

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در زمینه کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، سیستم‌های کنترل غیرفعال و در رأس آن میراگرهای فلزی به لحاظ سادگی ساخت، ارزان و در دسترس بودن و همچنین عدم نیاز به نیروی محرک خارجی، ابزاری مناسب برای مستهلک کردن انرژی ورودی به سازه‌ها هستند. یکی از مکانیسم‌های جذب انرژی در میراگرهای فلزی، استفاده از ظرفیت محوری است. این پژوهش نوع جدیدی از مهارندهای کمانش‌تاب را ارائه داده است که در آن، در هر سیکل، المان‌های مستهلک‌کننده انرژی به صورت فشاری و با تکیه بر ظرفیت محوری خود نیروی وارد شده را تحمل می‌کنند. در این میراگر، به جای استفاده از یک المان، از اعضای دندانه‌ای شکل استفاده شده است که با ایجاد طول‌های متفاوت در آن و تأخیر در شکل‌گیری مودهای کمانشی، منحنی‌های پلکانی در نمودار پاسخ سیستم پیشنهادی مشاهده شده است. نتایج نشان داده است که سیستم پیشنهادی در جابه‌جایی محوری ۳۵ میلی‌متر، نیروی $+۳۴۸/۶$ و $-۳۴۷/۶$ کیلونیوتن را در هر یک از جهت‌های رفت و برگشت تحمل کرده است. به منظور حذف جابه‌جایی‌های پسماند سیستم، از فنر به عنوان المان تأمین‌کننده مرکزگرایی استفاده شده است که جابه‌جایی سیستم را به میزان $۶۸/۸$ و $۶۷/۴$ درصد نسبت به جابه‌جایی نهایی آن کاهش داده است. همچنین برای ارزیابی عملکرد بهینه سیستم، میزان انرژی جذب شده و ضریب میرایی و اسکوز معادل آن بر اساس نمودار بار-تغییر مکان چرخه‌ای به ترتیب برابر $۳۵/۲۵$ کیلوژول و ۴۶ درصد به دست آمده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: مهارنده کمانش‌تاب، استهلاک انرژی، میراگر تسلیم شونده، خاصیت مرکزگرایی، کنترل غیرفعال.

رفتار چرخه‌ای یک نوع مهارنده کمانش‌تاب مرکزگرا (رویکرد آزمایشگاهی)

محمد یزدانی

دانشجوی دکتری، مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

عباسعلی تسنیمی (نویسنده مسئول)

استاد، گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، tasnimi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

باربر جانبی با هدف اصلی افزایش میزان جذب انرژی و کاهش خسارت‌های وارد به سازه اصلی معرفی شده‌اند که ایده مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله را تقویت کرده است. در زمینه مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، تکنولوژی کنترل غیرفعال^۱ با استفاده از ابزار اتلاف انرژی، راه‌حل بسیار مناسبی است و با توجه به مزیت ارزان بودن نسبت به روش‌های سنتی مقاوم‌سازی از بروز خسارت در المان‌های سازه جلوگیری به عمل می‌آورد (Grossi et al., 2024). فناوری‌های مستهلک‌کننده انرژی^۲ و

عملکرد سازه‌هایی که بر اساس آیین‌نامه‌ها در طول سالیان مختلف طراحی و ساخته شده است، در اثر وقوع زلزله‌های مختلف مورد بازبینی قرار گرفته است تا بر اساس آن، روش‌های طراحی نیز با رویکرد بهبود عملکرد این سازه‌ها در برابر این حوادث طبیعی، اصلاح شوند. خسارت‌های گسترده مالی و جانی در زلزله‌ها، منجر به این شده است که محققان سیستم‌های جدیدی را برای بهبود پارامترهای لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دهند (Rahimi et al., 2024). در سال‌های اخیر انواع سیستم‌های

مهاربندهای کمانش تاب با مکانیسم‌های متنوع کنترل کمانش اعم از مهاربندهای کمانش تاب پر شده با بتن و یا مهاربندهای کمانش تاب تمام فولادی^۸ به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، هندسه‌های متفاوتی از مهاربندهای کمانش تاب به عنوان عضو مستهلک کننده انرژی در سیستم‌های لرزه‌ای ارائه شده است (Zhai et al., 2024).

وو و فیلیپس (Wu & Phillips, 2017) با استفاده از ویژگی مهاربندهای کمانش تاب، نوع جدیدی از میراگر را با استفاده از مکانیسم مودهای کمانشی ستون‌هایی کوتاه ارائه دادند که جایگزینی اقتصادی برای دستیابی به منحنی‌های چرخه‌ای پرچمی شکل با خاصیت مرکزگرایی است و قابلیت استفاده مجدد در طراحی‌های لرزه‌ای را نیز دارد. یکی از مشکلات قاب‌های دارای مهاربند، کمانش کلی و به تبع آن کاهش سختی و مقاومت آن است. ایسا و آلام (Issa & Alam, 2019) برای جلوگیری از این مشکل، میراگری جدید با نام (Spring-Based Piston Bracing) SBPB را ارائه دادند که با استفاده از پیستون و فنر ساخته شده است و با هزینه کم، به راحتی امکان ساخت و تعمیر دارد. هویدایی و همکاران (Hoveidae et al., 2015) با تغییر در طول المان کمانش کننده مهاربندهای کمانش تاب مرسوم، نوع جدیدی از این میراگرها را با نام (Short Core BRB) SCBRB ارائه دادند که در مقایسه با نمونه‌های مرسوم، طول کوتاه‌تر دارند که به تبع آن، عضو محصورکننده کوتاه‌تری دارند که منجر به کاهش نیروی اصطکاک می‌شود. علی‌رغم تحمل کرنش‌های محوری بیشتر نسبت به مهاربندهای مرسوم، ساخت و نصب آسان این میراگر یکی دیگر از مزیت‌های آن عنوان شده است.

اما با وجود ویژگی‌های مثبت میراگرهای کمانش تاب به واسطه جذب انرژی بالا و افزایش شکل‌پذیری به سیستم، وجود تغییر شکل‌های پسماند^۹ پس از وقوع زلزله یکی از نقاط ضعف آن است و امکان دسترسی و بازسازی مجدد سازه را صلب می‌کند (Zhu & Zhang, 2008). برای این منظور، استفاده از ابزارهایی مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی^{۱۰}، کابل‌های پیش‌تنیده و فنرهای

به صورت خاص کنترل غیرفعال، در دهه‌های گذشته به رسمیت شناخته شده و به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور افزایش میرایی الحاقی به سازه و کاهش اثرات مخرب ناشی از زلزله، سیستم‌های کنترل لرزه‌ای متعددی ارائه شده است. به طور گسترده، این سیستم‌ها را می‌توان به سیستم‌های کنترل غیرفعال، فعال^۳، نیمه‌فعال^۴ و ترکیبی^۵ تقسیم کرد (Aghani et al., 2024). سیستم‌های غیرفعال و به صورت خاص، میراگرهای فلزی^۶ به دلیل فرآیند ساخت آسان، رفتار چرخه‌ای پایدار، عدم وابستگی به نرخ بارگذاری، و توانایی مقاومت در طیف گسترده‌ای از حرارت، یکی از پرکاربردترین ابزار اتلاف انرژی هستند. بر اساس مکانیسم اتلاف انرژی، میراگرهای فلزی انواع مختلف دارند (Shang et al., 2024). میراگرهای فلزی را می‌توان بر اساس مکانیسم اتلاف انرژی به انواع برشی (Benavent-Climent et al., 2011)، خمشی (Garivani et al., 2016)، پیچشی (Maleki & Mahjoubi, 2013)، محوری (Dong et al., 2017) و ترکیبی (Oinam & Sahoo, 2015) تقسیم کرد.

یکی از مکانیسم‌های اتلاف انرژی در میراگرهای فلزی، مکانیسم محوری است که در قالب مهاربندهای کمانش تاب^۷ معرفی و تحقیقات متعددی بر روی آن انجام شده است. اولین تحقیقات صورت گرفته بر روی این نوع مهاربندها توسط کیمورا و همکاران انجام شده است که نشان دادند دستیابی به منحنی‌های پایدار چرخه‌ای در سیستم‌های مهاربندی با محصور کردن هسته مرکزی آن در یک غلاف امکان‌پذیر است. همچنین فوجیموتو و همکاران نیز با بررسی آزمایشگاهی نوع جدیدی از مهاربندهای دارای غلاف بر روی یک سازه واقعی، زمینه‌ساز مطالعات در زمینه مهاربندهای کمانش تاب شدند (Fujimoto et al., 1990). مهاربندهای کمانش تاب نوعی از سیستم‌های مهاربندی هستند که قابلیت مناسبی در جذب انرژی از طریق سیکل‌های چرخه‌ای پایدار در هر دو حالت فشار و کشش و ایجاد سختی جانبی زیاد برای سازه دارند و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در دهه‌های اخیر انواع

به‌عنوان بخشی از مهاربند قطری را دارد. مقاله حاضر بخشی از تحقیقات صورت گرفته در قالب رساله دکترا با موضوع «ارائه میراگر فولادی تسلیم شونده کمانشی برای کنترل رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن مسلح مهاربندی‌شده» است که بخشی از آن در قالب مقاله‌ای (Yazdani & Tasnimi, 2024) ارائه شده است. در ادامه به معرفی هندسه میراگر و نتایج به‌دست‌آمده از رفتار آن در اثر بارگذاری چرخه‌ای وارد شده پرداخته خواهد شد.

۲-۱- پیکربندی میراگر پیشنهادی

شکل (۱)، قسمت‌های تشکیل‌دهنده میراگر پیشنهادی و پیکربندی نهایی آن را نشان می‌دهد. هسته مرکزی این میراگر از یک المان دندان‌های شکل مطابق شکل (۱-الف) تشکیل شده است که هر کدام از این دندان‌ها در اثر اعمال نیروی وارد شده طبق مکانیسمی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، دچار کمانش خواهد شد. به‌منظور ایجاد تأخیر در هم‌زمانی وقوع مودهای کمانشی هر یک از این دندان‌ها، طول آنها متفاوت در نظر گرفته شده است. مقطع هر یک از این المان‌های دندان‌های، تسمه‌ای مستطیلی به ابعاد 20×8 میلی‌متر است که با سه طول متفاوت ۳۹۰، ۳۸۶ و ۳۸۲ میلی‌متر ساخته شده است. ۴ عدد از این المان‌های کمانش‌کننده مطابق شکل (۱-ب) در دو ارتفاع و در دو سمت صفحه میانی به ابعاد 500×400 میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر به‌وسیله اتصال جوشی، متصل می‌شوند. لازم به ذکر است که در هر سیکل، دو المان دندان‌های شکل وظیفه تحمل نیرو را خواهند داشت. میراگر پیشنهادی از طریق جابه‌جایی صفحه میانی و برخورد مقطع هر یک از المان‌های دندان‌های شکل به دو صفحه انتهایی که نقش تکیه‌گاه را دارند و با ایجاد مودهای کمانشی حول محور ضعیف، نیروی وارد شده را تحمل می‌کند. لازم به ذکر است که با توجه به هندسه پیشنهادی میراگر، المان‌های مستهلک‌کننده، انرژی ناشی از نیروی وارد شده را با استفاده از ظرفیت کمانشی (کمانش کنترل شده) مستهلک می‌کنند و از ظرفیت ناشی از تسلیم کششی آنها صرف‌نظر شده است.

پیش‌فشرده به‌عنوان سیستم‌های مرکزگرا کننده^{۱۱} در میراگرهای پیشنهادی توسعه داده شد تا تغییر شکل‌های پسماند سازه کاهش داده شود (Christopoulos et al., 2008). دونگ و همکاران (Dong et al., 2017) سیستم جدیدی را برای مهاربند‌های کمانش‌تاب با استفاده از فنر به‌عنوان المان تأمین‌کننده مرکزگرایی ارائه دادند. نتایج آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی در مقایسه با مهاربند‌های کمانش‌تاب مرسوم نشان‌دهنده منحنی‌های چرخه‌ای پرچمی شکل^{۱۲} با تغییر شکل پسماند ناچیز به همراه ظرفیت جذب انرژی قابل قبول بوده است. میلر و همکاران (Miller et al., 2011) با اضافه کردن کابل‌های SMA به مهاربند‌های کمانش‌تاب معمولی، رفتار آن را در کاهش تغییر شکل‌های پسماند بهبود بخشیدند.

در این مقاله، با استفاده از مطالعات انجام شده پیشین، نوع جدیدی از مهاربند کمانش‌تاب ارائه شده است که رفتار متفاوتی نسبت به میراگرهای کمانش‌تاب مرسوم در سیکل‌های بارگذاری دارد. همچنین در این میراگر از فنر به‌عنوان المان تأمین‌کننده مرکزگرایی برای کاهش جابه‌جایی‌های پسماند سیستم استفاده شده است. ویژگی‌هایی مانند ساخت آسان، وزن کم، استفاده از ظرفیت کمانشی در هر سیکل (رفت و برگشت) و حذف جابه‌جایی پسماند از جمله نکات مثبت این میراگر محسوب می‌شود که در ادامه به ارائه جزئیات و بررسی رفتار آن اشاره می‌شود.

۲- توسعه مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا

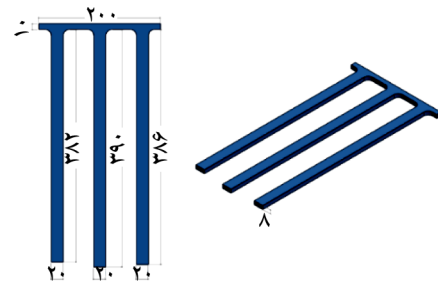
همان‌طور که اشاره شد، میراگر پیشنهادی نوع جدیدی از میراگرهای کمانش‌تاب است که با استفاده از ظرفیت کمانشی در هر سیکل، باعث مستهلک شدن انرژی ورودی می‌شود. همچنین میراگر پیشنهادی با کاهش طول هسته مرکزی و افزایش تعداد المان‌های کمانش‌کننده، نوع جدیدی از هندسه را با هدف ایجاد رفتار پله‌ای در نمودار پاسخ ارائه داده است. در این میراگر، فنر وظیفه حذف جابه‌جایی‌های پسماند سیستم را بر عهده دارد. لازم به ذکر است که این میراگر قابلیت استفاده به‌عنوان سیستم باربر جانبی در تمامی سازه‌های بتنی و فولادی

اما یکی از ملزومات سیستم‌های کمانش‌تاب، استفاده از غلاف برای کنترل کمانش با هدف ایجاد مودهای کمانشی بالاتر است. برای این منظور، در دو طرف هر یک از دندانه‌های المان مستهلک کننده انرژی، از تسمه‌هایی به ابعاد مقطع 30×20 میلی‌متر و طول 830 میلی‌متر استفاده شده است که با عبور از شیارهای تعبیه شده در صفحه میانی، در دو طرف دندانه‌ها قرار می‌گیرند و باعث کنترل کمانش آنها می‌شوند. این تسمه‌ها در دو انتهای خود با استفاده از پیچ‌های پر مقاومت $12/9$ به قطر 10 میلی‌متر و بدون ایجاد پیش‌تیدگی در هنگام بستن، به صفحه‌های انتهایی (صفحه‌های تکیه‌گاه) متصل می‌شوند. همچنین از 6 عدد فنر موازی در هر طرف صفحه میانی با سختی معادل 2316 نیوتن بر میلی‌متر استفاده شده است. شکل (۱-پ) نحوه قرارگیری تسمه‌های کنترل کننده کمانش، فنرها و اتصال آنها به صفحه‌های تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد.

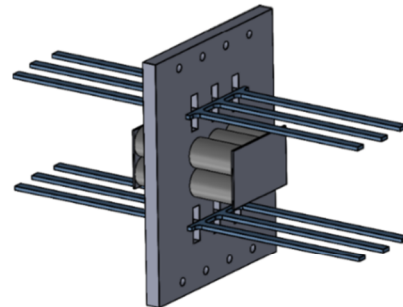
برای جلوگیری از تغییرشکل جانبی تسمه‌های محصورکننده، از 48 عدد بست استفاده شده است که هر یک از این بست‌ها در فواصل 50 و 200 میلی‌متری از دو انتهای المان محصورکننده به وسیله پیچ‌های پر مقاومت $12/9$ به قطر 8 میلی‌متر به هم متصل می‌شوند. شکل (۱-ت) نحوه اتصال بست‌ها و شکل (۱-ث) شکل شماتیک میراگر پیشنهادی را پس از آماده‌سازی نشان می‌دهد. همچنین از یک لایه نازک از گریس به منظور جلوگیری از اصطکاک بین صفحات بر روی سطح میراگر استفاده شده است.

۳- بررسی عددی

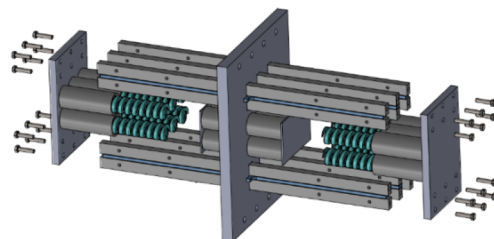
میراگر پیشنهادی علی‌رغم هندسه جدیدی که ارائه داده است، به‌عنوان نوعی مهاربند کمانش‌تاب شناخته می‌شود. به‌منظور تأمین شرایط لازم برای شکل‌گیری مودهای کمانشی بالاتر در هسته مرکزی مهاربندهای کمانش‌تاب، از غلاف‌های تماماً فولادی، بتنی و یا ترکیبی از فولاد و بتن استفاده می‌شود تا از ظرفیت کمانشی آن به‌خوبی استفاده شود. میراگر پیشنهادی نوعی مهاربند کمانش‌تاب تمام فولادی است که در هر سیکل،



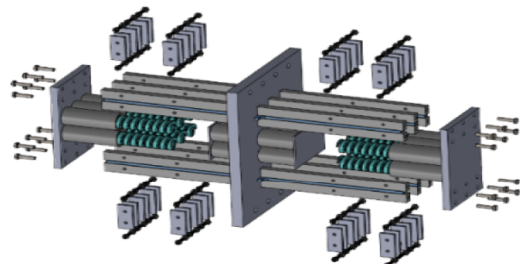
(الف) المان دندانه‌ای شکل (میراگر)



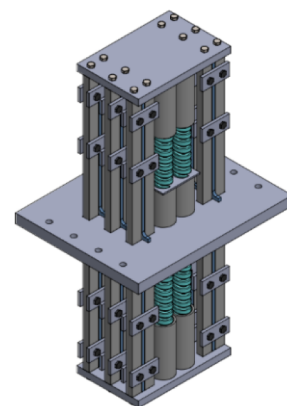
(ب) صفحه میانی



(پ) اتصال صفحه میانی، تسمه‌های محصورکننده، فنرها و صفحه‌های انتهایی



(ت) سرهم‌بندی سخت‌کننده‌ها



(ث) شکل شماتیک میراگر پیشنهادی

شکل (۱): پیکربندی میراگر پیشنهادی.

برخورد می‌کند. لازم به ذکر است که فاصله δ می‌تواند به نحوی در نظر گرفته شود که هر یک از تسمه‌ها، تسلیم را پیش و یا پس از کمانش تجربه کنند.

در این مرحله، با افزایش نیروی وارد شده، مود بعدی کمانش در هر یک از تسمه‌ها به وقوع می‌پیوندد. این روند تا پایان نیروی اعمال شده و شکل‌گیری سایر مودهای کمانشی در طول تسمه و وقوع خرابی‌های گسترده در طول آن ادامه پیدا می‌کند. لذا از آنجایی که هر یک از تسمه‌های کمانش‌کننده المان میراگر، تسلیم سراسری را در طول خود تجربه می‌کنند، ظرفیت اسمی میراگر پیشنهادی بر اساس توضیحات ارائه شده و مطابق رابطه (۳) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$P_n = P_{y_{sc}} + P_{Spring} = \sum F_{y_{sc}}^i A_{sc}^i + K_{eq} \Delta_{max} \quad (4)$$

۴- بررسی آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ای میراگر پیشنهادی

برای تعیین ظرفیت و دستیابی به منحنی رفتار چرخه‌ای میراگر پیشنهادی، آزمایشی بر روی نمونه تمام‌مقیاس آن انجام شده است که در ادامه به بررسی نتایج آن پرداخته خواهد شد.

۴-۱- برپایی نمونه آزمایشگاهی

بر اساس ابعاد و مشخصات هندسی که در بخش ۲-۱ از پیکربندی میراگر پیشنهادی اشاره شد، المان‌های مختلف ساخته شدند. شکل (۲-الف) اجزای تشکیل‌دهنده میراگر را نشان می‌دهد. کوتاه بودن طول میراگر و همچنین استفاده از اتصالات پیچی در پیکربندی آن، ساخت میراگر و بررسی آن پس از وقوع هر زلزله را آسان کرده است. بر اساس آنچه قبلاً به آن اشاره شد، مطابق شکل (۲-ب)، ابتدا المان‌های دندان‌های شکل به دو طرف صفحه میانی و در دو ارتفاع به آن جوش می‌شوند. سپس، بعد از عبور تسمه‌های کنترل‌کننده کمانش از شیارهای تعبیه شده، صفحه‌های انتهایی به همراه فنر در دو انتها قرار می‌گیرند و به وسیله پیچ‌های پر مقاومت ۱۲/۹ به قطر ۱۰ میلی‌متر به مقطع تسمه‌ها متصل می‌شوند. شکل (۲-پ) پیکربندی نهایی میراگر پیشنهادی را نشان می‌دهد.

هسته مرکزی آن به صورت فشاری عمل می‌کند. اعضای اصلی این میراگر شامل هسته مرکزی و المان محصورکننده کمانش است. هسته مرکزی این سیستم برای تحمل نیروی محوری و غلاف یا تسمه‌های محصورکننده آن برای تحمل نیروی جانبی ناشی از فشار تسمه‌های کمانش‌کننده طراحی می‌شوند. وجود المان‌های محصورکننده باعث می‌شود تا هسته مرکزی میراگر، تسلیم کامل را در مقطع خود تجربه کند. آیین‌نامه AISC (ANSI/AISC341-22, 2022) رابطه (۱) را برای ظرفیت مورد نیاز یک مهاربند کمانش‌تاب بر اساس تسلیم در هسته مرکزی پیشنهاد داده است:

$$P_{yc} = F_{y_{sc}} A_{sc} \quad (1)$$

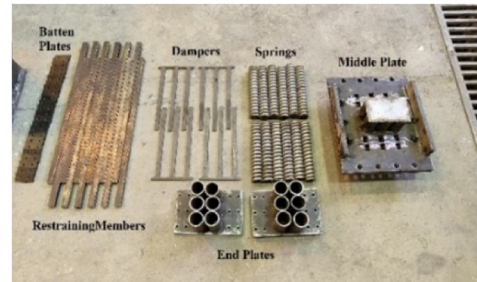
اما حداکثر مقاومت فشاری مهاربند کمانش‌تاب بیشتر از مقاومت مورد نیاز ارائه شده در رابطه (۱) است. تأثیر اضافه مقاومت مصالح^{۱۳}، سخت‌شوندگی کرنشی^{۱۴} و اصطکاک بین سطح میراگر و المان محصورکننده باید در فرمول ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC لحاظ شود (Wu et al., 2014; Piedrafita et al., 2015; Pandikkadavath & Sahoo, 2016; (ANSI/AISC341-22, 2022):

$$P_{max} = \beta \omega F_{y_{sc}} A_{sc} \quad (2)$$

در تحقیقات دیگری، محققان رابطه (۳) را با در نظر گرفتن اثرات المان مرکزگراکننده ارائه دادند (Miller et al., 2012; Ghowsi et al., 2019):

$$\phi P_n = \phi (P_{yc} + P_{sc}) = 0.9 (F_{y_{sc}} A_{sc} + P_{sc}) \quad (3)$$

طراحی میراگر پیشنهادی بر اساس تئوری کمانش و مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی برای کمانش خمشی اعضای فشاری انجام می‌شود (ANSI/AISC360-22, 2022). در ابتدا، هر یک از تسمه‌های کمانش‌کننده المان میراگر با پیروی از تئوری اویلر ۱۵ برای کمانش ستون‌ها تحت شرایط تکیه‌گاهی دو طرف گیردار، در برابر نیروی وارد شده مقاومت می‌کنند. سپس، سطح جانبی هر یک از این تسمه‌ها پس از تحمل حداکثر جابه‌جایی جانبی δ در محدوده میانی طولشان، به سطح المان محصورکننده



(الف) المان‌های تشکیل دهنده (ب) اتصال میراگر به صفحه میانی (پ) اتصال صفحه انتهایی به المان‌های محصور کننده

شکل (۲): ساخت میراگر پیشنهادی.

جدول (۱): ابعاد اجزای تشکیل دهنده میراگر پیشنهادی (اندازه‌ها به میلی‌متر).

نام المان	طول	ارتفاع	عرض	ضخامت
میراگر	متغیر (۳۸۲، ۳۸۶، ۳۹۰)	-	۲۰	۸
صفحه میانی	-	۵۰۰	۴۰۰	۳۰
صفحه انتهایی	-	۳۰۰	۲۰۰	۲۰
محصور کننده	۸۳۰	۳۰	۲۰	-
سخت کننده	-	۸۷	۴۰	۸

۱۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. شکل (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب تصویر پیکربندی آزمایش و شکل شماتیک آن را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۳-الف)، بارگذاری به صورت افقی به میراگر اعمال شده است. در این شکل، پیکربندی آزمایش شامل کف قوی^{۱۶}، قاب‌های تکیه‌گاهی^{۱۷}، جک دینامیکی و مهار جانبی (تکیه‌گاه غلتکی) نشان داده شده است. مهار جانبی به منظور جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه میراگر پیشنهادی در اثر بار وارده در نظر گرفته شده است. همچنین برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نسبی میراگر و تکیه‌گاه، از سه عدد LVDT استفاده شده است. یک انتهای میراگر به وسیله یک صفحه انتقال و با استفاده از شش عدد پیچ پرمقاومت ۱۲/۹ به قطر ۱۴ میلی‌متر به قاب تکیه‌گاهی و انتهای دیگر آن به وسیله چهار عدد پیچ پرمقاومت ۱۲/۹ به قطر ۲۷ میلی‌متر به جک دینامیکی متصل شده است.

به منظور بهره‌مندی از ظرفیت تسمه‌های کمانش کننده در مودهای بالاتر، فاصله‌ای به میزان ۱/۵ میلی‌متر بین سطح المان‌های دندانه‌ای شکل و محصور کننده‌ها در نظر گرفته شده است. زمانی که نیروی محوری به صفحه میانی اعمال می‌شود، دو تسمه از المان دندانه‌ای شکل به طول ۳۹۰ میلی‌متر به ورق انتهایی برخورد می‌کنند و با تحمل تغییر شکل‌های کمانشی، در برابر نیروی وارد شده مقاومت می‌کنند. با افزایش نیرو، سایر تسمه‌های المان دندانه‌ای شکل دچار کمانش می‌شوند.

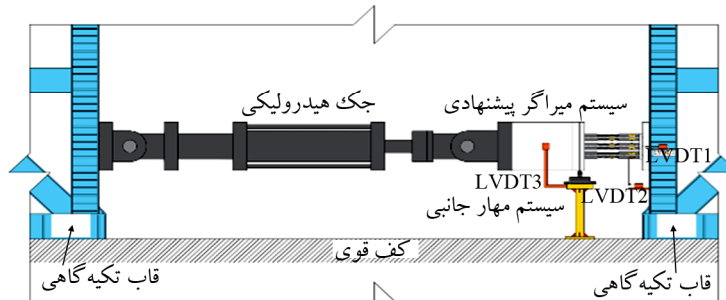
طول کلی میراگر پیشنهادی برابر ۸۷۰ میلی‌متر است. ابعاد اجزای تشکیل دهنده میراگر پیشنهادی در جدول (۱) نشان داده شده است.

۲-۴- پیکربندی آزمایش و پروتکل بارگذاری

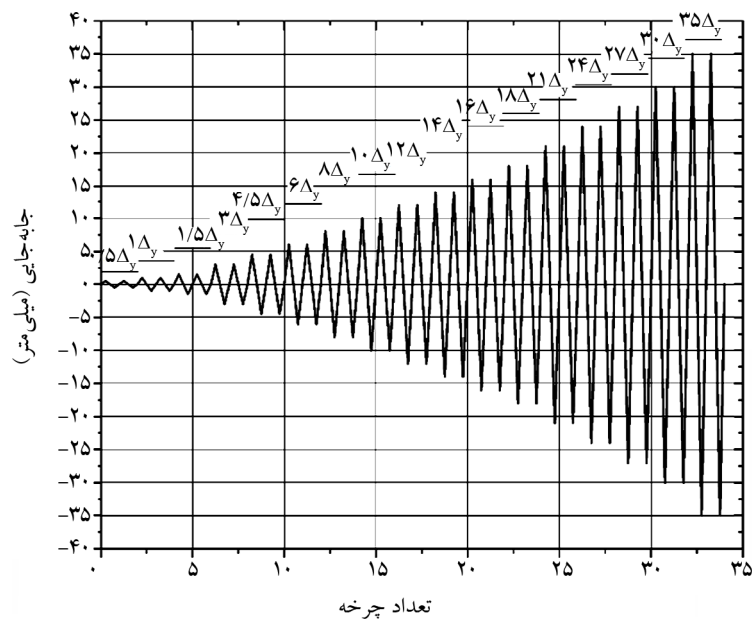
به منظور ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی، از جک دینامیکی آزمایشگاه سازه دانشگاه تربیت مدرس به ظرفیت



(الف) تصویر پیکربندی آزمایش



(ب) شکل شماتیک پیکربندی آزمایش



(پ) پروتکل بارگذاری

شکل (۳): پیکربندی آزمایش و پروتکل بارگذاری.

پروتکل بارگذاری وارد شده به میراگر پیشنهادی را نشان می‌دهد که با فرکانس 0.02 هرتز به آن اعمال شده است.

۳-۴- مشخصات مکانیکی مصالح

برای تعیین مشخصات مکانیکی ورق‌های استفاده شده در

برای تعیین منحنی بار-تغییر مکان میراگر پیشنهادی، بارگذاری چرخه‌ای با افزایش تدریجی جابه‌جایی محوری تحت شرایط جابه‌جایی کنترل مطابق دستورالعمل ATC-24 (ATC, 1992) به آن اعمال شده است. این دستورالعمل، برای ارزیابی لرزه‌ای المان‌های سازه‌های فولادی استفاده می‌شود. شکل (۳-پ)،

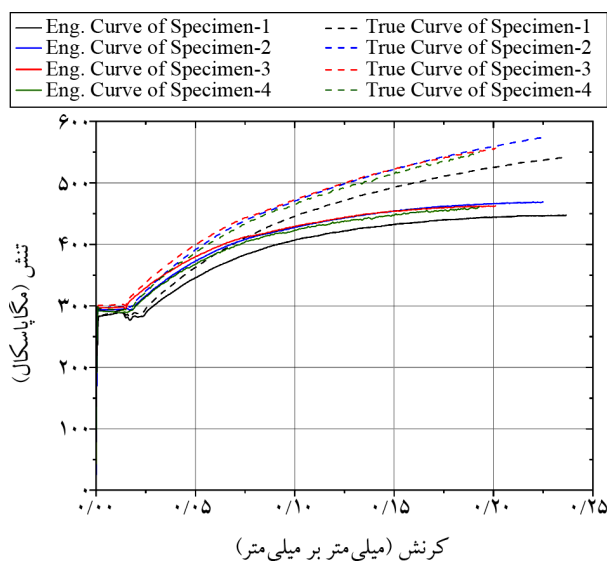
حوالی تنش مهندسی بیشینه، ناحیه گلوبی ایجاد می‌شود. با افزایش میزان جابه‌جایی، سرانجام نمونه در نقطه تنش شکست دچار شکست می‌شود. از آنجایی که منحنی تنش-کرنش مهندسی بر مبنای ابعاد اولیه ماده است که در طول آزمایش ثابت بوده و تأثیر تغییر ابعاد نمونه در آن لحاظ نشده است، لذا نمی‌توان شاخص مناسبی برای نمایش ماهیت حقیقی ماده باشد. به دلیل این‌که فولاد نرمه با افزایش بارگذاری ماهیتی سخت‌شونده دارد، لذا میزان تنش حقیقی با افزایش کرنش همواره افزایش می‌یابد. منحنی تنش-کرنش حقیقی به دلیل این‌که نشان‌دهنده مشخصه جریان خمیری در ماده است، منحنی جریان^{۲۰} نیز نامیده می‌شود. تنش حقیقی^{۲۱} (σ_T) و کرنش حقیقی^{۲۲} (ϵ_T)، بر مبنای تنش و کرنش مهندسی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_T = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} \stackrel{AL=A_0L_0}{\rightarrow} \sigma_T = \frac{P}{A_0} \frac{L}{L_0} = \quad (6)$$

$$\sigma_E \frac{L}{L_0} = \sigma_E \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \sigma_E (1 + \epsilon_E)$$

$$\epsilon_T = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \ln (1 + \epsilon_E) \quad (7)$$

شکل (۴) نمودار تنش-کرنش مهندسی را بر اساس خروجی‌های آزمایش و نمودار تنش-کرنش حقیقی را با استفاده از روابط (۶) و (۷) برای نمونه‌های کششی نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش حقیقی و مهندسی ورق فولادی.

میراگر به عنوان المان مستهلک کننده انرژی، چهار نمونه دمبلی شکل برای تست کششی مطابق استاندارد ASTM E8/E8M (ASTM, 2009) ساخته و با استفاده از دستگاه تست یونیورسال آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه تربیت مدرس با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن تست شدند.

منحنی تنش-کرنش مهندسی بر اساس مقادیر بار و جابه‌جایی به دست آمده از آزمایش کشش تک‌محوری بر روی ورق‌های فولادی محاسبه و ترسیم می‌شود. تنش مهندسی^{۱۸} σ_E ، تنش محوری متوسطی است که از تقسیم نیرو در طول زمان بارگذاری بر مساحت اولیه نمونه به دست می‌آید و کرنش مهندسی^{۱۹} ϵ_E ، کرنش میانگین خطی است و از تقسیم میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بر طول اولیه نمونه حاصل می‌شود.

متغیرهایی که برای توصیف منحنی تنش-کرنش مهندسی استفاده می‌شوند شامل مدول ارتجاعی، تنش تسلیم، درصد افزایش طول و میزان کاهش مساحت هستند. در محدوده ارتجاعی، تنش به صورت خطی با کرنش تغییر می‌کند. پس از وقوع تسلیم در نمونه، خاصیت ارتجاعی مصالح به صورت غیرخطی ادامه پیدا می‌کند و به مرور، تغییر شکل‌های ماندگار و خمیری در مصالح ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه جنس نمونه تحت آزمایش، فلز توپر است، طبق قانون جریان وابسته خمیری حجم نمونه در حین تغییر شکل‌های ماندگار و خمیری ثابت باقی می‌ماند و در نتیجه مطابق رابطه ۵، با افزایش طول در فاصله بین دو نقطه اندازه‌گیری، سطح مقطع نمونه به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.

$$V = V_0 \rightarrow AL = A_0L_0 = \text{constant} \quad (5)$$

در ابتدا سرعت رشد پدیده کرنش سختی بیشتر از سرعت کاهش سطح مقطع نمونه است و در نتیجه میزان تنش با افزایش کرنش، سیری صعودی دارد. شیب منحنی که معرف این رشد تنش است، با کاهش سطح مقطع کاهش می‌یابد تا سرانجام شیب منحنی تنش-کرنش در نقطه تنش مهندسی بیشینه (مقاومت نهایی) به صفر می‌رسد. تا این نقطه، کاهش سطح مقطع به صورت یکنواخت است، اما پس از این نقطه با افزایش سرعت کاهش سطح مقطع در نمونه و ایجاد ناپایداری در نمونه در

میراگر پیشنهادی به علت شکل‌گیری مودهای کماتشی بالا در المان‌های دندانه‌ای شکل، ظرفیت شکل‌پذیری مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین به علت وجود فنر در سیستم پیشنهادی، منحنی حاصل به صورت پرچمی شکل به دست آمده است که نشان‌دهنده خاصیت مرکزگرایی در سیستم است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، وجود تسمه با طول‌های متفاوت و به تبع آن تأخیر در شکل‌گیری مودهای کماتشی، باعث ایجاد شکل پلکانی در منحنی رفتاری آن شده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش، میراگر پیشنهادی رفتار چرخه‌ای مقارنی را در هر یک از بارگذاری‌های رفت و برگشت از خود نشان داده است. بیشینه نیرویی که میراگر در هر بارگذاری رفت و برگشت تحمل کرده است به ترتیب برابر

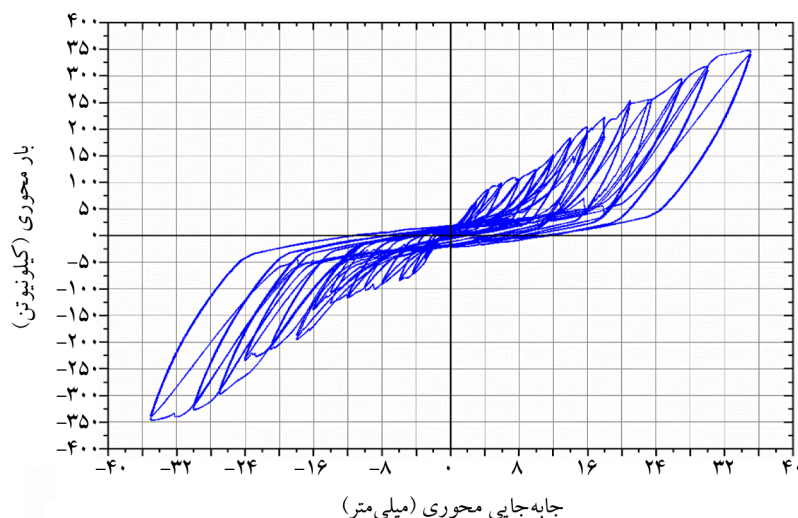
بر اساس نتایج، میانگین تنش تسلیم حقیقی $289/4$ مگاپاسکال، میانگین تنش نهایی حقیقی $555/6$ مگاپاسکال، میانگین مدول یانگ $200/4$ گیگاپاسکال و میانگین کرنش حقیقی نظیر گسیختگی $19/4$ درصد بوده است. جدول (۲)، خلاصه نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش کشش ورق‌های فولادی را نشان می‌دهد.

۴-۵- بررسی نتایج آزمایش بارگذاری چرخه‌ای بر روی میراگر

شکل (۵) منحنی چرخه‌ای بار محوری در برابر تغییر مکان محوری میراگر پیشنهادی را تحت پروتکل بارگذاری شکل (۳-پ) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

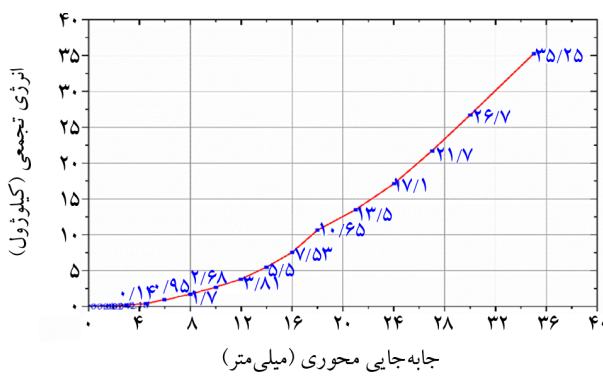
جدول (۲): نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش کششی

شماره نمونه	F_u (MPA)	F_y (MPA)	E (GPA)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)
۱	۴۴۷/۳	۲۸۲/۸	۲۰۰/۲	۰/۱۱	۲۳/۶
۲	۵۴۲/۳	۲۸۲/۸	۲۰۰/۲	۰/۱۱	۲۱/۲
۳	۴۶۹	۲۹۰	۲۰۰/۶	۰/۱۴۶	۲۲/۵
۴	۵۷۴/۵	۲۹۰	۲۰۰/۶	۰/۱۴۶	۲۰/۳
۵	۴۶۲/۶	۲۹۱	۲۰۰/۳	۰/۱۴۷	۲۰/۲
۶	۵۵۶/۲	۲۹۱	۲۰۰/۳	۰/۱۴۷	۱۸/۴
۷	۴۶۰/۸	۲۹۳/۸	۲۰۰/۶	۰/۱۴۱	۱۹/۳
۸	۵۴۹/۷	۲۹۳/۸	۲۰۰/۶	۰/۱۴۱	۱۷/۶

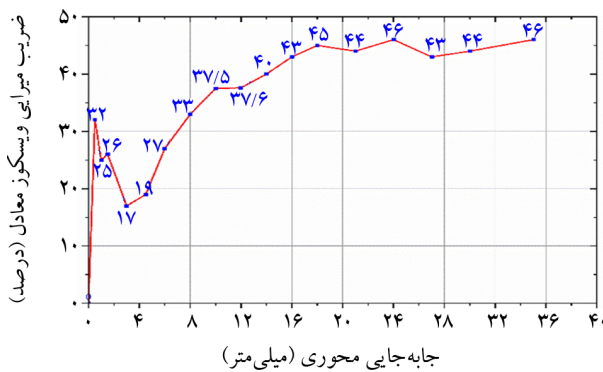


شکل (۵): منحنی بار-تغییر مکان میراگر پیشنهادی.

پیشنهادی می‌تواند شرایط را برای شکل‌گیری مودهای کمانشی بالاتر حول این محور فراهم کند و منجر به بهبود هرچه بهتر عملکرد آن شود. لازم به ذکر است که در انتهای آزمایش، مودهای خرابی تنها در المان‌های مستهلک کننده انرژی ایجاد شد و سایر بخش‌های میراگر بدون تجربه کردن تغییر شکل، در حالت الاستیک باقی ماند. یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای المان‌های جاذب انرژی، میزان انرژی مستهلک شده توسط این ابزار حین اعمال بارگذاری‌های چرخه‌ای است. میزان انرژی مستهلک شده از جمع مساحت زیر نمودارهای هر سیکل بارگذاری حاصل می‌شود. مقدار انرژی جذب شده توسط میراگر پیشنهادی برابر $35/25$ کیلوژول بوده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب این میراگر در جذب انرژی است. شکل (۷-الف) نمودار تغییرات انرژی جذب شده تجمعی^{۲۳} را به ازای هر گام بارگذاری نشان می‌دهد. شیب نمودار جذب انرژی در جابه‌جایی‌های بالاتر با شکل‌گیری مودهای کمانش در هر یک از تسمه‌های کمانش کننده، رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند.



(الف) میزان انرژی مستهلک شده تجمعی



(ب) ضریب میرایی و بسکوز معادل

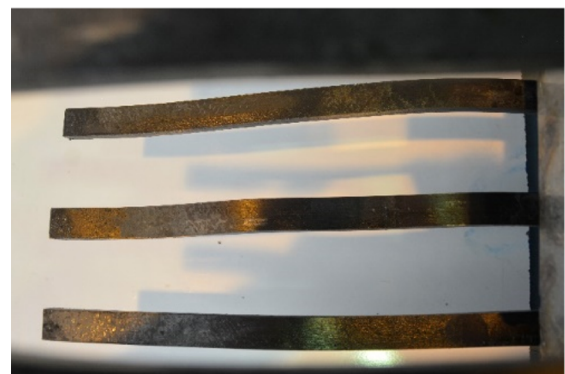
شکل (۷): مشخصات لرزه‌ای میراگر پیشنهادی.

$348/6 +$ و $347/6 -$ کیلونیوتن بوده است. همچنین اگرچه میراگر پیشنهادی بیشینه جابه‌جایی محوری 35 میلی‌متر را در هر سیکل تجربه کرده است، اما وجود فنر به‌عنوان المان مرکزگرا کننده باعث شده است تا در هر سیکل میزان تغییر شکل پسماند به ترتیب به میزان $68/8$ و $67/4$ درصد نسبت به جابه‌جایی بیشینه کاهش پیدا کرده و جابه‌جایی‌های محوری برابر $10/9 +$ و $11/4 -$ میلی‌متر را در انتهای بارگذاری تجربه کند.

شکل (۶)، شکل تغییر شکل یافته المان‌های دندانه‌ای شکل را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، تسمه با بیشترین طول، تعداد مودهای کمانشی بیشتری را تجربه کرده است. همان‌طور که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است، بیشترین مود خرابی مطابق انتظار حول محور ضعیف مقطع ایجاد شده است. با این حال، با افزایش نیروی وارد شده، مطابق شکل (۶-ب) مودهای کمانشی حول محور قوی نیز تشکیل شده است. اگرچه به لحاظ محدودیت‌های ظرفیت جک بارگذاری عرض تسمه‌ها کم در نظر گرفته شده است، اما کنترل کمانش حول محور قوی در میراگر



(الف) کمانش حول محور ضعیف



(ب) کمانش حول محور قوی

شکل (۶): مودهای خرابی المان‌های دندانه‌ای شکل.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش بر روی بررسی رفتار میراگر کمانش‌تاب جدیدی متمرکز شده است که با ایجاد تغییراتی در سیستم مرسوم، از المان‌های دندان‌های شکل با طول‌های متفاوت برای ایجاد تأخیر در شکل‌گیری مودهای کمانشی استفاده کرده است. همچنین برای حذف جابه‌جایی‌های پسماند سیستم که یکی از مشکلات ابزارهای استهلاک انرژی است، از فنر به‌عنوان المان تأمین‌کننده مرکزگرایی استفاده شده است. برای تعیین عملکرد سیستم پیشنهادی، از دستگاه جک دینامیکی آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه تربیت مدرس با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن به‌صورت بارگذاری شبه‌استاتیکی رفت و برگشتی استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از بارگذاری چرخه‌ای، نتایج زیر به‌صورت خلاصه ارائه می‌شود:

۱. میراگر پیشنهادی نیروی محوری $348/6$ کیلونیوتن و $347/6$ کیلونیوتن را در هر سیکل تحمل کرده است. علی‌رغم ظرفیت مناسب میراگر پیشنهادی، از آنجایی که عرض مقطع المان‌های کمانش‌کننده نسبت مستقیم با ظرفیت سیستم دارد، لذا افزایش عرض مقطع این تسمه‌ها منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت نیرویی سیستم می‌شود؛ بنابراین، به لحاظ اجرایی و در صورت تأمین پایداری و تضمین الاستیک باقی ماندن سایر بخش‌های سیستم، محدودیتی بابت تغییر عرض تسمه‌ها وجود ندارد.
۲. حداکثر جابه‌جایی سیستم در بارگذاری‌های رفت و برگشت برابر ۳۵ میلی‌متر بوده است که نشان می‌دهد سیستم پیشنهادی به لحاظ ظرفیت تغییرشکلی نیز رفتار مناسبی داشته است.
۳. میزان انرژی جذب شده سیستم ناشی از شکل‌گیری مودهای کمانشی در المان‌های کمانش‌کننده در حدود $35/25$ کیلوژول بوده است که نشان‌دهنده ظرفیت مناسب سیستم در جذب انرژی وارد شده در مقایسه با سیستم‌های مشابه است که در آن از المان‌های تأمین‌کننده مرکزگرایی استفاده شده است. لازم به ذکر است که بر اساس آنچه در بند ۱ به آن اشاره شد،

یکی دیگر از پارامترهای تعیین‌کننده کارایی رفتار لرزه‌ای سیستم‌های استهلاک انرژی، ضریب میرایی ویسکوز معادل^{۲۴} است.

این ضریب با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود که توسط آیین‌نامه FEMA356 (FEMA, 2000) ارائه شده است.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{\pi (F_{max}^+ d_{max}^+ + F_{max}^- d_{max}^-)} \quad (8)$$

ضریب میرایی ویسکوز معادل میراگر پیشنهادی تقریباً برابر ۴۶ درصد بوده است. شکل (۷-ب) نمودار تغییرات ضریب میرایی ویسکوز معادل را در گام‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد.

جدول (۳)، میزان انرژی مستهلک شده و ضریب میرایی ویسکوز معادل را در هر سیکل بارگذاری به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول (۳): میزان انرژی مستهلک شده و ضریب میرایی ویسکوز معادل میراگر پیشنهادی در هر سیکل بارگذاری.

جابه‌جایی (میلی‌متر)	E_D (کیلوژول)	ξ_{eq} (درصد)
۰/۵	۰/۰۰۷	۰/۳۲
۱	۰/۰۲	۰/۲۵
۱/۵	۰/۰۴۲	۰/۲۶
۳	۰/۱۸	۰/۱۷
۴/۵	۰/۴	۰/۱۹
۶	۰/۹۵	۰/۲۷
۸	۱/۷	۰/۳۳
۱۰	۲/۶۸	۰/۳۷
۱۲	۳/۸۱	۰/۳۷
۱۴	۵/۵	۰/۴
۱۶	۷/۵۳	۰/۴۳
۱۸	۱۰/۶۵	۰/۴۵
۲۱	۱۳/۵	۰/۴۴
۲۴	۱۷/۱	۰/۴۶
۲۷	۲۱/۷	۰/۴۳
۳۰	۲۶/۷	۰/۴۴
۳۵	۳۵/۲۵	۰/۴۶

References

مراجع

- Aghani, H., Cheraghi, K., & Bakhshipour, M. (2024). Numerical investigation of the effect of aluminum yielding damper for the retrofitting of semi-rigid steel frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(2), 349-357.
- ASTM (2009). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM E8/E8M-09.
- AISC (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC 341-22. An American National Standard. American Institute of Steel Construction.
- AISC (2022). *Specification for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC 360-22. An American National Standard. American Institute of Steel Construction.
- ATC (1992). *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*. Applied Technology Council.
- Benavent-Climent, A., Morillas, L., & Vico, J.M. (2011). A study on using wide-flange section web under out-of-plane flexure for passive energy dissipation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(5), 473-490.
- Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.-J., & Lacerte, M. (2008). Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 96-107.
- Dong, H., Du, X., Han, Q., Hao, H., Bi, K., & Wang, X. (2017). Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers. *Engineering Structures*, 148, 47-62.
- Federal Emergency Management (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA356, Washington, D.C.
- Fujimoto, M., Wada, A., & Saeki, E. (1990). Development of unbonded brace. *Quarterly Column*, 115, 91-96.
- Garivani, S., Aghakouchak, A., & Shahbeyk, S. (2016). Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures*, 16, 177-196.
- Ghowsi, A.F., Faqiri, A., & Sahoo, D.R. (2019).

- با افزایش عرض مقطع تسمه‌های کمانش کننده بر اساس ظرفیت سیستم، انرژی جذب شده نیز افزایش پیدا می‌کند.
۴. علی‌رغم حذف بخش زیادی از نمودار پاسخ و کاهش میزان جذب انرژی سیستم به دلیل وجود المان‌های تأمین کننده خاصیت مرکز گرایی در مقایسه با سیستم‌های مهاربند کمانش تاب مرسوم، وجود این المان‌ها منجر به حذف جابه‌جایی پسماند به میزان ۶۸/۸ و ۶۷/۴ درصد در هر یک از گام‌های رفت و برگشت نسبت به حداکثر جابه‌جایی سیستم شده است.
۵. یکی از مشخصه‌های اصلی سیستم‌های مستهلک کننده انرژی در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای آنها، پارامتر ضریب میرایی ویسکوز معادل سیستم است. بر اساس ضوابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها برای محاسبه این پارامتر، مقدار آن برای سیستم پیشنهادی در حدود ۴۶ درصد بوده است.
۶. میراگر پیشنهادی در طول هر یک از تسمه‌های کمانش کننده خود، مودهای بالای کمانشی را تجربه کرده است. این نشان می‌دهد که وجود غلاف‌های محصورکننده اطراف این تسمه‌ها به خوبی باعث کنترل کمانش شده است که این امر موجب استفاده از حداکثر ظرفیت سیستم شده است.
- با توجه به مطالب بیان شده، میراگر پیشنهادی به‌عنوان سیستم مستهلک کننده انرژی با توجه به ویژگی‌های مثبت آن تا این مرحله از تحقیقات صورت گرفته نتایج مطلوبی را از خود نشان داده است و تحقیقات تکمیلی بر روی آن در حال انجام است. ویژگی‌هایی از جمله ساخت آسان، وزن کم، استفاده از ظرفیت کمانشی در هر سیکل (رفت و برگشت) و حذف جابه‌جایی‌های پسماند از جمله نکات مثبت این میراگر محسوب می‌شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و همچنین از کلیه عوامل و پرسنل آزمایشگاه مهندسی سازه و زلزله این دانشگاه به‌واسطه حمایت‌های مادی و معنوی خود در پیشبرد این پژوهش قدردانی نمایند.

68(1), 314-324.

Shang, C., Zhou, Y., Shi, F., Li, J., & Jiang, K. (2024). Investigation on mechanical behavior of shear panel damper under bidirectional loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 216, 108580.

Wu, A.C., Lin, P.C., & Tsai, K.C. (2014). High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(3), 375-393.

Wu, J., & Phillips, B.M. (2017). Passive self-centering hysteretic damping brace based on the elastic buckling mode jump mechanism of a capped column. *Engineering Structures*, 134, 276-288.

Yazdani, M., Tasnimi, A.A., (2024). Investigating the cyclic behavior of the new self-centering buckling restrained brace. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE9)*, Tehran, Iran (in Persian).

Zhai, Z., Liu, Y., Mercan, O., Zou, S., & Zhou, F. (2024). A hybrid buckling-restrained brace for enhancing the seismic performance of steel moment resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108464.

Zhu, S., & Zhang, Y. (2008). Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 121-131.

واژه‌نامه

Passive Control	۱- کنترل غیرفعال
Energy Dissipator	۲- مستهلک کننده انرژی
Active Control	۳- کنترل فعال
Semi-Active Control	۴- کنترل نیمه فعال
Hybrid Control	۵- کنترل ترکیبی
Metallic Damper	۶- میراگر فلزی
Buckling Restrained Brace (BRB)	۷- مهاربند کمانش تاب
All-Steel BRB	۸- مهاربند کمانش تاب تمام فولادی
Residual Deformation	۹- تغییر شکل پسماند
Shape Memory Alloy (SMA)	۱۰- آلیاژهای حافظه دار شکلی
Self-Centering System	۱۱- سیستم مرکزگرا کننده

'Numerical Study on Cyclic Response of Self-Centering Steel Buckling-Restrained Braces'. In: Rao, A., Ramanjaneyulu, K., (eds) Recent Advances in Structural Engineering, Vol 1. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 11.

Grossi, E., Aprile, A., Zerbin, M., & Livieri, P. (2024). Preliminary experimental tests of a novel friction damper for seismic retrofit of RC precast structures. *Engineering Structures*, 305, 117718.

Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B., & Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 89-99.

Issa, A.S., & Alam, M.S. (2019). Seismic performance of a novel single and double spring-based piston bracing. *Journal of Structural Engineering*, 145(2), 04018261.

Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2013). Dual-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 85, 81-91.

Miller, D.J., Fahnestock, L.A., & Eatherton, M.R. (2011). *Self-Centering Buckling-Restrained Braces for Advanced Seismic Performance*. Structures Congress, Las Vegas, United States.

Miller, D.J., Fahnestock, L.A., & Eatherton, M.R. (2012). Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace. *Engineering Structures*, 40, 288-298.

Oinam, R.M., & Sahoo, D.R. (2015). *Enhancement of Lateral Capacity of Damaged Non-Ductile RC Frame Using Combined-Yielding Metallic Damper*. Advances in Structural Engineering: Materials, 3.

Pandikkadavath, M.S., & Sahoo, D.R. (2016). Cyclic testing of short-length buckling-restrained braces with detachable casings. *Earthquakes and Structures*, 10(3), 699-716.

Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E., & Comas, J. (2015). A new perforated core buckling restrained brace. *Engineering Structures*, 85, 118-126.

Rahimi, H., Esfandari, J., & TahamouliRoudsari, M. (2024). Experimental and numerical assessment of the seismic behavior of non-uniform slit dampers and bar dampers in moment resisting reinforced concrete frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*,

d_{max}^- : حداقل جابه‌جایی محوری سیستم
 E_D : مجموع انرژی مستهلک شده میراگر پیشنهادی
 F_{max}^+ : حداکثر نیروی محوری سیستم
 F_{max}^- : حداقل نیروی محوری سیستم
 F_{ysc} : تنش تسلیم حقیقی مصالح هسته مرکزی
 F'_{ysc} : تنش تسلیم حقیقی مصالح هر یک از هسته‌های مرکزی
 K_{eq} : سختی معادل سیستم مرکزگرا کننده
 L_0 : طول اولیه نمونه دمبلی
 L : طول نهایی نمونه دمبلی
 P_{max} : حداکثر ظرفیت مهاربند کماتش تاب
 P_n : ظرفیت اسمی مهاربند کماتش تاب
 P_{sc} : ظرفیت مورد نیاز سیستم مرکزگرا کننده
 P_{Spring} : نیروی ناشی از فنرها (المان مرکزگرا کننده)
 P_{yc} : ظرفیت مورد نیاز مهاربند کماتش تاب
 P : نیروی کششی وارد بر نمونه دمبلی
 V_0 : حجم اولیه نمونه دمبلی
 V : حجم نهایی نمونه دمبلی در ازای تغییر شکل

۱۲- منحنی چرخه‌ای پرچمی شکل Flag-Shaped Hysteretic Curve
 ۱۳- اضافه مقاومت مصالح Material Overstrength
 ۱۴- سخت‌شوندگی کرنشی Strain Hardening
 ۱۵- تئوری اویلر Euler Theory
 ۱۶- کف قوی Strong Floor
 ۱۷- قاب تکیه‌گاهی Reaction Frame
 ۱۸- تنش مهندسی Engineering Stress
 ۱۹- کرنش مهندسی Engineering Strain
 ۲۰- منحنی جریان Flow Curve
 ۲۱- تنش حقیقی True Stress
 ۲۲- کرنش حقیقی True Strain
 ۲۳- انرژی جذب شده تجمعی Cumulative Absorbed Energy
 ۲۴- ضریب میرایی ویسکوز معادل Equivalent Viscous Damping Coefficient

پارامترها

β : ضریب اصلاح مقاومت فشاری
 δ : حداکثر جابه‌جایی جانبی تسمه کماتش کننده معادل با فاصله آزاد میان سطح این تسمه با غلاف محصورکننده
 ϵ_E : کرنش مهندسی
 ϵ_T : کرنش حقیقی
 ξ_{eq} : ضریب میرایی ویسکوز معادل
 σ_E : تنش مهندسی
 σ_T : تنش حقیقی
 φ : ضریب کاهش مقاومت
 ω : ضریب اصلاح سخت‌شوندگی کرنشی
 Δ_{max} : حداکثر جابه‌جایی وارد شده به سیستم میراگر
 ΔL : جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در طول نمونه دمبلی
 A_0 : مساحت اولیه نمونه دمبلی
 A_{sc} : سطح مقطع هسته مرکزی
 A_{sc}^i : سطح مقطع هر یک از هسته‌های مرکزی
 A : سطح مقطع اولیه نمونه دمبلی
 d_{max}^+ : حداکثر جابه‌جایی محوری سیستم

Cyclic Behavior of the New Self-Centering Buckling Restrained Brace (Experimental Approach)

Mohammad Yazdani¹ and Abbas Ali Tasnimi^{2*}

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2. Professor, Dept. of Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: tasnimi@modares.ac.ir

To mitigate the input energy of the earthquake, numerous vibration control systems have been broadly proposed. The vibration control system can be categorized as passive, active, semi-active, and hybrid. The metallic dampers as a passive vibration control system because of their simple construction and configuration, low cost, availability, high efficiency, rate-independent, resistance to ambient temperature, and require no external energy, are an appropriate and economical control system in structures to mitigate the input energy of the earthquake. Metallic dampers can control the system and absorb the input energy of the earthquake through a shear, flexural, axial, and torsional capacity of the metal element. Different configurations of the metallic damper have been proposed. One of the energy-absorbing mechanisms of the metallic damper is using axial capacity. This paper proposed a new type of buckling restrained brace. Energy Dissipating elements of this damper withstand applied force through the compressive strength of the core plates in each cycle. The proposed damper consists of four comb-teeth elements instead of one consistent element. Each comb-teeth element with a rectangular section of 20×8 mm consists of three narrow straps with different lengths of 390, 386 and 382 mm to make a jump in the hysteric response curve by making lag in the formation of the buckling mode shapes. These comb-teeth elements were welded to two positions on both sides of the middle plate. The middle plate's height, width, and thickness are 500, 400 and 30 mm, respectively. The proposed damper carried out the axial load through the displacement of this plate. Twelve restraining elements with a section of 30×20 mm and a length of 830 mm were used to prevent global buckling of each strap of the comb-teeth damper. For this purpose, twelve grooves have been created on the middle plate and the restraining members passed through it. Also, to prevent the residual displacement of the system, six parallel springs with an equivalent stiffness of 2316 N/mm were used as a self-centering system on each side of the middle plate. By applying force to the middle plate, the pre-compressive springs provide self-centering force and bring the middle plate to the initial position. Finally, two end plates as reaction plates with a section of 300×200 mm and a thickness of 20 mm were bolted to the cross-section of the restraining members by using 10 mm high-strength grade 12.9 bolts. The springs are placed inside the pipes and between the middle plate and end plate. Both ends of the springs stay free. Also, to prevent the lateral displacement of the restraining members perpendicular to the length of the straps, 48 batten plates were used. These batten plates were bolted by using 8 mm high-strength grade 12.9 bolts at two positions from each end of the restraining members. The whole length of the proposed damper is 870 mm. The 1000kN-capacity servo-controlled hydraulic jack was used to experimentally determine the hysteretic behavior of the proposed damper. Experimental results indicate that the proposed system experienced the maximum axial load of 348.6 kN and -347.6 kN in the back-and-forth direction of applied load at the same axial displacement of 35 mm. The results show that the damper experienced a residual displacement of 10.9 and -11.4 mm at the end of the test, so using springs eliminates the residual displacement up to 68.8% and 67.4%, respectively. Also, to evaluate the performance of the proposed system, energy absorbing capacity and the equivalent viscous damping coefficient were calculated 35.25 kJ and 46% based on the load-displacement curve, respectively. As expected, the failure modes of the core plates of the proposed damper concentrated on buckling modes in the weak and strong axes. It is worth noting that all the systems exhibited satisfactory performance without any instability during the test.

Keywords: Buckling Restrained Brace, Energy Dissipation, Yielding Damper, Self-Centering, Passive Control