

طراحی و ارزیابی مهاربند قطری تعمیرپذیر با میراگر برشی چندسطحی از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین

جمال محمودی^{۱*}، عبدالرضا سروقدمقدم^۲، بهرخ حسینی هاشمی^۲

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۲- دانشیار، مهندسی عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۵۳۷۱۴۵۱۵، jamal.mahmoudi@iiees.ac.ir

چکیده

بررسی زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که هرچند بسیاری از سازه‌ها که طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند، توانسته‌اند ایمنی جانی ساکنان را تأمین نمایند؛ اما در زلزله‌های شدید دچار آسیب‌های گسترده‌ای شده‌اند و تخریب کلی سازه ناگزیر بوده است. تحمیل خسارات اقتصادی و اجتماعی قابل توجه وارده به مناطق آسیب‌دیده، ضرورت توسعه رویکردهایی نوین در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها را یادآور می‌شود که مطابق آن در کنار حفظ جان انسان‌ها، امکان تعمیرپذیری پس از زلزله نیز فراهم باشد. در پاسخ به این نیاز، پژوهش حاضر با به‌کارگیری یک میراگر تسلیمی برشی خاص، ساخته‌شده از فولاد با تنش تسلیم پایین، به معرفی نوعی سیستم مهاربندی قطری نوین با قابلیت تعمیرپذیری می‌پردازد. با هدف تأمین هم‌زمان سختی و شکل‌پذیری موردنیاز متناسب با شدت تقاضای لرزه‌ای و جذب انرژی زلزله در تمامی سطوح لرزه‌ای، از خفیف تا شدید، برای سیستم پیشنهادی چندین سطح عملکردی تأمین شده است. این سطوح به‌نحوی طراحی شده‌اند که با افزایش شدت بارهای زلزله، سختی و جذب انرژی کل سیستم به‌صورت مرحله‌ای افزایش یابد. برای ارزیابی دقیق عملکرد سیستم پیشنهادی، مدلی بر پایه روش اجزای محدود توسعه یافت. پیش از تحلیل نهایی، به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نمونه‌ای آزمایشگاهی با مشخصاتی مشابه از ادبیات فنی انتخاب شد و مدل‌سازی آن انجام گرفت. تطابق بالای نتایج تحلیل عددی با داده‌های تجربی، دقت بالای فرآیند مدل‌سازی را نشان داد. در نهایت، با انجام تحلیل‌های لرزه‌ای بر روی مدل پیشنهادی، مشخص شد که این سیستم علاوه بر تعمیرپذیری، دارای عملکرد چندسطحی و قابلیت افزایش مرحله‌ای سختی و استهلاک بالای انرژی است.

واژگان کلیدی

مهاربند قطری، تعمیرپذیری، میراگر تسلیمی برشی، عملکرد چند سطحی، فولاد با تنش تسلیم پایین

Design and Evaluation of a Repairable Diagonal Brace with Multi-Performance-Level Shear Damper Using Low-Yield-Point (LYP) Steel

J. Mahmoudi, A. SarvghadMoghadam, B. Hosseini Hashemi

Abstract

Recent investigations into major earthquakes have revealed that although many structures are designed in compliance with code provisions and ensure life safety, they still suffer significant damage under severe seismic events. Such damage often leads to complete loss of functionality, necessitating demolition and imposing substantial socio-economic impacts on affected communities. Consequently, developing innovative seismic design strategies that ensure both life safety and post-earthquake reparability has become essential. To address this need, this study proposes a novel repairable diagonal bracing system by integrating a shear-yielding metallic damper, fabricated from low-yield-point (LYP) steel, into conventional braces. The system is engineered to deliver stiffness and ductility aligned with seismic demand, dissipate energy across a full range of intensity levels (from minor to major), and enhance structural reliability. It incorporates a multi-performance-level mechanism in which components are progressively activated as seismic intensity increases, enabling staged enhancement in both energy dissipation capacity and system stiffness. A finite element model (FEM) was developed to evaluate the system's performance. For validation, a laboratory specimen with analogous specifications from previous studies was simulated, and the high correlation between numerical and experimental results confirmed the model accuracy. Seismic analyses demonstrated the system's reparability, multi-performance-level behavior, and gradual increases in both stiffness and energy dissipation.

Keywords

Diagonal Bracing, Reparability, Shear-Yielding Damper, Multi-Performance-Level, LYP Steel

۱- مقدمه

با بررسی آسیب‌های ثبت شده در زلزله‌های بزرگی نظیر کوبه و نورتریج، مشخص می‌شود که در سیستم‌های سازه‌ای متداول، حتی با رعایت دقیق اصول آیین‌نامه‌ای، اگرچه از تخریب کلی و تلفات انسانی جلوگیری می‌شود، اما سازه متحمل خسارات سنگین شده و عملاً غیرقابل استفاده می‌گردد [۱]. در پی این آسیب‌ها، ساختمان‌ها نیاز به تخریب کامل پیدا کرده و علاوه بر هزینه‌های مالی فراوان، مشکلاتی نظیر آوارگان شهری و تولید حجم زیادی نخاله به وجود می‌آید. بر همین اساس، نیاز به رویکردی نوین در طراحی سازه‌ها احساس می‌شود؛ رویکردی که بتواند ضمن حفظ سطح مناسبی از عملکرد لرزه‌ای، هزینه‌های اجرایی را نیز در حد معقول نگه دارد. در این راستا، هدف اصلی پژوهش حاضر، معرفی و بررسی سیستمی جدید با قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله است.

برای تأمین الزامات عملکردی، انرژی ناشی از زلزله باید به نحوی در سازه مستهلک گردد. در روش‌های مرسوم طراحی، این وظیفه عمدتاً بر عهده شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای نهاده شده است. درحالی‌که رفتار کاملاً الاستیک، ظرفیت جذب انرژی بسیار کمی دارد. از این رو طراحی سازه‌ای با این رفتار، از منظر اقتصادی و عملکردی مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل استفاده از اعضای که با ورود به ناحیه غیرارتجاعی انرژی را مستهلک کنند ضروری است. سیستم‌های مختلفی با ایده «هدایت آسیب» توسعه یافته‌اند. در این سیستم‌ها عملکرد سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود تا تمرکز آسیب و تغییرشکل‌های دائمی در نواحی خاصی از سازه رخ دهد. با تعبیه میراگرهای قابل تعویض در این نواحی می‌توان به هدف تعمیرپذیری نزدیک شد. تاکنون انواع مختلفی از این میراگرها معرفی و بررسی شده‌اند؛ از جمله مهاربندهای واگرا، میراگرهای (TADAS)، پنل‌های برشی تسلیم‌شونده (YSPD) و میراگرهای لوله‌ای دوپل (DPD) [۲-۵].

با این حال، تجربیات زلزله‌های گذشته نشان داده‌اند که فیوزهای لرزه‌ای در برخی موارد، حتی در زمین‌لرزه‌هایی با شدت کم‌تر از شدیدترین زلزله‌های محتمل نیز وارد رفتار غیرخطی شده و بخشی از ظرفیت شکل‌پذیری خود را از دست می‌دهند [۶]. تکیه بر تنها یک فیوز نیز باعث کاهش قابلیت اعتماد سیستم شده و این فیوزها ممکن است تحت بارهای زلزله دچار تغییرشکل‌های بزرگ و غیرقابل کنترل شوند. همچنین، اگر ظرفیت فیوزها به درستی با سطوح نیروی زلزله تنظیم نشده باشد، ممکن است

موجب افزایش سختی بیش از حد و در نتیجه افزایش نیروهای وارده به سایر اعضای سازه گردد. این عدم تناسب در زلزله‌های کوچک، به دلیل رفتار الاستیک فیوز، برجسته‌تر می‌شود [۷].

در نهایت، استفاده از ترکیب چند میراگر و طراحی سیستم‌هایی با چندین سطح عملکردی به عنوان رویکردی نوین در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله مورد توجه قرار گرفته است. به کارگیری دو فیوز مجزا یا فیوزی با عملکرد دوگانه در سازه می‌تواند برخی از محدودیت‌های پیشین را برطرف نماید. در چنین سیستم‌هایی، در زلزله‌های با شدت متوسط، تنها یکی از فیوزها فعال شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود؛ درحالی‌که فیوز دوم برای مقابله با زلزله‌های شدید، ظرفیت خود را حفظ می‌کند [۶]. به این ترتیب، از آسیب دیدن زود هنگام فیوز اصلی در زلزله‌های خفیف جلوگیری شده و با بهره‌گیری از یک فیوز کمکی، عملکرد سازه در برابر زلزله‌های متوسط نیز تضمین می‌شود. در سال‌های اخیر، ترکیب‌های مختلفی از میراگرهای وابسته به تغییر مکان و سرعت، جهت کنترل بارهای جانبی ناشی از زلزله و باد پیشنهاد شده‌اند [۸].

زهرای و وثوق، قاب مهاربندی با تیر پیوند قائم به همراه مهاربند زانویی را ارائه کردند که در آن تیر پیوند به عنوان فیوز اول و اعضای زانویی به عنوان فیوز دوم عمل می‌کردند [۹]. نتایج تحلیل عددی نشان داد، این سیستم می‌تواند عملکرد مناسبی در دو سطح لرزه‌ای داشته باشد.

حسینی‌هاشمی و علیرضایی سیستمی ترکیبی از مهاربند واگرا و زانویی را آزمایش نمودند که در آن، تیر پیوند و عضو زانویی نقش فیوزهای اولیه و ثانویه را ایفا می‌کردند [۱۰]. قاب در برابر بارگذاری‌های مختلف توانست بخش قابل توجهی از انرژی ورودی را مستهلک کند و سختی خود را تا پایان بارگذاری حفظ نماید.

چراغی و زهرایی نیز با استفاده از لوله‌های هم‌مرکز، نوعی سیستم میراگر دوسطحی پیشنهاد کردند [۱۱].

در پژوهش **پاچیده و همکاران**، با هدف افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی، ترکیبی از مهاربندها و میراگرهای دایره‌ای تسلیم‌شونده با عملکرد موازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. در این سیستم، با استفاده از دو فیوز سازه‌ای به صورت هم‌زمان، اهداف عملکردی متعددی پوشش داده شد.

ابراهیم^۱ و همکاران نیز در پژوهشی، ترکیبی از میراگر ویسکوپلاستیک و ورق‌های تسلیم‌شونده فلزی را معرفی کردند که در طیف گسترده‌ای از تغییر مکان‌ها عملکرد مطلوبی داشت

^۱ Ibrahim

[۱۳]. ترکیب میراگر ویسکوز با مهارنده‌های کمانش‌تاب یکی دیگر از رویکردهای ترکیبی نوین در این حوزه بوده است [۱۴].
لی^۱ و همکاران سیستمی متشکل از میراگرهای اصطکاکی و تسلیم‌شونده را معرفی کردند که عملکرد مرحله‌ای در زلزله‌های با شدت متفاوت داشت [۱۵].

هاشمی و شمیری نیز میراگر TADAS با ساختار دوسطحی را معرفی کردند [۱۶]؛ استفاده از میراگرهای هیبریدی مانند مهارنده‌های کمانش‌تاب و تاداس نیز نمونه‌های دیگری از این دسته مطالعات هستند [۱۷ و ۱۸].

در پژوهش تیزهوش و مؤدب، میراگر حلقوی دو مرحله‌ای با سه حلقه متحدالمرکز پیشنهاد شد که بسته به شدت تحریک، فیوزهای بیرونی یا داخلی فعال می‌شدند [۸].

همچنین، احمدی و همکاران با ترکیب مهارنده واگرا و اعضای میله‌ای دوخت، رویکرد دوسطحی جدیدی برای بهبود عملکرد ارائه دادند [۶].

میراگرهای صفحه‌ای برشی به‌عنوان نوعی دستگاه اتلاف انرژی غیرفعال، با استفاده از تغییرشکل پلاستیک در صفحه برشی، انرژی را مستهلک می‌کنند. این میراگرها از نظر شبیه‌سازی المان محدود و تحقیقات تجربی مورد توجه گسترده محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است [۱۹].

شو^۲ و همکاران از طریق آزمون‌های شبه‌استاتیک تمام‌مقیاس، تأثیر عواملی مانند نسبت عرض به ضخامت صفحه برشی، شرایط بارگذاری، ابعاد سخت‌کننده‌ها و بازشوهای گوشه بر رفتار هیستریزیس میراگرها را تحلیل نمودند [۲۰].

لی و همکاران [۲۱] و گو^۳ و همکاران [۲۲] نیز میراگرهای اتلاف انرژی با عملکرد ترکیبی برش-خمش را طراحی کردند که با استفاده از صفحات خمشی متعدد، صفحه برشی را در دو طرف مهار می‌کنند.

در کنار این موضوع در پژوهش‌های اخیر استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین به‌عنوان مترئال اصلی صفحات برشی جاذب انرژی بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. فولادهای با تنش تسلیم پایین به‌دلیل تنش تسلیم کم‌تر تحت تغییرشکل‌های کوچک، امکان اتلاف انرژی زودهنگام در زلزله‌های شدید، ایجاد تغییرشکل پلاستیک بزرگ‌تر تحت نیروهای افقی کم‌تر و جذب انرژی لرزه‌ای بالاتر به‌عنوان فولادهای جدید مقاوم‌سازی در

میراگرهای فلزی صفحه برشی مناسب‌اند [۲۳ و ۲۴]. وانگ^۴ و همکاران با انجام آزمون‌های بارگذاری یکنوا و چرخه‌ای بر روی فولادهای LYP100، SLY100 و LYP225 شکل‌پذیری مطلوب این فولادها را نشان دادند [۲۵ و ۲۶].

شی^۵ و همکاران فولادهای LY100، LY160 و LY225 را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند [۲۷ و ۲۸]. نتایج نشان داد این فولادها منحنی‌های هیستریزیس کاملی از خود نشان داده و در مقایسه با فولادهای معمولی از ظرفیت تغییرشکل و اتلاف انرژی بالاتری برخوردارند.

شی و همکاران با انجام آزمون‌های خستگی کم‌چرخه تحت تغییرشکل پلاستیک بزرگ، تقویت فزاینده فولادهای با تنش تسلیم پایین با افزایش چرخه‌ها و عملکرد خستگی مطلوب آن‌ها را تأیید کردند [۲۹ و ۳۰].

هوانگ^۶ و همکاران با انجام آزمون‌های کششی یکنوا و خستگی بسیار کم‌چرخه بر فولاد LY225 تحت حالت‌های تنش مختلف نشان دادند که این فولاد دارای مشخصات سخت‌شدگی چرخه‌ای و مد گسیختگی شکل‌پذیر است. همچنین نشان دادند که قابلیت تغییرشکل و اتلاف انرژی آن به‌ویژه تحت تنش برشی محض، بیش از دو برابر فولاد کم‌کربن Q235 است [۳۱].

چراغی و زهرانی با معرفی میراگر تسلیمی «لوله در لوله» و به‌کارگیری تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده نشان دادند که استفاده از این نوع میراگر موجب افزایش قابل توجه ظرفیت جذب انرژی و کاهش تغییرمکان نسبی سازه تحت زلزله‌های شدید می‌شود [۳۲].

غفوری‌نژاد و همکاران با ترکیب قاب مهاربندی زانویی با میراگر اصطکاکی، بهبود چشمگیری در شکل‌پذیری، ضریب رفتار و اتلاف انرژی قاب‌ها گزارش کردند و نشان دادند که افزودن میراگر اصطکاکی به مهاربند زانویی ضمن جلوگیری از کمانش خارج از صفحه، می‌تواند ظرفیت لرزه‌ای قاب را به طور مؤثری افزایش دهد [۳۳].

همچنین در پژوهشی دیگر عسگری و همکاران یک میراگر اصطکاکی دوسطحی با ورق روسری برای اتصالات خمشی تیر-ستون معرفی کردند. مدل‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که با انتخاب نسبت طول به ضخامت بهینه، پایداری هیستریزیس و جذب انرژی افزایش می‌یابد و سیستم رفتار پلاستیک سازگاری

⁴ Wang

⁵ Shi

⁶ Huang

¹ Lee

² Xu

³ Guo



از خود ارائه می‌دهد که مطابق معیارهای آیین‌نامه‌ای اتصالات ویژه است [۳۴]. عدم استفاده از متریال نوینی مانند فولادهای با تنش تسلیم پایین در میراگرهای چندسطحی برای بهبود شکل‌پذیری، محدودیت در مکانیزم‌های جذب انرژی برشی خالص در سیستم‌های موجود و نیاز به یکپارچه‌سازی مکانیزم‌های چندسطحی در مهاربندهای قطری با قابلیت تعمیرپذیری از جمله موضوعاتی هستند که در ادبیات فنی مسکوت باقی مانده است.

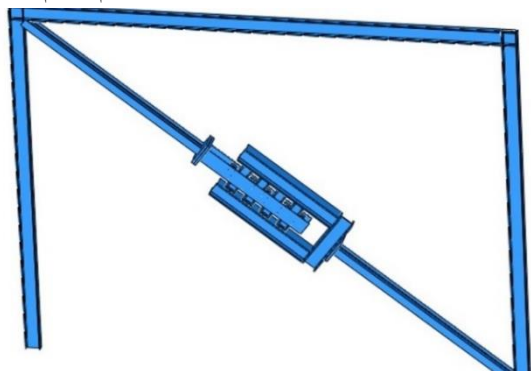
با توجه به چالش‌های پیش‌گفته و دستاوردهای مثبت تحقیقات پیشین، هدف پژوهش حاضر ارائه سیستمی مقاوم، تعمیرپذیر و دارای چند سطح عملکردی است تا ضمن کاهش خسارات سازه‌ای پس از زلزله، رفتاری هوشمندانه و متناسب با شدت زلزله از خود نشان دهد و برای لرزه‌های شدیدتر و پس‌لرزه‌ها ظرفیت متناسب ذخیره نماید. با توجه به سادگی ساخت میراگرهای تسلیمی وابسته به تغییرمکان، رویکرد این پژوهش نیز بر این اساس پایه‌ریزی شده است. همچنین، به‌منظور جلوگیری از پیچیدگی در مسیر انتقال بار و بهبود یکپارچگی سیستم، مکانیزم جذب انرژی به‌صورت یکنواخت و تحت عملکرد برشی در یک فیوز لرزه‌ای واحد پیاده‌سازی شده تا با تنظیم مناسب آن، ویژگی‌هایی چون سختی و میرایی سازه متناسب با شدت زمین‌لرزه قابل‌کنترل باشد. به‌دلیل تاریخچه موفق میراگرهای برشی و تأثیر مثبت استفاده از فولادهای با تنش تسلیم پایین در بهبود عملکرد جذب انرژی این میراگرها، در این پژوهش فولاد با تنش تسلیم پایین به‌عنوان ماده اصلی سازنده میراگر برشی چندسطحی انتخاب شد. سیستم پیشنهادی با داشتن مزیت عملکرد چندسطحی در مقایسه با میراگرهای مرسوم چون TADAS و مزیت تعمیرپذیری پس از زلزله نسبت به سیستم مهاربندهای دیگری همچون BRB، در کنار جذب انرژی بالا به‌دلیل استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین، گامی نوین در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی به‌شمار می‌آید.

ساختار کلی مقاله به این صورت است که پس از طرح مسئله و اهداف در بخش مقدمه، در بخش دوم، سیستم پیشنهادی تشریح شده و در بخش سوم فرضیات مدل‌سازی و صحت‌سنجی آن بررسی شده‌اند. نتایج در بخش چهارم مورد بحث قرار گرفته و در نهایت جمع‌بندی ارائه می‌شود.

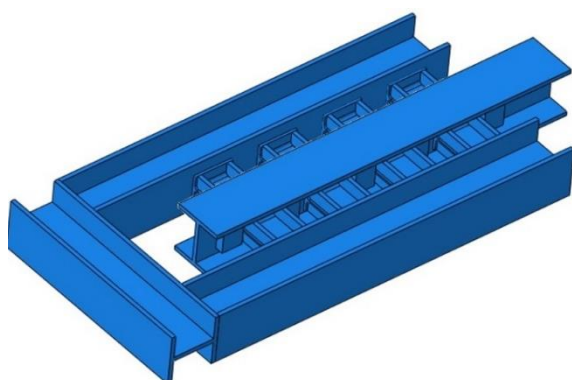
۲- پیکربندی سیستم پیشنهادی

پیکربندی سیستم پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این سیستم، فیوز جاذب انرژی پیشنهادی به‌صورت باکس مانند درون مهاربند قطری قرار می‌گیرد و فعال‌شدن آن از طریق

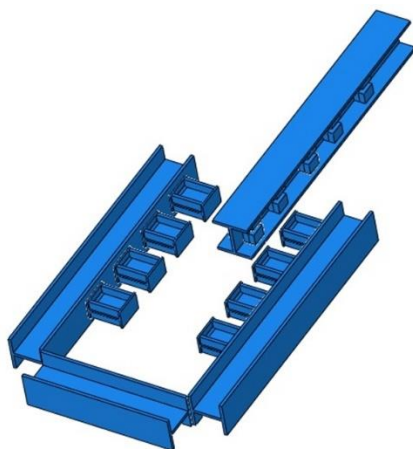
ورق‌های مستطیلی شکل و لقمه‌ها و اتصالات جوشی به تغییرمکان مهاربند وابسته می‌گردد (شکل‌های (۲) و (۳)). در اثر حرکت رفت‌وبرگشتی قاب تحت بارهای لرزه‌ای، مهاربند نیز در راستای طولی خود جابه‌جا شده و این حرکت از طریق اتصالات جوشی (در فاز اول) و گوه‌ها (در فاز دوم) به یک سر ورق‌های مستطیلی منتقل می‌شود. در نتیجه، این ورق‌ها تحت برش قرار گرفته و شروع به جذب انرژی می‌کنند. به‌دلیل برش یکسان در تمام طول ورق، انتظار می‌رود کل سطح ورق هم‌زمان با هم به تسلیم رسیده و به این وسیله جذب انرژی قابل‌توجهی برای سیستم فراهم گردد.



شکل ۱- پیکربندی سیستم پیشنهادی



شکل ۲- میراگر چندسطحی پیشنهادی



شکل ۳- اجزای تشکیل‌دهنده میراگر چندسطحی پیشنهادی

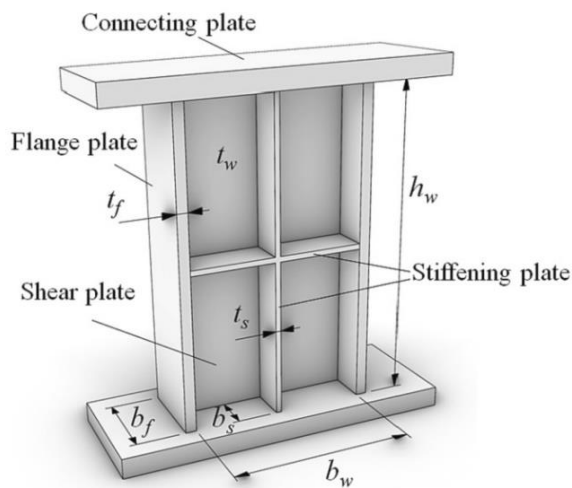
۳- صحت‌سنجی و مدل‌سازی

برای مدل‌سازی سیستم پیشنهادی از نرم‌افزار آباکوس بهره گرفته شد. به منظور اعتبارسنجی تنظیمات عددی، ابتدا مدلی مشابه با میراگر پیشنهادی از پژوهش‌هایی با پشتوانه آزمایشگاهی انتخاب شد تا پیش از ورود به مدل‌سازی اصلی، دقت مفروضات، رفتار مصالح و نتایج عددی بررسی شود.

۳-۱- پژوهش منتخب برای صحت‌سنجی

در پژوهشی توسط پن^۱ و همکاران، عملکرد اتلاف انرژی میراگرهای پانل برشی از جنس فولاد کم‌تنش (LSSPD) مورد مطالعه قرار گرفت [۴۰]. بدین منظور ۱۱ نمونه تمام‌مقیاس طراحی و آزمایش شد. با انجام آزمون‌های شبه‌استاتیک چرخه‌ای و شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر نسبت ابعاد صفحه برشی، ضخامت صفحه بال، تعداد و آرایش سخت‌کننده‌ها بر حالت‌های گسیختگی و عملکرد اتلاف انرژی LSSPD مطالعه شد. شکل (۴) شمای کلی میراگر پانل برشی مورد مطالعه و اجزا و پارامترهای متغیر آن در پژوهش مذکور و شکل (۵) منحنی بارگذاری چرخه‌ای آن را نشان می‌دهد.

به دلیل شباهت‌های هندسی (مانند ورق‌های مستطیلی، استفاده از پلیت اتصال و پلیت بال)، شباهت عملکردی (پانل برشی) و ویژگی‌های متریالی مشابه (مانند فولاد با تنش تسلیم پایین) و جامعیت اطلاعات ارائه‌شده، این پژوهش به‌عنوان مبنای صحت‌سنجی انتخاب شد.



شکل ۴- شمای کلی میراگر پانل برشی [۴۰]

برای دستیابی به عملکرد چندسطحی، تعدادی از ورق‌های مستطیلی مستقیم به المان اصلی هم‌راستا با مهاربند قطری جوش شده‌اند اما تعدادی دیگر از ورق‌ها آزاد هستند و اتصال مستقیمی با المان اصلی مهاربندی ندارند. دسته اول ورق‌ها به واسطه اتصال جوشی به محض حرکت مهاربند دچار تغییرشکل شده و با عملکرد برشی شروع به نشان‌دادن سختی و مقاومت و پس از تسلیم، شروع به جذب انرژی زلزله می‌نمایند. ورق‌های دسته دوم که اتصال مستقیم ندارند، در این مرحله فعال نشده و آزادانه حرکت می‌کنند. بر روی المان اصلی مهاربندی، لقمه‌هایی با فاصله‌ای معین از ورق‌های دسته دوم جوش شده است. پس از افزایش جابه‌جایی مهاربندها به اندازه فراتر از فاصله لقمه‌ها از ورق‌های دسته دوم، این ورق‌ها نیز از طریق درگیری با لقمه‌ها فعال شده و سختی و مقاومت جدیدی به سیستم تزریق می‌کنند و با فراتر رفتن تغییرشکل‌ها و ورود به ناحیه پلاستیک، مجدداً میزان قابل توجهی بر جذب انرژی سیستم می‌افزایند. با انتخاب فواصل مختلف بین لقمه‌ها و ورق‌های آزاد، امکان تعریف سطوح عملکردی سوم و بالاتر نیز فراهم می‌شود.

معیارهای انتخاب فاصله‌ها برای فعال‌سازی هر سطح وابسته به کاربری سازه و سطح عملکردی مدنظر برای آن کاربری (ایمنی جانی، استفاده بی وقفه و...) دارد. طراح سازه بر اساس دریافت معادل با سطوح عملکردی مختلف، فاصله‌های فعال‌سازی ورق‌های سطوح مختلف را تعیین نموده و با استفاده از پارامترهای هندسی ورق‌ها، سختی هر سطح را نیز مطابق با اهداف طراحی تنظیم می‌نماید.

برای تعیین دریافت معادل با سطوح عملکردی مدنظر و طراحی اجزای سیستم پیشنهادی، می‌توان از مبنای آیین‌نامه‌ای و استانداردهایی نظیر ASCE 7-22، Eurocode 8، AIJ، Guidelines for Seismic Performance Evaluation of Buildings، استاندارد ۲۸۰۰، نشریه ۳۶۰ ایران و کلیه استانداردها و آیین‌نامه‌هایی که رویکرد ارزیابی و یا طراحی مبتنی بر عملکرد دارند، بهره برد [۳۵-۳۹].

لازم به ذکر است که اتصال جوشی پانل‌های برشی سطح یک با توجه به اتصال گیردار آن به جعبه میراگر و اتصال گیردار جعبه میراگر به المان مهاربند، خیز مهاربند تحت اثر وزن جعبه را مهار نموده و آن را به مقداری در حد یک تا دو میلی‌متر محدود می‌نماید. از این رو تأثیر این خیز در عملکرد مهاربند و میراگر ناچیز بوده و قابل اغماض است.

^۱ Pan



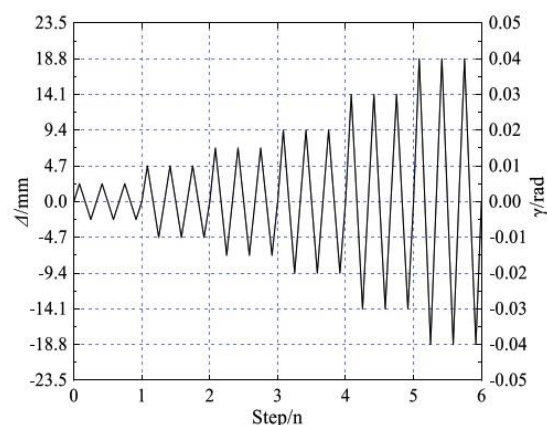
شکل ۷- برپایی آزمایش [۴۰]

۲-۳- مدل‌سازی المان محدود پژوهش منتخب

برای مدل‌سازی، کلیه اجزا به صورت Solid تعریف شدند. در تعریف مصالح فولادی، سه نوع مصالح فولاد با تنش تسلیم پایین (LY225)، فولاد معمولی (Q235) و فولاد پر مقاومت (Q345) به ترتیب برای ورق جان، ورق بال و ورق اتصال تعریف شد. مشخصات مکانیکی فولادهای مذکور بر اساس اطلاعات درج شده در گزارش پژوهش منتخب [۴۰]، مطابق جدول (۱) در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. برای تعریف رفتار فولاد با تنش تسلیم پایین در بخش رفتار مصالح از سه گزینه Elastic، Density و Plastic استفاده شد. در بخش چگالی فولاد و در بخش Elastic مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن تعریف شد. در بخش Plastic، برای رفتار Hardening حالت Combined انتخاب و نوع داده بر روی حالت پارامتری تنظیم شد. در نهایت تعداد چهار Backstress به منظور مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر اثر پوشینگر برای نرم‌افزار تعریف شده و تعریف ماده تکمیل شد. پارامترهای مدل سخت‌شوندگی ترکیبی فولاد با تنش تسلیم پایین بر اساس گزارش پژوهش منتخب در جدول (۲) ارائه شده است. پس از تعریف مصالح، مصالح مربوط به هر المان به آن بخش اختصاص داده شد و مونتاژ نهایی میراگر جهت انجام آنالیز، مطابق با شکل (۸)، صورت پذیرفت.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولادهای Q235 و Q345 [۴۰]

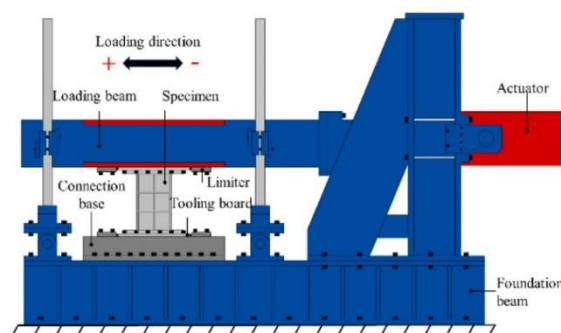
فولاد	تنش اسمی (MPa)		تنش حقیقی (MPa)	
	کرنش اسمی	کرنش حقیقی	کرنش اسمی	کرنش حقیقی
Q235	۲۸۰	۰/۰۰۱۳۶	۲۸۰	۰/۰۰۱۳۶
	۴۰۳	۰/۱۲۷۷۵	۴۵۴	۰/۱۲۰۲۲
Q345	۳۵۶	۰/۰۰۱۷۳	۳۵۷	۰/۰۰۱۷۳
	۴۹۸	۰/۱۰۲۸۵	۵۴۹	۰/۰۹۷۹



شکل ۵- منحنی بارگذاری چرخه‌ای به کاررفته در تست آزمایشگاهی

میراگر پانل برشی [۴۰]

به دلیل کاهش پارامترهای مؤثر و جلوگیری از پیچیدگی مسئله، از بین نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش مرجع، نمونه‌ای که فاقد سخت‌کننده‌های قائم و افقی بود، انتخاب شد تا تأثیر تعداد و چیدمان سخت‌کننده‌ها وارد مسئله نشود و تمرکز تنها بر روی بررسی اهداف اصلی پژوهش حاضر باقی بماند. از این رو نمونه SPD-1.31-16-H0V0 انتخاب شد که در آن ارتفاع جان پانل ۴۷ سانتی‌متر و عرض آن ۳۶ سانتی‌متر بود. عدد ۱/۳۱ در نام‌گذاری نمونه نیز برگرفته از نسبت همین مقادیر ارتفاع و عرض است. ضخامت جان پانل برشی در تمام نمونه‌ها ۸ میلی‌متر بود. عدد ۱۶ در نام نمونه بیانگر ضخامت قطعه بال بوده و عبارت H0V0 به معنای این است که هیچ سخت‌کننده افقی و قائمی در نمونه استفاده نشده است. شکل‌های (۶) و (۷) جزئیات شماتیک و واقعی برپایی آزمایش صورت‌گرفته بر روی نمونه‌ها را نمایش می‌دهند.

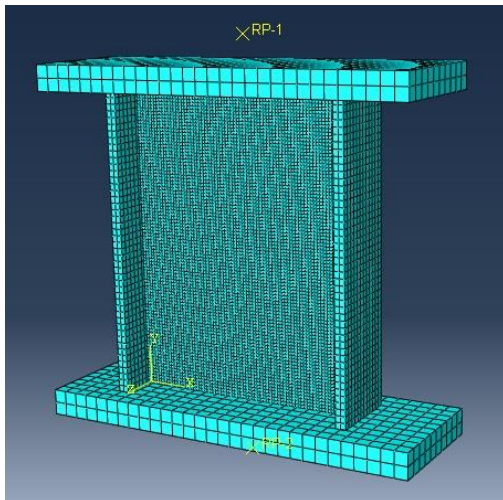


شکل ۶- نمایش شماتیک جزئیات برپایی آزمایش [۴۰]

جدول ۲- پارامترهای مدل سخت‌شوندگی ترکیبی فولاد LY225 [۴۰]

مقدار	پارامتر
۲۲۸	σ_0 (MPa)
۹۱	Q_{∞} (MPa)
۱	b
۳۱۵۶	C_1 (MPa)
۹۰	γ_1
۵۲۲	C_2 (MPa)
۸۶	γ_2
۴۹۱	C_3 (MPa)
۳۵۰	γ_3
۳۹۰	C_4 (MPa)
۱	γ_4

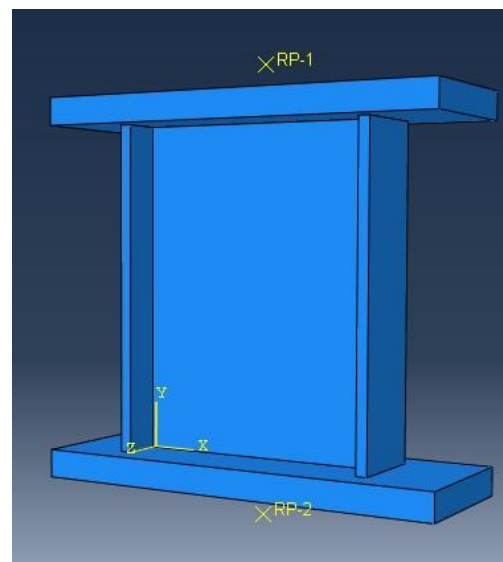
جابه‌جایی به‌صورت شرایط مرزی (Boundary Condition) بر نقطه مرجعی که صفحه فوقانی با آن کوپل شده بود، اعمال شد. برای مش‌بندی قطعات از المان هشت‌گره‌ی (Hex) خطی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) استفاده شد. اندازه مش در جهت طول و عرض صفحه برشی به دلیل اهمیت ویژه قطعه، پنج میلی‌متر تعیین شده و در جهت ضخامت صفحه به چهار لایه تقسیم شد. اندازه مش‌بندی بال‌ها نیز ۱۰ میلی‌متر و صفحات اتصال ۲۰ میلی‌متر تنظیم شد. شکل (۹) جزئیات مش‌بندی نهایی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مونتاژ نهایی میراگر در نرم‌افزار

پس از تکمیل تمامی مراحل مدل‌سازی، مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق با شکل (۵) قرار گرفت. شکل (۱۰) مقایسه بین خروجی مدل با نتیجه مطالعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مطابقت بسیار بالایی بین خروجی مدل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که تأییدکننده دقت بالای مدل‌سازی و قابل‌اتکابودن نتایج آن است. همچنین ملاحظه می‌شود که با لحاظ پارامترهای مدل‌سازی اثر بوشینگ، در مسیرهای برگشت چرخه‌ها و انحنا و خم این قسمت‌ها، مدل المان محدود به‌خوبی و با دقت بالا توانسته است رفتار نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی نموده و خروجی‌هایی کاملاً منطبق با نمونه‌های واقعی ارائه دهد.

در خروجی منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی، افت نیرویی دقیقاً در حوالی دامنه تغییر مکانی صفر مشاهده می‌شود. این پدیده به دلیل کمانش ورق جان رخ می‌دهد. در زمان تغییر جهت بارگذاری، تأخیر در بازیابی سختی الاستیک به دلیل کمانش رخ داده، موج افت نیرو می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد، مدل المان محدود به‌خوبی و با دقت بسیار

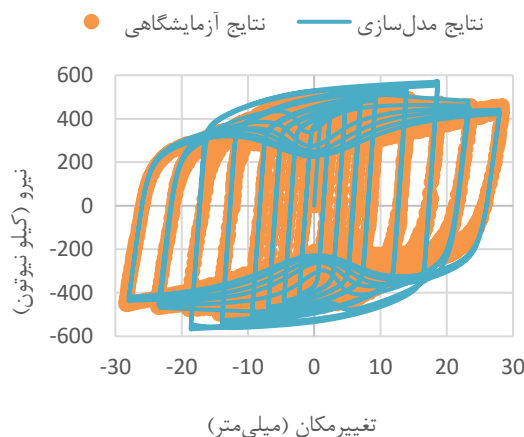


شکل ۸- مونتاژ نهایی میراگر در نرم‌افزار

به‌منظور تحلیل مدل از روش Static, General و برای اتصال قطعات از قید Tie استفاده شد. شرایط تکیه‌گاهی، به‌وسیله Coupling صفحه زیرین با یک Reference Point و مقیدکردن تمام درجات آزادی آن نقطه مرجع اعمال گردید. همچنین به‌منظور اعمال شرایط بارگذاری، صفحه فوقانی نیز با یک Reference Point دیگر Couple شد و برای این نقطه مرجع شرایط مرزی انتقالی در جهت‌های x و y آزاد گذاشته شد و سایر درجات آزادی مقید شدند. نقاط مرجع در شکل (۸) قابل مشاهده هستند.

برای اعمال بارگذاری در مازول Load، با استفاده از ابزار Amplitude، بارگذاری چرخه‌ای مطابق با شکل (۵) در قالب

مناسبتی توانسته است این اثر را شبیه‌سازی نماید. در پژوهش منتخب، در نمونه‌هایی که سخت‌کننده‌های افقی و قائم به‌کار رفته بود، به‌دلیل جلوگیری از وقوع کمانش، این افت نیرو مشاهده نشد.



شکل ۱۰- مقایسه بین خروجی مدل با نتایج مطالعات آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای

۳-۳- مدل‌سازی المان محدود میراگر پیشنهادی

پس از طی مراحل صحت‌سنجی، اطمینان از درستی فرضیات، تنظیمات نرم‌افزاری و دقت بالای مدل‌سازی، با فرضیات و تنظیمات مشابه مدل‌سازی میراگر پیشنهادی پژوهش انجام شد. در راستای اطمینان از عملکرد دقیق مدل المان محدود، از مدل ساخته‌شده برای صحت‌سنجی (میراگر LSSPD) یک رونوشت تهیه شد و تمامی تغییرات بر روی همان مدل صورت گرفت. به این دلیل که آن مدل‌سازی پستوانه مطالعات آزمایشگاهی داشت، تا حد توان سعی بر این شد مشخصات سیستم پایه از جمله ابعاد پانل‌های برشی، ابعاد ورق‌های بال و اتصال، مشخصات مصالح و پروتکل بارگذاری ثابت نگه داشته شود.

یک تغییر لازم، تغییر زاویه قرارگیری میراگر بود که از حالت افقی باید دوران می‌یافت و در راستای زاویه مهاربند قطری قاب قرار می‌گرفت و تغییر دیگر، که مهم‌ترین تغییر بود، اضافه‌کردن یک ورق محرک به نمایندگی از المان اصلی مهاربندی که پانل‌های سطح اول و لقمه‌های لازم برای فعال‌سازی سطح دوم به آن جوش می‌شوند. همان‌طور که در پیکربندی سیستم پیشنهادی نیز اشاره شد، تعدادی از پانل‌های برشی از همان ابتدا به المان اصلی جوش می‌شوند تا سختی اولیه و سطح عملکردی اول سیستم را فراهم نمایند. به‌منظور تأمین سطوح عملکردی بعدی در تعدادی دیگر از پانل‌ها، فاصله‌ای میان المان اصلی و پانل است که اجازه حرکت المان اصلی مستقل از پانل‌های این بخش را می‌دهد. بر روی المان اصلی محرک، لقمه‌هایی با فاصله‌ای مشخص از پانل‌ها تعبیه شده است که موجب

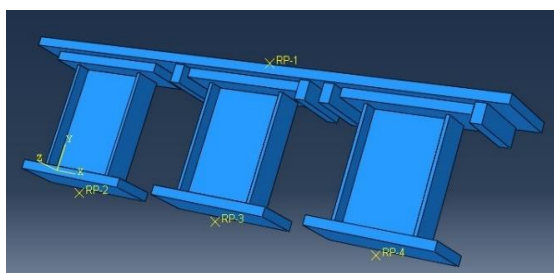
می‌شود در صورت فراتر رفتن جابه‌جایی المان اصلی از حدی مشخص، پانل‌های سطوح عملکردی بالاتر نیز فعال گردند. در ادامه دو مدل میراگر طراحی و مدل‌سازی شد.

مدل اول، میراگر دوطرحی است که در آن پانل‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند (شکل (۱۱)). در دسته اول، پانل‌ها از محل ورق اتصال به ورق محرک متصل بوده و به‌محض حرکت ورق محرک این پانل‌ها شروع به مقاومت و جذب انرژی می‌کنند و در دسته دوم، همان‌طور که در شکل (۱۲) نیز مشخص است، لقمه‌هایی در فاصله یک سانتی‌متری از پانل‌هایی که به ورق محرک متصل نیستند، قرار دارند. به این صورت که بدنه پانل‌ها از هر سمت با بدنه لقمه‌ها ۲/۵ سانتی‌متر فاصله داشته و پس از تغییر مکان یک سانتی‌متری، لقمه‌ها با پانل‌ها درگیر شده و دسته دوم پانل‌ها نیز فعال خواهند شد.

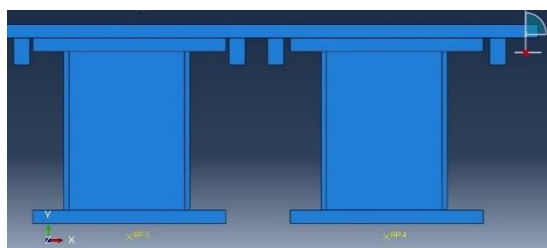
برای تعریف مشخصات تماس، گزینه‌های Normal Behavior و Tangential Behavior مورد استفاده قرار گرفتند. برای بخش Normal Behavior گزینه "Hard Contact" انتخاب شد و تیک چک‌باکس Allow separation after contact زده شد. برای بخش Tangential Behavior گزینه Penalty به‌منظور فرمولاسیون تأثیر اصطکاک انتخاب شد و مقدار ۰/۳ برای ضریب اصطکاک در این بخش وارد شد.

به‌دلیل مسئله تماس و جداشدن و تماس مجدد چندین باره لقمه‌ها با بدنه پانل‌ها، تحلیل المان محدود مدل پیشنهادی سنگین و زمان‌بر خواهد بود. از این رو به‌منظور کاهش زمان تحلیل و جلوگیری از واگرایی، از مدل‌سازی کل قاب اجتناب شد تا به این ترتیب هم رفتار مستقل میراگر پیشنهادی بدون اثرات ثانویه قاب یا مهاربند تحلیل شود و هم از سنگینی بیش‌تر مدل جلوگیری به عمل آید. از سوی دیگر با توجه به تقارن سیستم، تنها پلیت‌های یک سمت و به‌دلیل رفتار موازی پلیت‌ها، تنها یک پلیت از پلیت‌های هر سطح عملکردی مدل‌سازی شد. به‌منظور حصول هم‌زمان دقت در نتایج و بهینه‌سازی مدل به‌لحاظ جلوگیری از واگرایی و کوتاه‌تر شدن مدت تحلیل، برای بخش‌های با اهمیت بالاتر و سطوح درگیر در تماس، از مش‌هایی با سایز کوچک‌تر و برای باقی بخش‌ها از مش با سایز بزرگ‌تر استفاده شد. پس از مش‌بندی مجدد مدل به‌دلیل تغییرات ایجادشده مطابق با شکل (۱۳)، آنالیز مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای، آغاز شد.

دسته دوم نیز مانند مدل دوسطحی پس از تغییر مکان یک سانتی متری، با لقمه‌های روی المان محرک درگیر شده و این پانل‌ها نیز فعال خواهند شد. لقمه‌های اطراف دسته سوم پانل‌ها به گونه‌ای تنظیم شدند که با بدنه پانل‌ها به اندازه دو سانتی متر فاصله داشته باشند. به همین خاطر پس از فعال شدن پانل‌های دسته دوم، چنانچه تغییر مکان افزایش یافته و از دو سانتی متر فراتر رود، این پانل‌ها نیز فعال شده و به کمک سیستم باربر جانبی می‌آیند (شکل ۱۵).



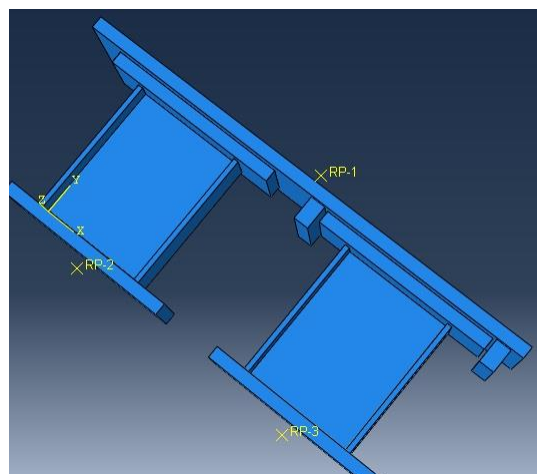
شکل ۱۴- میراگر برشی چندسطحی



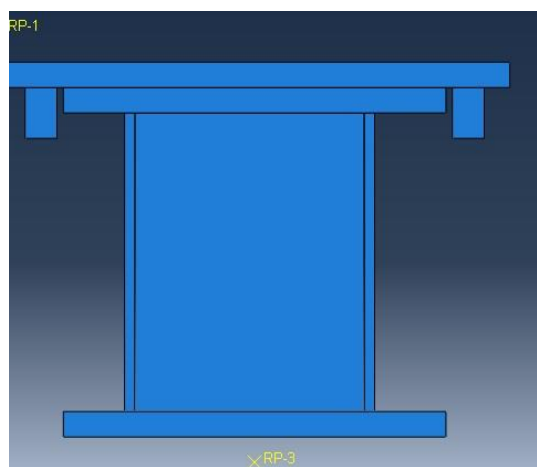
شکل ۱۵- فاصله بین لقمه‌ها با پانل‌های برشی سطح دو و سه

رفتار خارج از صفحه میراگر پیشنهادی تحت سه عامل اصلی هندسه، شرایط مرزی و ویژگی‌های مصالح کنترل می‌شود. در این طرح، چند تمهید برای اطمینان از پایداری خارج از صفحه لحاظ شده است. پانل‌های برشی با ضخامت و نسبت ابعادی مناسب (ارتفاع به عرض تقریباً برابر با $1/3$) طراحی شده‌اند که طبق الزامات AISC، احتمال بروز کمناش خارج از صفحه را کاهش می‌دهد. همچنین وجود ورق‌های بال در دو طرف پانل‌ها (مطابق شکل ۴) به عنوان سخت‌کننده جانبی عمل کرده و لنگر خمشی ناشی از بارهای خارج از صفحه را جذب می‌کند. از سوی دیگر ساختار جعبه‌ای میراگر باعث می‌شود که مجموعه به صورت یک دیافراگم فولادی صلب رفتار کرده و نیروهای خارج از صفحه را به اعضای مهاربند اصلی منتقل کند و از متمرکز شدن تغییر شکل‌ها در پانل‌ها جلوگیری شود.

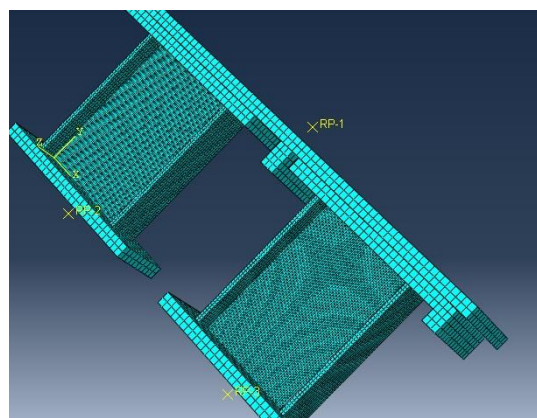
در نتیجه، با توجه به ساختار جعبه‌مانند، وجود سخت‌کننده‌های جانبی، اتصالات صلب و سختی خمشی زیاد اجزای برشی، انتظار می‌رود رفتار خارج از صفحه این سیستم



شکل ۱۱- مدل دوسطحی با دو دسته پانل برشی



شکل ۱۲- فاصله بین لقمه و پانل برشی جهت تأمین سطح دو



شکل ۱۳- مش‌بندی مدل دوسطحی

مدل دوم میراگر چندسطحی است که در آن پانل‌های برشی به بیش از دو دسته (در نمونه این پژوهش سه دسته) تقسیم می‌شوند (شکل ۱۴). مانند مدل دوسطحی، دسته اول پانل‌ها از محل ورق اتصال به ورق محرک متصل است و از ابتدای بارگذاری با ورق محرک درگیر بوده و مقاومت نشان داده و جذب انرژی می‌کنند.

عمدتاً الاستیک و ناچیز باشد و تأثیر معناداری بر عملکرد لرزه‌ای کلی نگذارد.

در صورت ادامه بارگذاری و فعال شدن و جاری شدن ورق‌های تمامی سطوح، مکانیزم نهایی انهدام میراگر، کماتش موضعی صفحات، تسلیم تدریجی فولاد و شروع گسیختگی برشی در جان پانل‌های برشی است. این گسیختگی پس از رسیدن کرنش پلاستیک به حدود ۱۵٪ رخ می‌دهد و به دلیل تمرکز تنش در لبه‌های جوش شده پانل‌ها آغاز می‌گردد.

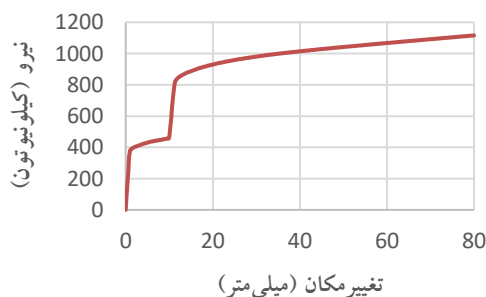
در پایان به منظور ارزیابی عملکرد سیستم‌های پیشنهادی، هر دو مدل دوسطحی و چندسطحی به همراه مدل پایه تک‌سطحی تحت بارگذاری یکنوا و چرخه‌ای قرار گرفتند که در بخش بعد به بررسی نتایج حاصل پرداخته شده است.

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

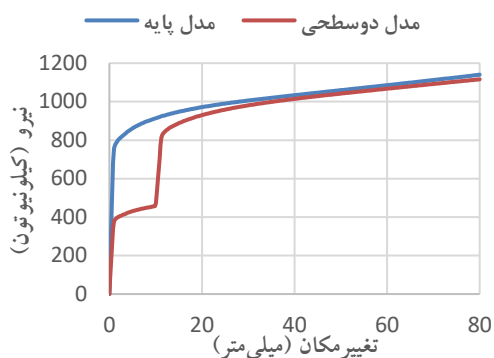
پس از اجرای فرآیند صحت‌سنجی مدل و انجام تحلیل‌های عددی مبتنی بر روش اجزای محدود، در این بخش نتایج به دست آمده در چند قسمت مجزا بررسی شده‌اند.

۴-۱- تحلیل نتایج میراگر دو سطحی

شکل (۱۶) روند تغییر نیرو نسبت به تغییر مکان را برای مدل دوسطحی تحت بارگذاری یکنوا نمایش می‌دهد. شکل (۱۷) نیز این پاسخ را با مدل تک‌سطحی مقایسه می‌کند. مطابق نمودار شکل (۱۶)، با آغاز بارگذاری، عملکرد اولیه مربوط به فعال شدن ورق‌های سطح اول است که سختی ابتدایی سیستم را تعیین می‌کند. با ادامه بارگذاری و ورود به ناحیه غیرالاستیک، جذب انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با رسیدن دررفت به مقدار تعیین شده برای فعال‌سازی سطح دوم (یک سانتی‌متر)، پانل‌های سطح دوم وارد عمل شده و منجر به افزایش سختی کلی سیستم می‌شود. در شکل (۱۷)، این افزایش گام‌به‌گام سختی به وضوح در مقایسه با مدل تک‌سطحی قابل مشاهده است.

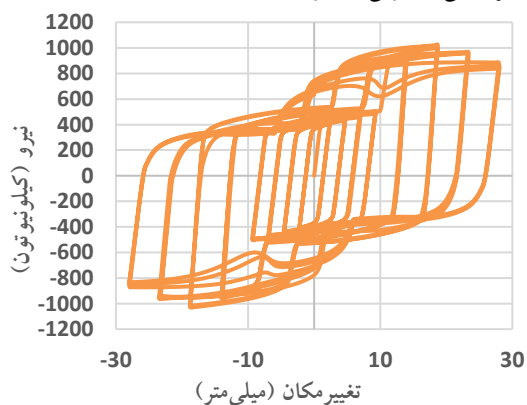


شکل ۱۶- منحنی نیرو-تغییر مکان مدل دوسطحی تحت بارگذاری یکنوا

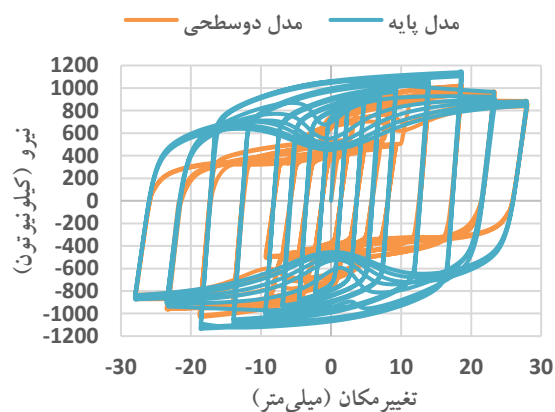


شکل ۱۷- مقایسه پاسخ به بارگذاری یکنوا مدل دوسطحی و تک‌سطحی

شکل (۱۸) منحنی هیستریزس سیستم دوسطحی را در برابر بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد و شکل (۱۹) نیز آن را با مدل پایه مقایسه می‌کند. تحلیل این منحنی‌ها بیانگر آن است که در کنار حفظ ظرفیت نهایی، سیستم پیشنهادی با افزایش تقاضا واکنش مناسبی از خود نشان داده و به صورت مرحله‌ای سختی بیش‌تری ارائه داده است. این واکنش تدریجی در کل چرخه‌های رفت و برگشتی به خوبی مشهود است.



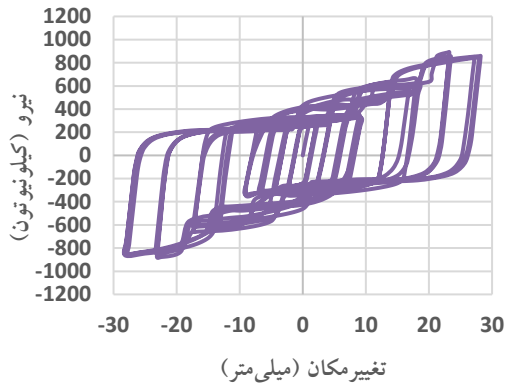
شکل ۱۸- منحنی هیستریزس میراگر برشی دوسطحی تحت بارگذاری چرخه‌ای



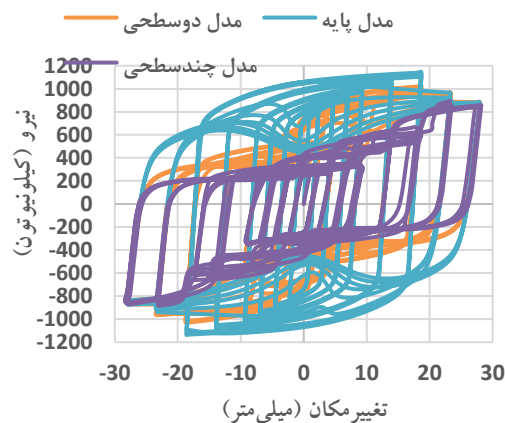
شکل ۱۹- مقایسه پاسخ به بارگذاری چرخه‌ای میراگر دوسطحی و میراگر تک‌سطحی

۴-۲- تحلیل نتایج میراگر چندسطحی

در شکل (۲۰) نمودار نیرو-تغییر مکان مدل چندسطحی (سه سطحی) تحت بارگذاری یکنواخت ارائه شده است. در شکل (۲۱)، این مدل با نمونه‌های تک و دوسطحی مقایسه شده است. با مشاهده منحنی ملاحظه می‌شود که ابتدا فعال‌سازی سطح اول منجر به سختی اولیه سیستم می‌گردد؛ سپس با افزایش تغییر مکان به یک سانتی‌متر، سطح دوم و پس از آن با رسیدن به ۲ سانتی‌متر سطح سوم فعال شده و هر مرحله با افزودن سختی جدید به سیستم همراه بوده است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که پاسخ مدل چندسطحی دارای انطباق بسیار بهتری با روند بارگذاری و تغییرات تقاضا نسبت به سایر مدل‌ها است.

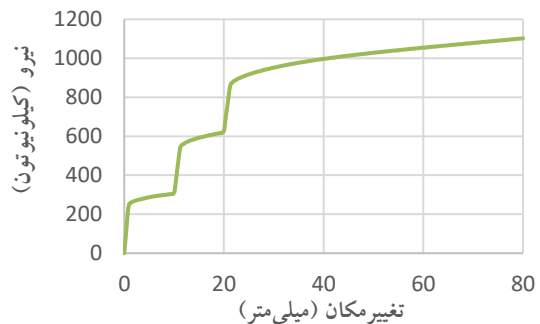


شکل ۲۲- منحنی هیستریزس میراگر چندسطحی

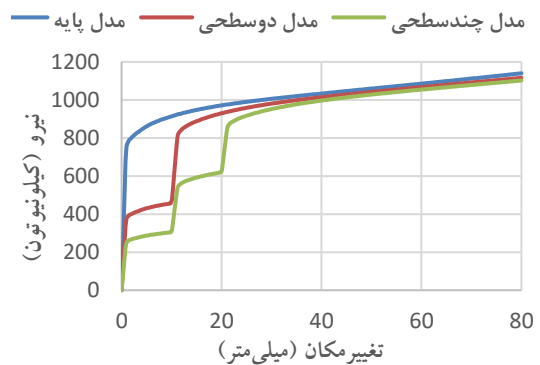


شکل ۲۳- مقایسه منحنی هیستریزس میراگر چندسطحی با میراگر دوسطحی و تک سطحی

جدول (۳) مقایسه بین سختی و جذب انرژی سیستم‌های پیشنهادی و مدل پایه را نشان می‌دهد. مطابق جدول، در مدل تک سطحی تمامی سختی در نظر گرفته شده برای سازه در همان فاز ابتدایی به سازه تزریق شده و متعاقباً این سختی منجر به دریافت نیروی لرزه‌ای بالاتری می‌شود. از طرف دیگر، سازه خیلی زود تمام سختی خود را از دست داده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. در حالی که در مدل دوسطحی، نیمی از سختی برای فاز دوم ذخیره می‌شود و در مدل چندسطحی این سختی به وضوح به صورت تدریجی به سازه تزریق می‌شود و ظرفیت مناسبی برای تمامی سطوح لرزه‌ای ذخیره می‌گردد. همچنین با مقایسه میزان انرژی دریافتی مشاهده می‌شود که متناسب با شدت لرزه، جذب انرژی در مدل‌های دو و چندسطحی در حال افزایش است و ورود انرژی زلزله در سیستم سازه‌ای به تدریج اتفاق می‌افتد.



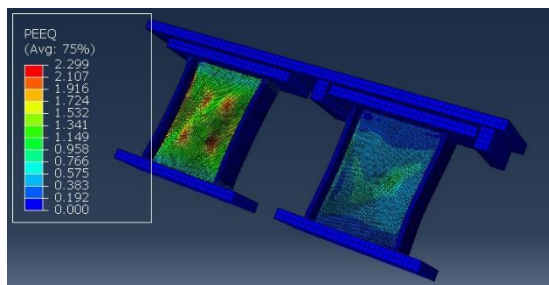
شکل ۲۰- منحنی نیرو-تغییر مکان مدل چندسطحی تحت بارگذاری یکنوا



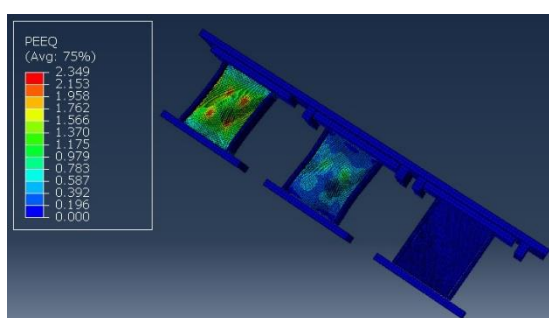
شکل ۲۱- مقایسه پاسخ مدل چندسطحی، دوسطحی و تک سطحی به بارگذاری یکنوا

شکل (۲۲) رفتار هیستریزس میراگر چندسطحی پیشنهادی و شکل (۲۳) مقایسه این رفتار با مدل‌های دو و تک سطحی را تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد. نتایج هر دو شکل حاکی از آن است که سیستم چندسطحی در عین حفظ ظرفیت مقاومت نهایی، توانسته است با ارائه سختی مرحله‌ای متناسب با شرایط بارگذاری، کارایی لرزه‌ای بسیار مناسبی از خود نشان دهد.

انرژی و تغییرشکلی خود نزدیک شده‌اند، پانل‌های سطح دو و سه هنوز از ظرفیت بالایی برخوردار هستند. از این رو در صورت تداوم یا شدت یافتن زلزله و یا در پس‌لرزه‌ها، این ظرفیت باقی‌مانده کمک شایانی به حفظ پایداری و ادامه استهلاک انرژی لرزه‌اعمالی خواهد نمود.



شکل ۲۶- کانتور کرنش PEEQ در مدل دوسطحی



شکل ۲۷- کانتور کرنش PEEQ در مدل چندسطحی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای و تأمین قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله، اصلاحاتی در مهاربندهای قطری سستی اعمال شد و نوعی میراگر برشی ساخته‌شده از فولاد کم‌تنش با عملکرد چندسطحی به آن افزوده شد. برای ارزیابی رفتار سیستم پیشنهادی، مدل‌سازی عددی، پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی، با استفاده از روش اجزای محدود صورت گرفت.

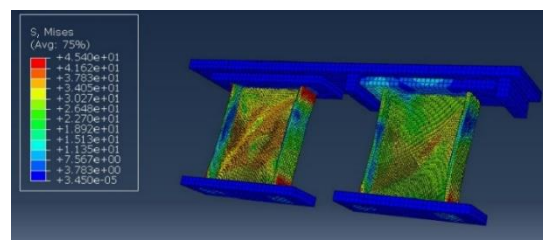
نتایج تحلیل‌ها بر روی مدل‌های المان محدود سیستم‌های پیشنهادی پژوهش، بیانگر آن است که میراگر برشی پیشنهادی به‌خوبی توانسته است برای سیستم عملکرد چندسطحی را فراهم آورد. همچنین در مقایسه با مدل‌های تک‌سطحی مشاهده شد که سیستم پیشنهادی (در قالب مدل‌های دو و چندسطحی) توانسته است سختی مرحله‌ای متناسبی فراهم کرده و در نتیجه پاسخ دینامیکی سازه را به‌شکل هوشمندانه‌ای کنترل نماید. همچنین استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین در جان پانل‌های برشی موجب شد که میزان جذب انرژی سیستم پیشنهادی به نسبت سیستم‌های مشابه با فولاد معمولی ارتقا یابد.

جدول ۳- مقایسه سختی و میزان جذب انرژی مدل‌ها طی تغییر فاز و افزایش تغییر مکان نسبی

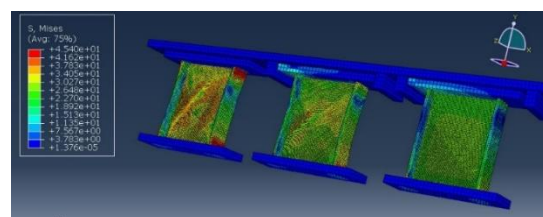
مدل	سطح ۱		سطح ۲		سطح ۳	
	جذب انرژی	سختی	جذب انرژی	سختی	جذب انرژی	سختی
تک‌سطحی	۱۰۰٪	۳۳٪	۶۷٪	پلاستیک	۱۰۰٪	جذب انرژی
دوسطحی	۵۰٪	۱۷٪	۱۰۰٪	پلاستیک	۱۰۰٪	جذب انرژی
چندسطحی	۳۳٪	۱۱٪	۶۷٪	۳۳٪	۱۰۰٪	۶۷٪

۴-۳- بررسی کانتورهای تنش و کرنش

شکل‌های (۲۴) و (۲۵) تصویر توزیع تنش فون‌میسز را در انتهای یکی از چرخه‌های بارگذاری در مدل‌های دو و چندسطحی نشان می‌دهد. تحلیل این تصویر نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان تنش در ناحیه جان پانل‌های برشی رخ داده است و این تنش حداکثری در کل ورق جان به‌خوبی گسترش یافته و جان پانل‌ها به‌عنوان ناحیه اصلی جذب انرژی عمل می‌کند. این ویژگی منجر به افزایش مؤثر مساحت منحنی هیستریزس و بالارفتن ظرفیت جذب انرژی سیستم شده است. در عین حال مشاهده می‌شود که سایر اجزای سیستم، از جمله ورق‌های بال، ورق اتصال و المان متحرک، در ناحیه الاستیک باقی‌مانده‌اند. این تمرکز رفتار غیرخطی در جان پانل‌ها، امکان تعویض آن‌ها پس از وقوع زلزله و در نتیجه، تعمیرپذیری سیستم را فراهم می‌آورد.



شکل ۲۴- توزیع تنش در مدل دوسطحی بر اساس معیار فون‌میسز



شکل ۲۵- توزیع تنش در مدل چندسطحی بر اساس معیار فون‌میسز

شکل‌های (۲۶) و (۲۷) تصویر کانتور کرنش PEEQ در یکی از چرخه‌های بارگذاری انتهایی در مدل‌های دو و چندسطحی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصاویر مشخص است، با وجود این که پانل‌های برشی سطح یک به حداکثر ظرفیت جذب

بررسی کانتورهای تنش و کرنش نیز نشان داد که سیستم پیشنهادی با قابلیت عملکرد دو یا چندسطحی، ظرفیت رزرو بسیار مناسبی را در صورت تشدید یافتن و یا در پس‌لرزه‌ها، به نسبت سایر سیستم‌های لرزه‌ای، برای سازه فراهم می‌آورد. همچنین مشاهده شد با تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک و جذب انرژی در جان پانل‌های برشی، به‌خوبی قابلیت تعمیرپذیری برای سیستم پیشنهادی تأمین شده است.

نتایج نشان داد میراگر برشی پیشنهادی با افزایش سختی سیستم متناسب با تقاضای لرزه‌ای، جذب انرژی بسیار مناسب و مقاومت نهایی یکسان با مدل پایه در کنار تأمین تعمیرپذیری برای سیستم مهاربندی از طریق متمرکز کردن ناحیه پلاستیک و وظیفه جذب انرژی در پانل‌های برشی، عملکرد لرزه‌ای بسیار مطلوبی داشته و به‌عنوان یک سیستم اصلاح‌شده و ارتقایافته با عملکردی هوشمند می‌تواند جایگزین مناسبی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها باشد.

در پایان شایان ذکر است که حساسیت به رواداری‌های اجرایی دقیق و تغییرشکل‌های ماندگار در کل سازه از جمله چالش‌هایی است که در استفاده از این نوع میراگرها همچنان وجود دارد. از این‌رو در مدل‌سازی قاب‌های دوبعدی و سه‌بعدی مجهز به میراگر پیشنهادی و تحلیل رفتار کلی سازه تحت رکوردهای لرزه‌ای و بررسی عملکرد آن از طریق تحلیل‌های غیرخطی، استفاده از یک سیستم مرکزگرا در کنار مهاربند تعمیرپذیر چندسطحی پیشنهادی، مطالعه آزمایشگاهی سیستم پیشنهادی در قالب یک قاب فولادی و... به‌عنوان موضوعاتی جهت پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

- [15] Lee, C.H., Kim, J., Kim, D.H., Ryu, J., and Ju, Y.K. (2016), "Numerical and Experimental Analysis of Combined Behavior of Shear-Type Friction Damper and Non-Uniform Strip Damper for Multi-Level Seismic Protection", *Engineering Structures*, 114, pp.75-92.
- [16] Shamshiri Dareini, H., and Hashemi, B.H. (2011), "Use of Dual Systems in Tadas Dampers to Improve Seismic Behavior of Buildings in Different Levels", *Procedia Engineering*, 14, pp.2788-2795.
- [17] Kim, D.H., Lee, C.H., and Ju, Y.K. (2017), "Experimental investigation of hybrid buckling-restrained braces", *International Journal of Steel Structures*, 17(1), pp.245-255.
- [18] Hosseini Hashemi, B., and Moaddab, E. (2017), "Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 170(10), pp.722-734.
- [19] He, Z., Zhou, Y., and Chen, Q. (2012), "Advance in research and application of steel shear panel dampers", *Dizhen Gongcheng yu Gongcheng Zhendong (Earthquake Engineering and Engineering Vibration)*, 32(6), pp.124-135.
- [20] Xu, L., Nie, X., and Fan, J. (2016), "Cyclic Behaviour of Low-Yield-Point Steel Shear Panel Dampers", *Engineering Structures*, 126, pp.391-404.
- [21] Li, Z., Shu, G., and Huang, Z. (2019), "Development and Cyclic Testing of an Innovative Shear-Bending Combined Metallic Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, 158, pp.28-40.
- [22] Guo, L., Wang, J., Wang, W., and Wang, H. (2021), "Experimental, numerical and analytical study on seismic performance of shear-bending yielding coupling dampers", *Engineering Structures*, 244, p.112724.
- [23] Wu, Z., Zhuang, L., Zhao, Y., Fan, L., Zhang, K., Yang, K., Li, Y., and Wang, W. (2025), "Development and Application of a Novel Restoring Force Model for Metallic Dampers", In *International Conference on Civil Engineering*, pp.377-388.
- [24] Nakashima, M., Akazawa, T., and Tsuji, B. (1995), "Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. II: Model", *Journal of Structural Engineering*, 121(12), pp.1750-1757.
- [25] Jiaojiao, W., Yongjiu, S., and Yuanqing, W. (2015), "Experimental study on the low yield point steel LYP100 under cyclic loading", *Journal of Zhejiang University, Engineering Science*, 49(8), pp.1401-1409.
- [26] Wang, J., Shi, Y., and Wang, Y. (2016), "Constitutive model of low-yield point steel and its application in numerical simulation of buckling-restrained braces", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), p.04015142.
- [27] Shi, G., Gao, Y., Wang, X., and Zhang, Y. (2018), "Mechanical properties and constitutive models of low yield point steels", *Construction and Building Materials*, 175, pp.570-587.
- [28] Shi, G., Wang, X., Gao, Y., and ZHANG, Y. (2018), "Experimental study on domestic low yield point
- [1] Bertero, V.V. (1994), "Performance of steel building structure during the Northridge earthquake", Report No. UCB/EERC-94/09.
- [2] Popov, E.P., and Kasai, K. (1978), "Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes", *Journal of the Structural Division, ASCE*, 104, pp.1409-1427.
- [3] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P., and Su, Y.F. (1993), "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction", *Earthquake Spectra*, 9, pp.505-528.
- [4] Chan, R.W.K., Albermani, F., and Kitipornchai, S. (2013), "Experimental Study of Perforated Yielding Shear Panel Device for Passive Energy Dissipation", *Journal of Constructional Steel Research*, 91, pp.14-25.
- [5] Maleki, S., and Mahjoubi, S. (2013), "Dual-Pipe Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, 85, pp.81-91.
- [۶] احمدی، ا.، علیرضایی، م.، و شریفی، م. (۱۴۰۳)، "ارزیابی آزمایشگاهی قاب مهاربندی شده فولادی برای دو سطح عملکرد"، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت*، شماره ۱۱، ص. ۲۶۰-۲۸۰.
- [7] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and McNamara, R.J. (2008), "Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments", *Journal of Structural Engineering*, 134(1), pp.3-21.
- [۸] تیزهوش سردرودی، ح.، و معاضد، ا. (۱۴۰۰)، "ارزیابی آزمایشگاهی و عددی میراگر لوله‌ای دوسطحی"، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت*، شماره ۸، ص. ۷۵-۹۵.
- [9] Zahrai, S.M., and Vosooq, A.K. (2013), "Study of an innovative two-stage control system: Chevron knee bracing and shear panel in series connection", *Structural Engineering and Mechanics*, 47(6), pp.881-898.
- [10] Hosseini Hashemi, B., and Alirezaei, M. (2015), "Experimental investigation of a combined system in steel braced frames", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 17(3), pp.181-191.
- [11] Cheraghi, A., and Zahrai, S.M., (2019), "Cyclic testing of multilevel pipe in pipe damper", *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10), pp.1695-1718.
- [12] Pachideh, G., Kafi, M., and Gholhaki, M. (2020), "Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater", *In Structures*, 28, pp.467-481.
- [13] Ibrahim, Y.E., Marshall, J., and Charney, F.A. (2007), "A visco-plastic device for seismic protection of structures", *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11), pp.1515-1528.
- [14] Kim, D.H., Ju, Y.K., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2014), "Wind-induced vibration control of tall buildings using hybrid buckling-restrained braces", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(7), pp.549-562.

steels under cyclic loading", *Engineering Mechanics*, 35(8), pp.30-38.

[29] Shi, G., Gao, Y., Wang, X., and Zhang, Y. (2019), "Low cycle fatigue properties of low yield point steels", *China Civil. Engineering, Journal*, 52, pp.20-26.

[30] Shi, G., Gao, Y., Wang, X., et al. (2018), "Energy-Based Low Cycle Fatigue Analysis of Low Yield Point Steels", *Journal of Constructional Steel Research*, 150, pp.346-353.

[31] Huang, X., Yuan, Y., Zhao, J., and Li, R. (2022), "Investigation of extremely low cycle fatigue behavior of low yield strength steel LY225 under different stress states", *Construction and Building Materials*, 350, p.128907.

[۳۲] زهرائی، س.م. و چراغی، ع. (۱۴۰۲)، "ارزیابی رفتار میراگر تسلیمی لوله در لوله با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۳، شماره ۲۵، ص. ۱۵-۵.

[۳۳] غفوری‌نژاد، ا.، علیرضایی، م.، میرحسینی، س.م. و ضیغمی احسان، ا. (۱۴۰۳)، "عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی زانویی با میراگر اصطکاکی و مقایسه آن با سیستم قاب زانویی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۸، شماره ۴۳، ص. ۹۲-۷۶.

[۳۴] عسگری، ه.، زهرایی، س.م.، وجدیان، م.، و میرحسینی، س.م. (۱۴۰۲)، "بررسی عددی میراگر دوسطحی با ورق روسری در اتصال خمشی تیر به ستون"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۷، شماره ۴۱، ص. ۲۶-۵.

[35] ASCE/SEI 7-22, (2022), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.

[36] CEN, (2004), Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules. for Buildings, European Committee for Standardization.

[37] AIJ, (2010), Guidelines for Seismic Performance Evaluation of Buildings, Architectural Institute of Japan.

[۳۸] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۳)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، چهارمین ویرایش، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

[۳۹] نشریه شماره ۳۶۰، (۱۳۹۲)، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، تجدید نظر اول، سازمان برنامه و بودجه کشور.

[40] Pan, Y., Gao, H., Zeng, H., and Li, Y. (2024), "Laboratory Study on Energy Dissipation Performance of Low-Yield-Point Steel Shear Panel Dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, 213, pp.1-15.