J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum ۲۱, Issue ۳, autumn ۲۰۲٤
Issn: ۲۸۲۱-۰۹۹۹
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
آنالیز سازه - زلزله
فصلنامه علمی
دوره ۲۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

An Overview of Research Conducted on Various Types of Yield Steel Tubular Dampers

Yashar Hodaipour
Ph.D Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Adel Ferdousi*
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Yousef Hosseinzadeh
Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Leila Hosseinzadeh
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
A_ferdousi@iaut.ac.ir

Keywords:
Steel damper,
Energy dissipation,
Pipe section,
Hysteresis behavior.

Abstract

Despite significant advancements in structural engineering, unfortunately we continue to witness severe loss of life and extensive damage caused by earthquake. Therefore, providing solutions to counteract this natural event and mitigate its effects has always been a focus of researchers. Structural control systems, such as dampers and isolators, have gained significant popularity due to their remarkable ability to reduce the seismic response of structures. In this research, a comprehensive review of the development and application of tubular yielding steel dampers has been the focus. Dampers are classified based on their behavioral characteristics and geometric configuration, and tubular dampers are among the most commonly used dampers. Based on conducted research, it can be concluded that most tubular dampers have a simple and cost-effective manufacturing technology, and the possibility of replacing damaged components after an earthquake is available for each of these types of dampers. On the other hand, tubular dampers offer advantages such as high energy absorption and dissipation capacity, consistent performance under cyclic loading, high ductility, and high strength and stiffness. In this article, a comparison between different types of yielding tubular dampers has been conducted. It is worth noting that despite the advantages of tubular dampers, their widespread use in the country is not yet evident. Moreover, the existing codes and standards lack design provisions for such energy dissipation systems, which is a significant gap considering the importance of the subject.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴,۰ International License
(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می‌باشد).

مروری بر تحقیقات انجام یافته در خصوص انواع میراگرهای لوله‌ای فولادی

یاشار هدائی‌پور
دانشجوی دکتری عمران-سازه، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
عادل فردوسی*
استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری‌های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
یوسف حسین‌زاده
دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
لیلا حسین‌زاده
استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
A_ferdousi@iaut.ac.ir

تاریخ دریافت : ۲۰ خرداد ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۱ مهر ۱۴۰۳

چکیده

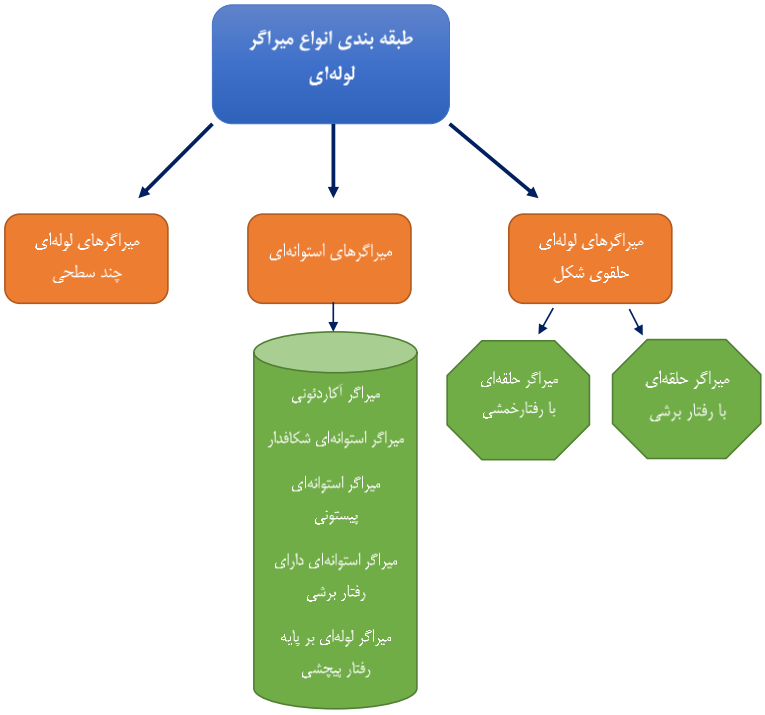
با وجود پیشرفت‌های عمده در زمینه مهندسی سازه متاسفانه در حال حاضر نیز شاهد تلفات جانی شدید و خسارات فراوان ناشی از زلزله هستیم. از این رو ارائه راهکارهای مقابله با این رخداد طبیعی و کاستن از اثرات آن همواره مورد توجه محققین می‌باشد. سیستم‌های کنترل سازه از جمله میراگر و جداسازها به دلیل توانایی قابل توجه در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. در این پژوهش مرور جامعی از توسعه و کاربرد انواع میراگرهای فولادی تسلیم شونده لوله‌ای مورد توجه بوده است. میراگرها با توجه به نوع رفتار و پیکربندی هندسی آنها طبقه‌بندی می‌شوند و میراگرهای لوله‌ای جزو پرکاربردترین میراگرها می‌باشند. با بررسی تحقیقات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که اغلب میراگرهای لوله‌ای دارای تکنولوژی ساخت راحت و کم‌هزینه بوده و امکان تعویض قطعات آسیب‌دیده پس از زمین‌لرزه برای هریک از این نوع میراگرها مهیا می‌باشد. از سوی دیگر میراگرهای لوله‌ای مزایایی مانند توانایی جذب و استهلاک انرژی بالا، عملکرد ثابت در بارگذاری چرخه‌ای، ظرفیت شکل‌پذیری، مقاومت و سختی بالا را ارائه می‌دهند. در این مقاله مقایسه‌ای بین انواع میراگرهای لوله‌ای تسلیم شونده صورت گرفته است. لازم به ذکر است که با توجه به مزایای میراگرهای لوله‌ای، هنوز کاربرد گسترده این نوع میراگرها در کشور دیده نمی‌شود و در آئین‌نامه‌های موجود جای خالی ضوابط طراحی چنین سیستم‌های استهلاک انرژی تا حد زیادی با توجه به اهمیت موضوع احساس می‌شود.

کلید واژگان: میراگر فولادی، استهلاک انرژی، مقطع لوله‌ای، رفتار هیسترتیک.

۱- مقدمه

سازه ها تحت مخاطرات احتمالی ناشی از بارگذاری پیش بینی شده و یا غیر متعارف همچون زلزله، باد و سیلابهای شدید و آتش سوزی هستند. به طور خاص، زمین لرزه ها از عوامل اصلی آسیب شدید به ساختمان ها و سازه های حساس چون پل ها می باشد و به عنوان نمونه در جریان زلزله مکزیکوسیتی در سال ۱۹۸۵، بیش از ۱۳۲ ساختمان فروریخت یا به شدت آسیب دید. در سال ۱۹۸۹، کالیفرنیای شمالی توسط زمین لرزه لوما پریتا لرزید که بیش از ۲۰۰ ساختمان آسیب دیدند [۱]. برای جلوگیری یا کاهش چنین آسیب‌هایی، کنترل‌های ارتعاش سازه تا حد زیادی توسعه یافته‌اند و به طرز ماهرانه‌ای در مکان‌های مختلف سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. سیستم های کنترل را می توان در کاهش خطر لرزه ای سازه های جدید و همچنین در مقاوم سازی سازه های موجود با مقاومت جانبی کم مانند قاب های پیش ساخته استفاده کرد و در زمان و هزینه تخریب و ساخت بنای جدید صرفه جویی کرد. در میان همه دسته‌ها، سیستم‌های غیرفعال یکی از محبوب‌ترین کنترل‌های ارتعاش سازه‌ای هستند [۳].

قطعات استهلاک انرژی به آسانی می توانند اگر خسارت جدی به آنها وارد شد، جایگزین و تعویض شوند. استفاده از این قطعات یکی از اقتصادی ترین و مؤثرترین راه های کاهش اثرات زلزله روی ساختمان-هاست. از میان قطعات استهلاک انرژی، میراگرهای فلزی به دلیل عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده جهت ساخت، علمی تر بودن کاربرد آنها در سازه، رفتار پایدار در برابر زلزله و دخیل نبودن عوامل محیطی (درجه حرارت، رطوبت و...)، در رفتار مکانیکی آنها اهمیت خاصی دارند.میراگرهای تسلیم شونده نیز از جمله میراگرهای غیرفعال بوده که عملکرد مناسبی در بارگذاری ارتعاشی را از خود نشان می‌دهند. با ورود میراگر تسلیم شونده به ناحیه پلاستیک، انرژی ورودی به سازه را صرف تغییرشکل پلاستیک در آن خواهد شد[۴] . این میراگرها از خاصیت رفتار هیسترتیک فلزات به هنگام تغییرشکل در ناحیه‌ی خمیری استفاده می‌کنند و باعث افزایش انرژی پسماند و لختی سیستم سازه‌ایی می‌شوند[۵] . میراگرهای لوله‌ای فولادی به عنوان نوعی از میراگرهای غیرفعال برای اتلاف انرژی لرزه‌ای شناخته می‌شوند به طوری که می‌توانند مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی ورودی لرزه‌ای را بواسطه ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک در خود مستهلک نموده و در نتیجه از ایجاد آسیب و صدمات مخرب در سازه‌ها جلوگیری نمایند[۶] . می‌توان ازمیراگرهای لوله‌ای فولادی در اتصال اعضای سازه‌ای مورد استفاده قرار داد. آنها می‌توانند مقدار قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای وارده را به دلیل شکل هندسی و رفتار شکل پذیر و غیر ارتجاعی فولاد نرمه جذب و مستهلک کنند. قابلیت تغییر شکل‌های بزرگ و رفتار هیسترتیک پایدار در آزمایش تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای این نوع از میراگرها از ویژگی آنها محسوب می‌شود[۷] . به علاوه از مزایای دیگر آنها می‌توان به قابلیت تعویض پس از زلزله، ساختار ساده، امکان نصب در موقعیت های مختلف به شکل لوله‌ای در سیستم‌های حاکم و غیره اشاره کرد. میراگرهای فولادی از جمله میراگرهای جدیدی هستند که علی رغم ساختار ساده، دارای عملکرد بالایی هستند.[۸] . با توجه به کثرت این نوع از میراگرها و نوع عملکرد آنها طبقه بندی آنها در نمودار ذیل بصورت مبسوط ارائه گردیده است.

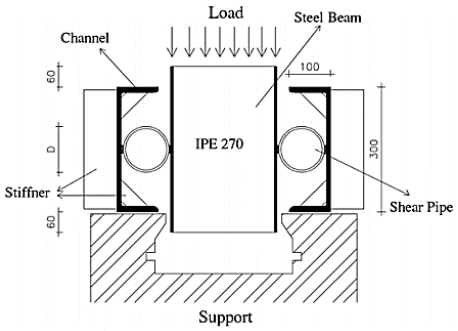


شکل ۱- نمودار طبقه بندی انواع میراگر لوله‌ای

۲-میراگر لوله‌ای حلقوی شکل

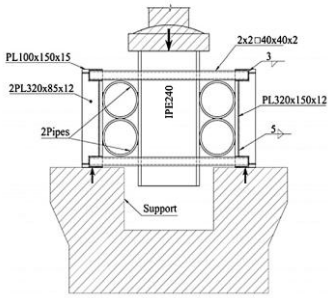
۲-۱-میراگر حلقه‌ای با رفتار برشی

در راستای توسعه میراگرهای لوله‌ای پژوهشی تحت عنوان رفتار لوله‌های فولادی، تو خالی و پر شده با بتن، تحت نیروی برش چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته تا امکان استفاده از لوله‌های فولادی به عنوان میراگر لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. دو نمونه از لوله‌های فولادی پر شده با بتن تحت نیروی برش یکنواخت و چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و چهار نمونه دیگر از لوله‌های فولادی توخالی تحت بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.



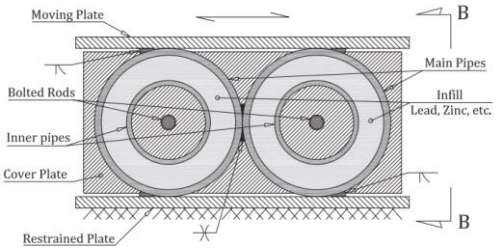
شکل ۲- جزئیات میراگر برشی لوله‌ای فولادی[۹]

نتایج نشان می‌دهد که لوله‌های فولادی توخالی قادر به جذب مقدار زیادی انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای با رفتار هیسترزیس پایدار هستند[۹]. در ادامه نویسندگان یک نوع ساختار جدیدی از استهلاک انرژی غیرفعال تحت عنوان میراگر دو لوله‌ای را ارائه کردند. پژوهش صورت گرفته هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تحلیلی بوده است. این ساختار شامل دو لوله جوش داده شده در مکان‌های انتخاب شده برای بارگذاری برشی می‌باشد. تغییر شکل چرخه‌ای غیر الاستیک انرژی(استهلاک انرژی) عمدتا از طریق خم شدن بدنه لوله‌ها صورت می‌پذیرد.



شکل ۳- جزئیات بارگذاری برشی میراگر دو لوله‌ای فولادی[۱۰]

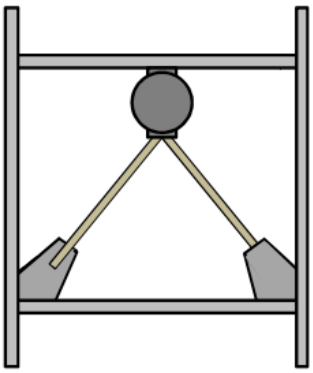
شکل پذیری عالی، جذب انرژی و حلقه‌های هیسترزیس پایدار در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود. DPD بسیار سبک وزن است، به راحتی ساخته شده و مقرون به صرفه است. با برخورداری از این ویژگی ها، میراگر معرفی شده به عنوان یک وسیله مفید برای کنترل غیر فعال سازه‌ها کاربرد دارد [۱۰]. با توسعه مقاله فوق موفق به ارائه ساختاری جدیدی از میراگرهای لوله‌ای با عنوان میراگر لوله‌ای تو پر شده‌اند. این دستگاه شامل دو لوله جوش داده شده است که دو لوله کوچکتر در داخل آنها قرار دارد و فضاهای بین لوله‌ها با فلزاتی مانند سرب یا روی پر شده است.



شکل ۴- جزئیات میراگر دو لوله‌ای توپر[۱۱]

این نوع میراگر در برابر نیروی برشی بارگذاری می‌شود و از تسلیم شدن لوله‌های خارجی، لوله‌های داخلی و فلزات پر شده و اصطکاک بین فلزات به عنوان مکانیسم‌های جذب انرژی استفاده می‌کند. این دستگاه را می‌توان تکامل یافته دمپر دو لوله دانست. که قبلاً توسط نویسندگان توسعه یافته بود. میراگر پیشنهادی دارای مزایای از جمله مقرون به صرفه بودن، ساخت ساده، نصب آسان و کارآمدی و عملکرد بالای آن در االستهلاک انرژی، مقاومت و سختی بالا اشاره کرد[۱۱] .

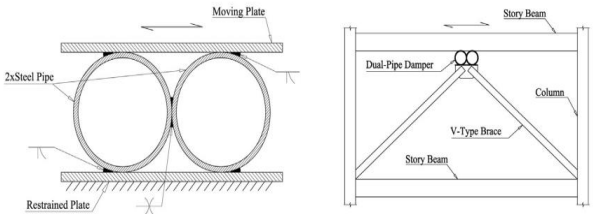
مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی تحلیلی بر رفتار و عملکرد هیسترتیک میراگر پنل برشی به شکل هندسی دایره‌ای ارائه شده است.



شکل ۵- معرفی و جانمایی میراگر برشی دایره‌ای[۱۲]

این مقاله با هدف توسعه و ارزیابی عملکرد ساختاری میراگر پنل برشی دایره‌ای با سخت کننده و بدون سخت کننده برای استهلاک از انرژی لرزه‌ای غیرفعال با تغییر شکل غیر ارتجاعی یا تغییر شکل‌های پلاستیک صورت گرفته است. ارزیابی ساختاری با استفاده از برنامه شبیه سازی المان محدود غیر خطی تجاری موجود انجام شده است. نسبت قطر به ضخامت به عنوان پارامتر اصلی برای بررسی عملکرد هیسترتیک پانل برشی دارای سخت کننده و بدون سخت کننده استفاده شده است. از این رو با بررسی پارامترهای عنوان شده می‌توان از آن به عنوان دستگاه اتلاف انرژی و میراگرای غیر فعال در سازه‌های مهندسی عمران استفاده کرد [۱۲] .

در ادامه مقاله‌ای با عنوان ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و طراحی سازه‌های فولادی مجهز به میراگرهای دو لوله‌ای ارائه شده است. هدف از مطالعه حاضر ارائه دستورالعمل هایی برای پیاده سازی (DPD) در ساختمانهای فولادی واقعی، ارزیابی و مقایسه عملکرد آنها در برابر سایر میراگرهای فلزی تسلیم است.

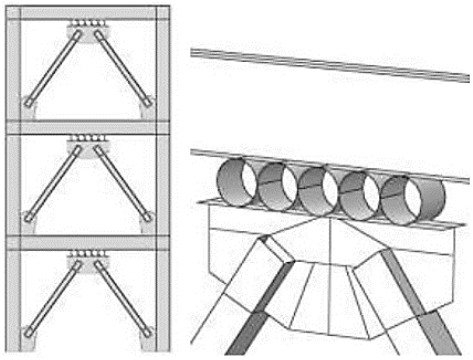


شکل ۶- جزئیات اتصال میراگر دو لوله‌ای فولادی[۱۳]

سه قاب فولادی مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای ۵ ، ۱۰ و ۲۰ طبقه طراحی شده ابتداً بدون میراگر و سپس به میراگرهای دو لوله با خواص مختلف مجهز شده‌اند. پاسخ قاب‌ها به هفت تحریک زلزله با استفاده از تجزیه و تحلیل تاریخچه زمان غیرخطی دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که میراگرهای (DPD) در استهلاک بخش قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای ورودی و کاهش قابل توجه آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای نقش بسزای را ایفا می‌کنند و همچنین قابلیت این را دارند که اطمینان لرزه‌ای سازه‌ها را افزایش دهند. پاسخ های یک قاب ۱۰ طبقه مجهز به میراگر (DPD) با پاسخ‌های قاب با دستگاه های TADAS مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سازه مجهز به میراگر DPD، با قسمت سخت شدن ثانویه منحصر به فرد خود در جابجایی و نیرو، آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای کمتری را در مقایسه با میراگر TADAS نشان می‌دهد[۱۳] . پژوهشی دیگر تحت عنوان رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی مهاربندی شده توسط میراگرهای لوله‌ای ارائه گردیده است. مطالعه حاضر بر عملکرد سازه‌ای و لرزه‌ای سیستم دوگانه تمرکز کرده است. عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی با ۴، ۸ و ۱۶ طبقه با قاب ساده یا قاب مهاربند مجهز به میراگرهای لوله‌ای تحت بار لرزه‌ای

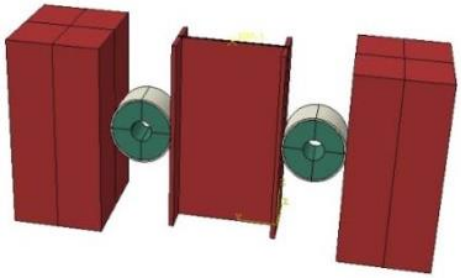
قرار گرفته و با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد مدل‌ها با در نظر گرفتن برش پایه و جابجایی جانبی سقف و همچنین توزیع تنش فون میزس مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع تنش ناشی از تجمع آسیب پلاستیک در میراگرهای لوله‌ای در مدل‌های ۴ و ۸ طبقه افزایش یافته و برش پایه در مدل‌های ۴ طبقه مجهز به میراگر لوله‌ای ۵۰ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان داده است که در مدل‌های ۱۶ طبقه، مقاومت در سیستم میرایی باید مطابق سایر عناصر طراحی شود. علاوه بر این، می‌توان مقاومت سیستم میرایی را با افزایش تعداد لوله‌ها و ضخامت آنها افزایش داد. توزیع تنش سازه‌های ۸ طبقه مجهز به میراگرهای لوله‌ای مناسب‌تر از قاب ساده بوده و آسیب‌های پلاستیک در میراگرها متمرکز شده است. برش پایه و جابجایی سقف در سازه ۸ طبقه مجهز به میراگرهای لوله‌ای نسبت به قاب ساده تا ۵۰٪ کاهش یافته است[۱۴] .

در ادامه توسعه میراگرهای لوله‌ای مطالعه‌ی تحت عنوان بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شورون با استفاده از میراگرهای تسلیم چند لوله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، رفتار چرخه‌ای یک سیستم قاب مهاربندی شورون مجهز به دمپرهای چند لوله‌ای(CBF-MPD) با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های المان محدود شامل قاب مهاربندی شورون به تنهایی و قاب مهاربندی شورون مجهز به میراگرهای چند لوله‌ای بوده است. مدل قاب مهاربندی شورون به عنوان مدل مرجع برای مقایسه و ارزیابی اثرات میراگرهای چند لوله انتخاب شده است. سپس مدل‌های اجزای محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای و روش‌های استاتیکی غیرخطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که ظرفیت برشی میراگر لوله‌ای تأثیر بسزایی در تعیین رفتار مهاربند دارد. همچنین، انتخاب مناسب ابعاد میراگرهای لوله‌ای باعث افزایش شکل پذیری و جذب انرژی قاب‌های مهاربندی شورون شده است. نتایج مطالعات بر روی میراگرهای لوله‌ای به عنوان عناصر شکل‌پذیر و جاذب انرژی در سیستم‌های قاب مهاربندی همگرا، ظرفیت شکل پذیری خوب، استهلاک انرژی و حلقه‌های هیسترتیک پایدار را ارائه می‌دهد[۱۵] .



شکل ۷- جزئیات نصب میراگر فولادی چند لوله‌ای در مهاربندهای شورون[۱۵]

مقاله‌ای در جهت توسعه‌ی میراگرهای لوله فولادی تحت عنوان رفتار چرخه‌ای میراگرهای لوله‌ای تقویت شده با مواد کامپوزیت با الیاف(HPFRCC) را ارائه شده است. مواد کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف (HPFRCC) از جمله مصالح جدیدی هستند که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقاومت زیاد در برابر کشش در مقایسه با بتن معمولی و قابلیت بالای استهلاک انرژی از جمله مزایای این مواد است.



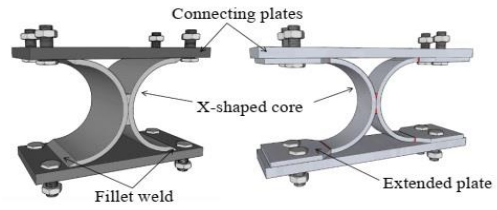
شکل ۸- جزئیات و قطعات میراگر لوله فولادی تقویت شده با مواد کامپوزیت سیمانی با الیاف(HPFRCC) [۸]

در این نوشتار به بررسی تأثیر تقویت و ترکیب میراگرهای لوله‌ای با استفاده از مواد (HPFRCC) پرداخته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تقویت میراگرهای لوله توسط مواد HPFRCC می‌تواند مقدار انرژی وارد شده به سیستم را به طور چشمگیری کاهش داده و کارایی میراگرهای لوله‌ای را افزایش دهد. به عبارت دیگر، می توان گفت که تقویت

میراگرهای لوله‌ای از طریق HPFRCC منجر به توزیع یکنواخت تنش در کل بخش میراگر لوله‌ای می‌شود. با توجه به شاخص آسیب در فولاد و HPFRCC، مشخص شده است که ایجاد میکرو ترک در HPFRCC نقش مهمی در افزایش میزان استهلاک انرژی را بر دارد. افزودن HPFRCC به میراگر فولادی باعث افزایش سختی میراگر در ناحیه الاستیک می‌شود. میراگرهای تقویت شده دارای مزایای میراگرهای فولادی با مقاومت بیشتر هستند.[۸] .

۲-۱-۱-استفاده از میراگر لوله‌ای حلقوی، بصورت نیم لوله با رفتار برشی

در جهت توسعه میراگرهای لوله‌ای با عنوان مطالعه تجربی یک میراگر فولادی با نیمه‌های لوله جوش داده شده به شکل X پیشنهاد شده است. در این مقاله، یک میراگر فولادی جدید به نام میراگر لوله‌ای X شکل (XPD) پیشنهاد و بررسی می‌شود. میراگر پیشنهادی از طریق جوشکاری دو نیمه لوله در جهت مخالف جهت ایجاد هسته‌ای Xشکل و اتصال هسته‌X شکل به صفحات جانبی با جوش‌های گوشه یا جوش‌های شیاری ساخته می‌شود. میراگر XPD مقاومت جانبی و رفتارهای استهلاک انرژی را ابتدا از طریق مقاومت خمشی صفحات لوله و سپس از طریق مقاومت کششی در نیمه لوله‌های کامپوزیتی ارائه می‌دهد. XPDها می‌توانند در برابر بارهای جانبی مقاومت مشابه‌ی را تنها با استفاده از نصفه لوله نسبت به میراگرهای دو لوله نشان دهند. منحنی هیسترتیک نمونه‌های XPD همه دارای حلقه‌های پایدار هستند و پس از تسلیم تا شکست کامل افزایش مقاومت پایدار از خود نشان می‌دهند. XPDهای جوش شیاری سختی اولیه، مقاومت و قابلیت شکل‌پذیری بهتری را نسبت به جوش‌های گوشه از خود نشان می‌دهند، اما همچنین دارای پتانسیل شکست تحت اثر پدیده خستگی هستند الخصوص در مناطقی که تحت تأثیر گرما زیادی در اثر جوشکاری قرار گرفته‌اند[۱۶] .
نویسندگان در ادامه مقاله فوق، توسعه و بررسی عملکرد لرزه‌ای میراگرهای فولادی با اتصالات پیچ و مهره‌ای با استفاده از نیم لوله‌های X شکل را ارائه کردند. در این مقاله، یک طرح اصلاح شده میراگر لوله‌ای است که میراگر X شکل (XPD) نامیده می‌شود، پیشنهاد شده است. میراگر با اتصال دو نیمه لوله که در مقابل هم قرار گرفته‌اند برای تشکیل یک هسته X شکل ساخته می‌شود که سپس به صفحات اتصال پیچ می‌شوند. XPDهای پیچ شده قابل تعویض هستند و می توان آنها را به راحتی با هزینه کم تهیه و تعویض کرد.



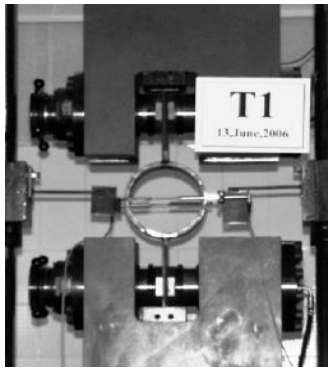
شکل ۹- معرفی جزئیات مدل و قطعات میراگر فولادی تسلیم نیم لوله‌ای با اتصالات پیچی و جوشی[۱۶،۱۷]

آزمایشات بارگذاری چرخه‌ای بر روی ۵ نمونه XPD پیچدار و ۲ نمونه XPD جوش‌شده برای بررسی الگوهای توسعه مقاومت، عملکرد هیسترتیک، توانایی‌های استهلاک انرژی و حالت‌های خرابی صورت پذیرفته است. XPDهای پیچ و مهره شده و جوش داده شده نیز برای مقاوم سازی لرزه‌ای یک قاب فولادی ۶ طبقه برای بررسی عملکرد میراگرهای جدید در کنترل پاسخ لرزه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی نشان داده است کهXPDهای پیچدار می‌توانند شکل‌پذیری خوب و نمودار هیسترتیک پایدار را تحت هر دو پروتکل بارگذاری چرخه‌ای استاندارد و پروتکل بارگذاری چرخه‌ای خستگی را ارائه دهند. XPDها با اتصالات جوشی دارای ظرفیت استهلاک انرژی ضعیف‌تری به دلیل شکست زودهنگام هستند، اما می توانند سختی و مقاومت تسلیم بالاتری را ارائه می‌دهند.[۱۷] .

۲-۲-میراگر حلقه‌ای با رفتار خمشی

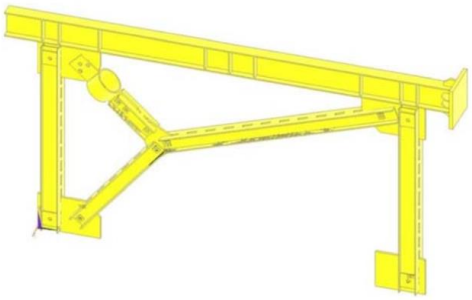
مطالعه‌ای با عنوان بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکل‌پذیری حلقه‌ی فولادی ارائه شده است. در این نوشتار میزان جذب انرژی و شکل پذیری یک حلقه‌ی فولادی به عنوان المان شکل‌پذیر مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. حلقه‌ی فولادی را می‌توان به دو صفحه‌ی فولادی جوش کرد و به راحتی در انواع مهاربندهای هم محور تعبیه کرد. ظرفیت بار حلقه‌ی فولادی تابع طول، شعاع، ضخامت و تنش تسلیم آن

است و این امر امکان طراحی آن را متناسب با ظرفیت مهاربند فراهم می‌کند. نتایج این بررسی بیانگر جذب انرژی و شکل پذیری بسیار خوب حلقه‌ی فولادی و پشتوانه‌ی ایده‌ی جدید این نوشتار در چگونگی استفاده از حلقه‌ی فولادی است. بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی حلقه‌ی فولادی در این نوشتار نشان می‌دهد که: حلقه‌ی فولادی از قابلیت جذب انرژی بسیار بالا و شکل‌پذیری خوبی برخوردار است. و می‌تواند به عنوان یک المان شکل‌پذیر در مهاربندهای هم محور استفاده شود. ظرفیت کششی حلقه از ظرفیت فشاری آن بیشتر و با ظرفیت کششی و فشاری مهاربندهای هم‌محور هم‌سو است. شکستگی طولی حلقه از کنار خط جوش بیان‌گر توزیع یکنواخت بار در طول آن است.[۱۸]



شکل ۱۰- بررسی حلقه فولادی در اثر بارهای کششی و فشاری[۱۸]

پژوهشی در مورد میراگرهای لوله‌ای تحت عنوان ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم مهاربندی خارج از مرکز با المان لوله‌ای در مکان بهینه ارائه گردیده است. در این مقاله، سیستم مهاربندی جدید با استفاده از المان لوله‌ای (مستهلک کننده دایره‌ای) به منظور تعویض اعضای آسیب دیده بدون نیاز به بازسازی یا تعمیر سیستم سازه‌ای اصلی است. بنابراین با استفاده از نرم افزار غیرخطی المان محدود ANSYS یک فریم با سیستم مهاربندی خارج واگرا با گریز از مرکز مطلوب و قاب دیگری با مشخصات مشابه بدون المان دایره‌ای مدلسازی شده است.



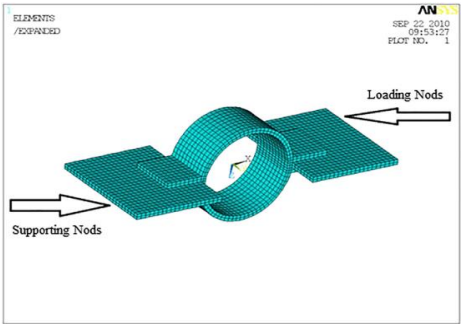
شکل ۱۱- معرفی و جانمایی میراگر لوله‌ای در مهاربند واگرا[۱۹]

نتایج تحلیلی و مقایسه نمودارهای این دو(مدل بدون المان شکل‌پذیر و با المان شکل‌پذیر) مدل‌ها نشان داد که مدل همراه با المان شکل‌پذیر عملکرد بالاتری نسبت به مدل های دیگر دارد[۱۹] .

مطالعه‌ی در مورد بررسی آزمایشگاهی شکل‌پذیری و عملکرد حلقه‌های فولادی ساخته‌شده از صفحات فولادی ارائه شده است. در این تحقیق، استفاده از حلقه‌های فولادی ساخته شده از لوله‌های فولادی به عنوان اتلاف کننده انرژی به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که مهاربند با حلقه فولادی منحنی هیسترتیک ثابت و پایداری را دارا می‌باشد. علاوه بر این، حلقه فولادی به راحتی قابل جایگذاری در مهاربند فولادی است و همچنین قابلیت تعویض راحت را نیز دارا می‌باشد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که اعضای سازه‌ای سیستم مهاربندی به جز حلقه فولادی در ناحیه الاستیک خود باقی می‌مانند. از آنجایی که نوع اتصال بر عملکرد حلقه تأثیر می گذارد، در این مقاله اثرات انواع مختلف اتصالات نیم حلقه را بررسی می‌کند. رینگ فولادی ساخته شده از صفحات فولادی عملکرد مناسبی نسبت به حلقه لوله دارد و شکل پذیری و جذب انرژی بالایی از خود نشان می دهد. استفاده از نیم حلقه های فولادی ساخته شده از صفحات فولادی به دلیل تنوع کم لوله های بدون درز هیچ مشکلی برای انتخاب حلقه مناسب ایجاد نمی‌کنند. تعویض نیم حلقه‌های فولادی آسان، کم هزینه و سریع است. جوش های نیمه حلقه (جوش‌های پشتی) شکل‌پذیری حلقه را کاهش می‌دهند، شکستگی حلقه از سمت جوش‌های (جوش‌های پشتی) رخ می‌دهد[۲۰] .

شکل ۱۲- بررسی نیم حلقه‌های فولادی در اثر بارهای رفت و برگشتی[۲۰]

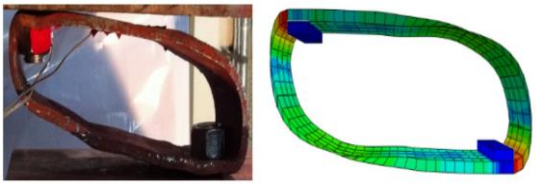
مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی عددی شکل پذیری و جذب انرژی حلقه‌های فولادی ساخته شده از صفحات فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل محدودیت در اندازه لوله‌های فولادی، اینطور نیست که همیشه بتوان یک لوله مناسب برای استفاده در مهاربندها پیدا کرد. در مطالعه حاضر، عملکرد حلقه فولادی ساخته شده از دو نیمه حلقه فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، اثرات جوشکاری یا استفاده از پیچ و مهره و ضخامت حلقه‌های فولادی و خواص مواد بر شکل پذیری و جذب انرژی مهاربندها ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۳- معرفی مدل و جزئیات میراگر لوله‌ای دو حلقه‌ای[۲۱]

نتایج نشان دهنده شکل پذیری مناسب و جذب انرژی مناسب حلقه‌های فولادی ساخته شده است. حلقه‌های فولادی ساخته شده استفاده از موادی همچون CT۲۰ به جای فولاد ST۳۷ نتایج قابل توجهی را به دنبال دارد از جمله‌ای آنها می‌توان به افزایش ظرفیت تحمل نیروی حلقه‌های فولادی اشاره کرد. همچنین مشاهده شد که شکل پذیری مدل CT۲۰ می تواند تا ۴۰٪ بیشتر از مدل ST۳۷ باشد، علاوه بر این، نتیجه گرفته شد که مدل CT۲۰ از نظر استهلاک انرژی نیز مفیدتر از فولاد ST۳۷ است. استفاده از یک حلقه فولادی ضخیم‌تر ظرفیت آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و همچنین باعث شکل پذیری بیشتر مدل می‌شود. علاوه بر این، ترکیب حلقه‌های فولادی ضخیم تر باعث استهلاک انرژی قابل توجهی می‌شود. عملکرد حلقه‌های فولادی ساخته شده از دو نیم حلقه می‌تواند به همان اندازه موثر باشد که از یک لوله فولادی کامل استفاده شده باشد. با این حال، با استفاده از دو حلقه نیمه، محدودیت در اندازه و ضخامت لوله‌های فولادی برطرف می شود[۲۱] .

پژوهشی با عنوان مدل سازی عددی بالشتک‌های(حلقه‌های) فولادی مستهلک کننده انرژی ارائه شده است. بالشتک‌های فولادی مستهلک کننده انرژی (EDSCs) دستگاه ساده‌ای هستند که می توانند برای اتصال اعضای سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. آنها می‌توانند مقدار قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای وارده را به دلیل شکل هندسی و رفتار شکل پذیر و غیرارتجاعی فولاد نرمه جذب و مستهلک کنند. قابلیت تغییر شکل‌های بزرگ و رفتار هیسترتیک پایدار در آزمایش تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای میراگر EDSCs بدست آمده است.

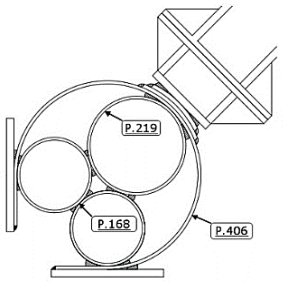


شکل ۱۴- کانتور تنش و تغییر شکل‌های برشی نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی میراگر بالشتکی فولادی[۷]

مدلسازی عددی با موفقیت پارامترهای همچون مقاومت و سختی را شبیه سازی کرده و افزایش‌های شیب منحنی‌ها را که در چرخه‌های پایانی اتفاق می‌افتد را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. مدلسازی عناصر محدود منحنی‌های هیسترزیس منطبق بر نتایج تجربی و آزمایشگاهی را ارائه می‌کند. و همچنین در بارگذاری عرضی یا برشی نیز نتایج کاملا منطبق بر نتایج تجربی و آزمایشگاهی است[۷] .

مقاله‌ای در توسعه‌ای میراگرهای لوله‌ای با عنوان میراگر فلزی پوسته‌ای تودرتو با رویکرد بهبود در رفتار هیسترزیس ارائه گردیده است. با بهره‌گیری از ایده‌ی مهار سازه‌ها با استفاده از ابزارهای میراکننده‌ی انرژی زلزله، میراگر نوینی به نام میراگر پوسته‌ای تودرتوی ناهمراستا توسط نگارندگان این پژوهش پیشنهاد شده است. ساختمان این میراگر از یک

پوسته‌ی استوانه‌ای بزرگ فلزی که سه پوسته‌ی استوانه‌ای کوچک را در برگرفته است، ساخته شده است. برای ساخت این میراگر از روش‌های جوشکاری یا ریخته‌گری فلز می‌توان بهره برد. چیدمان عضوهای پوسته‌ای این میراگر در فرایند بارگذاری لرزه‌ای می‌توانند به‌سان فنرهای فرابازگشتی با ترکیب سری و موازی سبب بالارفتن عملکرد دستگاه شوند.



شکل ۱۵- معرفی جزئیات مدل و قطعات میراگر فلزی پوسته‌ای تودرتو[۲۲]

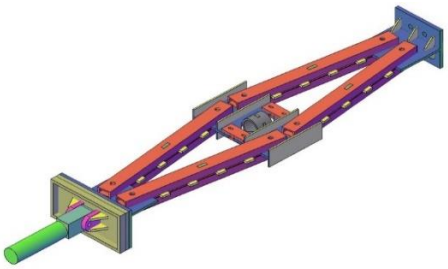
در این پژوهش گونه‌ی نوآورانه‌ای از یک ابزار میراکننده‌ی انرژی زلزله در سازه پیشنهاد شده است. اگرچه این میراگر دارای نکته‌های مثبتی در بالابردن سازوکار گونه‌های پیشین به ویژه گونه‌هایی با ساختار پوسته‌ای دارد ولی دارای کاستی‌هایی نیز می‌تواند باشد. یکی از نکات ضعف این میراگر همانند سایر میراگرهای کنشگیر (به استثنای میراگرهای ویسکوز) عدم برگشت پذیری میراگر پس از وقوع زلزله است که پیشنهاد می‌شود با به کارگیری مواد ویسکوالاستیک در فضای خالی پوسته های استوانه‌ای تا حدودی این نقطه ضعف جبران شود. از طرفی برای افزایش کارایی و سودمندی این میراگر، پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های پس از این، در آلیاژهای فلز به کار رفته بررسی‌هایی انجام شود و از آلیاژی برای پوسته‌ها استفاده شود (مانند آلیاژهای دارای سرب) که دارای ویژگی‌های فرابازگشتی بیشتری باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از اثرهای مخرب جوشکاری از روش های پیشرفته‌ی ریخته گری فلز در ساخت میراگر استفاده شود. از سوی دیگر از مزایای میراگر پیشنهادی می توان عملکرد ویژه ی پوسته‌ای، هزینه ساخت بسیار پایین، سازوکار چندگامه تا گسیختگی کامل، ساختمان ساده ولی با ساختار پیچیده مکانیکی، پایداری بالا، میرایی و توان بالای جاری شدن وغیره را برشمرد.[۲۲] .

پژوهشی نیز تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکل‌پذیری حلقه فولادی مرکب جهت نصب در مهاربندهای هم‌محور ارائه گردیده است. حلقه تعبیه شده تحت اثر نیروی محوری در مهاربند، تحت خمش قرار گرفته و با استفاده از جمع شدن و بازگشت به حالت اولیه و ورود به مرحله غیرخطی و تشکیل مفاصل خمیری، در استهلاک انرژی زلزله تأثیر بسزایی خواهد داشت. از آنجایی که تنوع حلقه‌های فولادی محدود و تهیه آنها متناسب با ظرفیت مورد نیاز سازه مقدور نیست، لذا اتخاذ روشی جهت افزایش ظرفیت باربری حلقه‌های موجود از جمله کمبودهای پژوهشی در این زمینه می‌باشد. هدف از این مقاله، افزایش ظرفیت باربری المان حلقه با استفاده از دو حلقه متداخل فولادی است که فضای بین آنها توسط ماده پلاستیک صنعتی(یا تفلون) پر شده است. بر این اساس، طرح مذکور مورد ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی قرار گرفته است. در بررسی‌های آزمایشگاهی مشخص شد که المان پیشنهادی دارای قابلیت جذب بالای انرژی زلزله در سیکل‌های رفت و برگشتی است و می‌تواند گزینه مناسبی جهت نصب در مهاربندهای هم‌محور به حساب آید. [۲۳]

شکل ۱۶- حلقه فولادی پر شده با تفلون(پلاستیک صنعتی)[۲۳]

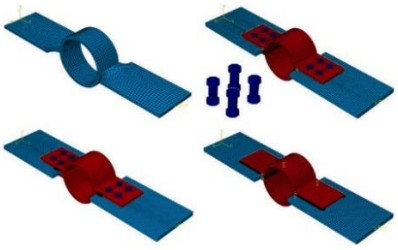
مقاله‌ای دیگری تحت عنوان ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی‌شکل مجهز به میراگر تسلیم‌شونده نیزمورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تلاش های محققان در راستای افزایش شکل پذیری سیستم‌های مهاربندی، استفاده از حلقه فولادی بعنوان فیوز کنترلی در سال‌های اخیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که دارای محاسن و معایب مختلفی می‌باشد. بنابراین در راستای پوشش معایب موجود در این سیستم، در این مقاله به معرفی و بررسی عملکرد آزمایشگاهی سیستم نوین مهاربندی و ترکیب آن با میراگر تسلیم‌شونده پرداخته می‌شود. این سیستم که در راستای افزایش شکل پذیری، جذب انرژی بالاتر و پوشش ضعف‌های سیستم‌های موجود مورد پیشنهاد و

بررسی قرار گرفته است، از یک عضو مهاربند لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم شونده حلقوی در وسط آن تشکیل شده است. در ساخت نمونه‌ها ۳ مدل مختلف با اتصالات سخت، نیمه سخت و ساده مدنظر قرار گرفته است که پس از ساخت، تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مورد مقایسه شدند.



شکل ۱۷- معرفی جزئیات مدل و قطعات مهاربند با عضو لوزی‌شکل مجهز به میراگر تسلیم‌شونده لوله‌ای[۲۴]

نتایج این تحقیق در وهله اول بیانگر قابلیت اجرایی شدن سیستم و در ادامه نشان از قابلیت بالای هر سه سیستم در جذب انرژی و شکل پذیری را می‌دهد. همچنین با توجه به هندسه اعضای مهاربندی و میراگر، با ابعاد و ضخامت کوچکتر حلقه فولادی می‌توان به جذب انرژی بالاتر و نیروی وارد شده بیشتری برای تسلیم میراگرها نسبت به سایر سیستم های موجود دست یافت. در نهایت نیز در راستای امکان سنجی مدلسازی سیستم پیشنهادی در نرم افزارهای المان محدودی، مدل المان محدودی سیستم پیشنهادی در نرم‌افزار آباکوس مورد مدلسازی و صحت سنجی قرار گرفت که نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی دارای هماهنگی مناسبی می‌باشد.[۲۴] .مقاله‌ای تحت عنوان بررسی عددی و تحلیلی رفتار چرخه-ای میراگرهای حلقه فولادی(SRDs) نیز ارائه گردیده است. در این مطالعه، رفتار چرخه‌ای میراگر حلقه فولادی (SRD) از طریق روش‌های عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه حاضر به منظور بررسی شکل پذیری و استهلاک انرژی و ارائه یک معادله تحلیلی برای برآورد ظرفیت تسلیم SRD انجام شده است. برای این منظور، مطالعات پارامتری گسترده‌ای با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده است. مطالعات پارامتری شامل بررسی تأثیر ضخامت، طول و قطر حلقه فولادی بر رفتار SRD بوده است. تجزیه و تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تجزیه و تحلیل مدل‌های اجزای محدود تحت بارگذاری چرخه ای استفاده شده است.

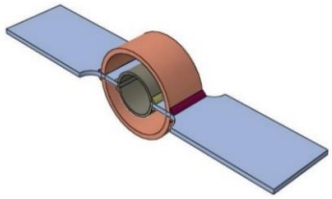


شکل ۱۸- جزئیات مدل‌ها میراگر فولادی حلقه فولادی(SRDs) [۲۵]

نتایج مدل‌های پارامتری و روابط تحلیلی نشان داده است که با افزایش قطر حلقه فولادی، شکل پذیری و اتلاف انرژی به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. همچنین، با افزایش نسبت قطر به ضخامت (D/t) ، نیروی تسلیم، شکل پذیری و استهلاک انرژی به ترتیب کاهش می‌یابد. رابطه تحلیلی برای برآورد نیروی تسلیم SRD با نتایج روش عددی مطابقت خوبی داشت. نیروی تسلیم نیز مستقیماً به طول و قطر حلقه فولادی وابسته بوده و با نسبت D/t رابطه معکوس دارد.[۲۵] .

نویسندگان مقاله‌ای در توسعه مقالات قبلی خود در رابطه با میراگرهای لوله‌ای یا حلقه فولادی با عنوان بررسی رفتار چرخه‌ای یک سیستم استهلاک انرژی با میراگرهای فولادی دو حلقه‌ای(SDRDs) را ارائه کردند. در این مقاله، سیستم جاذب انرژی یک میراگر فولادی دو حلقه (SDRD) ارائه شده است و رفتار چرخه‌ای آن به صورت تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. مکانیسم استهلاک انرژی SDRD از طریق تشکیل مفاصل پلاستیک در حلقه‌های فولادی است. هدف از این مطالعه ارائه یک رابطه تحلیلی برای برآورد مقاومت تسلیم، جابجایی تسلیم و سختی الاستیک SDRDهای پیشنهادی است. یک رابطه تحلیلی برای محاسبه سختی الاستیک SDRDها با استفاده از روش تحلیل سازه‌ای ارائه شده است. همچنین ، با استفاده از تجزیه و تحلیل پلاستیک و در نظر گرفتن مکانیسم تشکیل مفاصل پلاستیک، رابطه‌ای برای برآورد مقاومت تسلیم و جابجایی تسلیم SDRD ها به دست آمده است. مطالعات پارامتری گسترده‌ای با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی برای بررسی صحت روابط تحلیلی به دست آمده انجام

شده است. مطالعات پارامتری شامل بررسی تأثیر پارامترهای ضخامت و همچنین قطر حلقه داخلی و خارجی SDRD ها است[۲۶] .

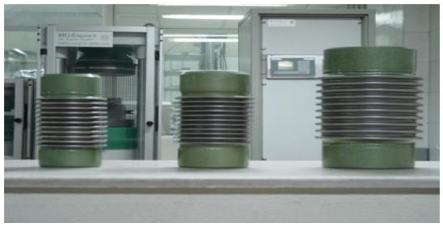


شکل ۱۹- جزئیات مدل و قطعات میراگر فولادی تسلیم دو حلقه‌ای(SDRDs) [۲۶]

۳-میراگر استوانه‌ای

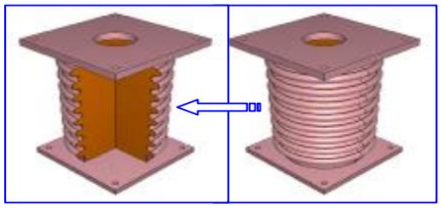
۳-۱-میراگر آکاردئونی

پژوهشی با عنوان مطالعه استهلاک انرژی در لوله جدارنازک آکاردئونی تحت نیروی رفت و برگشتی را مورد بررسی قرار گرفته است. لوله‌های جدار نازک ظرفیت تغییر شکل پذیری محوری زیادی دارند و در صورت بروز مد مناسبی برای کمانش غیر الاستیک، برای جذب انرژی زلزله مناسب‌اند. در این مقاله استهلاک انرژی در لوله‌های فلزی جدار نازک آکاردئونی و رفتار آنها در برابر نیروی محوری رفت و برگشتی به منظور استفاده به عنوان میراگر فلزی جاری شونده مطالعه می‌شود. بدین منظور از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده شده است. مطالعات آزمایشگاهی برروی نمونه‌های مشابه موجود در بازار و با استفاده از دستگاه کشش و فشار دینامیکی انجام گرفته است.



شکل ۲۰- نمونه‌های مورد آزمایش لوله‌های جداره نازک آکاردئونی[۲۷]

در این مطالعات تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی این لوله‌ها از قبیل هندسه شکل، ضخامت ورق، قطر و طول لوله و همچنین نوع مصالح بر میزان استهلاک انرژی و سختی محوری بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند لوله های جدار نازک آکاردئونی از نظر جذب انرژی رفتار مطلوبی دارند و با انتخاب پارامترهای هندسی و مکانیکی مناسب می توان به طرح بهینه میراگر فلزی آکاردئونی برای نیاز سازه دست یافت[۲۷]. مطالعه‌ای دیگر برای میراگرهای آکاردونی تحت عنوان مقایسه‌ی شاخص‌های رفتار میراگر فلزی آکاردئونی توخالی و پر شده با فوم پلیمری در بارگذاری محوری رفت و برگشتی ارائه شده است. در این مقاله پس از معرفی میراگر فلزی آکاردئونی پر شده، شاخص‌های رفتار میراگر پر شده و توخالی برای بارگذاری محوری چرخه‌ای مطالعه و مقایسه شده است.



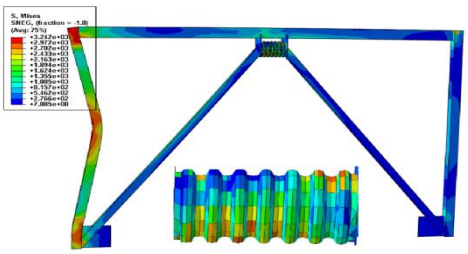
شکل ۲۱- میراگر فلزی آکاردئونی پر شده بهمراه مقطع میراگر[۲۸]

بدین منظور ابتدا به روشی تحلیلی اجزای محدود، مشخصات تقریبی پلیمر پرکننده مؤثر تعیین و سپس چهار نمونه آزمایشگاهی شامل دو نمونه میراگر پر شده با نوع خاصی فوم پلیمریک و دو نمونه‌ی میراگر توخالی متناظر با آنها، با استفاده از جک هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس تأثیر پرشوندگی میراگر با فوم بر برخی از مهمترین شاخص‌های رفتار تعیین و سعی شده از این روش به منظور پایداری و بهبود رفتار میراگر استفاده شود. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ماده پرکننده متناسب در داخل میراگر، روشی مناسب به منظور افزایش برخی شاخص‌های رفتاری میراگر مانند تعداد چرخه‌ی قابل تحمل، میزان جذب انرژی و همچنین ظرفیت خمیری کششی و فشاری میراگر بوده و اثر اندرکنش بین فوم و جدار آکاردئونی در افزایش جذب انرژی و افزایش ظرفیت خمیری سیستم به ویژه برای نمونه‌های جدار نازک آکاردئونی با ظرفیت باربری پایین، چشمگیر است[۲۸].

پژوهشی در جهت گسترش میراگرهای آکاردئونی تحت عنوان رفتار بهبودیافته‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی میراگر فلزی آکاردئونی تحت تأثیر افزایش لایه‌ها ارائه شده است. در این مطالعه با هدف بهبود رفتار میراگر فلزی آکاردئونی به عنوان یکی از بارزترین میراگرهای فلزی جاری شونده،

تأثیر افزایش تعداد لایه های جداره‌ای این میراگر مورد مطالعه‌ی تحلیلی، آزمایشگاهی و پارامتریک قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه های تک لایه و دو لایه انجام شده و مدل های تحلیلی تک لایه، دو لایه و سه لایه‌ای میراگر توسعه یافته و با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفته است. همچنین تأثیر تغییر پارامترهای مهم هندسی جداره‌ای میراگر در رفتار استهلاکی آن بررسی و مدل ایده آل هندسی ارائه شده است. به علاوه مطالعه‌ی تحلیلی به جهت شناسایی میزان تأثیر چند لایه شدن میراگر در قابلیت تحمل تعداد سیکل های بارگذاری انجام شده است. نتایج به دست آمده از مطالعات نشان می دهد که افزایش تعداد لایه های میراگر به دلیل ایجاد پایداری بیشتر رفتاری، اصلاح مودهای کمانشی تغییرشکل و همچنین تأثیرات مطلوب اندرکنش بین لایه ها، تأثیر بسزایی در مشخصات رفتاری میراگر و افزایش تعداد سیکل های بارگذاری قابل تحمل آن دارد[۵] .

پژوهشی در مورد تاثیر گذاری میراگرهای لوله‌ای آکاردئونی در برابر بار انفجار را با عنوان بررسی اثر میراگرهای جدارنازک آکاردئونی در کاهش پاسخ قاب‌ها تحت بار انفجاری ارائه شده است. امروزه، با توجه به رشد روز افزون فعالیت‌های تروریستی خطر مواجه سازه‌ها با بارهای انفجاری افزایش یافته است. وقوع حوادث گوناگون تروریستی در مورد سازه‌های مهم در سراسر جهان سبب شده که در سال‌های اخیر بارهای انفجاری مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرند. حملات اخیر در جهان مثل حادثه مرکز تجارت جهانی نشان می‌دهد که متاسفانه فعالیتهای تروریستی افزایش یافته است. یک نوع از حملات تروریستی رایج، استفاده از مواد منفجره می‌باشد. انفجارها می‌توانند سبب خرابی پیشرونده و یا خرابی کامل در سازه گردند. در حالی که طراحی سازه‌ها برای انفجارهای بزرگ ممکن است گران و غیرعملی باشد، لذا میتوان با بهره‌گیری از انواع مستهلک کننده‌ها سبب افزایش مقاومت انفجاری سازه گردید. هدف از این تحقیق ارزیابی رفتار قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای فلزی آکاردئونی در برابر بار انفجاری می‌باشد. به منظور بررسی اثر میراگر، یک بار قاب بدون میراگر و بار دیگر قاب مجهز به میراگر تحت اثر بار انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است.

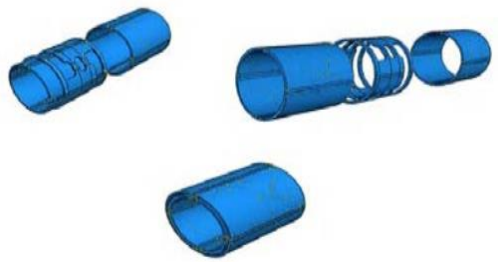


شکل ۲۲- جزئیات نصب میراگر فلزی تسلیم آکاردئونی در اثر انفجار [۲۹]

این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده ازمیراگرهای جدار نازک آکاردئونی، به ویژه در انفجارهای بزرگ تا حد زیادی جابجایی کلی قاب را بهبود می-بخشد. به طوری که در قاب یک طبقه بیشترین کاهش برای سر ستون سمت انفجار ۹۸٪ بوده است. این میزان کاهش برای میانه ستون ۲۱٪ می‌باشد و در قاب چهار طبقه بیشترین کاهش برای تراز سقف چهارم، ۶۴٪ بوده است. این میزان برای تراز سقف سوم ۵۵٪ می‌باشد. استفاده از میراگر به همراه مهاربند روی رفتار انفجاری قاب چهار طبقه نیز تاثیر زیادی دارد. این عامل سبب کاهش جابجایی قاب در تمام بخش‌های آن می‌شود.[۲۹] .

۳-۲-میراگر استوانه‌ای شکافدار

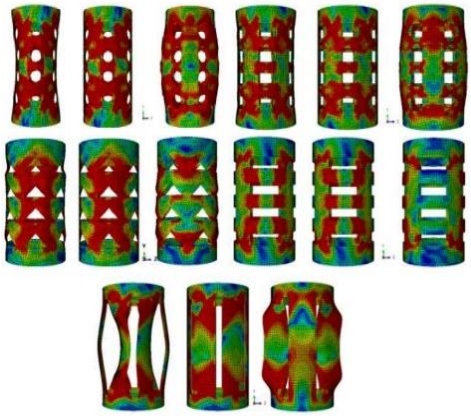
مقاله‌ای تحت عنوان کاربرد یک میراگر لوله‌ای شکافدار جدید با مقطع استوانه‌ای در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، نوع جدیدی از یک میراگر فولادی شکافدار معرفی شده است که می‌تواند به صورت مهاربند در سازه‌ها نصب شود. این میراگر از سه لوله استوانه‌ای توخالی که در داخل هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. در جداره لوله میانی چندین شکاف ایجاد شده است که در اثر تحریکات زلزله و ایجاد نیروی محوری در بادبندها، باریکه‌های ایجاد شده بین این شکاف‌ها تسلیم شده و انرژی مستهلک می‌شود. لوله‌های داخلی و خارجی در میراگر از تغییر شکل خارج از صفحه لوله میانی جلوگیری می‌کنند. همچنین، در دیواره لوله‌های داخلی و خارجی چندین سوراخ لوبیایی تعبیه شده است تا جابجایی حداکثر دستگاه را محدود کرده و از تغییر شکل بیش از حد باریکه‌های شکاف‌ها جلوگیری کنند.



شکل ۲۳- جزئیات پیشنهادی برای میراگر شکافدار[۳۰]

سادگی ساخت این میراگر نسبت به میراگرهای مشابه و نیز در دسترس بودن و سهولت بازرسی آنها از مزایای این سیستم است. آنگاه این سازه، در حالت مجهز شده به میراگر و بدون آن، تحت ارتعاشات پایه مربوط به سه زلزله السنترو، کوبه و طبس قرار داده شده و تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی بر روی آن انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل‌های عددی نشان دادند که میراگر معرفی شده تأثیر قابل ملاحظه‌ای در جذب انرژی زلزله‌های وارده و همچنین کاهش دریفت طبقات و برش پایه داشته است[۳۰] .

مقاله‌ای دیگر تحت عنوان تأثیر شکل شکاف میراگر فولادی توخالی دایره‌ای بر ظرفیت استهلاک انرژی آن نیز ارائه شده است. این تحقیق به بررسی تأثیر شکاف‌های میراگر فولادی توخالی دایره‌ای (CHS) بر استهلاک انرژی(EDC) آن می‌پردازد. محاسبات استهلاک انرژی از نمودار هیسترتیک نمونه‌ها بدست آمده است. و تجزیه و تحلیل بروش اجزای محدود دینامیکی غیرخطی سه بعدی در نرم‌افزار Abaqus صورت گرفته است. برای ایجاد جابجایی چرخه‌ای از قسمت بالای دستگاه استفاده می‌شود در حالی که قسمت پایینی کاملاً مهار شده در نظر گرفته می شود. در این مدل‌ها وجود تغییر شکل‌های بزرگ در دستگاه، در نتیجه تسلیم مواد در نظر گرفته شده است در مجموع ۵ شکل مختلف برای شکاف‌ها در نظر گرفته شده است. شکاف‌ها شامل شکاف افقی، عمودی، دایره‌ای، مربعی و مثلثی هستند. تمام پیکربندی شکاف‌ها یک مساحت خالی را ارائه می‌دهند تا مقایسه عادلانه‌ای حاصل شود. از فولاد-A ۳۶برای میراگر به عنوان فولادی که دارای ویژگی‌های شکل پذیری خوبی است استفاده شده است. در نهایت، عملکرد هر یک از مدل‌های میراگر CHS از ویژگی‌های نمودار هیسترتیک، توزیع تنش و استهلاک انرژی آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده مدل با شکاف‌های مدور یا دایره‌ای، بیشترین ظرفیت استهلاک انرژی را ارائه می‌دهد، زیرا این نوع شیار یا شکاف، بر خلاف بقیه مدل-های مورد بررسی که راس یا گوشه آنها متمرکز کننده تنش هستند، نشان از توزیع تنش‌ها در کل شکاف‌ها می‌باشد. دستگاه دارای شکاف‌های دایره‌ای استهلاک انرژی بیشتری را ارائه می‌دهد، رفتار هیستریتیک آن در چرخه‌های بار ثابت بود. نمونه شیاردار یا شکافدار مربعی نیز چرخه‌های پسماند پایدار را ارائه می‌دهد، اما به دلیل تمرکز تنش بر رأس یا گوشه مربع‌ها، ظرفیت استهلاک انرژی کمتری را ارائه می‌دهد. جالب است که مشاهده شده که همه مدل‌های شکافدار مورد بررسی نسبت به حالت اولیه خود تغییر شکل‌های قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند، با این حال نمونه با شکاف‌های افقی نمونه‌ای بود که کمتر دچار تغییر شکل شده است[۳۱] .

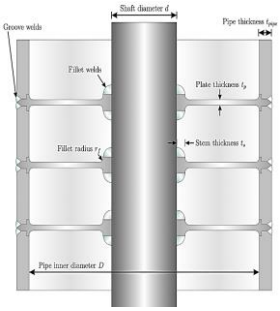


شکل ۲۴- بررسی تغییر شکل و تنش انواع شکل مختلف شکاف برای میراگر فولادی استوانه‌ای[۳۱]

۳-۳-میراگر استوانه‌ای پیستونی

مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی تجربی و عددی میراگر فلزی پیستونی (PMD) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، یک میراگر تسلیم فلزی، به نام دمپر فلزی پیستونی (PMD) برای اولین بار معرفی شده است. PMD از مجموعه‌ای از صفحات دایره‌ای توخالی موازی تشکیل شده است که محور داخلی PMD را به لوله خارجی آن متصل می‌کند. از آزمایش‌ها و مدل‌های عددی برای بررسی کاربرد آن به عنوان یک دستگاه مستهلک کننده انرژی لرزه‌ای استفاده شده است. در این میراگر

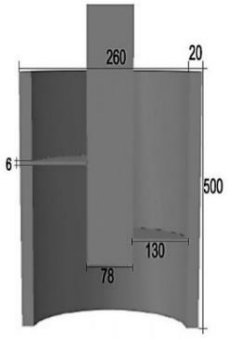
مستهلک کننده انرژی لرزه‌ای جدید هنگامی که سیستم جابجایی‌های کوچک تا متوسط را تجربه می‌کند، انرژی از طریق خمش ورق‌های فولادی مدور مستهلک می‌شود. در جابجایی‌های بزرگ، رفتار کششی غالب می‌شود و باعث افزایش قابل توجه سختی سیستم می‌شود.



شکل ۲۵- جزئیات مدل و قطعات میراگر فلزی تسلیم پیستونی(PMD) [۳۲]

در برنامه آزمایشی، نمونه‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند و رفتار هیسترتیک آنها ثبت شده است. این آزمایشات نشان می‌دهد که PMD قادر است مقدار قابل توجهی از انرژی ورودی لرزه ای را با یک رفتار هیسترتیک پایدار مستهلک کند و الزامات آئین‌نامه‌ای را برای خستگی با چرخه کم و جابجایی زیاد ارضا کند. در جابجایی نسبتاً زیاد بین شفت و لوله خارجی، رفتار صفحات تغییر شکل یافته به حالت کششی تغییر می‌کند و سختی سیستم را افزایش می‌دهد. تعداد صفحات فولادی تاثیر قابل توجهی بر روی جابه‌جای تسلیم ندارند. با افزایش ضخامت صفحات یا نسبت شفت به قطر لوله، شکل حلقه‌های هیسترزیس از منحنی‌های پروانه ای به شکل تقریباً مستطیلی با ظرفیت جذب انرژی بیشتر تغییر می‌کند، در نتیجه ظرفیت جابجایی نمونه‌ها کاهش می-یابد.[۳۲] .

در ادامه مطالعات لوله‌های فولادی مقاله‌ای تحت عنوان بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب فولادی با استفاده از میراگر پیستونی با صفحات نیم دایره‌ای ارائه شده است. در میان سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای دینامیکی می‌توان به سیستم مهاربند پیستونی شکل اشاره کرد که نقش مهمی در پایداری سازه‌ها و کنترل پاسخ‌های دینامیکی از قبیل جابجایی و شتاب، دارند و با جذب انرژی، سازه را در برابر تحریکات مختلف مقاوم کرده و مانع از ایجاد آسیب‌های جدی به سازه می‌شوند. در این مقاله، سیستم مهاربند پیستونی شکل جدیدی که از دو لوله خارجی و داخلی و تعدادی صفحات نیم دایره‌ای موازی متصل به آنها تشکیل شده‌اند در نظر گرفته شده است که در برابر فشار، کشش و کمانش هم، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند و به صورت‌های مختلف همگرا و واگرا می‌توانند نصب شوند و با اتلاف انرژی از میزان نیروهای جانبی وارد بر سازه بکاهند.

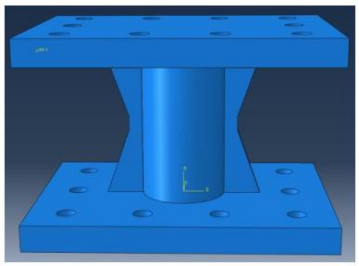


شکل ۲۶- جزئیات میراگر پیستونی با صفحات نیم دایره‌ای[۳۳]

در این مقاله رفتار قاب فولادی با استفاده از سیستم مهاربند پیستونی شکل در برابر بارهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است و برخی پاسخ‌های دینامیکی آن کنترل شده است. برای این منظور پنج نوع پیستون طراحی شده است که هر کدام در یک قاب فلزی یک دهنه تعبیه شده‌اند. پس از مدلسازی هر پنج نوع مهاربند، نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اصلی‌ترین هدف این پژوهش، بررسی کارایی این سیستم جدید در کنترل پاسخهای دینامیکی نظیر جابجایی، سرعت و شتاب و کمانش مهاربند پیستونی شکل بوده است تا آسیب‌های ناشی از بارهای جانبی که به سازه اعمال می‌شوند به حداقل برسانند. در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از ورق‌های نیم دایره‌ای پیستونی و افزایش فاصله آنها از یکدیگر بر رفتار قاب مهاربندی شده همگرا با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده تا مشخص گردد که چه تفاوتی در عملکرد سازه ایجاد می-کند. با بررسی نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزایش فاصله ورق-های نیم دایره‌ای پیستونی میزان ظرفیت باربری کاهش پیدا کرده و افزایش فاصله، شکل پذیری پیستون را افزایش داده و با بیشتر شدن میزان شکل پذیری سختی کاهش یافته و باعث استهلاک انرژی بیشتری شده است.[۳۳] .

۳-٤-میراگر استوانه‌ای دارای رفتار برشی

پژوهشی در مورد برآورد ظرفیت نهایی استهلاک انرژی میراگرهای لوله-ای فولادی صورت گرفته است. آزمایش‌های نمونه دمپر لوله های فولادی بسیار مهم اما گران و زمان بر هستند. بنابراین ابزارهای کارآمد برای به حداقل رساندن هزینه و زمان با اجتناب از آزمایش‌های غیر ضروری مورد نیاز است. این مقاله ارزیابی دقیق اجزای سازنده را با استفاده از شبیه سازی شکست یا آسیب شکل پذیری با نرم‌افزار المان محدود بر اساس رویکرد محلی تحلیل و تجزیه می‌کند و ظرفیت نهایی استهلاک انرژی میراگرهای لوله‌ای فولادی را با استفاده از مدل آسیب مبتنی بر انرژی را برآورد می‌کند.



شکل ۲۷- نمونه استفاده شده از میراگر لوله‌ای فولادی برای برآورد ظرفیت نهایی استهلاک انرژی[۳۴]

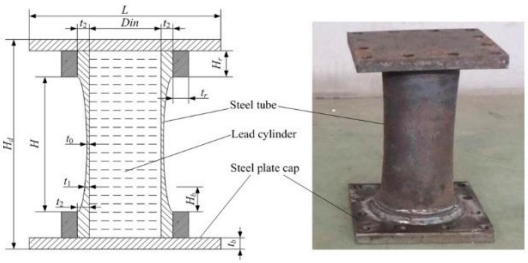
پیش بینی اولیه دقیق برای برآورد عملکرد میراگرهای لوله‌ای فولادی بسیار مهم است. رفتار هیسترتیک و ظرفیت نهایی استهلاک انرژی از طریق شبیه سازی اجزای محدود پس از ارزیابی دقیق اجزا مورد بررسی مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از این رویکردها، می توان ظرفیت نهایی استهلاک انرژی نهایی میراگرهای لوله‌ای فولادی را تحت الگوهای مختلف بارگذاری برآورد کرد.[۳۴] .

مقاله‌ای تحت عنوان ویژگی‌های هیسترزیس چرخه پایین میراگر فولادی توخالی دایره‌ای با رفتار غیرالاستیک ارائه گردیده است. این مطالعه با هدف ارزیابی رفتار هیسترتیک میراگر فولادی توخالی دایره‌ای (CHSD)انجام شده است. CHSD یکی از میراگرهای فولادی است که انرژی لرزه‌ای را از طریق تغییر شکل غیرارتجاعی مصالح فلزی و کشش هندسه شکل دایره‌ای مستهلک می‌کند. تجزیه و تحلیل اجزای محدود به منظور ارزیابی ویژگی‌های هیسترتیک چرخه کم و خستگی CHSD با استفاده از شاخص شکست انجام شده است.

شکل ۲۸- نمونه‌ای از تغییر شکل پلاستیک میراگر لوله‌ای در شرایط آزمایشگاهی[۳۵]

بسته به نسبت قطر به ضخامت(D/t) ، واکنش هیسترتیک و همچنین حالت کمانش میراگر فولادی دایره‌ای توخالی متفاوت است. رفتار خستگی با چرخه پایین با استفاده از شاخص شکست و شاخص PEEQ ارزیابی می‌شود[۳۵] .

مقاله‌ای تحت عنوان عملکرد لرزه‌ای میراگر لوله فولادی پر از سرب: تست آزمایشگاهی، شناسایی پارامترها و کاربردها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، یک میراگر لوله فولادی پر از سرب (LFSTD) ارائه شده است که شامل یک لوله فولادی، یک استوانه سربی و دو درپوش صفحه فولادی است. هفت LFSTD بر اساس نسبت ضخامت به قطر، ضریب ضعف و نسبت ارتفاع به قطر در سه گروه طراحی شده است. آنها تحت آزمایش چرخه‌ای شبه استاتیکی در آزمایشگاه قرار گرفتند تا پارامترهای دستگاه مانند رفتار هیسترتیک، مقاومت، شکل پذیری، استهلاک انرژی، میرایی و تا حالت‌های خرابی مشخص شود.



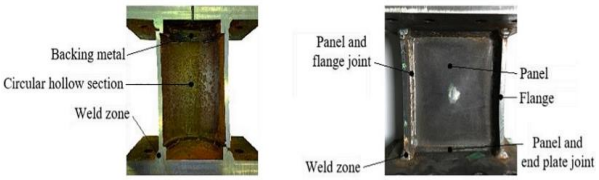
شکل ۲۹- معرفی جزئیات مدل و قطعات میراگر فولادی تسلیم لوله‌ای پر شده با سرب[۳۶]

نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که LFSTD ها در جذب انرژی لرزه‌ای و کاهش جابجایی‌های جانبی سازه محافظت شده توسط میراگر پیشنهادی کاربردهای بالقوه‌ای دارند. LFSTDها حلقه‌های هیسترتیک پایدار را از خود نشان می‌دهند که با زوال اندک مقاومت و سختی مشخص می‌شود. مدل قاب RC مجهز به میراگرای پیشنهادی هنگامی که که تحت تحریکات لرزه‌ای شدید قرار می‌گیرد عملکرد لرزه‌ای رضایت بخشی را ارائه می‌دهد[۳۶] .

مقاله‌ای تحت عنوان ارتقاء عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی توسط معرفی میراگرهای لوله فولادی پر شده با سرب ارائه شده است. خرابی ستون مرکزی می‌تواند باعث سقوط سازه‌های بزرگ زیرزمینی در هنگام زلزله‌های شدید شود. استفاده از میراگرهای لوله‌ای فولادی سرب دار (LFSTDs) در طراحی لرزه‌ای چنین سازه‌هایی برای کاهش یا جلوگیری از چنین احتمالی پیشنهاد شده است. تجزیه و تحلیل دینامیکی سه بعدی ایستگاه مترو Daikai با و بدون (LFSTDs) تحت اثر زلزله Hyogoken–Nambu، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از LFSTDs در سازه‌های بزرگ زیرزمینی به طور قابل ملاحظه‌ای نیروی وارده، تغییر شکل و آسیب مربوط به ستون مرکزی تحت بار لرزه‌ای را کاهش می‌دهد.

LFSTD می‌تواند انرژی لرزه‌ای را به طور موثری پراکنده کند، به ویژه در هنگام ارتعاش‌های شدید. در طی این مدت، حداکثر تغییر شکل برشی LFSTD کمتر از ۲۰ میلی متر است، درنتیجه به سازه اصلی این اجازه را می‌دهد تاعملکرد طبیعی خود را حفظ کند. افزایش تعداد LFSTDهای نصب شده منجر به کاهش آشکارتر اثرات لرزه‌ای در سازه شده و باعث افزایش بازده استهلاک انرژی LFSTD ها می‌شود.[۳۷] .

پژوهشی دیگری تحت عنوان رفتار چرخه‌ای میراگرهای هیسترتیک برشی با شکل‌های مقطع مختلف نیزمورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه یک میراگر فلزی از نوع برشی ساخته شده با یک لوله توخالی دایره‌ای را مورد بررسی قرار داده است. یک میراگر دیگر با مقطع H شکل، که معمولاً به عنوان یک میراگر برشی فلزی استفاده می‌شود، نیز برای مقایسه در مطالعه گنجانده شده است.



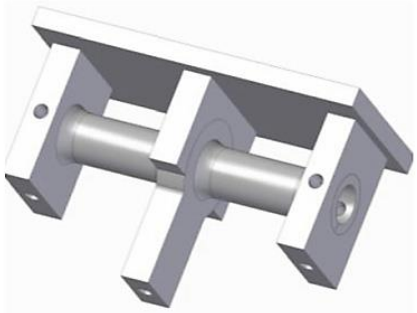
شکل ۳۰- جزئیات میراگرهای برشی الف) با مقطع H شکل، ب) با مقطع دایره‌ای توخالی یا استوانه‌ای[۳۸]

یک معادله سازه‌ی برای محاسبه مقاومت و سختی اولیه بر اساس مکانیزم آسیب پلاستیک برای دو نوع میراگر ارائه شده است. برای هر دو نوع میراگر، یک آزمایش بارگذاری چرخه‌ای برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی آنها به عنوان میراگرهای هیسترتیک صورت پذیرفته است. نمونه‌های میراگرها با یک سطح مقطع و با استفاده از فولاد نرمه ساخته شده و طوری طراحی شده‌اند که تقریباً از مقاومت برشی پلاستیک، سختی اولیه و وزن یکسان برخوردار باشند. نتایج تجربی تأیید می‌کنند که هر دو نوع میراگر ویژگی‌های هیسترتیک پایدار را نشان می‌دهند و دارای ظرفیت تغییر شکل غیرارتجاعی و ظرفیت جذب انرژی مناسبی هستند. در نتیجه تحت شرایط بارگذاری یکسان دو میراگر نسبت افزایش مقاومت و ظرفیت شکل‌پذیری تقریباً به یک میزان افزایش یافته است. کرنش از نظر مقاومت و شکل‌پذیری، تفاوت چندانی با توجه به شکل و مقطع میراگرها وجود نداشته است. علاوه بر این، ظرفیت استهلاک انرژی دو نوع میراگر نیز مشابه بوده است[۳۸] .

۳-۵-میراگر لوله‌ای بر پایه رفتار پیچشی

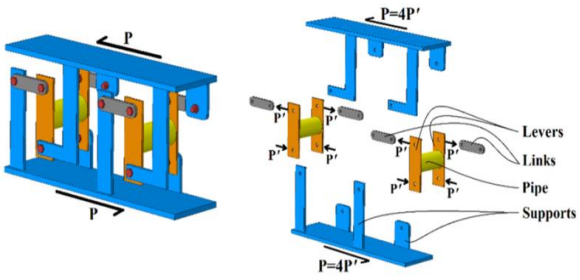
مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی دستگاه جدیدی از مستهلک کننده‌های انرژی بر پایه پلاستیسیته فلزات نیز ارائه شده است. این دستگاه جدید بر اساس پلاستیسیته فلزات از طریق تنش مماسی ایجاد شده توسط پیچش خالص(بدون بارهای برشی و ممان خمشی در لوله‌های فولادی) است. پس از تشریح مراحل طراحی و تجزیه و تحلیل، آزمایشات انجام شده بر روی چندین نمونه اولیه تولید شده با فولاد کم کربن در این مقاله شرح داده شده است. چهار نمونه اولیه(در اندازه کامل) آزمایش شده است. آزمایش‌ها تحت بارگذاری سیکلیک صورت پذیرفته است. در نهایت، پارامترهای که تجزیه و تحلیل شده و نتیجه‌گیری شده، جابجایی، نیروها، سختی، پلاستیسیته واستهلاک انرژی بوده است. در تمامی موارد تسلیم

پس از تقریباً تعداد چرخه‌های یکسان در نمونه‌ها شروع شده است. به‌عنوان نتیجه‌گیری نهایی، می‌توان گفت که دستگاه رفتار هیسترتیک پایدار، با حلقه‌هایی هیسترتیک با شکل و رفتار منظم و متقارن را از خود نشان داده است. این دستگاه دارای ظرفیت خستگی بالا در چرخه پایین است. انرژی مستهلک شده و پارامتر شکل پذیری به طور قابل توجهی بزرگتر و بالاتر از مقادیری هستند که از سایر دستگاه‌ها با رفتار هیسترتیک به دست آمده است. مزیت دیگر این دستگاه عدم وجود کمانش موضعی در مناطق تسلیم است.[۳۹] .



شکل ۳۱- میراگر لوله‌ای فولادی با رفتار پیچشی[۳۹]

مقاله‌ای دیگری تحت عنوان بررسی عملکرد تحلیلی و تجربی میراگر فلزی تسلیم تحت پیچش خالص ارائه گردیده است. در این مقاله یک میراگر تسلیم جدید با مکانیزم پیچشی خالص معرفی و بررسی شده است. نیروی برشی طبقات با استفاده از جزئیات خاص به دستگاه پیشنهادی منتقل می‌شود تا پیچشی خالص بدون نیروی برشی و گشتاور خمشی در لوله‌های میراگر ایجاد کند. بنابراین، ظرفیت استهلاک انرژی اجزای میراگر می‌تواند به طور موثری مورد استفاده قرار گیرد. برخی از روابط برای ویژگی‌های ساختاری میراگر پیشنهادی از جمله سختی اولیه، تسلیم و مقاومت نهایی و رابطه بار–جابجایی، به صورت تحلیلی بدست آمده است. این امر با فرض منحنی دو خطی برای ویژگی مواد فولادی با توجه به سخت شدگی کرنشی آن انجام شده است.

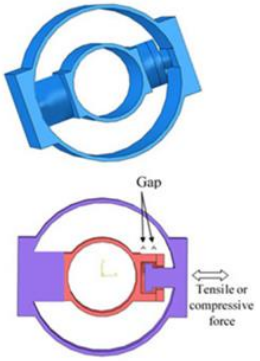


شکل ۳۲- جزئیات مدل میراگر لوله‌ای فولادی تحت پیچش خالص[۴۰]

منحنی‌های هیسترتیک نشان دهنده یک رفتار چرخه ای پایدار و خوش فرم(متوازن) است. نتایج نیز قابلیت جذب و شکل پذیری بالای انرژی را برای این نوع از میراگر را نشان می‌دهند. تسلیم گسترده و توزیع تنش یکنواخت در کل ضخامت دیواره لوله میراگر منجر به میرایی ویسکوز معادل ۳۸ تا ۴۸ درصدی است[۴۰] .

٤-میراگر لوله‌ای چند سطحی

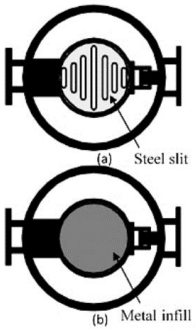
پژوهشی با عنوان آزمایش چرخه‌ای لوله‌های چند سطحی در میراگر لوله-ای ارائه گردیده است. در قسمت اول این تحقیق مطالعه تحلیلی شکل جدیدی از میراگر لوله‌ای چند سطحی است که اخیراً توسط نویسندگان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، تأیید تجربی و آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی و جزئیات ساخت عملی آن ارائه شده است. میراگر پیشنهادی شامل ترکیبی از لوله‌های تو در تو است که می‌تواند پارامترهای رفتار دینامیکی مانند مقاومت، سختی و نسبت میرایی را برای جذب و استهلاک انرژی در سطوح مختلف زلزله تغییر دهد.



شکل ۳۳- معرفی اجزای میراگر تو در توی لوله‌ای فولادی دو سطحی[۴۱]

آزمایشات شبه استاتیکی چرخه‌ای با توجه به پروتکل بارگذاری-ATC ۲۴بر روی دو نمونه انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، جذب و استهلاک انرژی مناسب، شکل پذیری و منحنی‌های هیسترتیک پایدار در نمونه‌ها مورد آزمایش مشاهده شده است. منحنی های هیسترزیس یک رفتار انعطاف‌پذیر و شکل‌پذیر قابل اعتماد را بدون هیچ گونه تنش شدید و متمرکز را نشان می‌دهند. همچنین، عملکرد چند سطحی همانطور که انتظار می‌رفت می‌تواند انرژی را در سطوح مختلف انرژی ورودی پخش کنترل کند. علاوه بر این، دستیابی به شکل پذیری بالا باعث شده است که نسبت میرایی ویسکوز معادل در حدود ۱۹ تا ۳۸ درصد قابل دسترس باشد که درصد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. دستگاه پیشنهادی سبک وزن است و به راحتی ساخته می‌شود و عملکرد چرخه‌ای مناسبی را برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای نشان می‌دهد[۴۱] .

نویسندگان پژوهش قبلی ذکر شده را با مقاله‌ای تحت عنوان بهبود رفتار چرخه‌ای میراگر لوله‌ای چند سطحی با استفاده از پر کردن داخل لوله داخلی توسط صفحه‌ی یکپارچه و شکاف دار توسعه داده‌اند. قسمت اول این تحقیق مطالعه تحلیلی شکل جدیدی از میراگر لوله‌ای چند سطحی است که اخیراً توسط نویسندگان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، با افزودن سرب یا روی یا دیافراگم شکاف در داخل لوله داخلی، سعی شده است نسبت میرایی ویسکوز معادل را افزایش داده و عملکرد چرخه‌ای سیستم کنترل چند سطحی که قبلا پیشنهاد شده بود را بهبود بخشد. میراگر از سه قسمت اصلی شامل لوله بیرونی، لوله داخلی و قسمت میرایی مکملی بعدا اضافه شده تشکیل یافته است.



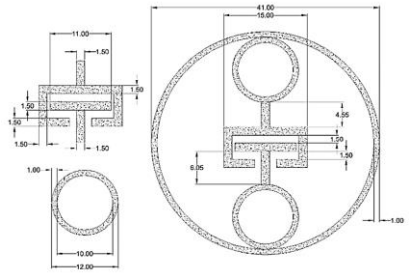
شکل ۳۴- معرفی میراگر تو در توی لوله‌ای دو سطحی پر شونده[۴۲]

در ابتدا تغییر شکل پلاستیک لوله خارجی، سپس لوله داخلی و به ویژه هسته اضافه شده و اصطکاک بین آنها باعث می‌شود که سیستم میراگر به صورت چند سطحی به عنوان یک سیستم استهلاک انرژی بهبود یافته عمل کند. چندین نوع پر کننده سرب یا روی اضافه شده و همچنین اشکال مختلف دیافراگم شکاف در داخل لوله داخلی مدل شده و اثر آنها بر منحنی‌های هیسترتیک با تجزیه و تحلیل استاتیک غیرخطی با استفاده از روش اجزای محدود توسط نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که افزودن سرب تأثیر عمده‌ای روی سختی میراگر ندارد در حالی که پر شدن توسط روی و دیافراگم یا صفحه شکاف بسته به ضخامت صفحه و قطر لوله، سختی میراگر را تا بیش از ۱۰ برابر افزایش می‌دهد[۴۲] .

در ادامه توسعه و گسترش پژوهش‌های میراگرهای لوله‌ای تسلیم فلزی با عنوان ارزیابی رفتار میراگر تسلیمی لوله در لوله با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) گردیده است. در این تحقیق در ابتدا یک میراگر چندسطحی غیرفعال لوله‌درلوله نوین با قابلیت تغییر سختی، مقاومت و میزان جذب انرژی در سطوح مختلف جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها ارائه گردیده و عملکرد آن در سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده با استفاده از نرم افزار SAP۲۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آنست که علیرغم تفاوت ماهیت زلزله‌های انتخابی و مولفه های دینامیکی آنها نظیر مدت تداوم و نیز محتوای فرکانسی، در تمامی آنها میراگر پیشنهادی سبب بهبود محسوس عملکرد سازه گردیده که موید عملکرد موثر در بهسازی سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف به واسطه سختی و مقاومت متغیر آن است. به نظر می‌رسد میراگر پیشنهادی در عین سادگی، قابلیت اجرا و هزینه نسبی

پایین، از عملکرد مناسب و قابل قبول در کاهش دامنه ارتعاشات و در نتیجه نیروی وارد به سازه برخوردار باشد[۴۳] .

مطالعه دیگری نیز در مورد میراگرهای لوله‌ای تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر لوله‌ای جهت کنترل دو سطح مختلف زمین لرزه ارائه گردیده است. در این مطالعه به بررسی عددی و آزمایشگاهی میراگر لوله‌ای جدید تشکیل شده از سه حلقه پرداخته شده است. میراگر مورد بررسی از ترکیب سه حلقه‌ی فولادی تو در تو تشکیل شده است که قادر به اتلاف انرژی در دوسطح زمین لرزه‌ی متفاوت می‌باشد. فیوز کمکی (حلقه‌ی بیرونی) در زمین لرزه‌های متوسط و فیوز اصلی (حلقه‌های داخلی) در زمین لرزه‌های شدید انرژی ورودی زمین لرزه را جذب می‌نماید.



شکل ۳۵- جزئیات مدل و قطعات میراگر فولادی لوله‌ای دو سطحی[۴۳]

نتایج نشان داده است که پیکربندی پیشنهادی به خوبی عملکرد دو سطحی میراگر را تامین می‌کند. افزایش سختی و نیروی قابل تحمل بعد از تاخیر تغییرمکانی باعث افزایش میزان جذب انرژی در سیکل‌های بالاتر شد. بررسی میرایی معادل محاسبه شده در مدل‌ها نشان داد استفاده از فیوز اصلی در تغییرمکان‌های زیاد موجب شده است که میرایی در بازه‌ی تغییرمکانی لازم بهبود یابد. دو افزایش سختی و نیرو پس از فاصله‌ی تغییرمکانی اتفاق افتاده است. تغییرات قطر و ضخامت در مدل‌های عددی نشان داده است تغییرات ضخامت تاثیر بیشتری در سهم نیروهای منتقل شده به فیوز اصلی دارد. به نحوی که افزایش ضخامت سهم نیروی وارد بر فیوز داخلی را افزایش داده و بالعکس افزایش قطر سبب کاهش این سهم میگردد. مقادیر انرژی تلف شده برای مدلهای عددی میراگر دوسطحی نشان می‌دهد در سیکلهای بالا به دلیل عملکرد غیر خطی هر دو فیوز سطح جذب انرژی افزایش ناگهانی داشته است. مقادیر میرایی ویسکوز معادل برای مدلهای عددی در تغییرشکل نهایی برابر ۱۵ درصد محاسبه شده است [۴۴]. نتایج مشابهی با هندسه متفاوت از میراگرها نیز مشاهده شده است [۴۵].

۵-نتیجه‌گیری

مطابق مرور و بررسی صورت گرفته بر روی تحقیقات میراگرهای لوله‌ای فولادی، نتایج گواه این است که پژوهش‌های مناسبی بر روی این نوع از میراگرها صورت پذیرفته است. با توجه به بررسی موردی این نوع از میراگرها اعم از نوع رفتار و شکل هندسی آنها، می‌توان نتیجه گیری‌های ذیل را به اختصار ارائه کرد.

با استفاده از مواد پر کننده اعم از روی، سرب، تفلون(پلاستیک صنعتی)، مواد کامپوزیتی الیافی و یا صفحات فولادی شکافدار می‌توان پارامترهای جذب انرژی، شکل‌پذیری، مقاومت و سختی میراگرهای فولادی را بهبود بخشید. همچنین ملاحظه شد که با اضافه کردن لوله دوم به میراگر تک لوله پارامترهای ذکر شده بهبود می‌یابند.

میراگرهای لوله‌ای ساخته شده استفاده از موادی همچون CT۲۰ به جای فولاد ST۳۷ نتایج قابل توجهی را به دنبال دارد از جمله‌ای آنها می‌توان به افزایش ظرفیت تحمل نیروی حلقه‌های فولادی اشاره کرد. همچنین مشاهده شد که شکل پذیری مدل CT۲۰ می تواند تا چهل درصد بیشتر از مدل ST۳۷ باشد، علاوه بر این، نتیجه گرفته شد که مدل CT۲۰ از نظر استهلاک انرژی نیز مفیدتر از فولاد ST۳۷ است. استفاده از یک حلقه فولادی ضخیم‌تر ظرفیت آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و همچنین باعث شکل پذیری بیشتر مدل می‌شود.

همچنین ملاحظه شد که با استفاده از میراگرهای لوله‌ای در سازه‌ها می‌توان از انها به عنوان فیوز سازه‌ای بهره برد. بطوریکه این امکان را فراهم می‌سازند که با استهلاک انرژی وارده، از خرابی دیگر المان‌های اصلی سازه جلوگیری کنند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی میراگرهای آکاردئونی این نوع از میراگرهای علاوه بر مزایای خود در برابر بارهای لرزه‌ای، دارای ویژگی کاهش پاسخ قاب‌ها تحت بار انفجاری نیز هستند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده ازمیراگرهای جدار نازک آکاردئونی، به ویژه در انفجارهای بزرگ تا حد زیادی جابجایی کلی قاب را بهبود می‌بخشد.

نوع دیگری از میراگرهای لوله‌ای فولادی، میراگرهای لوله‌ای چند سطحی هستند که این نوع از میراگرهای پیشنهادی شامل ترکیبی از لوله‌های تو

در تو هستند که می‌توانند پارامترهای رفتار دینامیکی مانند مقاومت، سختی و نسبت میرایی را برای جذب و استهلاک انرژی در سطوح مختلف زلزله تغییر دهند. فیوز کمکی (حلقه‌ی بیرونی) در زمین لرزه‌های متوسط و فیوز اصلی (حلقه‌های داخلی) در زمین لرزه‌های شدیدتر انرژی ورودی زمین لرزه را جذب می‌نماید. به طور کلی میراگر چندسطحی غیرفعال لوله‌درلوله با قابلیت تغییر پکیجی از پارامترها اعم از سختی، مقاومت و میزان جذب انرژی در سطوح مختلف جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها ارائه گردیده‌اند.

از دیگر ویژگی‌های مهم این نوع از میراگرها می‌توان به ظرفیت افزایش سختی میراگرهای لوله‌ای در کنار دیگر ویژگی‌های آنها اعم از استهلاک انرژی، افزایش مقاومت و شکل‌پذیری اشاره کرد. افزایش سختی باعث کاهش جابجایی‌های وارد می‌شود، مزیت اصلی این فرآیند در میراگرهای لوله‌ای چند سطحی به شکل کامل‌تری خود را بروز داده و باعث افزایش سختی متناسب با افزایش جابجایی‌های وارده در هر مرحله می‌گردد.

هریک از این میراگرها به نوبه خود با توجه به تکنولوژی ساخت موجود امکان اجرا دارند به گونه‌ای که اغلب این نوع میراگرها دارای تکنولوژی ساخت راحت وکم هزینه بوده و امکان تعویض قطعات آسیب دیده پس از زلزله برای هریک از این نوع میراگرها مهیا می‌باشد. از طرفی میراگرهای لوله‌ای فولادی مزایایی مانند توانایی جذب و استهلاک انرژی بالا، عملکرد ثابت در بارگذاری چرخه‌ای، ظرفیت شکل پذیری، مقاومت و سختی بالا را ارائه می‌دهند. که به موجب آن می توان صدمات وارده به اجزای اصلی سازه را برای سازه‌های جدید و موجود به حداقل رساند. قابل ذکر است که با توجه به مطالعات صورت گرفته و ویژگی‌های ذکر شده هنوز کاربرد گسترده این نوع از میراگرها را شاهد نیستیم و در آئین نامه‌های موجود جای خالی ضوابط طراحی چنین سیستم‌های استهلاک انرژی تا حد زیادی با توجه به اهمیت موضوع احساس می‌شود.

٦-مراجع

١. Javanmardi, A., et al, State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation, Archives of Computational Methods in Engineering, ٢٠٢٠, ٢٧, ٤٥٥–٤٧٨.

٢. Spencer BF Jr, Nagarajaiah S, State of the art of structural control. Journal Structural Engineering, ٢٠٠٣, ١٢٩:٨٤٥–٨٥٦.

٣. Saaed TE, Nikolakopoulos G, Jonasson J-E, Hedlund H., A state-of-the-art review of structural control systems. Journal Vib Control,٢٠١٣, ٢١:٩١٩–٩٣٧.

[۴]. زهرائی، سیدمهدی؛ مرتضی‌قلی، محمدحسین. "بهبود عملکرد میراگرهای بیضی شکل در قاب فلزی مهاربند شورن به کمک ورق‌های سخت کننده جانبی " ، هفتمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران–تهران، ۱۳۹۴، صفحه ۳۰–۳۷.

[۵]. ناطقی‌الهی، فریبرز؛ تربت اصفهانی، مهدی. "رفتار بهبودیافته‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی میراگر فلزی آکاردئونی تحت تأثیر افزایش لایه‌ها " ، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲–۳۱، شماره ۳/۱، ۱۳۹۴، صفحه ۲۹–۱۹.

[۶]. حسن‌زاده، جواد؛ سرافرازی، سیدرضا؛ خطیبی‌نیا، محسن. "ارزیابی عملکرد اتصال تیر به ستون مجهز شده به میراگر لوله‌ای فولادی بیضوی "، مجله علمی–پژوهشی عمران مدرس، دوره بیست و یکم، جلد ۲۱ شماره ۲، ۱۴۰۰، صفحات ۷۷–۶۳.

٧. Gullu, A. et al, Numerical Modelling of Energy Dissipative Steel Cushions, International Journal of Steel Structures,٢٠١٩, Vol. ١٩, ١٣٣١–١٣٤١.

٨. Lahooti, A. et al, Cyclic Behavior of Pipe Dampers Reinforced with High-performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC) Materials, Jordan Journal of Civil Engineering, ٢٠٢٠, Vol. ١٤, No. ٢.

٩. Maleki, Sh. Bagheri, S., Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study, Journal of Constructional Steel Research, ٢٠١٠, ٦٦،١٠٨٨–١٠٩٥.

١٠. Maleki, Sh. Mahjoubi, S., Dual-pipe damper, Journal of Constructional Steel Research, ٢٠١٣, ٨٥،٨١–٩١.

١١. Maleki, Sh. Mahjoubi, S., Infilled-pipe damper, Journal of Constructional Steel Research, ٢٠١٤, ٩٨،٤٥–٥٨.

١٢. Abebe, D. Choi, J., Analytical Evaluation on Hysteresis Performance of Circular Shear Panel Damper, International Journal of Civil, Architectural,

Structural and Construction Engineering, ۲۰۱٤, Vol:۸ No:٦.

۱۳. Mahjoubi, S. Maleki, Sh., Seismic performance evaluation and design of steel structures equipped with dual-pipe dampers, Journal of Constructional Steel Research,۲۰۱٦, ۱۲۲،۲۵–۳۹.

۱٤. Abdollahiparsa, H. et al, Seismic behavior of braced steel frames with pipe dampers, Advances in Structural Engineering, ۲۰۲۰, Vol. ۲٤(۸), ۱۵۲٦-۱۵۳۸.

۱۵. Behzadfar, B. et al, Improved Seismic Performance of Chevron Brace Frames Using Multi-Pipe Yield Dampers, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, ۲۰۲۰, Vol. ۸-٤, ۱۳۷-۱۵۵.

۱٦. Guo, W. et al, Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halves, Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۲۰, Vol. ۱۷۰(۵).

۱۷. Guo, W. et al, Development and seismic performance of bolted steel dampers with X-shaped pipe halves, Engineering Structures, ۲۰۲۱, Vol. ۲۳۹.

[۱۸]. عباسینیا، رضا؛ قاسم‌وتر، محمد؛ احمدی، رسول؛ کافی، محمدعلی. و همکاران، " بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکل پذیری حلقه‌ی فولادی" ، نشریه مهندسی عمران شریف، شماره ۵۱، ۱۳۸۸، صفحه ۴۱–۴۸.

۱۹. Bazzaz, M. Kafi, M., Evaluating the Seismic Performance of Off-centre Bracing System with Circular element in Optimum Place, International Journal of Steel Structures, ۲۰۱٤, Vol ۱٤, No ۲, ۲۹۳-۳۰٤.

۲۰. Andalib, Z. et al, Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates, Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۱٤, Vol. ۱۰۳, ۷۷–۸۸.

۲۱. Andalib, Z. et al, Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates, Engineering Structures, ۲۰۱۸, Vol. ۱٦۹, ۹٤–۱۰٦.

[۲۲]. رئیسی، علیرضا؛ میردامادی، حمید؛ رهگذر،محمدعلی. "میراگر فلزی پوسته‌ای تودرتو با رویکرد بهبود در رفتار هیسترزیس "، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱، ۱۳۹۹، ص۳۴–۲۱.

[۲۳]. کافی، محمدعلی؛ خیرالدین، علی؛ حج‌فروش، محمد. " بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکل‌پذیری حلقه فولادی مرکب جهت نصب در مهاربندهای هم‌محور" ، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۵۰، شماره ۲، ۱۳۹۹، ص۴۹–۴۱.

[۲۴]. پاچیده، قاسم؛ کافی، محمدعلی؛ قلهکی، مجید. "ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی‌شکل مجهز به میراگر تسلیم‌شونده "، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱۱، ۱۴۰۰، ص۴۵۷۶–۴۵۵۷.

۲۵. Gorji, M. et al, Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs), Thin-Walled Structures, ۲۰۲۰, Vol. ۱۵۱.

۲٦. Gorji, M. et al, Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs), Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۲۰, Vol. ۱۷۲.

[۲۷]. معتمدی، مهرتاش؛ ناطقی الهی، فریبرز؛ ضیایی‌فر، منصور؛ کریمی، محمد. "مطالعه استهلاک انرژی در لوله جدارنازک آکاردئونی تحت نیروی رفت و برگشتی " ، نشریه استقلال، سال ۲۵، شماره ۱، شهریور ۱۳۸۵، صفحه ۱۱۹–۱۰۱.

[۲۸]. ایزدی، اسماعیل؛ ناطقی الهی، فریبرز ؛ معتمدی، مهرتاش. "مقایسه‌ی شاخصه‌ای رفتار میراگر فلزی آکاردئونی توخالی و پر شده با فوم پلیمری در بارگذاری محوری رفت و برگشتی " ، مجله علمی–پژوهشی عمران مدرس، دوره دهم، شماره ۲، شهریور ۱۳۸۹، ص۱۲۱–۱۰۲.

[۲۹]. میرزا گلتبار، علیرضا؛ ناصری، علی؛ نصیری، جابر. "بررسی اثر میراگرهای جدارنازک آکاردئونی در کاهش پاسخ قابها تحت بار انفجاری " ، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۴، ۱۳۹۶، ص۷۲۲–۷۰۷.

[۳۰]. سعیدمنیر، حبیب؛ علیپور، ندا. "کاربرد یک میراگر لوله‌ای شکافدار جدید با مقطع استوانه‌ای در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه-ها " ، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۴۳–۲۹.

۳۱. Leon, D.H. et al, Influence of the Shape of Slit of a Circular Hollow Steel Damper on its Energy Dissipation Capacity, Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brazil, November ۱۶-۱۹, (۲۰۲۰).

۳۲. Jarrah, M. et al, Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD), Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۱۹, Vol. ۱۵٤, ۹۹–۱۰۹.

[۳۳]. قنادی‌اصل، امین؛ عیسی‌زاده، مهدی. "بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب فولادی با استفاده از میراگر پیستونی با صفحات نیم دایره‌ای "، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی سازه و ساخت،دوره ۸ شماره۴۵، ۱۴۰۰، ص۳۴۲–۳۲۹.

۳٤. Utomo, J. et al, Estimating the ultimate energy dissipation capacity of steel pipe dampers, The ٥th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum, Procedia Engineering, ۲۰۱٥, ۱۲٥, ۱۱۰۱ – ۱۱۰۷.

۳٥. Abebe, D. et al, Low-Cycled Hysteresis Characteristics of Circular Hollow Steel Damper Subjected to Inelastic Behavior, International Journal of Steel Structures, ۲۰۱۸, Vol. ۱۹, ۱٥۷–۱٦۷.

۳٦. Luo, W. et al, Seismic performance of lead-filled steel tube damper: Laboratory test, parameter identification and application, Engineering Structures, ۲۰۲۰,Vol. ۲۱۹.

۳۷. He, Zh. Chen, Q., Upgrading the seismic performance of underground structures by introducing lead-filled steel tube dampers, Tunnelling and Underground Space Technology, ۲۰۲۰,Vol. ۱۰۸(۳),

۳۸. Park, H. et al, Cyclic behavior of shear-type hysteretic dampers with different cross-sectional shapes, Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۲۱, Vol. ۱۸۷.

۳۹. J.M. Franco. et al, Experimental testing of a new anti-seismic dissipator energy device based on the plasticity of metals, Engineering Structures, ۲۰۱۰,Vol. ۳۲.

٤۰. Mahyari, Sh. et al, Investigating the analytical and experimental performance of a pure torsional yielding damper, Journal of Constructional Steel Research, ۲۰۱۹, Vol. ۱٦۱, ۳۸٥–۳۹۹.

٤۱. Cheraghi, A. Zahrai, M., Cyclic Testing of Multi-Level Pipe in Pipe Damper, Journal of Earthquake Engineering, ۲۰۱۷, ۲۳, ۱٦۹٥-۱۷۱۸, Published online (۲۰۱۷).

٤۲. Zahrai, M. Cheraghi, A., Improving cyclic behavior of multi-level pipe damper using infill or slit diaphragm inside inner pipe, Structural Engineering and Mechanics, ۲۰۱۷, Vol. ٦٤, No. ۲, ۱۹٥-۲۰٤.

[۴۳]. چراغی، عبدالله؛ زهرائی، سید مهدی. "ارزیابی رفتار میراگر تسلیمی لوله در لوله با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده(IDA) " ، نشریه علمی–پژوهشی سازه و فولاد، سال ۱۸، شماره ۲۵، ۱۳۹۷، صفحه۱۵–۵.

[۴۴]. تیزهوش، حسین؛ مودب، الهام. "بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر لوله‌ای جهت کنترل دو سطح مختلف زمین‌لرزه "، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۸، شماره ۴۰، ۱۴۰۰، ص۹۵–۷۵.

[۴۵] یوسفی، محسن؛ نصیرا، یحیی؛ قمری، علی. " بررسی عملکرد مدل جدیدی از میراگر مستطیلی درمهاربند همگرای قطری" فصلنامه آنالیز سازه– زلزله. دوره ۱۸، شماره ۱، ۱۴۰۰، صفحه ۳۹–۵۲.