخامت بیشتر چشمگیرتر بود. افزایش ۲۰٪ بازشو به‌طور میانگین موجب کاهش حدود ۲۸٪ در مقاومت و ۲۸٪ در جذب انرژی شد؛ این افت در حضور نیروی محوری ۱۶٪ بار بحرانی تشدید شد و به ۳۷٪ در مقاومت نهایی و ۳۶٪ در سختی الاستیک رسید. معادلات تحلیلی پیشنهادی، علاوه بر ارائه دقت مناسب، این قابلیت را دارند که رفتار سازه را در بازه‌های میانی پارامترها برون‌یابی و تخمین زده و به‌عنوان ابزاری کاربردی در فرآیند طراحی این میراگرها مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی: پانل برشی تسلیمی، نیروی محوری، سختی الاستیک، مقاومت نهایی، اتلاف انرژی

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۴/۰۷/۰۶	۱۴۰۴/۰۹/۱۴	۱۴۰۴/۱۰/۱۵	۱۴۰۴/۱۰/۱۵	۱۴۰۴/۰۵/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2026.549805.3830
*نویسنده مسئول:		سحر جلیلی			
پست الکترونیکی:		Saharjalili.c@iaui.ac.ir			

۱- مقدمه

کنترل ارتعاشات سازه‌ای و کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله یکی از محورهای اساسی مهندسی زلزله در دهه‌های اخیر بوده است. اهمیت این موضوع به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز به خاطر احتمال بالای خسارت‌های جانی و مالی ناشی از زلزله، بیشتر آشکار شده است. یکی از رویکردهای مؤثر در این حوزه، کاهش انرژی ورودی ناشی از ارتعاشات زمین به سازه، از طریق جذب و اتلاف کنترل‌شده بخشی از این انرژی است [۱، ۲]. بهره‌گیری از سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال، روشی است که در آن دستگاه‌های ویژه‌ای به ساختار اصلی سازه افزوده می‌شوند تا با تغییر شکل‌های کنترل‌شده و عمدتاً تسلیم فلزی، بخش قابل توجهی از انرژی زلزله را جذب و مستهلک نمایند [۳، ۴]. هدف این سیستم‌ها، حفظ ایمنی جانی، کاهش تغییر شکل‌های غیرالاستیک و همچنین محدود نمودن خسارت‌های وارده به سازه اصلی است؛ به نحوی که پس از رویدادهای لرزه‌ای متوسط، امکان تعمیر یا تعویض این دستگاه‌ها وجود داشته باشد و سازه به عملکرد مطلوب خود ادامه دهد [۵]. در این راستا، طراحی و به‌کارگیری انواع مختلف میراگرهای فلزی، مبتنی بر اصول تغییر شکل برشی، خمشی یا محوری، به عنوان راهکاری مطمئن و اقتصادی در ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله مطرح شده است. از جمله ویژگی‌های بارز این دستگاه‌ها، سهولت در نصب و نگهداری، قابلیت جایگزینی آسان و اثربخشی مطلوب در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه می‌باشد [۷، ۸]. اتلاف انرژی از طریق تسلیم برشی صفحات فلزی، به دلیل برخورداری از سختی اولیه بالا و کرنش تسلیم پایین‌تر نسبت به سایر مکانیزم‌ها، نقش مهمی در کنترل تغییر مکان‌ها و افزایش مقاومت و سختی سازه ایفا می‌کند [۹-۱۱].

انواع میراگرهای خمشی و برشی توسط محققان تاکنون پیشنهاد شده است. هر نوع از این میراگرها مزایای خاص خود را دارند. هان^۱ و همکاران [۱۲] در پژوهشی به بررسی رفتار مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی هیستریزیس در میراگرهای صفحه‌ای فولادی لوزی شکل پرداختند. آنان سه نوع فولاد، از جمله فولاد با مقاومت تسلیم پایین را مورد آزمون قرار دادند. نتایج نشان داد که این نوع فولاد در مقایسه با فولاد معمولی دارای نیروی تسلیم کمتر و تغییر شکل پلاستیک بیشتری است. به واسطه این ویژگی‌ها، استفاده از میراگر لوزی شکل با فولاد تسلیم پایین در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، موجب کاهش آسیب و ارتعاش می‌شود. باقری و همکاران [۱۳] با بررسی میراگر تسلیم‌شونده U شکل و مقایسه آن با میراگر اصطکاکی چرخشی در قاب‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله، نشان دادند که هر دو نوع میراگر باعث کاهش برش پایه و جابجایی جانبی سازه می‌شوند، اما هر کدام در یک شاخص عملکرد بهتری دارند. آغلارا^۲ و همکاران دو نوع میراگر ویژه برای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله توسعه دادند: میراگر فیوز میله‌ای [۱۴] و میراگر فیوز لوله‌ای [۱۵]، که هر دو از مقاطع متداول فولادی با اجزای قابل تعویض ساخته می‌شوند. نتایج حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای و تحلیل‌های عددی بیانگر رفتار هیستریزیس پایدار، قابلیت بالای جذب انرژی و تعویض آسان قطعات پس از آسیب است. مقایسه عملکرد نشان داد میراگر فیوز لوله‌ای نسبت به نوع میله‌ای دارای پینچینگ کمتر و ظرفیت جذب انرژی بالاتری در شرایط بارگذاری مشابه است. گرجی ازندریانی و همکاران با مطالعه رفتار چرخه‌ای میراگر حلقه‌ای فولادی [۱۶] و نوع دو حلقه‌ای [۱۷] آن، روابط تحلیلی و عددی برای برآورد مقاومت تسلیم، سختی و جابجایی ارائه دادند و مدل‌های عددی را با آزمایش تجربی صحت‌سنجی کردند. یافته‌ها نشان داد افزایش قطر حلقه، ظرفیت انرژی‌گیری را ارتقاء داده اما شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد و نسبت قطر به ضخامت نیز موجب افت شکل‌پذیری و میرایی می‌شود. یانگ و همکاران [۱۸]، با معرفی میراگر فلزی برشی-خمشی دارای مکانیزم تسلیم دو مرحله‌ای، عملکرد لرزه‌ای و قابلیت جذب انرژی را در سازه‌ها افزایش دادند. آزمایش‌های چرخه‌ای و یکنواخت روی نمونه‌ها، رفتار پلاستیک مطلوب، شکل‌پذیری بالا و هیستریزیس کامل را نشان داد. همچنین تأثیر پارامترهای هندسی و دو نوع الگوی شکست بررسی شد. در مطالعات دیگر، میراگرهای تسلیمی با هندسه D شکل [۱۹]، U شکل [۲۰، ۲۱]، U شکل زاویه دار [۲۲، ۲۳]، C شکل [۲۴] و S شکل [۲۵، ۲۶] پیشنهاد شده است. در این مطالعات معادلاتی تحلیلی و تقریبی برای محاسبه پارامترهای اساسی میراگر همچون سختی الاستیک، مقاومت نهایی و جذب انرژی آن‌ها پیشنهاد شده است.

^۱ -Han^۲ -Aghlara

نوعی از میراگرهای تسلیمی که دارای مکانیزم تسلیم برشی هستند در سال‌های اخیر توجه زیادی از محققان را به خود جلب کرده است. قمری و همکاران [۲۷] رفتار لرزه‌ای قاب فولادی مهاربندی همگرا در سازه‌ها را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با وجود سختی و مقاومت مناسب، این قاب‌ها به علت کمناش مهاربند قطری و رفتار هیستریزس نامطلوب، در زلزله شکل‌پذیری و جذب انرژی کافی ندارند. برای رفع این مشکل، میراگر برشی فولادی با مقطع I شکل پیشنهاد شده که عضو اقتصادی، ساده در اجرا و قابل تعویض پس از آسیب است. تحلیل‌های عددی و پارامتری نشان می‌دهد این قطعه همچون فیوز شکل‌پذیر عمل کرده و با مشارکت جان و بال، مقاومت برشی و اضافه‌مقاومت بیش از مقادیر آیین‌نامه موسسه فولاد آمریکا ایجاد می‌کند. چوی^۳ و همکاران [۲۸] به بررسی میراگرهای صفحه برشی در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله پرداخته‌اند. این میراگرها با تسلیم فلزی صفحه‌ای که بین بال‌ها و ورق‌های انتهایی جوش شده، انرژی جنبشی زمین‌لرزه را مستهلک کرده و از آسیب جدی به اجزای اصلی سازه جلوگیری می‌کنند. با این حال، عملکرد آن‌ها فقط در ناحیه تغییرشکل غیرالاستیک فعال می‌شود. برای کاهش این محدودیت، فولاد با تنش تسلیم پایین و شکل‌پذیری زیاد به عنوان ماده میراگر انتخاب شده است. رفتار غیرخطی، تغییرمکان‌های بزرگ و منحنی‌های هیستریزس به کمک تحلیل اجزای محدود شبیه‌سازی و با آزمون بارگذاری شبه‌استاتیکی راستی‌آزمایی شده است. خو^۴ و همکاران [۲۹] نوع تازه‌ای از میراگر صفحه‌ای فلزی را با استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین نوع BLY160 برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه معرفی کرده‌اند. آن‌ها چهار گروه نمونه را تحت بارگذاری چرخه‌ای برگشتی قرار داده و عرض به ضخامت ورق، سوراخ‌کاری گوشه‌ها، ابعاد تقویت‌کننده‌ها و بارگذاری را به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته‌اند. از روی حلقه‌های نیرو-جابجایی، منحنی‌های پوش منحنی، الگوی تغییرشکل و نحوه گسیختگی، توان اتلاف انرژی میراگرها ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد سخت‌شوندگی قابل توجهی در تغییرشکل‌های تکراری با دامنه ثابت و افزایش رخ می‌دهد و ظرفیت جذب انرژی این میراگرها حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر صفحات فولادی با رفتار الاستوپلاستیک ساده است. برای شبیه‌سازی این رفتار پیچیده، مدل سخت‌شوندگی ترکیبی معرفی و با نتایج آزمایشگاهی کنترل شده است. نوزو^۵ و همکاران [۳۰] یک سیستم میراگر پانل برشی را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در مناطق با خطر بالای زلزله مطالعه کرده‌اند. این سیستم پیش‌تر در چندین پروژه واقعی، به‌ویژه در آمریکای جنوبی، اجرا شده و در این پژوهش رفتار غیرخطی آن بر پایه داده‌های آزمایشگاهی با یک مدل عددی اجزای محدود بازتولید شده است. مدل طوری تنظیم شده که سخت‌شدگی ترکیبی را در دوره‌های بارگذاری چرخه‌ای ثبت کند و درک بهتری از تغییرشکل‌های بزرگ و پاسخ هیستریزی سازه فراهم آورد. سپس یک مدل تحلیلی ساده‌تر برای برآورد سختی اولیه، نیروی تسلیم و میرایی معادل در جابجایی‌های زیاد پیشنهاد شده و گزینه‌های متفاوت سختی از نظر سادگی و دقت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند تا مبنایی برای طراحی مهندسی قابل استفاده فراهم شود. کیخسروکیان و همکاران [۳۱] با معرفی میراگر ترکیبی لینک قائم با سازوکار تسلیم دومرحله‌ای، بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی را هدف قرار دادند. این سامانه با دو پانل برشی جایگزین‌شونده در سری، امکان جذب انرژی در سطوح مختلف تغییرمکان نسبی طبقه را فراهم می‌کند. تحلیل عددی نشان داد میراگر، ظرفیت جذب انرژی و میرایی را در بازه وسیعی از تغییرمکان‌ها افزایش داده و سختی قاب را ارتقا می‌بخشد. نسبت دهانه آزاد به ارتفاع حداقل ۷ نیز برای عملکرد مطلوب توصیه شد. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که نیروی محوری می‌تواند رفتار میراگر را تغییر دهد؛ به‌طوری که اگر این میراگرها علاوه بر بارهای اصلی خود، تحت نیروهای محوری نیز قرار گیرند، بسته به مقدار آن، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری میراگرهای تسلیمی داشته باشند [۳۲-۳۴]. با وجود پیشرفت‌های اخیر، هنوز خلاهای مهمی در درک اثر ترکیبی پارامترهای هندسی و بارهای محوری بر عملکرد لرزه‌ای پانل برشی وجود دارد؛ به‌ویژه در شرایطی که این میراگرها دارای بازشو هستند. این خلا پژوهشی در بسیاری از مطالعات پیشین نادیده گرفته شده است. در یک مطالعه، رفتار یازده نمونه تمام‌مقیاس پانل برشی از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین بررسی شد و اثر نسبت ابعادی صفحه برشی، ضخامت ورق‌های کناری و سخت‌کننده‌ها بر ظرفیت اتلاف انرژی و الگوی شکست تحلیل گردید [۳۵]. در پژوهشی دیگر، رفتار لرزه‌ای دیوارهای کوپل مجهز به پانل برشی فولادی با تنش تسلیم پایین و قابلیت تعویض مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی کارایی لرزه‌ای مطلوب و قابلیت تعویض سریع این میراگر را نشان داد [۳۶]. افزون بر این، مطالعات مربوط به پانل‌های برشی خمیده در قاب‌های مهاربندی‌شده نیز نشان می‌دهد که این نوع میراگرها می‌توانند سختی،

³ -Choi⁴ -Xu⁵ -Nuzzo

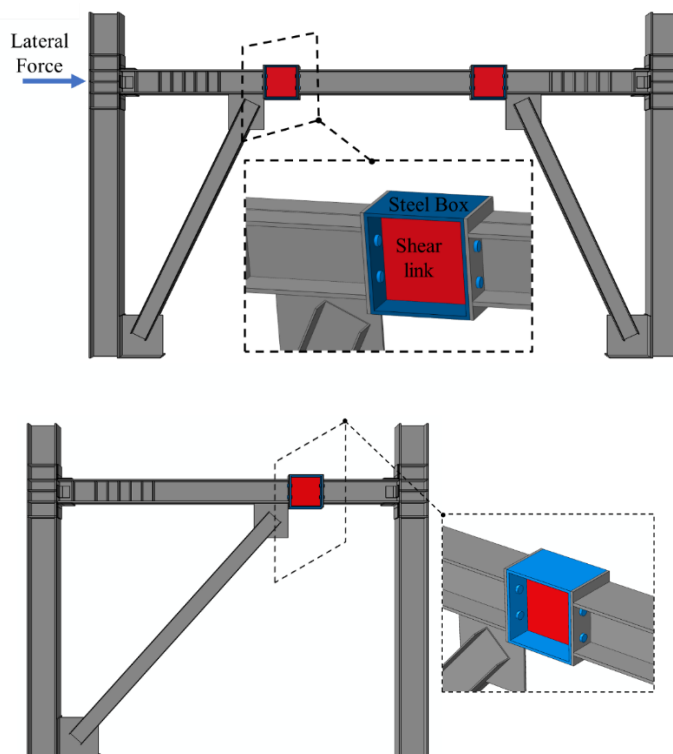
مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی سازه را به طور چشمگیری افزایش دهند و همزمان آسیب دال بتنی را کاهش دهند [۳۷]. همچنین، رفتار میراگر برشی فولادی با سوراخ‌های هشت ضلعی به صورت عددی بررسی شد و معادلاتی برای پیش‌بینی پارامترهای هیستریزس ارائه گردید که در طراحی لرزه‌ای سازه کاربرد دارد [۳۸]. در یک پژوهش عددی، رفتار هیستریزیسی پانل‌های برشی فولادی با تنش تسلیم پایین بررسی شد. مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داده شد و اثر سخت‌کننده‌ها، ورق‌های کناری و ضخامت صفحه اصلی تحلیل گردید. در ادامه، یک مدل تحلیلی برای برآورد تنش کمانشی و توصیه‌های طراحی برای اجزای مختلف میراگر ارائه شد [۳۹]. همچنین در مطالعات جدید، طراحی بهینه سامانه‌های کنترل لرزه‌ای و اجزای اتلاف انرژی با بهره‌گیری از روش‌های نوین بهینه‌سازی، از جمله طراحی هم‌زمان کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی و میراگر جرمی تنظیم‌شده فعال در ساختمان‌های بلند روی خاک نرم و نیز بهینه‌سازی شکل فراصوت با الگوریتم تعادل برای بهبود انتقال انرژی، گزارش شده است [۴۰، ۴۱].

بررسی دقیق پیشینه پژوهش بیانگر آن است که علی‌رغم توسعه میراگرهای تسلیمی، ارائه معادلاتی جامع برای محاسبه پارامترهای لرزه‌ای این نوع پانل‌های برشی که دامنه وسیعی از ابعاد و به‌ویژه مدل‌های دارای بازشو را پوشش دهد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف رفع این خلاء در ادبیات فنی، به توسعه معادلات تحلیلی کاربردی بر مبنای تحلیل‌های عددی گسترده پرداخته است تا ابزاری کارآمد جهت تسهیل فرآیند طراحی فراهم آورد. افزون بر این، در این مطالعه تأثیر اندرکنش نیروی محوری و بازشو بر شاخص‌های کلیدی نظیر سختی الاستیک، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری این پانل‌ها به طور ویژه و جامع مورد ارزیابی قرار گرفت؛ موضوعی که در تحقیقات گذشته به آن پرداخته نشده یا نتایج محدودی در دسترس بوده است.

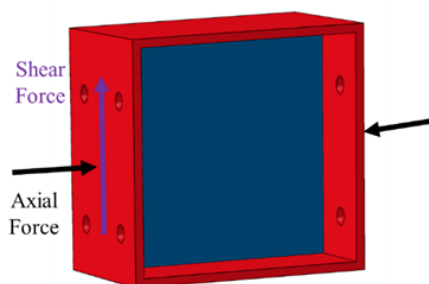
۲- پیکربندی و نحوه قرارگیری پانل برشی در سازه

نحوه قرارگیری پانل‌های برشی در سازه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این حالت اگر سازه تحت نیروی جانبی قرار گیرد، نیروهای برشی در پانل‌های تسلیمی ایجاد می‌شوند که موجب تسلیم و جذب انرژی می‌شود. از مزیت‌های این نوع آرایش، اتصال پیچی است که امکان تعویض پس از زلزله را فراهم می‌کند. همچنین در مطالعات گذشته محل قرارگیری این میراگر در بین تیر و مهاربند شورون نیز پیشنهاد شده است [۴۲]. برای اتصال هر پانل برشی و جعبه فولادی در قاب از ۸ عدد بولت فولادی استفاده می‌شود. مقاومت هر ۴ بولت می‌بایست طوری طراحی شود که بزرگ‌تر مساوی مقاومت حداکثر پانل برشی طراحی شود که تا انتهای بارگذاری گسیخته نشوند. منظور از قابلیت تعویض در این مطالعه، امکان جداسازی و جایگزینی سریع عضو به واسطه اتصال پیچی است. با توجه به نبود معیار استاندارد برای تعیین نقطه دقیق پایان عمر قطعه، در این پژوهش حد آستانه‌ای برای خرابی یا زمان تعویض تعریف نشده و صرفاً جنبه اجرایی آن مدنظر بوده است.

در حالتی که جعبه فولادی و پانل برشی مطابق شکل ۱ در سازه و در میان تیر و مهاربند شورون قرار گیرند، نیروهای وارده در این پانل برشی به صورت شکل ۲ می‌باشد. نیروهای اصلی در این میراگر به صورت برشی بوده که موجب تسلیم آن می‌شود. اما در واقعیت علاوه بر این نیروی برشی، نیروهای به صورت عمود بر جعبه فولادی نیز وارد می‌شود. این نیروهای اضافه موجب تغییر رفتار میراگر می‌شود که در این مطالعه تأثیر آن نیز در تحلیل‌ها لحاظ شده است.



شکل ۱ محل پیشنهادی قرارگیری پانل برشی در سازه



شکل ۲ نیروهای وارده به پانل برشی

۳- محاسبه بار کمانشی پانل برشی

در این مطالعه بار محوری وارد بر پانل برشی بر اساس درصدی از بار کمانشی آن به مدل‌ها اعمال می‌شود. از این رو در این بخش بار کمانشی محاسبه گردید. به این ترتیب فرض شد که نیروی محوری صرفاً توسط پانل برشی تحمل می‌شود، به گونه‌ای که در تحقیقات پیشین نیز فرض مشابهی در نظر گرفته شده و از سختی جعبه فولادی در برابر پانل برشی صرف نظر شده است [۴۲]. با توجه به قرارگیری پانل برشی درون یک جعبه فولادی و اعمال بارگذاری از یک سمت، می‌توان رفتار کمانشی آن را تقریباً مشابه یک صفحه مربعی فرض کرد که از یک وجه تحت بارگذاری و از وجه دیگر در شرایط گیردار قرار دارد. بر اساس روابط تقریبی تیموشنکو و گیر [۴۳]، بار بحرانی کمانش واحد طول پانل برشی از معادله (۱) به دست می‌آید. در این معادله، عدد $10/07$ به عنوان ضریب کمانش مطرح می‌شود [۴۴]. این ضریب یک پارامتر بدون بعد است که مقدار آن به نسبت ابعادی صفحه، شکل موج کمانش (پارامترهای طول موج)، و شرایط مرزی پانل برشی بستگی دارد. در این معادله سختی خمشی صفحه به صورت معادله (۲) قابل محاسبه است. همچنین N_c بار بحرانی کمانش واحد طول پانل برشی است [۴۵].

$$N_c = 10.07 \frac{\pi^2 d}{D^2} \quad (1)$$

$$d = \frac{E \times t_s^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

در معادلات فوق، d سختی خمشی صفحه، E مدول الاستیسیته فولاد، ν ضریب پواسون، t_s ضخامت پانل برشی و D بعد آن است. در بخش مطالعات عددی، که در ادامه ارائه شده است درصدی از این نیروی محوری در تحلیلها لحاظ می شود. شایان ذکر است که بار بحرانی کمانشی محاسبه شده در این بخش، مربوط به پانل برشی بدون بازشو می باشد. اگرچه وجود بازشو ظرفیت کمانشی واقعی را کاهش می دهد، به دلیل نبود روابط تحلیلی صریح برای ورق های سوراخ دار، در این پژوهش از ظرفیت کمانشی ورق بدون بازشو استفاده شده است.

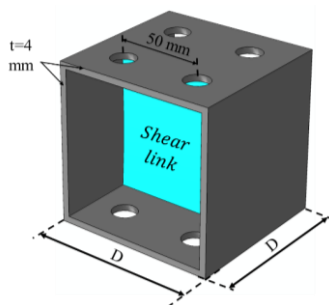
۴- صحت سنجی مدل عددی

به منظور اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد مدل سازی های عددی، در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل های غیرخطی با داده های آزمایشگاهی موجود در مطالعات پیشین مقایسه شده است. به این منظور از پنج نمونه از مطالعات آزمایشگاهی چان و همکاران [۴۲] استفاده شد. نمونه های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، از نوع میراگرهای تسلیمی برشی بودند. این میراگرها از یک ورق دیافراگم فولادی نازک (پانل برشی) تشکیل شده اند که درون یک مقطع مربع توخالی جوش داده شده است.

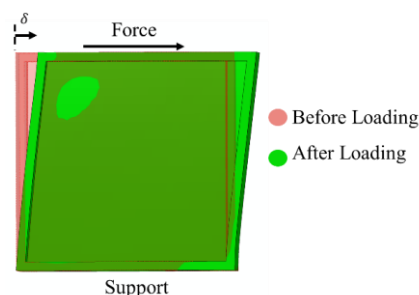
برای صحت سنجی مدل عددی، از پنج نمونه آزمایشگاهی شامل مدل های M۲-۱۰۰، M۱۰۰-۴، M۱۲۰-۲، M۱۲۰-۳ و M۴-۱۲۰ استفاده شد.

برای ساخت دو نمونه نخست، از مقطع جعبه فولادی با ابعاد $4 \times 100 \times 100$ میلی متر و مقاومت تسلیم ۴۱۴/۹ مگاپاسکال استفاده گردید. در مدل M۲-۱۰۰ ورق دیافراگم با ضخامت اسمی ۲ میلی متر (ضخامت اندازه گیری شده ۱/۸۶ میلی متر) و مقاومت تسلیم ۲۱۱/۳ مگاپاسکال به کار رفت. مدل M۴-۱۰۰ نیز از ورق ضخیم تر با ضخامت اسمی ۴ میلی متر (ضخامت اندازه گیری شده ۳/۷۸ میلی متر) و مقاومت تسلیم ۳۵۱/۲ مگاپاسکال بهره می برد. اتصال این نمونه ها به دستگاه آزمایش از طریق چهار پیچ M16 در هر سمت انجام شد.

برای بررسی عملکرد مقاطع بزرگ تر، سه نمونه دیگر شامل M۲-۱۲۰، M۱۲۰-۳ و M۴-۱۲۰ با استفاده از مقطع SHS به ابعاد $4 \times 120 \times 120$ میلی متر و مقاومت تسلیم ۴۱۴/۹ مگاپاسکال ساخته شدند. در مدل M۲-۱۲۰ ورق دیافراگم با ضخامت اسمی ۲ میلی متر (ضخامت اندازه گیری شده ۱/۸۶ میلی متر) و مقاومت تسلیم ۲۱۱/۳ مگاپاسکال به کار گرفته شد. مدل M۳-۱۲۰ از ورق دیافراگم با ضخامت اسمی ۳ میلی متر (ضخامت اندازه گیری شده ۲/۸۳ میلی متر) و مقاومت تسلیم ۳۲۱/۳ مگاپاسکال تشکیل شد. همچنین در مدل M۴-۱۲۰ ورق دیافراگم با ضخامت اسمی ۴ میلی متر (ضخامت اندازه گیری شده ۳/۷۸ میلی متر) و مقاومت تسلیم ۳۵۱/۲ مگاپاسکال استفاده شد. شیوه اتصال این سه نمونه نیز مشابه نمونه های قبلی، با استفاده از چهار پیچ M16 در هر سمت انجام شد. شرایط مرزی این مدل ها به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شد. همچنین وضعیت مدل بعد و قبل از بارگذاری به صورت شکل ۴ بود که در این شکل پارامتر δ نیز نشان داده شده است [۴۲].



شکل ۳ ابعاد و پارامترهای پانل برشی



شکل ۴ محل اعمال نیرو و تغییر شکل مدل

برای مدل سازی عددی نمونه های آزمایشگاهی، اجزای مختلف سیستم بر اساس ماهیت رفتاری آن ها انتخاب و شبیه سازی شدند. بدین منظور، المان حجمی^۶ برای شبیه سازی مقطع جعبه فولادی استفاده شد. همچنین از المان صفحه^۷ برای پانل برشی به کار گرفته شد. انتخاب این المان ها به دلیل توانایی آن ها در بازنمایی دقیق رفتار اجزای نازک تحت برش، شبیه سازی کمانش و پس کمانش برشی، و مدل کردن توزیع تنش های غشایی صورت گرفت [۴۶]. همچنین در مدل، تغییر شکل های اولیه هندسی^۸ (۱/۵۰۰ ضلع پانل برشی) لحاظ گردید تا شرایط واقعی تری از پاسخ سازه بازآفرینی شود. برای حصول اطمینان از همگرایی، چندین اندازه مش برای مدل آزمایش شد و نتایج سختی اولیه و بار نهایی در هر حالت استخراج گردید. نتایج این تحلیل حساسیت در شکل ۵الف ارائه شده است. در این نمودار، میزان خطای سختی الاستیک و مقاومت نهایی نسبت به مدل مبنا با اندازه مش بهینه ۴ میلی متر نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با ریزتر شدن مش، تغییرات نتایج بسیار اندک بوده و نشان می دهد که انتخاب مش ۴ میلی متر از دقت کافی برخوردار است. برای شبیه سازی اتصال بین دیافراگم و جدار مقطع باکس، از "Tie" استفاده شد. شرایط مرزی مدل سازی مطابق با آزمایش در نظر گرفته شد و بارگذاری به صورت کنترل-جابجایی و با حلگر استاتیکی غیرخطی^۹ در آباکوس انجام گرفت. جزئیات مربوط به مدل مش بندی و شرایط مرزی در شکل ۵ نمایش داده شده است. در مدل آزمایشگاهی هیچ گونه گسیختگی در پیچ ها مشاهده نشد، از این رو شبیه سازی آن ها نادیده گرفته شد و شرایط مرزی در محل سوراخ ها در نظر گرفته شد که در شکل ۵(ب) ارائه شده است. با توجه به اینکه رفتار پانل های برشی شامل کمانش های قابل توجه و ورود به ناحیه پس کمانش می باشد، لحاظ نمودن اثرات غیرخطی هندسی برای دقت نتایج ضروری است. بدین منظور، در تمامی مراحل تحلیل، اثرات تغییر شکل های بزرگ در نظر گرفته شد تا رفتار سازه به طور دقیق شبیه سازی شود.

به منظور توصیف دقیق رفتار غیرخطی مصالح فولادی در تحلیل های اجزای محدود، از تئوری پلاستیسیته کلاسیک با معیار تسلیم فون میزس استفاده گردید. با توجه به اینکه تحلیل های اصلی این پژوهش به صورت بارافزون انجام شده اند، قانون سخت شدگی ایزوتروپیک برای توصیف رفتار پس از تسلیم و گسترش ناحیه پلاستیک مناسب تشخیص داده شد. مشخصات مکانیکی مصالح بر اساس داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲] استخراج گردید. از آنجا که نرم افزار آباکوس برای تحلیل های با تغییر شکل بزرگ نیازمند تعریف منحنی رفتار ماده به صورت حقیقی است، داده های تنش و کرنش مهندسی حاصل از آزمایش با استفاده از روابط (۳) و (۴) به مقادیر تنش و کرنش حقیقی تبدیل و در مدل اعمال شدند. در روابط فوق، σ_{true} و ϵ_{true} به ترتیب بیانگر تنش و کرنش حقیقی هستند. همچنین σ_{eng} و ϵ_{eng} نشان دهنده مقادیر تنش و کرنش مهندسی می باشند. منحنی های تنش-کرنش حقیقی به کار رفته برای ورق های با ضخامت های مختلف در شکل ۵ج نشان داده شده است.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (۳)$$

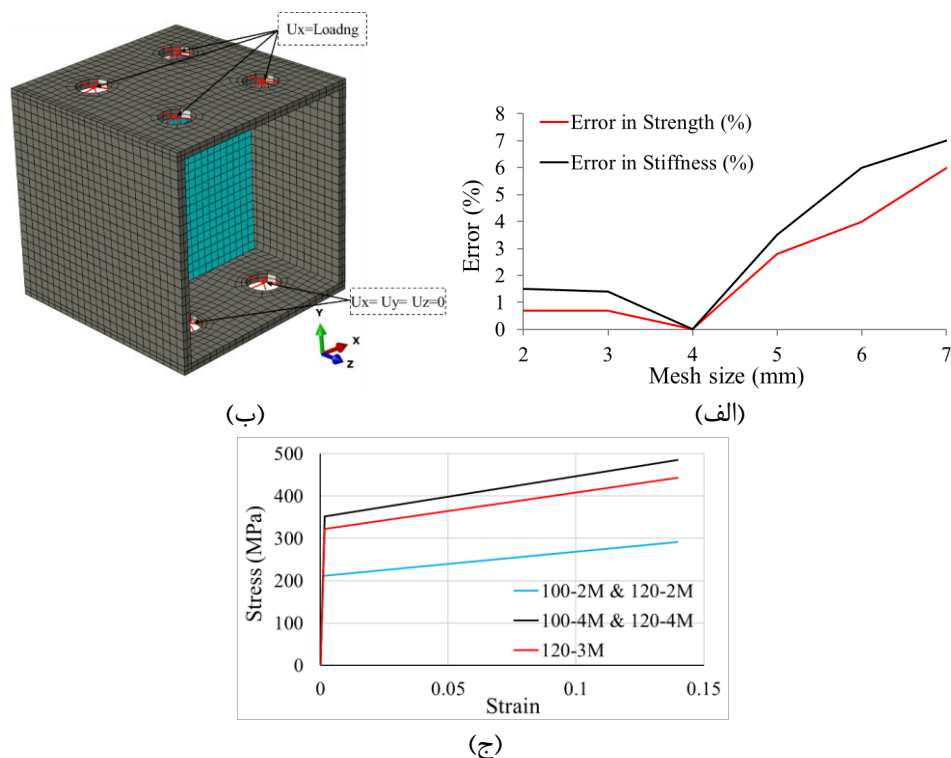
$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (۴)$$

^۶ Solid

^۷ Shell

^۸ Initial imperfections

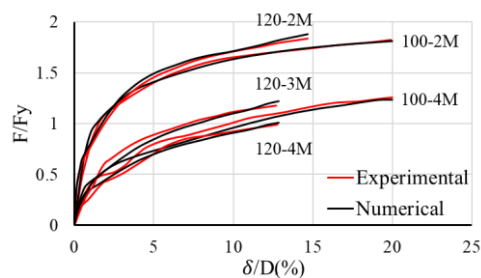
^۹ Static General



شکل ۵ (الف) نتایج آنالیز حساسیت مش بندی (ب) شرایط مرزی مدل مش بندی شده عددی (ج) نمودار تنش کرنش واقعی مصالح

پس از انجام تحلیل بر روی هر دو مدل عددی، منحنی های نیرو-جابجایی استخراج و با داده های حاصل از آزمایش های تجربی مقایسه گردید. در مطالعه آزمایشگاهی، مقادیر نیرو به صورت نسبت به نیروی تسلیم (معادله ۵) ارائه شده اند. در این معادله، f_y بیانگر تنش تسلیم عضو برشی است. همان گونه که ملاحظه می شود، نتایج عددی همخوانی مطلوبی با داده های آزمایشگاهی نشان می دهند؛ به طوری که میانگین درصد اختلاف مقاومت نهایی و سختی الاستیک میان مدل های عددی و آزمایشگاهی به ترتیب ۲/۴٪ و ۳/۳٪ محاسبه گردید.

$$F_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} b t_s \quad (۵)$$



شکل ۶ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

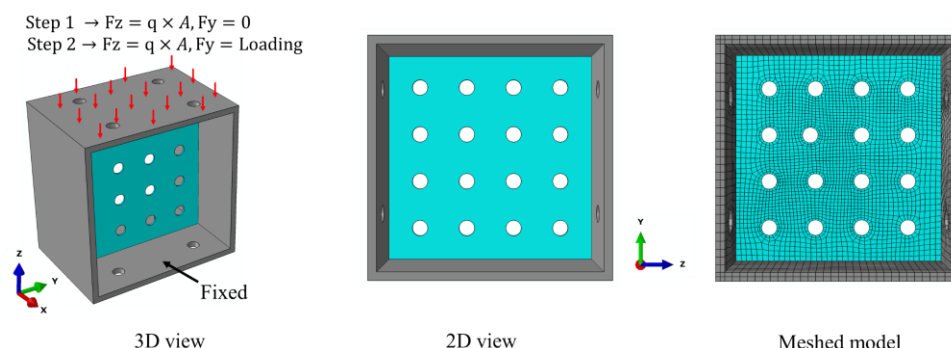
۵- مطالعات عددی

در این بخش، تحلیل های عددی به منظور ارزیابی پارامترهای کلیدی مؤثر بر عملکرد لرزه ای پانل برشی انجام شد. متغیرهای مورد بررسی شامل مساحت بازشوها، نسبت لاغری و نیروی محوری اعمال شده به پانل های برشی بود. مدل های مورد مطالعه دارای پیکربندی هندسی مشابه نمونه صحت سنجی بودند، با این حال بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تعریف شدند. در این جدول، خصوصیات تمامی مدل های عددی، از جمله طول ضلع پانل برشی (D)، نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل برشی (β)، نسبت نیروی محوری به بار کمناشی (α)، نسبت لاغری (λ) و بار کمناشی تشریح شده است. در کلیه مدل ها، تعداد و موقعیت بازشوها ثابت نگه داشته شد و صرفاً مساحت آن ها به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد. همان طور که چان و همکاران [۴۲] گزارش کردند، آرایش مستطیلی بازشوها به سبب ایجاد پاسخ

هیستریزیسی پایدارتر، کاهش پدیده پینچینگ و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی، برترین کارایی را میان الگوهای بررسی شده ارائه می‌کند؛ از این رو در پژوهش حاضر نیز بازشوها با چینش مستطیلی درون پانل برشی تعبیه شدند. شکل ۷ شماتیک مدل عددی و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد، که شامل قیود تکیه‌گاهی، چیدمان بازشوها و شرایط بارگذاری در گام اول و دوم بارگذاری است. در شکل ۷، A نشان‌دهنده مساحت سطحی است که بار گسترده بر آن وارد می‌شود و q بیانگر شدت بار فشاری است که در مدل عددی به صورت گسترده و یکنواخت بر کل سطح اعمال گردید. به منظور اعمال نیروی محوری، روند تحلیل به صورت دومرحله‌ای پیاده‌سازی شد؛ بدین ترتیب که در گام نخست بار محوری اعمال و در گام بعدی بار برشی به مدل وارد گردید. در تمام مدل‌ها دوران مدل مطابق نمونه آزمایشگاهی تا δ/D برابر ۲۰٪ اعمال شد. همچنین در شکل ۷ مشاهده می‌شود، الگوی مش‌بندی در مدل‌های دارای بازشو به گونه‌ای تنظیم شده است که در نواحی پیرامونی حفره‌ها، ابعاد المان‌ها ریزتر در نظر گرفته شود. این تراکم شبکه اجزای محدود در اطراف بازشو، به منظور ثبت دقیق گرادینان‌های شدید تنش و شبیه‌سازی صحیح پدیده تمرکز تنش در لبه‌های حفره اعمال گردیده است.

در خصوص موقعیت هندسی بازشوها، شایان ذکر است که در تمامی مدل‌های مورد بررسی، چیدمان حفرات به صورت کاملاً متقارن نسبت به محورهای اصلی پانل و متمرکز در مرکز هندسی ورق در نظر گرفته شده است. به منظور تعمیم نتایج به ابعاد مختلف، فواصل بین بازشوها و همچنین فاصله آن‌ها از لبه‌های مرزی پانل، به صورت نسبتی ثابت از بعد لینک (D) تعریف و مدل‌سازی شده‌اند. این رویکرد موجب می‌شود تا الگوی توزیع تنش در مدل‌های با ابعاد متفاوت، ماهیت یکسانی داشته باشد.

لازم به ذکر است که تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش از نوع استاتیکی غیرخطی (بارافزون) بوده و ماهیت مستقل از زمان دارند؛ لذا از اثرات نرخ کرنش بر خواص مکانیکی فولاد صرف‌نظر شده است. اگرچه افزایش سرعت بارگذاری معمولاً موجب افزایش تنش تسلیم و مقاومت نهایی فولاد می‌شود، اما نادیده گرفتن این افزایش مقاومت در تحلیل‌های استاتیکی، منجر به تخمین ظرفیت باربری در حد پایین می‌گردد. بنابراین، نتایج ارائه‌شده یک برآورد محافظه‌کارانه^{۱۰} از رفتار میراگر محسوب می‌شوند که از دیدگاه طراحی ایمن، رویکردی قابل قبول و در جهت اطمینان است.



شکل ۷ شرایط مرزی مدل عددی

در این مطالعه، دو مدل با ارتفاع‌های متفاوت ۱۵۰ میلی‌متر و ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. برای این مدل‌ها، سه پارامتر α ، β و γ تعریف گردید. این پارامترها وابسته به درصد نیروی محوری، درصد سطح بازشو و نسبت لاغری هستند که در قالب ۵۴ مدل، تعریف دقیق آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. پس از تحلیل، نتایج حاصله در شکل ۸ به نمایش درآمده است. نمودارهای این شکل، رابطه نیروی برشی (F_y) بر حسب دوران (δ/D) را نشان می‌دهند. سه پارامتر کلیدی استخراج‌شده از این نمودارها عبارت‌اند از سختی الاستیک، مقاومت نهایی و جذب انرژی که از جمله مشخصه‌های مهم لرزه‌ای میراگرها محسوب می‌شوند. مجموعه مدل‌های عددی به گونه‌ای طراحی شد که گستره‌ای از مقادیر لاغری، بازشو و نیروی محوری را پوشش دهد تا امکان تحلیل حساسیت و استخراج روندهای کلی فراهم گردد. این گستردگی موجب می‌شود نتایج نه‌تنها برای یک حالت خاص، بلکه برای دامنه‌ای از شرایط هندسی و بارگذاری قابل استفاده باشد.

¹⁰ Conservative

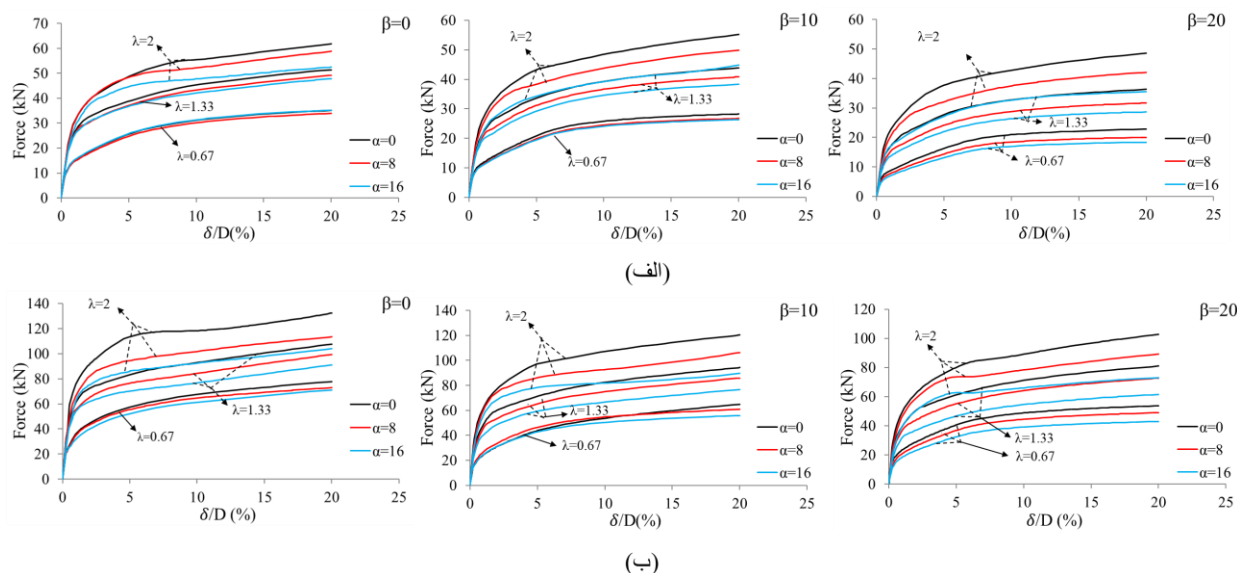
در شکل ۸ نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک بر روی میراگرهای برشی تسلیمی به نمایش گذاشته شده است. نمودارهای این شکل به ارزیابی تأثیر سه پارامتر کلیدی، شامل نسبت لاغری (λ)، درصد مساحت بازشو (β) و درصد نیروی محوری (α) بر رفتار نیرو-جابجایی این میراگرها می‌پردازند. نمودارهای بخش (الف) مربوط به مدل‌هایی با ارتفاع $D=150$ میلی‌متر و نمودارهای بخش (ب) مربوط به مدل‌هایی با ارتفاع $D=250$ میلی‌متر هستند.

جدول ۱ معرفی مدل‌های پارامتریک

M- λ - β - α	D(mm)	β (%)	α (%) = P/Nc	λ (%) = t/D	Nc (kN)
M1-0.67-0-0	۱۵۰	۰	۰	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-0-0				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-0-0				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-0-8			۸	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-0-8				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-0-8				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-0-16			۱۶	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-0-16				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-0-16				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-10-0		۱۰	۰	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-10-0				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-10-0				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-10-8			۸	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-10-8				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-10-8				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-10-16			۱۶	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-10-16				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-10-16				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-20-0	۲۵۰	۰	۰	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-20-0				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-20-0				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-20-8			۸	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-20-8				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-20-8				۲	۳۳۵/۸
M1-0.67-20-16			۱۶	۰/۶۷	۱۲/۴
M1-1.33-20-16				۱/۳۳	۹۹/۵
M1-2-20-16				۲	۳۳۵/۸
M2-0.67-0-0		۰	۰	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-0-0				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-0-0				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-0-8			۸	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-0-8				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-0-8				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-0-16			۱۶	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-0-16				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-0-16				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-10-0		۱۰	۰	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-10-0				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-10-0				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-10-8			۸	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-10-8				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-10-8				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-10-16			۱۶	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-10-16				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-10-16				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-20-0		۲۰	۰	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-20-0				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-20-0				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-20-8			۸	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-20-8				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-20-8				۲	۹۳۲/۹
M2-0.67-20-16			۱۶	۰/۶۷	۳۵/۱
M2-1.33-20-16				۱/۳۳	۲۷۴/۳
M2-2-20-16				۲	۹۳۲/۹

روند کلی نمودارها نشان می‌دهد که افزایش هر یک از پارامترهای λ ، β و α تأثیر مشخصی بر عملکرد لرزه‌ای پانل‌های برشی دارد. افزایش نسبت (λ)، که با افزایش ضخامت ورق نسبت به ابعاد مقطع ارتباط دارد، موجب افزایش قابل توجهی در سختی اولیه و ظرفیت نهایی

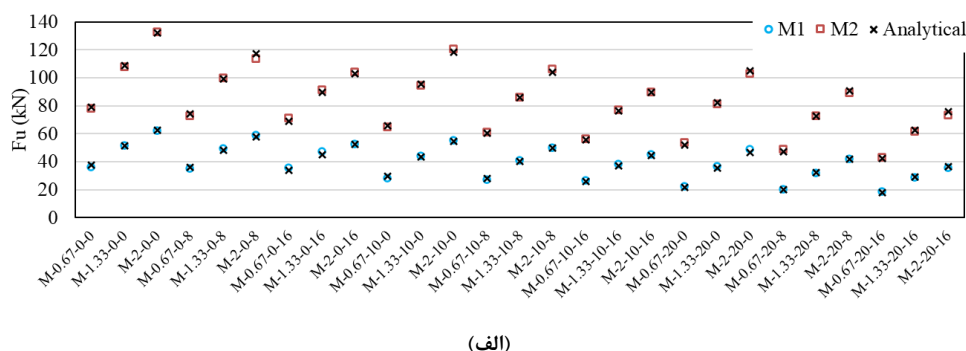
میراگر می‌شود. در مقابل، افزایش درصد مساحت بازشو (β) باعث کاهش ظرفیت باربری و سختی میراگر می‌شود که ناشی از تضعیف سطح مقطع مؤثر برای تحمل بار برشی است. علاوه بر این، تأثیر نیروی محوری (α) نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. نمودارها به وضوح نشان می‌دهند که افزایش نیروی محوری به‌طور مستقیم با ظرفیت برشی میراگر رابطه معکوس دارد و منجر به کاهش مقاومت نهایی آن می‌شود.



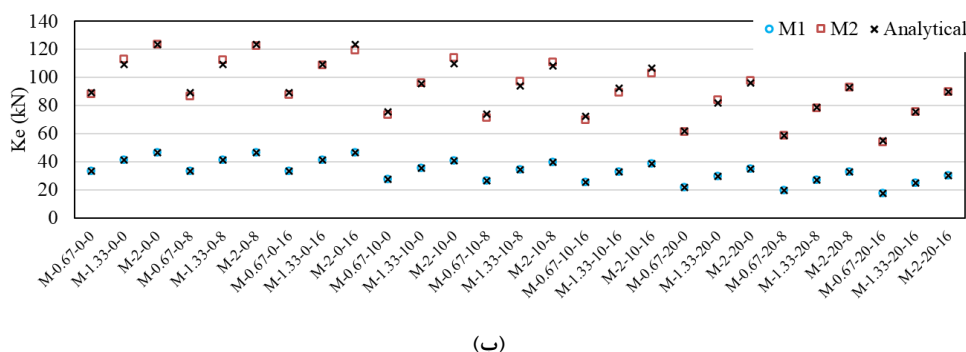
شکل ۸ نمودارهای نیرو-جابجایی، برای مدل‌های با (الف) ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و (ب) ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر.

مقاومت نهایی و سختی الاستیک تمامی نتایج شکل ۸ محاسبه شدند. این نتایج در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش نیروی محوری در تمامی مدل‌ها باعث کاهش این دو پارامتر شده است. به طوری که بیشترین تأثیر برای مدل‌های با ضخامت بیشتر بوده است. در این مدل‌ها به دلیل اینکه نیروی محوری بیشتر بود، تأثیر آن نیز بر روی مدل بیشتر شد. در ادامه، معادلات تقریبی برای محاسبه این دو پارامتر ارائه شدند. این معادلات بر اساس برازش منحنی و نتایج تحلیل‌های عددی استخراج شده‌اند. از آنجا که روش دقیقی برای محاسبه این پارامترها وجود ندارد، این معادلات می‌توانند تا حد قابل قبولی برای طراحی این نوع میراگرها مورد استفاده قرار گیرند. برای محاسبه این معادلات، ابتدا رابطه مستقیم یا معکوس هر پارامتر تعیین گردید. سپس بر اساس آن، یک معادله اولیه پیشنهاد شد و ضرایبی برای متغیرها در نظر گرفته شد. در ادامه این ضرایب به گونه‌ای محاسبه شدند که نتایج این معادلات با نتایج عددی، حداقل اختلاف را داشته باشد. در نتیجه، برای محاسبه مقاومت حداکثر، معادله (۶) پیشنهاد شد. در این معادله، سه پارامتر α ، β و λ بی‌بعد هستند، اما پارامتر D باید بر حسب میلی‌متر وارد شود. همچنین برای محاسبه سختی الاستیک معادله (۷) پیشنهاد شد. نتایج دو معادله تقریبی همراه با نتایج عددی در شکل ۹ نشان داده شده است که مطابقت قابل قبول آن‌ها را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که به دلیل پیچیدگی‌های رفتار پس‌کمانش، تداخل میدان‌های کشش قطری و تمرکز تنش در اطراف بازشوها، استخراج روابط تحلیلی دقیق مبتنی بر اصول مکانیک کلاسیک برای این نوع میراگرها عملاً امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، در این پژوهش از رویکرد تقریبی و روش تحلیل رگرسیون برای توسعه معادلات استفاده شده است. فرم ریاضی توابع انتخاب‌شده با الهام از مطالعات پیشین در حوزه میراگرهای تسلیمی [۱۶، ۲۳، ۳۹] و با هدف بازنمایی روندهای فیزیکی حاکم تعیین گردیده‌اند. فرم کلی این معادلات بر اساس رابطه مستقیم یا معکوس داشتن هر یک از متغیرها بر روی نتایج شکل گرفته‌اند. بدین معنی که هر متغیر که رابطه مستقیم دارد در صورت کسر قرار گرفته و متغیرهای که رابطه معکوس بر روی نتایج دارند در مخرج قرار می‌گیرند این رویکرد اگرچه فاقد اثبات مستقیم مکانیکی است، اما ابزاری کاربردی و با دقت بالا برای برآورد رفتار سیستم در اختیار طراحان قرار می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۹ نتایج عددی و تحلیلی برای (الف) سختی الاستیک (Ke) و (ب) مقاومت نهایی (Fu)

$$F_u = \frac{(\lambda^{0.47} \times D^{1.44} - 0.16D \times \beta - 0.00025\alpha \times D^{2.1} \times \lambda) D^{0.024}}{34} \quad (kN) \quad (6)$$

$$K_e = 0.0025(\lambda^{0.3} \times D^{1.22} - 0.17\alpha \times \beta - 0.046\alpha \times D) \times D^{0.7} \quad (kN) \quad (7)$$

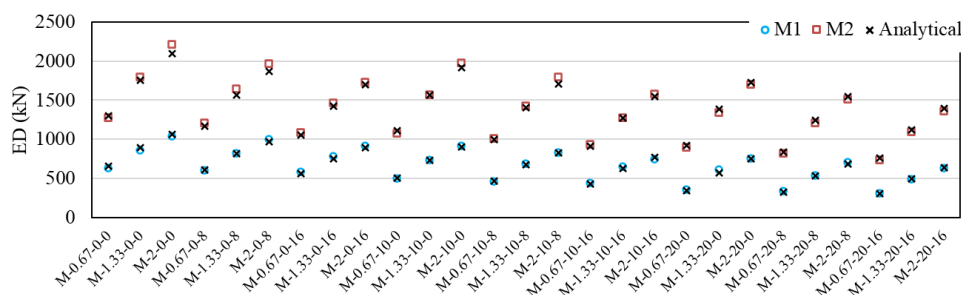
کاهش سختی و مقاومت ناشی از اعمال نیروی محوری را می‌توان با دو مکانیزم فیزیکی تشریح کرد. نخست، حضور نیروی فشاری محوری موجب تشدید اثرات پی-دلتا و تسریع در وقوع کمانش خارج از صفحه ورق می‌شود؛ این امر ظرفیت جانبی ورق را کاهش داده و منجر به افت سختی مماس می‌گردد. دوم، بر اساس معیار تسلیم فون میزس، وجود تنش‌های نرمال فشاری موجب می‌شود که ظرفیت تنش برشی قابل تحمل توسط مصالح کاهش یابد. به عبارت دیگر، بخشی از ظرفیت تسلیم مصالح صرف تحمل بار محوری شده و در نتیجه، پانل در نیروی برشی کمتری دچار تسلیم شده و ظرفیت نهایی آن کاهش می‌یابد.

مکانیزم افت مقاومت در اثر ایجاد بازشو، ناشی از گسیختگی میدان کشش قطری است. در پانل‌های برشی سالم، پس از کمانش اولیه، مقاومت اصلی از طریق شکل‌گیری میدان کشش قطری تأمین می‌شود. وجود بازشو موجب قطع شدن مسیر جریان این نیروهای کششی شده و انتقال نیرو را مختل می‌کند. همچنین، کاهش سطح مقطع مؤثر در ناحیه بازشو باعث می‌شود تنش‌های برشی در نواحی باقی‌مانده افزایش یافته و تسلیم مصالح در تغییر مکان‌های کوچک‌تری رخ دهد. تشدید اثر مخرب بازشوها در حضور نیروی محوری، ریشه در برهم‌نهی تمرکز تنش دارد. بازشوها در مدل موجب ایجاد تمرکز تنش در لبه‌های حفره می‌شوند. زمانی که نیروی محوری فشاری نیز اعمال می‌شود، نواحی اطراف بازشو تحت ترکیبی از تنش‌های متمرکز برشی و فشاری قرار می‌گیرند که طبق معیار تسلیم، باعث ورود سریع‌تر این نواحی به فاز پلاستیک می‌شود. این امر منجر به افت شدیدتر ظرفیت باربری در مدل‌های ترکیبی می‌گردد.

در خصوص علت تشدید اثر نیروی محوری در مدل‌های با ضخامت بیشتر (نسبت لاغری کمتر)، باید توجه داشت که در این پژوهش نیروی محوری به صورت کسری از بار بحرانی کمانش (Nc) تعریف شده است. از آنجا که بار بحرانی کمانش با توان سوم ضخامت رابطه مستقیم دارد، افزایش ضخامت ورق منجر به افزایش چشمگیر مقدار مطلق نیروی محوری اعمالی می‌گردد. این افزایش نیرو به مراتب سریع‌تر از افزایش سطح مقطع ورق است؛ لذا در مدل‌های ضخیم‌تر، سطح تنش فشاری اولیه بسیار بالاتر بوده و طبق معیار تسلیم فون میزس، بخش

عمده‌ای از ظرفیت مصالح اشغال می‌گردد. این امر سبب می‌شود که کاهش ظرفیت برشی و سختی در این مدل‌ها نسبت به نمونه‌های نازک‌تر، نمود بیشتری داشته باشد.

اتلاف انرژی (ED) به توانایی یک عضو سازه‌ای در جذب انرژی ورودی از طریق تغییر شکل‌های غیرالاستیک گفته می‌شود. در تحلیل‌های بارافزون، این انرژی معادل با مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی است که با وقوع تسلیم در ماده، بخش قابل توجهی از آن جذب می‌شود. مقادیر اتلاف انرژی مدل‌های عددی بر اساس نتایج شکل ۸ محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تاثیر پارامترهای مدل بر روی این نتایج نیز مشابه سختی و مقاومت حاصل شده است. برای محاسبه این پارامتر لرزه‌ای پانل برشی نیز معادله (۸) پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این معادله با نتایج عددی در این شکل مقایسه شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.



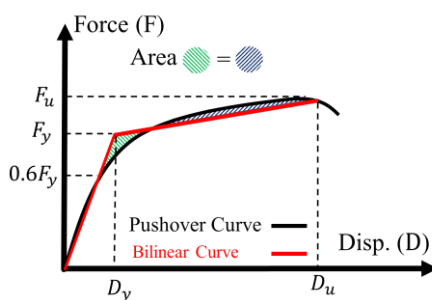
شکل ۱۰ مقایسه نتایج عددی و معادلات تحلیلی برای اتلاف انرژی (ED)

$$ED = \frac{\lambda^{0.44} \times D + 0.32\alpha - 3\beta}{D - 0.33 + 0.0026\alpha} \quad (8)$$

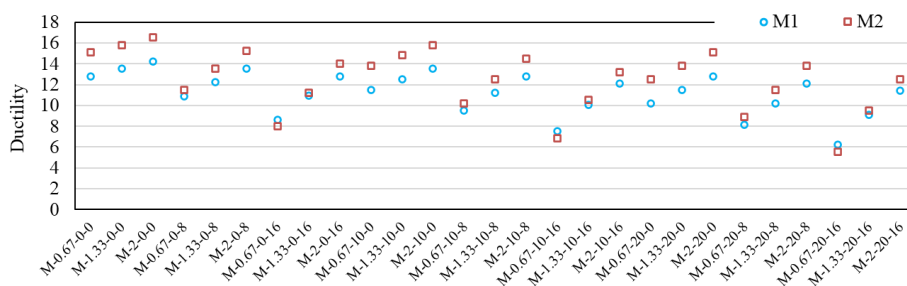
یکی از پارامترهای اساسی در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای میراگرها، ضریب شکل‌پذیری است که بیانگر توانایی عضو در تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک بدون افت قابل توجه مقاومت می‌باشد. به منظور استخراج این پارامتر ابتدا منحنی پوش حاصل از تحلیل‌ها باید به یک نمودار ایده‌آل دوخطی تبدیل گردد. بدین منظور، از روش تعادل انرژی مطابق با ضوابط استاندارد FEMA-440 [۴۷] استفاده شد.

در این روش، نمودار دوخطی به گونه‌ای ترسیم می‌شود که دو شرط اساسی ارضا گردد: نخست، سطح زیر نمودار دوخطی برابر با سطح زیر منحنی پوش واقعی تا نقطه جابجایی نهایی باشد (شرط برابری انرژی). دوم، خط الاستیک اولیه نمودار دوخطی باید منحنی واقعی را در نیرویی معادل ۶۰ درصد نیروی تسلیم موثر را قطع نماید. با تعیین نقطه تسلیم و جابجایی نهایی از روی نمودار دوخطی، ضریب شکل‌پذیری ۱۱ به صورت نسبت جابجایی نهایی به جابجایی تسلیم محاسبه می‌گردد. شکل ۱۱ (الف) نحوه برازش منحنی دوخطی بر روی پاسخ واقعی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. بر اساس این روش، مقادیر شکل‌پذیری برای تمامی مدل‌های مورد مطالعه محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۱۱ (ب) ارائه شده است.

بررسی مقادیر ضریب شکل‌پذیری استخراج شده برای ۵۴ مدل پارامتریک، تأثیر مستقیم پارامترهای هندسی و بارگذاری بر این شاخص را نشان می‌دهد. تحلیل تفکیکی نتایج نشان می‌دهد که در حالت عدم حضور نیروی محوری، افزایش ارتفاع پانل تأثیر مثبتی بر عملکرد داشته است؛ به طوری که میانگین شکل‌پذیری برای مدل‌های با ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر برابر با ۸/۱۵ و برای مدل‌های ۱۵۰ میلی‌متر برابر با ۵/۱۳ به دست آمد. اما در مقابل، حضور نیروی محوری این روند را تغییر داده است؛ به گونه‌ای که در مدل‌های تحت ۱۶ درصد بار محوری، میانگین شکل‌پذیری در هر دو گروه ارتفاعی کاهش یافته و به مقادیر نزدیک به هم (حدود ۱۱) تنزل یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه افزایش ارتفاع در حالت عادی مفید است، اما مدل‌های مرتفع‌تر حساسیت بیشتری نسبت به نیروی فشاری داشته و نرخ افت شکل‌پذیری در آن‌ها شدیدتر بوده است. همچنین در بحرانی‌ترین حالت (ترکیب لاغری زیاد، بازشوی ۲۰ درصد و نیروی محوری حداکثر)، کمترین مقدار شکل‌پذیری برابر با ۵/۵ ثبت گردید. همچنین نتایج حاصل از تحلیل بارافزون نشان می‌دهد که افزایش ابعاد بازشو به دلیل کاهش سطح مقطع مؤثر و تمرکز تنش پیرامون حفره، منجر به کاهش ظرفیت باربری نهایی و افت ضریب شکل‌پذیری می‌گردد.



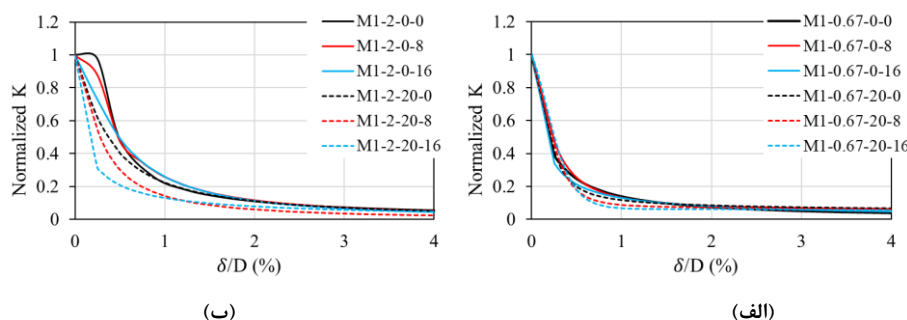
(الف)



(ب)

شکل ۱۱ (الف) روش دوخطی کردن منحنی پوش بر اساس معیار تعادل انرژی (ب) نتایج شکل پذیری

تغییرات سختی مدل یا شیب منحنی نیرو-جابجایی، یکی از شاخص‌های مهم لرزه‌ای به شمار می‌رود. این پارامتر در ابتدای بارگذاری برابر با سختی الاستیک است و با افزایش بار و تسلیم شدن مدل، افت پیدا می‌کند. در این بخش، روند تغییرات سختی برای چند نمونه از مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این پارامتر در هر دوران مشخصی از مدل، برابر با شیب نمودار نیرو-جابجایی در آن دوران محاسبه می‌شود. شکل ۱۲ مقادیر سختی نرمال شده به سختی الاستیک را در بخش اولیه نتایج نشان می‌دهد. از آنجا که نرخ کاهش سختی در دوران‌های کم از لینک برشی بیشتر بوده است، بخش اولیه این مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۲ الف تغییرات سختی برای مدل‌هایی با لاغری ۰/۶۷٪ برای دو حالت بدون سوراخ و با ۲۰٪ مساحت بازشو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرخ کاهش سختی تا ۴۰٪ سختی الاستیک تقریباً برای مدل‌ها یکسان بوده است. در δ/D بیش از ۰/۵٪، مدل‌های دارای حفره، سختی کمتری نسبت به مدل‌های بدون آن داشته‌اند. شکل ۱۲ ب نتایج مدل‌های با لاغری ۰/۲٪ را نشان می‌دهد. در این نمودارها، تأثیر نیروی محوری بر نرخ کاهش سختی قابل توجه‌تر بوده است؛ به طوری که تأثیر آن بر روی مدل‌های دارای بازشو مشهودتر است. به عنوان مثال، برای مدل‌های بدون سوراخ، زمانی که δ/D برابر ۰/۵٪ بوده، نسبت سختی به سختی الاستیک برابر ۶۳٪، ۵۴٪ و ۴۹٪ به ترتیب برای مدل‌های با نیروی محوری ۰، ۸٪ و ۱۶٪ بود. این نشان می‌دهد که افزایش ۸٪ بار بحرانی به طور میانگین موجب کاهش ۱۲٪ سختی شده است. در مدل‌های دارای سوراخ، نسبت سختی به سختی الاستیک در δ/D برابر ۰/۵، برابر ۲۹٪، ۱۹٪ و ۱۶٪ برای مدل‌های با نیروی محوری ۰، ۸٪ و ۱۶٪ بود. این نشان می‌دهد که افزایش ۸٪ بار بحرانی در این مدل‌ها موجب کاهش ۳۱٪ و ۱۹٪ سختی شده است. همچنین در این مدل، افزایش ۲۰٪ مساحت بازشو موجب شده است که مدل‌های با نیروی محوری ۰، ۸٪ و ۱۶٪ به ترتیب ۴۶٪، ۳۶٪ و ۳۲٪ کاهش سختی را تجربه کنند.



شکل ۱۲ تغییرات سختی نرمال شده برای مدل‌های با نسبت لاغری (الف) ۰/۶۷٪ و (ب) ۲٪، در حالت‌های با و بدون بازشو و تحت مقادیر مختلف نیروی محوری

در بخش‌های پیشین، روابط تقریبی به منظور پیش‌بینی نتایج مدل ارائه شد. با توجه به اینکه دقت این معادلات نقش تعیین کننده‌ای در کاربردهای طراحی دارد، در این بخش میزان تطابق نتایج آن‌ها با داده‌های عددی ارزیابی گردید. به منظور ارزیابی دقت و اعتبار معادلات پیشنهادی، شاخص میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) مطابق با معادله (۹) به کار گرفته شد. این شاخص معیاری معتبر برای سنجش دقت مدل‌های پیش‌بینی کننده است. کلیه نتایج عددی و تحلیلی که در بخش‌های پیشین ارائه شده بود، در قالب مقادیر کمی در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که میانگین قدرمطلق خطا برای تمامی نتایج کمتر از ۳٪ محاسبه شده، که نشان‌دهنده مطابقت قابل قبول نتایج عددی و تحلیلی است. همچنین به منظور اعتبارسنجی دقیق‌تر و بررسی میزان پراکندگی خطاها، علاوه بر شاخص MAPE، از دو معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۲} و ضریب تعیین^{۱۳} استفاده گردید. این شاخص‌ها به ترتیب بر اساس روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شدند:

$$MAPE = \frac{1}{54} \sum_{i=1}^{54} \left(\frac{|Num-res_i - Analytical-res_i|}{Num-res_i} \right) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{54} \sum (Y_{num} - Y_{ana})^2} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{54} (Y_{num,i} - Y_{ana,i})^2}{\sum_{i=1}^{54} (Y_{num,i} - \bar{Y}_{mean})^2} \quad (11)$$

در روابط فوق، Y_{num} نشان‌دهنده مقادیر حاصل از تحلیل عددی، Y_{ana} مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط تحلیلی، $\bar{Y}_{mean}$ میانگین داده‌های عددی و n بیانگر تعداد کل نمونه‌های آماری است. نتایج حاصل از این ارزیابی آماری، همبستگی بسیار بالای روابط پیشنهادی با داده‌های عددی را تأیید می‌کند. طبق محاسبات انجام شده، مقدار ضریب تعیین برای پارامترهای سختی الاستیک، مقاومت نهایی و اتلاف انرژی بیش از ۰/۹۹۲ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل رگرسیون است. همچنین مقادیر RMSE برای این سه پارامتر به ترتیب معادل ۱/۶۲، ۱/۲۵ و ۲۱ محاسبه گردید. شایان ذکر است که اگرچه بیشترین میزان خطا در بخش تخمین اتلاف انرژی مشاهده شد (با حداکثر خطای موردی حدود ۵ درصد)، اما با توجه به مقدار بالای R^2 و پایین بودن شاخص‌های خطا، عملکرد کلی معادلات برای مقاصد طراحی کاملاً قابل قبول ارزیابی می‌شود.

با این وجود، باید توجه داشت که معادلات پیشنهادی دارای محدودیت‌های نیز هستند. از آنجا که این روابط بر اساس برازش منحنی بر روی مجموعه‌ای متناهی از داده‌های عددی استخراج شده‌اند، همواره سطحی از عدم قطعیت معرفتی در آن‌ها وجود دارد. این عدم قطعیت ناشی از ساده‌سازی رفتار پیچیده و شدیداً غیرخطی پس‌کمانش و تقریب‌زدن آن با توابع ریاضی ساده است. به بیان دیگر، خطاهای گزارش شده بیانگر انحراف معیار مدل ریاضی از رفتار فیزیکی واقعی است که ناشی از ناتوانی توابع چندجمله‌ای در بازتولید دقیق تمام جزئیات میدان کشش قطری و تغییر شکل‌های موضعی می‌باشد؛ لذا طراحان باید در استفاده از این روابط، به‌ویژه در مرزهای دامنه اعتبار پارامترها مدنظر قرار دهند.

¹² RMSE

¹³ R^2

جدول ۲ نتایج کمی حاصل از مدل عددی و تحلیلی (واحد kN)

جذب انرژی	مقاومت حداکثر		سختی الاستیک		مدل‌ها
تحلیلی	عددی	تحلیلی	عددی	تحلیلی	عددی
M1-0.67-0-0	۶۲۷	۳۷/۴	۳۵/۹	۳۳/۴	۳۳/۴
M1-1.33-0-0	۸۵۳	۵۱/۶	۵۱/۴	۴۱	۴۲
M1-2-0-0	۱۰۳۹	۶۲/۵	۶۱/۹	۴۶/۴	۴۵/۷
M1-0.67-0-8	۵۹۷	۳۵/۷	۳۵	۳۳/۴	۳۴/۱
M1-1.33-0-8	۸۱۳	۴۸/۳	۴۹/۲	۴۱	۴۲
M1-2-0-8	۹۹۷	۵۷/۶	۵۸/۸	۴۶/۴	۴۴/۹
M1-0.67-0-16	۵۷۶	۳۴/۱	۳۵/۲	۳۳/۴	۳۳
M1-1.33-0-16	۷۸۱	۴۵	۴۷	۴۱	۴۱/۲
M1-2-0-16	۹۰۹	۵۲/۶	۵۲/۶	۴۶/۴	۴۶/۲
M1-0.67-10-0	۴۹۱	۲۹/۴	۲۸/۳	۲۷/۷	۲۷
M1-1.33-10-0	۷۳۳	۴۳/۶	۴۳/۹	۳۵/۳	۳۶/۷
M1-2-10-0	۹۱۵	۵۴/۵	۵۵/۱	۴۰/۶	۴۰/۵
M1-0.67-10-8	۴۵۶	۲۷/۸	۲۶/۷	۲۶/۵	۲۶/۵
M1-1.33-10-8	۶۸۲	۴۰/۴	۴۰/۸	۳۴/۱	۳۵/۲
M1-2-10-8	۸۳۰	۴۹/۶	۴۹/۸	۳۹/۵	۳۹
M1-0.67-10-16	۴۳۷	۲۶/۱	۲۶/۳	۲۵/۴	۲۵/۴
M1-1.33-10-16	۶۴۲	۳۷/۱	۳۸/۳	۳۳	۳۲/۷
M1-2-10-16	۷۳۸	۴۴/۷	۴۴/۸	۳۸/۴	۳۷/۲
M1-0.67-20-0	۳۵۶	۲۱/۵	۲۲/۴	۲۱/۹	۲۱/۲
M1-1.33-20-0	۶۰۵	۳۵/۷	۳۶/۳	۲۹/۵	۲۹/۸
M1-2-20-0	۷۵۵	۴۶/۶	۴۸/۵	۳۴/۹	۳۴/۶
M1-0.67-20-8	۳۳۰	۱۹/۸	۲۰/۱	۱۹/۶	۱۹/۷
M1-1.33-20-8	۵۳۰	۳۲/۴	۳۱/۷	۲۷/۳	۲۷/۵
M1-2-20-8	۷۰۲	۴۱/۶	۴۲/۱	۳۲/۶	۳۱/۴
M1-0.67-20-16	۳۰۲	۱۸/۲	۱۸/۴	۱۷/۴	۱۷/۶
M1-1.33-20-16	۴۸۳	۲۹/۱	۲۸/۶	۲۵	۲۵/۶
M1-2-20-16	۶۲۹	۳۶/۷	۳۵/۵	۳۰/۳	۳۰
M2-0.67-0-0	۱۲۶۷	۷۹	۷۷/۸	۸۹/۱	۸۸/۴
M2-1.33-0-0	۱۷۹۲	۱۰۹	۱۰۷/۸	۱۰۹/۴	۱۱۳/۱
M2-2-0-0	۲۲۰۵	۱۳۲	۱۳۲/۴	۱۲۳/۷	۱۲۳/۵
M2-0.67-0-8	۱۲۰۸	۷۴/۱	۷۲/۸	۸۹/۱	۸۶/۵
M2-1.33-0-8	۱۶۳۸	۹۹/۳	۹۹/۵	۱۰۹/۴	۱۱۲/۷
M2-2-0-8	۱۹۶۰	۱۱۷/۴	۱۱۳/۶	۱۲۳/۷	۱۲۲/۷
M2-0.67-0-16	۱۰۸۲	۶۹/۲	۷۱/۲	۸۹/۱	۸۷/۸
M2-1.33-0-16	۱۴۵۷	۸۹/۶	۹۱/۱	۱۰۹/۴	۱۰۸/۹
M2-2-0-16	۱۷۲۹	۱۰۲/۸	۱۰۳/۹	۱۲۳/۷	۱۱۹/۲
M2-0.67-10-0	۱۰۶۸	۶۵/۵	۶۴/۹	۷۵/۴	۷۳/۲
M2-1.33-10-0	۱۵۶۲	۹۵/۵	۹۴/۴	۹۵/۷	۹۶/۲
M2-2-10-0	۱۹۷۱	۱۱۸/۶	۱۲۰/۴	۱۱۰	۱۱۳/۹
M2-0.67-10-8	۱۰۱۰	۶۰/۶	۶۰/۹	۷۳/۷	۷۱/۴
M2-1.33-10-8	۱۴۲۴	۸۵/۸	۸۵/۹	۹۴/۱	۹۶/۹
M2-2-10-8	۱۷۹۰	۱۰۴	۱۰۶/۳	۱۰۸/۳	۱۱۰/۷
M2-0.67-10-16	۹۲۹	۵۵/۸	۵۵/۹	۷۲/۱	۶۹/۸
M2-1.33-10-16	۱۲۷۲	۷۶/۲	۷۶/۷	۹۲/۵	۸۹/۳
M2-2-10-16	۱۵۷۸	۸۹/۴	۸۹/۵	۱۰۶/۷	۱۰۳/۲
M2-0.67-20-0	۸۹۴	۵۲/۱	۵۳/۷	۶۱/۷	۶۱/۴
M2-1.33-20-0	۱۳۴۱	۸۲/۱	۸۱	۸۲	۸۳/۸
M2-2-20-0	۱۶۹۹	۱۰۵/۱	۱۰۲/۷	۹۶/۲	۹۷/۸
M2-0.67-20-8	۸۱۴	۴۷/۲	۴۹	۵۸/۴	۵۸/۵
M2-1.33-20-8	۱۲۰۷	۷۲/۴	۷۲/۸	۷۸/۸	۷۸
M2-2-20-8	۱۵۰۶	۹۰/۶	۸۹/۲	۹۳	۹۲/۸
M2-0.67-20-16	۷۳۶	۴۲/۳	۴۲/۹	۵۵/۲	۵۳/۷
M2-1.33-20-16	۱۰۹۵	۶۲/۷	۶۱/۶	۷۵/۵	۷۵/۴
M2-2-20-16	۱۳۵۴	۷۶	۷۳/۱	۸۹/۸	۹۰
MAPE(%)	۲/۳۵	۱/۷۶	۱/۷۵		
R ²	۰/۹۹۲	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷		
RMSE	۳۴	۱/۲۵	۱/۶۲		

همان گونه که در جدول ۲ ارائه شد، معادلات تحلیلی پیشنهادی توانسته‌اند مقادیر سختی الاستیک، مقاومت نهایی و اتلاف انرژی را با دقت قابل قبولی نسبت به نتایج عددی بازتولید نمایند. مقدار شاخص خطای میانگین کمتر از ۳٪ بیانگر آن است که این روابط می‌توانند به عنوان ابزار مناسبی برای تخمین پارامترهای لرزه‌ای در فرآیند طراحی به کار گرفته شوند. نتایج نشان می‌دهند که سه پارامتر اصلی، یعنی نسبت لاغری (λ)، درصد بازشو (β) و نیروی محوری (α)، بر نتایج لرزه‌ای پانل برشی تأثیر بسزایی دارند. به طور کلی، افزایش لاغری موجب افزایش سختی و مقاومت شده، در حالی که افزایش سطح بازشو باعث کاهش محسوس هر دو شاخص می‌گردد. همچنین، حضور نیروی محوری روند کاهش مقاومت و سختی را تشدید کرده و بر افت تدریجی سختی تأثیرگذار است. در خصوص اتلاف انرژی، نتایج نشان دادند که مدل‌های با لاغری بالاتر و بدون نیروی محوری بیشترین ظرفیت جذب انرژی را دارا هستند، در حالی که افزایش بازشو و اعمال نیروی محوری این ظرفیت را کاهش می‌دهد.

از مهم‌ترین مزایای بهره‌گیری از معادلات تحلیلی، قابلیت آن‌ها در برون‌یابی و برآورد مقادیر در بازه‌های میانی متغیرهاست؛ در حالی که نتایج عددی صرفاً به صورت نقاط گسسته و محدود در دسترس قرار می‌گیرند. پیوستگی روابط تحلیلی این امکان را فراهم می‌سازد که طیف وسیع‌تری از ترکیب پارامترها پوشش داده شود و بدین ترتیب، وابستگی به شبیه‌سازی‌های پرهزینه و زمان‌بر عددی کاهش یابد. افزون بر این، تداوم نتایج تحلیلی شرایطی فراهم می‌آورد که تحلیل حساسیت، شناسایی روندهای کلی رفتار لرزه‌ای، و استخراج روابط کاربردی برای طراحی مهندسی با دقت و کارایی بیشتری انجام پذیرد.

این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت ترکیب اثرات هندسی و بارگذاری محوری در طراحی میراگرهای تسلیمی هستند. در ادامه، برای درک بهتر مکانیزم‌های رفتاری، به بررسی توزیع تنش و کمانش‌های خارج از صفحه در چند نمونه از مدل‌ها پرداخته شده است.

لازم به توضیح است که معادلات پیشنهادی ۴، ۵ و ۶ بر اساس داده‌های حاصل از تحلیل‌های عددی در محدوده مشخصی از پارامترهای هندسی و بارگذاری توسعه یافته‌اند. اعتبار این روابط تنها در بازه پارامترهای بررسی شده تضمین می‌شود. این بازه شامل ارتفاع پانل برشی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر، نسبت لاغری بین حدود ۰/۶۷ درصد تا ۲ درصد، درصد سطح بازشو بین ۰ تا ۲۰ درصد و نسبت نیروی محوری به بار بحرانی بین ۰ تا ۱۶ درصد است. هرچند معادلات قابلیت برون‌یابی محدود در نزدیکی این محدوده‌ها را دارند، استفاده از آن‌ها خارج از این بازه‌ها، به‌ویژه برای نسبت‌های لاغری بسیار بزرگ یا درصدهای بازشوی بالا، می‌تواند موجب افزایش خطا شود و در این شرایط نیاز به بررسی عددی یا آزمایشگاهی تکمیلی وجود دارد.

تفسیر نتایج و کاربرد معادلات پیشنهادی در طراحی، مستلزم توجه به محدودیت‌های ذاتی این پژوهش است. نخست، روابط تحلیلی توسعه‌یافته در این مطالعه بر مبنای تحلیل‌های بارافزون یکنواخت استخراج شده‌اند تا ظرفیت پوش سیستم تعیین گردد؛ از این رو، اثرات زوال سختی و مقاومت ناشی از بارگذاری رفت‌وبرگشتی و خستگی کم‌چرخه در فرمول‌بندی مستقیم این معادلات لحاظ نشده است. دوم، با توجه به تمرکز بر ارائه یک طرح محافظه‌کارانه و ایمن، از اثرات نرخ کرنش بر افزایش مقاومت مصالح صرف‌نظر شده است. سوم، اعتبار نتایج حاصله تابع محدوده پارامترهای هندسی و بارگذاری تعریف‌شده در این مطالعه است و تعمیم آن به خارج از این بازه یا هندسه‌های متفاوت، نیازمند ارزیابی‌های تکمیلی خواهد بود. در نهایت، این پژوهش بر رفتار سطح عضو متمرکز بوده و بررسی اندرکنش دینامیکی آن با سایر اجزای قاب ساختمانی در مقیاس کلی سازه، در دامنه این تحقیق قرار نداشته است.

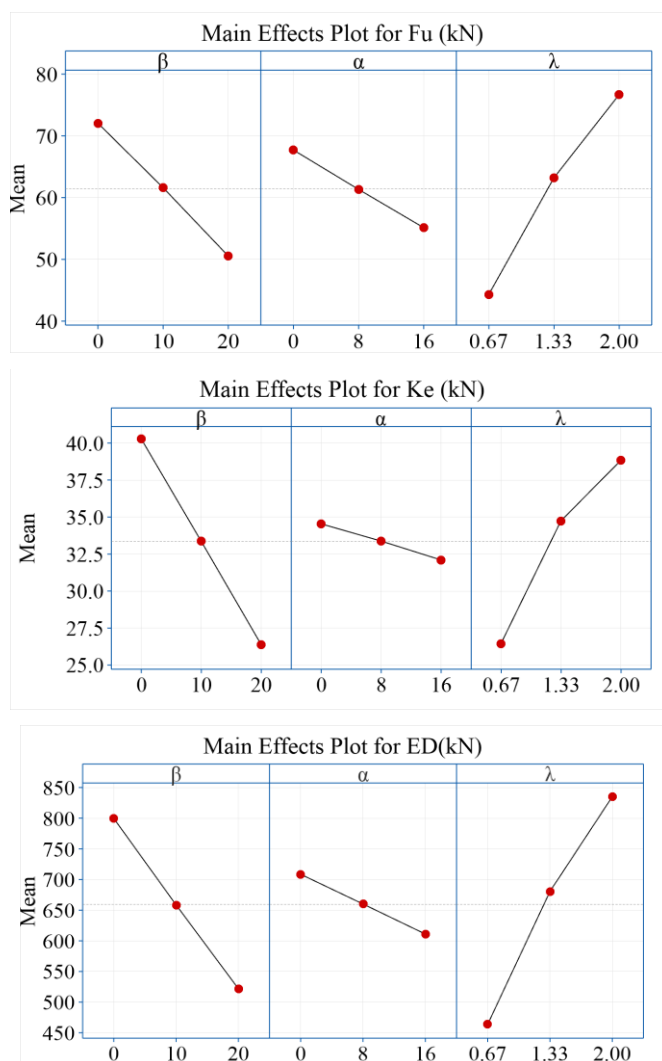
۵-۱- تحلیل آماری اثرات اصلی پارامترها

به منظور انجام یک تحلیل حساسیت سیستماتیک و درک دقیق‌تر از وزن نسبی و تأثیر مستقل هر یک از پارامترهای ورودی بر پاسخ لرزه‌ای سیستم، از رویکرد طراحی آزمایش‌ها و ترسیم نمودارهای اثرات اصلی^{۱۴} استفاده شده است (شکل ۱۳). در این نمودارها، شیب هر خط بیانگر میزان حساسیت پاسخ سیستم به آن پارامتر خاص است؛ به طوری که خطوط با شیب تندتر نشان‌دهنده حساسیت بالاتر و خطوط افقی بیانگر عدم وابستگی پاسخ به تغییرات آن پارامتر هستند.

¹⁴ Main Effects Plot

با بررسی شکل ۱۳، نتایج زیر استنباط می‌شود:

۱. پارامتر لاغری: نمودار مربوط به این پارامتر دارای بیشترین شیب مثبت است. این امر نشان می‌دهد که نسبت لاغری (که تابعی از ضخامت ورق است) عامل اصلی در افزایش مقاومت، سختی و اتلاف انرژی سیستم می‌باشد و رفتار سیستم همبستگی بالایی با آن دارد.
۲. درصد بازشو: این پارامتر با شیب منفی، دومین عامل تأثیرگذار محسوب می‌شود. افزایش ابعاد بازشو موجب افت ظرفیت باربری و انرژی می‌گردد. روند تقریباً خطی این نمودار نشان می‌دهد که نرخ کاهش عملکرد با افزایش اندازه بازشو یکنواخت است.
۳. نیروی محوری: اگرچه شیب این نمودار نیز منفی است (نشان‌دهنده اثر کاهنده نیروی محوری)، اما شیب آن در مقایسه با دو پارامتر دیگر ملایم‌تر است. این موضوع بیانگر آن است که حساسیت سیستم به تغییرات هندسی (ضخامت و بازشو) بیش از تغییرات بار محوری در محدوده بررسی شده می‌باشد.



شکل ۱۳ نمودار اثرات اصلی برای پارامترهای مقاومت نهایی، سختی الاستیک و جذب انرژی

۵-۲- دستورالعمل پیشنهادی برای طراحی

به منظور کاربردی سازی نتایج حاصل از این پژوهش و تسهیل استفاده از روابط پیشنهادی در فرآیند طراحی و مقاوم سازی لرزه ای، یک روند گام به گام و تکرار پذیر به شرح زیر پیشنهاد می گردد:

گام اول: تعیین تقاضای لرزه ای ابتدا بر اساس تحلیل دینامیکی یا استاتیکی سازه اصلی، میزان نیروی برش نهایی و سختی جانبی مورد نیاز برای هر دهانه مجهز به میراگر تعیین می گردد.

گام دوم: انتخاب پارامترهای گسسته با توجه به اینکه ضخامت ورق های فولادی در بازار دارای مقادیر گسسته و مشخصی است (مانند ۶، ۸، ۱۰ میلی متر و ...)، رویکرد عملی این است که ابتدا یک ضخامت در دسترس (t) و یک درصد بازشو اولیه (β) بر اساس ملاحظات معماری یا تاسیساتی فرض شود. همچنین نسبت نیروی محوری بر اساس بارهای جانبی وارده بر قاب برآورد گردد.

گام سوم: محاسبه ابعاد هندسی (D) با در دست داشتن مقاومت نهایی مورد نیاز (از گام اول) و جایگذاری پارامترهای فرض شده (t, β, α) در معادله (۶)، مقدار بعد مورد نیاز برای پانل محاسبه می شود. از آنجا که معادله (۶) بر حسب پارامترهای هندسی فرمول بندی شده است، ممکن است نیاز به یک فرآیند سعی و خطای ساده یا حل معکوس معادله برای یافتن دقیق مقدار D باشد. پس از تعیین D ، نسبت لاغری کنترل شود تا در محدوده اعتبار معادلات قرار داشته باشد.

گام چهارم: کنترل سختی پس از نهایی شدن ابعاد D و t ، سختی الاستیک میراگر با استفاده از معادله (۷) محاسبه و با نیاز اولیه سازه مقایسه می گردد. چنانچه سختی یا مقاومت محاسبه شده با تقاضای طرح اختلاف قابل توجهی داشته باشد، با تغییر ضخامت ورق (t) یا درصد بازشو، گام های دوم و سوم تکرار می شوند تا طرح مناسب حاصل گردد.

گام پنجم: کنترل سلسله مراتب تسلیم (طراحی ظرفیتی) پس از نهایی شدن طرح هندسی، باید بر اساس اصل طراحی ظرفیتی اطمینان حاصل شود که نیروی تسلیم و نهایی میراگر طراحی شده، کمتر از ظرفیت کماتشی یا تسلیم اعضای اصلی قاب (تیرها، ستون ها و مهاربندها) باشد. این امر تضمین می کند که پانل برشی به عنوان فیوز سازه ای عمل کرده و پیش از آسیب دیدن اعضای باربر ثقلی، انرژی زلزله را مستهلک نماید.

گام ششم: طراحی اتصالات در نهایت، به منظور جلوگیری از شکست ترد در ناحیه اتصال و رعایت ضوابط طراحی ظرفیتی مطابق با استاندارد AISC 341-22 [48]، اتصالات باید برای حداکثر ظرفیت نهایی مورد انتظار میراگر طراحی شوند. بر این اساس، با فرض استفاده از ۴ عدد پیچ برای اتصال هر پانل، حداقل سطح مقطع یا قطر مورد نیاز پیچ ها باید به گونه ای انتخاب شود که رابطه (۱۲) ارضا گردد:

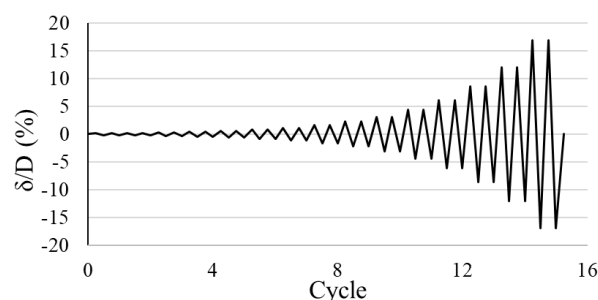
$$4 \times (\phi F_{nv} \times A_b) \geq F_{u_{max}} \quad (12)$$

در رابطه فوق، $F_{u_{max}}$ نیروی نهایی برآورد شده از معادله (۶)، $\phi=0.75$ ضریب کاهش مقاومت برای گسیختگی برشی، F_{nv} تنش برشی اسمی پیچ (وابسته به رده مقاومتی پیچ) و A_b سطح مقطع اسمی پیچ است. این کنترل تضمین می کند که اتصالات قادر به تحمل نیروهای ناشی از سخت شوندگی کرنشی و تغییر شکل های بزرگ بوده و تا انتهای ظرفیت رفتاری میراگر دچار گسیختگی نخواهند شد.

۶- بررسی رفتار چرخه ای مدل

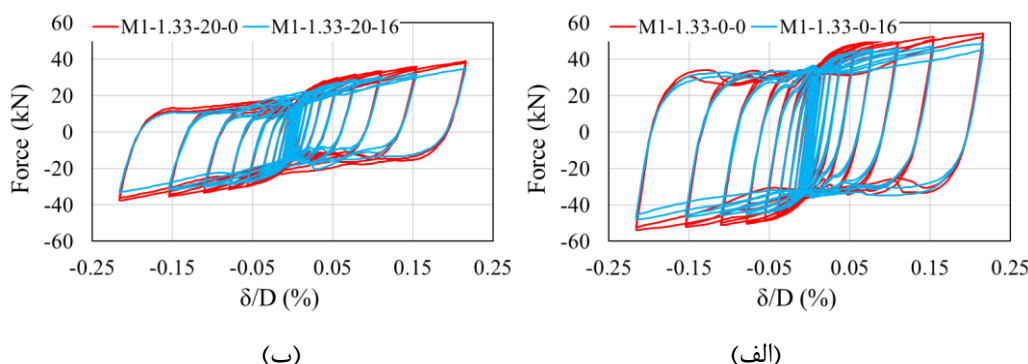
اگرچه تحلیل های بارافزون دیدگاه مناسبی از منحنی ظرفیت پوش و سختی اولیه سیستم ارائه می دهند، اما برای ارزیابی جامع عملکرد لرزه ای، بررسی رفتار تحت بارگذاری رفت و برگشتی ضروری است. پدیده هایی نظیر زوال سختی و مقاومت شکل حلقه های هیستریزس که بیانگر میزان جذب انرژی هستند، تنها از طریق تحلیل های چرخه ای قابل مشاهده می باشند. بدین منظور، از میان مدل های پارامتریک بررسی شده، ۴ نمونه انتخاب شدند تا عملکرد آن ها تحت بارگذاری تناوبی مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. برای انجام این تحلیل ها، الگوی بارگذاری چرخه ای شبه استاتیکی مطابق شکل ۱۴ و به صورت کنترل-جابه جایی بر مدل اعمال شد. در این الگو، دامنه جابه جایی سیکل اولیه بر اساس دستورالعمل های FEMA-461 [۴۹] برابر با $0.015h$ (معادل 0.15% درصد ارتفاع مؤثر مدل) در نظر گرفته شد و سپس در هر گام

بعدی، دامنه جابه‌جایی با ضریب ثابت تقریباً $1/4$ نسبت به گام قبلی افزایش یافت. در هر سطح جابه‌جایی، دو سیکل رفت و برگشت متقارن حول مبدأ اعمال شد تا پاسخ سازه در همان دامنه جابه‌جایی پایدار شده و سپس به سطح بارگذاری بعدی وارد شود



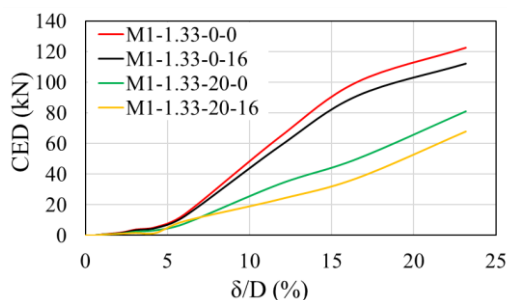
شکل ۱۴ الگوی بارگذاری

مدل مورد مطالعه در این بخش مشابه بخش قبل بوده و تنها تفاوت آن در الگوی بارگذاری است. به این ترتیب مدل‌های با و بدون بازشو و همچنین با و بدون نیروی محوری در این بخش مورد بررسی قرار گرفت. این مدل‌ها به ترتیب M1-1.33-0-0، M1-1.33-0-16، M1-1.33-20-0 و M1-1.33-20-16 بود. پس از انجام تحلیل نمودارهای هیستریزیس آن‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با مقایسه دقیق حلقه‌های هیستریزیس، دو پدیده مهم قابل شناسایی است. نخست، اثر نیروی محوری (منحنی‌های آبی‌رنگ) است که در هر دو گروه با و بدون بازشو، منجر به کاهش مقاومت در سیکل‌های متوالی شده است. این امر ناشی از تشدید لنگرهای ثانویه و تسریع در کماتش ورق تحت فشار محوری است. دوم، اثر هندسه بازشو است؛ در مدل‌های دارای حفره، تمرکز تنش در لبه‌های بازشو سبب شده است که پدیده باریک‌شدگی در حلقه‌های هیستریزیس، به‌ویژه در حضور نیروی محوری، نمایان‌تر باشد. این باریک‌شدگی نشان‌دهنده کاهش قابلیت جذب انرژی در دررفت‌های بالا نسبت به مدل‌های توپر است که در آن‌ها حلقه‌ها فرم چاق‌تر و پایداری را تا انتهای بارگذاری حفظ کرده‌اند.



شکل ۱۵ مقایسه منحنی‌های هیستریزیس تحت بارگذاری چرخه‌ای در حضور و عدم حضور نیروی محوری برای: (الف) مدل‌های بدون بازشو و (ب) مدل‌های دارای ۲۰ درصد بازشو.

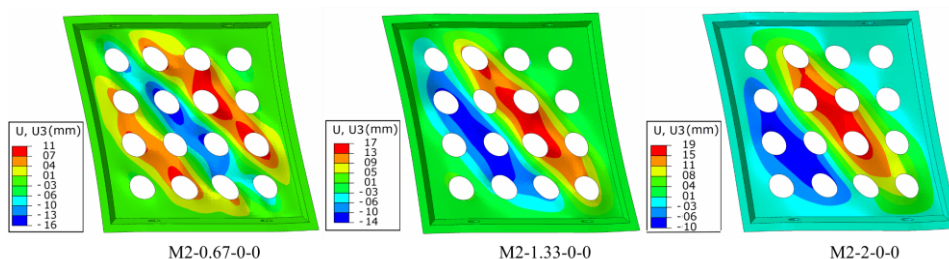
یکی از پارامترهای اساسی حاصل از نمودارهای هیستریزیس، نتایج انرژی تجمعی آن است که از مجموع مساحت داخلی حلقه‌های هیستریزیس تا انتهای بارگذاری حاصل می‌شود. این نتایج در شکل ۱۶ ارائه شده است. بررسی روند منحنی‌ها نشان می‌دهد که هندسه بازشو و نیروی محوری هر دو نقش کاهنده در ظرفیت اتلاف انرژی ایفا می‌کنند، اما وزن تأثیر آن‌ها متفاوت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل مرجع توپر و بدون نیروی محوری، بیشترین جذب انرژی را داشته است. اعمال نیروی محوری به تنهایی منجر به کاهش جزئی این ظرفیت شده است. اما نکته حائز اهمیت تأثیر شدید هندسه بازشو است؛ به طوری که در مدل دارای بازشو حتی بدون نیروی محوری ظرفیت اتلاف انرژی افت قابل توجهی نسبت به حالت توپر داشته است. در نهایت نامطلوب‌ترین عملکرد مربوط به مدل تحت اثر ترکیبی بازشو و نیروی محوری که کمترین میزان انرژی را مستهلک نموده است.



شکل ۱۶ مقایسه منحنی‌های اتلاف انرژی تجمعی برای مدل‌های با و بدون بازشو تحت تأثیر نیروی محوری

۱- بررسی توزیع تنش و کمانش خارج از صفحه

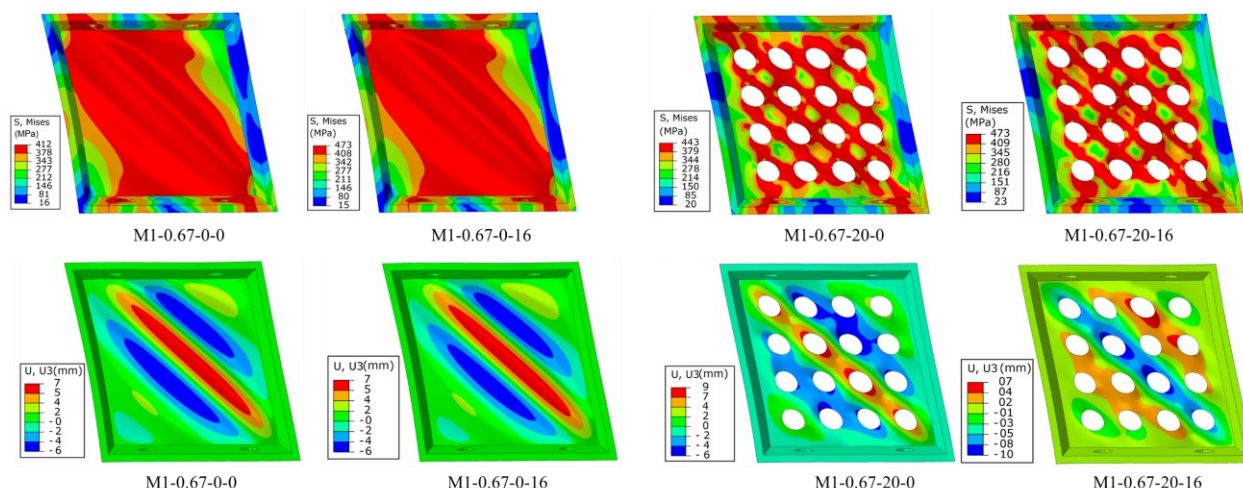
در این بخش توزیع تنش فون میزس^{۱۵} و تغییر شکل خارج از صفحه (U3) مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هدف بررسی تأثیر نیروی محوری و وجود بازشو بر روی نحوه توزیع تنش در مدل‌ها است. به این ترتیب نتایج چند نمونه آزمایشی در این بخش ارائه شد. شکل ۱۷ تغییر شکل خارج از صفحه سه مدل عددی را پس از بارگذاری نهایی نشان می‌دهد. این تغییر شکل، که ناشی از پدیده کمانش برشی در پانل‌های تسلیمی است، به صورت موج‌های کمانشی قطری در سطح پانل ظاهر شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت ضخامت به بعد (پارامتر λ)، میزان تغییر شکل خارج از صفحه نیز افزایش می‌یابد. این مشاهده به این دلیل است که تغییر شکل خارج از صفحه مستقیماً با پدیده کمانش مرتبط است. با افزایش لاغری سختی و مقاومت کمانشی صفحه نیز افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، صفحه قادر به تحمل نیروی بیشتری قبل از کمانش است که این امر در مرحله پساکمانش، با تغییر شکل‌های بزرگ‌تر خارج از صفحه همراه می‌شود.



شکل ۱۷ تغییر شکل خارج از صفحه در مدل‌های عددی M-0.67-0-0، M-1.33-0-0، و M-2-0-0 در جابجایی حداکثر

برای تحلیل بهتر رفتار پس از کمانش، در شکل ۱۸ تنش فون میزس و جابجایی خارج از صفحه (U3) چهار حالت از پنل مدل M1 نشان داده شده است. در حالت بدون بازشو، تنش‌ها عمدتاً در امتداد نوارهای قطری متمرکز می‌شوند و نیروی محوری موجب افزایش بیشینه تنش می‌گردد. در پنل‌های دارای بازشو، تمرکز تنش پیرامون سوراخ‌ها شکل گرفته و با حضور نیروی محوری تشدید می‌شود. نتایج جابجایی خارج از صفحه نیز نشان می‌دهد که بازشوها باعث افزایش دامنه تغییر شکل و الگوهای موجی پیچیده‌تر می‌شوند، در حالی که در حالت بدون بازشو تغییر شکل‌ها منظم‌تر باقی می‌مانند.

¹⁵ Von Mises

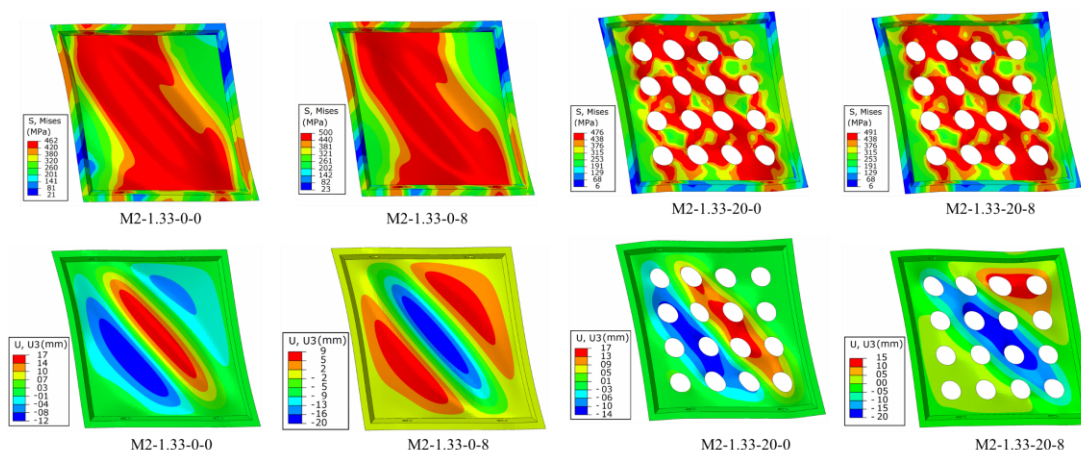


شکل ۱۸ توزیع تنش و جابجایی خارج از صفحه در ۴ نمونه از مدل‌های M1

در شکل ۱۹ نتایج تنش فون میزس و جابجایی خارج از صفحه برای مدل‌های پانل برشی با و بدون بازشو و همچنین در شرایط حضور و عدم حضور نیروی محوری در M2 ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مدل‌های بدون بازشو، توزیع تنش نسبتاً یکنواخت‌تری در سطح پانل ایجاد شده و بیشینه تنش‌ها در نوارهای قطری متمرکز شده‌اند. افزودن نیروی محوری موجب افزایش مقدار بیشینه تنش شده است، با این حال الگوی کلی توزیع تنش تغییر چندانی نکرده است. جابجایی خارج از صفحه نیز در این حالت بیشتر به صورت موج قطری منظم نمایان شده و حضور نیروی محوری موجب کاهش دامنه تغییرشکل‌ها شده است. در مقابل، در مدل‌های دارای بازشو، تمرکز تنش در پیرامون حفره‌ها به وضوح مشاهده می‌شود. این تمرکز تنش، علاوه بر افزایش مقادیر موضعی تنش فون میزس، منجر به تغییر در مسیرهای انتقال تنش در سطح پانل شده است. حضور نیروی محوری در این مدل‌ها، علاوه بر افزایش مقادیر بیشینه تنش، موجب تشدید تغییرشکل‌های خارج از صفحه گردیده و الگوی کمانش پیچیده‌تری را نسبت به مدل‌های بدون بازشو به همراه داشته است.

به‌طور کلی، نتایج این شکل بیانگر آن است که وجود بازشوها موجب ایجاد تمرکز تنش، حساسیت رفتار پانل به اثرات نیروی محوری را افزایش داده و موجب بروز تغییرشکل‌های پیچیده‌تر و بزرگ‌تر در ناحیه پساکمانش می‌گردد. در یک مقایسه کمی بین نتایج، مشخص است که در مدل بدون بازشو، افزودن نیروی محوری موجب افزایش تنش حداکثر از ۴۶۲ مگاپاسکال به ۵۰۰ مگاپاسکال و افزایش جابجایی خارج از صفحه از ۱۷ میلی‌متر به ۲۰ میلی‌متر شده است. در مدل دارای بازشو نیز روند مشابهی مشاهده گردید؛ به‌طوری‌که تنش حداکثر از ۴۷۶ مگاپاسکال به ۴۹۱ مگاپاسکال افزایش یافته و جابجایی حداکثر از ۱۷ میلی‌متر به ۲۰ میلی‌متر رسیده است.

تحلیل دقیق الگوهای تنش نشان می‌دهد که تشدید افت ظرفیت در مدل‌های تحت اثر ترکیبی نیروی محوری و بازشو، ناشی از اندرکنش تمرکز تنش و معیار تسلیم است. وجود بازشو موجب ایجاد تمرکز تنش در لبه‌های حفره می‌گردد. با اعمال نیروی محوری، تنش‌های فشاری در این نواحی متمرکز افزایش می‌یابد. بر اساس معیار تسلیم فون میزس، حضور این تنش‌های قائم بزرگ سبب می‌شود که مصالح در لبه‌های بازشو حتی با مقادیر اندک تنش برشی وارد ناحیه پلاستیک شوند (تسلیم زودرس). علاوه بر این، باریک‌های ورق در مجاورت بازشو که تحت فشار محوری زیاد و لاغری موضعی هستند، استعداد بیشتری برای کمانش موضعی پیدا کرده و موجب ناپایداری سریع‌تر سیستم می‌شوند.



شکل ۱۹ توزیع تنش فون میزس و جابجایی خارج از صفحه در مدل های پانل برشی M2، در حالت های با و بدون بازشو و تحت حضور و عدم حضور نیروی محوری.

۸- مقایسه پانل برشی با میراگرها

به منظور ارزیابی جایگاه عملکردی میراگر پیشنهادی در مقایسه با سایر سیستم های تسلیمی متداول، خلاصه ای از بازه تغییرات سختی الاستیک و مقاومت نهایی گزارش شده در ادبیات فنی در جدول ۳ گردآوری شده است. اگرچه مقایسه مستقیم به دلیل تفاوت در ابعاد هندسی، مشخصات مصالح و نوع بارگذاری در مطالعات مختلف دشوار است، اما بررسی حدود بالا و پایین داده ها دیدگاه مناسبی از ظرفیت عملکردی سیستم فراهم می کند. بررسی داده های جدول ۳ نشان می دهد که میراگر پیشنهادی از نظر مقاومت نهایی، عملکردی فراتر از میراگرهای شیاری^{۱۶} دارد و ظرفیتی تقریباً معادل با میراگرهای ترکیبی برشی و خمشی^{۱۷} ارائه می دهد. از سوی دیگر، در مقایسه با میراگرهای با ظرفیت بالا نظیر ADAS، TADAS و میراگر فولادی هیستریزیس^{۱۸}، حداکثر مقاومت این سیستم در محدوده پایین تری قرار می گیرد. همچنین سختی حداکثر این پانل از میراگرهای شیاری، میراگرهای ترکیبی برشی و خمشی، میراگر فولادی هیستریزیس و TADAS بیشتر بوده، اما نسبت به میراگر ADAS مقدار کمتری دارد.

جدول ۳ مقایسه بازه سختی الاستیک و مقاومت نهایی میراگر پیشنهادی با سایر میراگرهای تسلیمی متداول

میراگرهای تسلیمی	سختی الاستیک (kN/mm)	مقاومت حداکثر (kN)
Panel damper	۱۷-۱۲۳	۱۸-۱۳۲
Slit yielding Damper [50]	۵-۱۵	۲۳-۳۶
SAFYD [51]	۲۲-۲۶	۶۵-۱۳۰
HSD [52]	۵-۶	۱۸۰-۲۷۰
ADAS[53]	۱۶-۱۵۷	۵۰-۲۵۰
TADAS [54]	۲۳-۱۱۹	۶۰-۳۰۰

۹- محدودیت های تحقیق

تفسیر نتایج و به کارگیری معادلات پیشنهادی در طراحی، مستلزم توجه به محدودیت های ذاتی این پژوهش است. نخست، روابط تحلیلی توسعه یافته در این مطالعه بر مبنای تحلیل های بارافزون یکنواخت استخراج شده اند؛ در نتیجه، اثرات زوال سختی و مقاومت ناشی از بارگذاری رفت و برگشتی، پدیده های هیستریزیس پیچیده و خستگی کم چرخه در فرمول بندی مستقیم این معادلات لحاظ نشده است. دوم، با

¹⁶ Slit Yielding Damper

¹⁷ shear-and-flexural yielding metallic dampers (SAFYD)

¹⁸ Hysteretic Steel Damper (HSD)

توجه به رویکرد محافظه کارانه در طراحی، از اثرات نرخ کرنش بر افزایش مقاومت مصالح صرف نظر شده و رفتار فولاد به صورت وابسته به زمان مدل نشده است. سوم، مدل سازی اجزای محدود بر پایه فرض رفتار یکنواخت مصالح، اتصالات ایده آل (از جمله مدل سازی صلب اتصال دیافراگم به جعبه فولادی و عدم لحاظ لغزش پیچ ها) و همچنین عدم شبیه سازی های تنش پسماند انجام شده است؛ بنابراین، نامنظمی های اجرایی، تنوع مقاومت مصالح و جزئیات واقعی اجرای اتصالات می تواند بر پاسخ واقعی مؤثر باشد. چهارم، اعتبار نتایج تابع محدوده پارامترهای هندسی و بارگذاری تعریف شده در این مطالعه است و تعمیم آن به خارج از این بازه ها یا به هندسه های متفاوت پانل، مستلزم تحلیل های عددی یا آزمایشگاهی تکمیلی است.

علاوه بر موارد فوق، ساختار معادلات پیشنهادی دارای محدودیت های ذاتی ناشی از ماهیت غیرفیزیکی آن ها است. از آنجا که این روابط بر پایه برازش منحنی بر روی نتایج یک نوع فولاد مشخص توسعه یافته اند، پارامترهای مکانیکی مصالح نظیر مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به عنوان متغیرهای مستقل در فرمولاسیون ظاهر نشده اند. بنابراین، اگرچه این معادلات برای فولادهای ساختمانی رایج با مشخصات مشابه دقت بالایی دارند، اما تعمیم آن ها به مصالحی با سختی یا مقاومت بسیار متفاوت (مانند آلومینیوم یا فولادهای پر مقاومت خاص) بدون اعمال ضرایب اصلاحی، ممکن است با خطا همراه باشد.

۱۰- نتیجه گیری

این مطالعه به صورت عددی و تحلیلی رفتار لرزه ای پانل های برشی تسلیمی را مورد بررسی قرار داد. در ابتدا برای صحت سنجی مدل اجزای محدود، نتایج تحلیل های غیرخطی با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. در ادامه، مجموعه ای شامل ۵۴ مدل پارامتریک با دو ارتفاع مختلف تعریف گردید که در آن سه متغیر اصلی نسبت لاغری (λ)، درصد سطح بازشو (β) و نسبت نیروی محوری به بار بحرانی (α) به عنوان پارامترهای اصلی مورد مطالعه قرار گرفتند. تحلیل ها به صورت استاتیکی غیرخطی و با رویکرد کنترل جابجایی در نرم افزار اجزای محدود انجام شد. سپس بر اساس منحنی های نیرو-جابجایی، نتایج لرزه ای شامل سختی الاستیک، مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی استخراج گردید. در ادامه معادلات تقریبی با استفاده از روش برازش منحنی و بر مبنای نتایج عددی برای برآورد این پارامترها توسعه داده شد و میزان دقت آن ها با شاخص خطای میانگین قدرمطلق مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، روند کاهش سختی در طول بارگذاری و تأثیر پارامترهای هندسی و نیروی محوری بر آن بررسی گردید. در گام نهایی، برای ارزیابی مکانیزم های رفتاری، توزیع تنش فون میزس و تغییر شکل خارج از صفحه در مدل ها مورد مقایسه قرار گرفت. خلاصه نتایج این تحقیق در بندهای زیر ارائه گردید:

۱. افزایش نیروی محوری در تمامی مدل ها باعث کاهش سختی الاستیک و مقاومت نهایی می شود. این تأثیر به ویژه در مدل هایی با ضخامت بیشتر (نسبت لاغری بالاتر) که نیروی محوری بیشتری را تجربه کردند، چشمگیرتر بود. نتایج نشان داد که افزودن بازشو به میزان ۲۰٪ سطح پانل، بدون حضور نیروی محوری، مقاومت نهایی را به طور میانگین ۲۸٪ کاهش داد. به طوری که این مقدار برای مدل های با ۱۶٪ بار محوری، برابر ۳۷٪ بود. این دو حالت برای سختی الاستیک به ترتیب برابر ۲۷٪ و ۳۶٪ بود.
۲. افزایش نیروی محوری در تمامی مدل ها باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی شد. این کاهش در مدل های دارای بازشو بیشتر از مدل های بدون بازشو مشاهده گردید. نتایج نشان داد که افزودن حفره به میزان ۲۰٪ سطح پانل، بدون حضور نیروی محوری، ظرفیت جذب انرژی را به طور میانگین ۲۸٪ کاهش داد، در حالی که با حضور نیروی محوری معادل ۱۶٪ بار بحرانی، این کاهش به حدود ۳۳٪ رسید.
۳. بررسی ضریب شکل پذیری نشان داد که اگرچه افزایش ارتفاع پانل در شرایط بدون بار محوری موجب بهبود این شاخص می گردد، اما اعمال نیروی محوری و تعبیه بازشو هر دو نقش کاهنده دارند. شدیدترین افت شکل پذیری در مدل های مرتفع و لاغر تحت نیروی محوری بالا مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت پایداری این نمونه ها به بارهای فشاری است.

۴. معادلات تقریبی استخراج شده برای سختی الاستیک، مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی با شاخص MAPE برای سختی ۱/۷۵٪، مقاومت ۱/۷۶٪ و انرژی ۲/۳۵٪ دقت قابل قبولی نشان دادند. مزیت اصلی آن‌ها، قابلیت برون‌یابی و تخمین مقادیر در حالت‌های میانی متغیرها و کاهش نیاز به تحلیل‌های عددی پرهزینه است.
۵. بر اساس تحلیل آماری اثرات اصلی، مشخص گردید که عملکرد لرزه‌ای میراگر بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به پارامترهای نسبت لاغری، درصد بازشو و نیروی محوری از خود نشان می‌دهد. شیب تندتر نمودارهای مربوط به پارامترهای هندسی بیانگر آن است که تغییرات ضخامت و ابعاد بازشو، نقش غالب‌تری نسبت به تغییرات بار محوری در تعیین ظرفیت نهایی و اتلاف انرژی سیستم ایفا می‌کنند.
۶. توزیع تنش در مدل‌های بدون بازشو نسبتاً یکنواخت‌تر بوده و در نوارهای قطری متمرکز می‌شود، در حالی که در مدل‌های دارای بازشو، تنش در اطراف سوراخ‌ها متمرکز می‌یابد. افزایش نسبت لاغری منجر به افزایش تغییرشکل خارج از صفحه می‌شود. افزودن نیروی محوری در هر دو نوع مدل (با یا بدون بازشو) باعث افزایش حداکثر تنش و جابجایی خارج از صفحه می‌گردد. برای مثال، در مدل‌های بدون بازشو، تنش حداکثر از ۴۶۲ به ۵۰۰ مگاپاسکال و جابجایی از ۱۷ به ۲۰ میلی‌متر افزایش یافته است. این روند مشابه در مدل‌های دارای بازشو نیز مشاهده شده است.
۷. با توجه به دامنه این پژوهش، عناوین زیر به عنوان پیشنهادات کاربردی برای تحقیقات آتی مطرح می‌گردد: الف) ارزیابی رفتار هیستریزیس و پدیده خستگی تحت پروتکل‌های بارگذاری رفت‌وبرگشتی متنوع. ب) انجام مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی دقیق اثر اندرکنش نیروی محوری و بازشو. ج) بهینه‌سازی توپولوژی و هندسه بازشوها (مانند دایره‌ای یا لوزی) با هدف توزیع یکنواخت‌تر تنش و به تعویق انداختن کمانش در حالت‌های تحت اعمال نیروی محوری. د) تاثیر نرخ بارگذاری بر عملکرد لرزه‌ای پانل‌های برشی تسلیمی

مراجع

- [1] Zhang, M., Ma, Y., Zhao, G., Zhai, Z., Yang, Z., Zhao, Z., Yang, H. (2024). Experimental and numerical studies on the cyclic behavior of a new metallic-friction hybrid damper. *Journal of Building Engineering*. 88, pp. 109130. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109130>.
- [2] Youssef, A., Esfahani, m.R., zareian, m. (2024). Analytical verification of the behavior of TADAS metal dampers in a self-centered coupled shear wall system. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 11(3), pp. 71-92. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.407319.3171>.
- [3] 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>.
- [4] Moradi, Y., Cheraghi, K., Tavana, M.H. (2025). Numerical and Analytical Study of the Seismic Behavior of NSD Dampers with Flexural Performance. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01840-3>.
- [5] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Cheraghi, K. (2024). Numerical study of metallic dampers' effect on seismic performance of concrete frames. *Asian Journal of Civil Engineering*. 25(3), pp. 2431-2441. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00917-6>.
- [6] Cheraghi, K., Tahamouli Roudsari, M. (2025). 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), pp. 3164-3183. 10.1080/13632469.2025.2555008.
- [7] Mahmoodi, B., Rasoulitabar, M., Cheraghi, K. (2025). Analytical and Numerical Investigation of the Cyclic Behavior of O-Shaped Dampers. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01972-6>.
- [8] Baderan, M., Hemmati, A., Hashemi, S.M.A. (2022). Experimental Behavior of Reinforced Concrete Frame Equipped with ADAS Yielding Damper Under Cyclic loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(9), pp. 67-86. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.325830.2703>.

- [9] Zhuang, L., Wang, J., Nie, X., Wu, Z. (2022). Experimental study on the cyclic behaviour of shear links made of BL Y160 steel. *Thin-Walled Structures*. 174, pp. 109072. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109072>.
- [10] Hejazi, M., Amere, F. (2021). Parametric Study of Behaviour of Perforated Yielding Shear Panel Device as a Vertical Link Beam in Inverted V-Braced Steel Frames under Cyclic Load. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(8), pp. 266-288. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.220995.2088>.
- [11] Ke, K., Zhou, X., Hu, S., Chen, Y., Alam, M.S., Wang, Y., Zhou, Z. (2024). Development and tests of novel repairable multi-stage yielding steel slit dampers for seismic mitigation. *Journal of Building Engineering*. 86, pp. 108809. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108809>.
- [12] Han, Q., Jia, J., Xu, Z., Bai, Y., Song, N. (2014). Experimental Evaluation of Hysteretic Behavior of Rhombic Steel Plate Dampers. *Advances in Mechanical Engineering*. 6, pp. 185629. <https://doi.org/10.1155/2014/185629>.
- [13] Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., Farzinfar, A. (2015). U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. *Structures*. 3, pp. 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.04.003>.
- [14] Aghlari, R., Tahir, M.M. (2018). A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering Structures*. 159, pp. 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.049>.
- [15] Aghlari, R., Tahir, M.M., Adnan, A.B. (2018). Experimental study of Pipe-Fuse Damper for passive energy dissipation in structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 148, pp. 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.004>.
- [16] Gorji Azandariani, M., Abdolmaleki, H., Gorji Azandariani, A. (2020). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs). *Thin-Walled Structures*. 151, pp. 106751. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106751>.
- [17] Gorji Azandariani, M., Gorji Azandariani, A., Abdolmaleki, H. (2020). Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs). *Journal of Constructional Steel Research*. 172, pp. 106145. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106145>.
- [18] Yang, J., Liang, S., Zhu, X., Dang, L., Shen, T., Zhou, S. (2023). Experimental and theoretical research on a shear-bending-metallic-damper with a double-phased yield mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*. 203, pp. 107839. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107839>.
- [19] 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>.
- [20] Cheraghi, K., Tahamouli Roudsari, M. (2025). Analytical and Numerical Study of the Cyclic Behavior of U-Shaped Yielding Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*. 29(3), pp. 691-708. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2436620>.
- [21] 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>.
- [22] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Analytical and numerical investigation of the cyclic behavior of angled U-shape damper. *Steel and Composite Structures*. 51(3), pp. 325-335. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.51.3.325>.
- [23] (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>.
- [24] Farsi, A., Amiri, H.R., Dehghan Manshadi, S.H. (2021). An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures. *Structures*. 34, pp. 4254-4268. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.069>.
- [25] 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>.
- [26] 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>.

- [27] Ghamari, A., Kim, Y.-J., Bae, J. (2021). Utilizing an I-shaped shear link as a damper to improve the behaviour of a concentrically braced frame. *Journal of Constructional Steel Research*. 186, pp. 106915. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106915>.
- [28] Choi, J., Abebe, D.Y. (2014). Hysteresis Characteristics of Shear Panel Damper Using SLY120. *APCBEE Procedia*. 9, pp. 370-375. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.065>.
- [29] Xu, L.-Y., Nie, X., Fan, J.-S. (2016). Cyclic behaviour of low-yield-point steel shear panel dampers. *Engineering Structures*. 126, pp. 391-404. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.002>.
- [30] Nuzzo, I., Losanno, D., Cilento, F., Caterino, N. (2020). Analytical and numerical modelling of shear-link device for seismic energy dissipation in frame structures. *Engineering Structures*. 214, pp. 110630. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110630>.
- [31] Keykhosro Kiani, B., Hosseini Hashemi, B. (2021). Development of a double-stage yielding damper with vertical shear links. *Engineering Structures*. 246, pp. 112959. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112959>.
- [32] Cheraghi, K., Kahrari, Z., Tavana, M.H. (2025). Parametric Study on the Effect of Axial Force on the Seismic Performance of the Bar Damper. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.40312>.
- [33] 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>.
- [34] Mortezaagholi, M.H., Zahrai, S.M., Abbasi Shanbehazari, R. (2024). Cyclic Behavior of a Novel MADAS Damper with No Axial Force and Improved Seismic Performance (Experimental, Numerical, and Analytical Assessment). *Journal of Earthquake Engineering*. 28(8), pp. 2249-2272. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2286378>.
- [35] Pan, Y., Gao, H., Zeng, H., Li, Y. (2024). Study on energy dissipation performance of low-yield-point steel shear panel dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. 213, pp. 108351. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108351>.
- [36] Xu, Z., Wu, M., Cui, J., Wu, Y. (2025). Experimental studies on seismic and replaceable behaviors of hybrid coupled walls with a low-yield-point steel shear panel damper. *Structures*. 71, pp. 108140. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108140>.
- [37] Wu, Z., Fan, L., Zhuang, L., Zhang, K., Zhao, Y. (2025). Research on the seismic behaviour of the Y-eccentrically braced composite frame with bent shear panel damper. *Structures*. 72, pp. 108153. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108153>.
- [38] Bustos, F., Hinojosa, J., Olivos, A. (2025). Numerical characterization and experimental validation of steel plate shear yielding damper. *Structures*. 72, pp. 108215. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108215>.
- [39] Zhu, Y., Wang, W., Lu, Y., Yao, Z. (2023). Finite element modeling and design recommendations for low-yield-point steel shear panel dampers. *Journal of Building Engineering*. 72, pp. 106634. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106634>.
- [40] Shahi, M., Sohrabi, M.R., Etedali, S., Zamani, A.-A. (2023). Simultaneous Optimal Design of PID and MATMD Considering their Proposed Elevation Placement for Seismic Control of Tall Buildings on Soft Soil. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*. 6(4), pp. 241-259. <https://doi.org/10.22111/ieco.2023.46162.1494>.
- [41] Mirzaei, D., Asgari, M., Zamani, A.-A., Masoumi, A. (2025). Enhancing Emulsion Stability: A Novel Shape Design Approach for Barbell Horns Using the Equilibrium Optimization Algorithm. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 106(5), pp. 1323-1334. <https://doi.org/10.1007/s40032-025-01207-7>.
- [42] Chan, R.W.K., Albermani, F., Williams, M.S. (2009). Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*. 65(2), pp. 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.017>.
- [43] Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Theory of elastic stability. 2012: Courier Corporation.
- [44] Levy, S. (1942). Buckling of rectangular plates with built-in edges.
- [45] Chajes, A. (1974). Principles of structural stability theory.

- [46] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M.A. (2020). Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. *Engineering Structures*. 203, pp. 109866. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109866>.
- [47] Fema, A. (2005). 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *FEMA-440, Redwood City*. 7(9), pp. 11
- [48] American Institute of Steel, C., Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22). 2022, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [49] Applied Technology, C., *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*, in *FEMA 461*. 2007, Federal Emergency Management Agency (FEMA): Washington, DC.
- [50] Chan, R.W.K., Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*. 30(4), pp. 1058-1066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>.
- [51] Sahoo, D.R., Singhal, T., Taraihia, S.S., Saini, A. (2015). Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. 114, pp. 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.006>.
- [52] Teruna, D.R., Majid, T.A., Budiono, B. (2015). Experimental Study of Hysteretic Steel Damper for Energy Dissipation Capacity. *Advances in Civil Engineering*. 2015, pp. 631726. <https://doi.org/10.1155/2015/631726>.
- [53] Cheraghi, K., Tahamouli Roudsari, M., Kiasat, S., Esfandiari, J. (2024). Numerical and Analytical Study of the Cyclic Behavior of ADAS Damper and the Effect of Axial Force on its Behavior. *Journal of Earthquake Engineering*. pp. 1-18. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2345821>.
- [54] Cheraghi, K., Tahamouli Roudsari, M. (2024). Numerical and analytical study of cyclic behavior of TADAS and the impact of axial force on its performance. *Steel and Composite Structures*. 53(2), pp. 195-208. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.53.2.195>.