

# معرفی میراگر جدید بیضوی شکل به منظور استهلاک انرژی در سازه‌ها

الهه میرزائی (دانشجوی دکتری)

فرهاد دانشجو\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۳۹-۵۰، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، یک میراگر جدید بیضوی شکل به منظور استهلاک انرژی و کنترل خسارت در اعضاء اصلی سازه‌ها معرفی شده است، که از یک قسمت اصلی حلقه‌ی بیضوی تشکیل شده است، که از طریق تغییر شکل برشی انرژی را جذب می‌کند. به منظور بررسی رفتار میراگر پیشنهادی، نمونه‌ی از آن در آزمایشگاه آزمون شده است. آزمایش بارگذاری چرخه‌ی شبه‌استاتیکی به منظور ارزیابی ظرفیت جذب انرژی، عملکرد چرخه‌ی رفتار میراگر صورت گرفته است. برای اعمال نیرو در دو جهت متفاوت از دو چک هیدرولیکی، برای اندازه‌گیری نیرو از دو بارسنج و برای اندازه‌گیری جابه‌جایی از جابه‌جایی سنج استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که میراگر پیشنهادی، حلقه‌های هیستریزس پایدار و جذب انرژی مناسبی دارد. تأثیر قطر بزرگ، نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک، نسبت ضخامت و ارتفاع ناحیه‌ی اتصال به قطر بزرگ از طریق انجام تحلیل پارامتریک مدل اجزاء محدود میراگر و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی، جابه‌جایی بزرگ و خرابی مصالح انجام و مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: تیر پیوند فیوزدار، میراگر بیضوی، نمونه‌ی آزمایشگاهی، مدل عددی، تحلیل پارامتریک.

el.mirzaei@gmail.com  
danesh\_fa@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند؛ که در بین آنها، سیستم‌های غیرفعال یکی از محبوب‌ترین سیستم‌های کنترل سازه هستند، که کم‌هزینه هستند و بدون نیاز به منبع انرژی خارجی و الگوریتم کنترلی، از سازه در مقابل بارهای لرزه‌یی حفاظت می‌کنند.<sup>[۷] و [۸]</sup>

میراگرهای غیرفعال، به طور گسترده‌یی از سال ۱۹۸۰ در کنترل لرزه‌یی سازه‌ها استفاده شده‌اند. انواع مختلف میراگرهای غیرفعال، مانند: میراگر فلزی، میراگر ویسکوز، میراگر ویسکوکشسان، میراگر اصطکاکی و میراگر هوشمند پیشنهاد شده و در طراحی لرزه‌یی به کار رفته‌اند. در بین آنها، میراگرهای فلزی به سبب داشتن مزایای متعددی، از جمله: سازوکار ساده، هزینه‌ی کمتر، عملکرد پایدار و سهولت در تنظیم مقاومت و سختی شهرت بیشتری دارند.<sup>[۹، ۱۰ و ۱۱]</sup> تسلیم فولاد در مودهای مختلف به عنوان سازوکار اتلاف انرژی، در توسعه‌ی میراگرهای زیادی در چند دهه‌ی اخیر به کار رفته است.<sup>[۱۱ و ۱۲]</sup> در بین میراگرهای تسلیم‌شونده، میراگر با شکل ساعت شنی<sup>[۱۳]</sup>، میراگر لانه‌زنبوری<sup>[۱۴]</sup>، میراگر مثلی<sup>[۱۵]</sup>، مهاربندهای مقید در برابر کماتش<sup>[۱۶]</sup> و میراگر اسلیت<sup>[۱۷]</sup> شناخته شده هستند.

اخیراً پژوهشگران به استفاده از ورق‌های انحادار، لوله‌ها و حلقه‌های فولادی به عنوان میراگر توجه کرده‌اند. کوتاکا<sup>[۴ (۲۰۰۵)]</sup>، با معرفی میراگر Pi اولین بار از حلقه‌ی فولادی به عنوان میراگر استفاده کرده و آن را در اتصال خمشی تیر به ستون و برای محور

تخریب کلی سازه در زلزله‌های شدید و غیراقتصادی بودن تعمیر و بهسازی پس از زلزله‌های متوسط از مشکلات استفاده از روش طراحی سنتی است. به دلیل افت مقاومت و میرایی کم اعضاء باربر قائم پس از چند چرخه‌ی اول تحریک لرزه‌یی، آنها معمولاً ظرفیت استهلاک انرژی پایینی نیز دارند. بنابراین پژوهشگران به استفاده از مفهوم کنترل سازه‌ها روی آورده‌اند.<sup>[۱۰-۱۵]</sup> طراحی لرزه‌یی در این‌نامه‌های موجود، بر اساس روش نیرو بوده و معمولاً بر جلوگیری از آسیب تمرکز داشته و بازسازی سازه پس از زلزله به خوبی در نظر گرفته نشده است. چنانچه اعضاء مستهلک‌کننده‌ی انرژی، بخشی از سیستم باربر قائم سازه باشند، تعمیر اعضاء آسیب‌دیده پس از زلزله دشوار است. از آن‌جا که تعمیر و بازسازی ساختمان پس از زلزله، باعث اختلال در کاربری و عملکرد آن می‌شود، تعمیر اعضاء سازه‌یی پرهزینه است. یک راه مؤثر برای کنترل آسیب اعضاء اصلی سازه و بالا بردن قابلیت مقاوم‌سازی لرزه‌یی، استفاده از وسایل مستهلک‌کننده‌ی انرژی است، که از سیستم باربر قائم مستقل باشند. تحت تحریک لرزه‌یی، خرابی در وسایل مستهلک‌کننده‌ی انرژی متمرکز شده است، که می‌توانند به آسانی و بدون تأثیر در سیستم باربر قائم جایگزین شوند.<sup>[۳ و ۶]</sup> سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه به طور کلی به ۴ دسته‌ی:

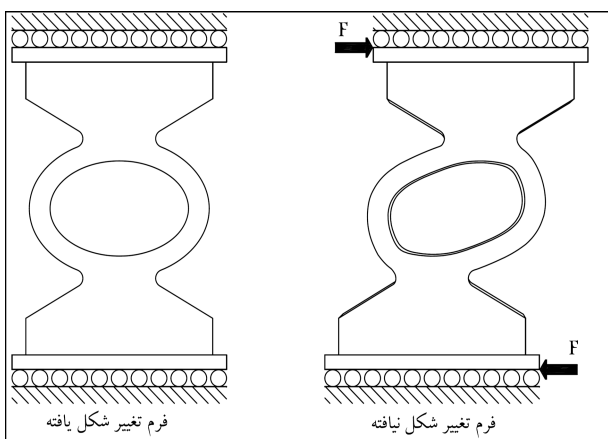
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۱۳.

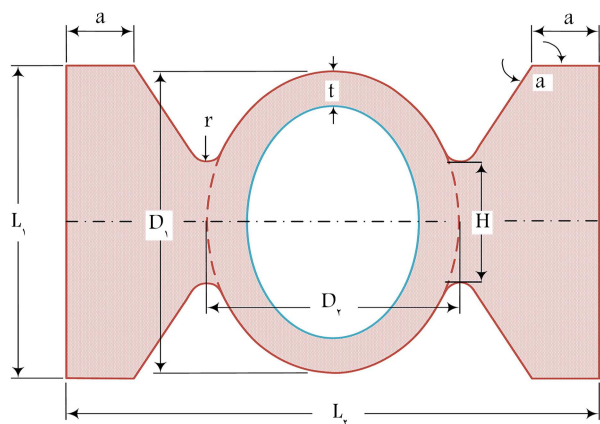
DOI:10.24200/J30.2021.57751.2932

## ۲. پیکربندی میراگر بیضوی پیشنهادی

هندسه‌ی میراگر پیشنهادی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. میراگر بیضوی از یک حلقه‌ی بیضوی به همراه دو قسمت کناری جهت اتصال به دیگر اعضاء سازه تشکیل شده است. تحت تغییر مکان‌های نسبی بزرگ، بیضی اشاره شده، آزادانه تغییر شکل می‌دهد و با ورود به ناحیه‌ی خمیری، انرژی لرزه‌یی را جذب می‌کند. هندسه‌ی میراگر به نحوی انتخاب شده است که حلقه‌ی بیضوی با تغییر شکل خمیری خود و اساساً در فرم برشی، انرژی لرزه‌یی را مستهلک کند. فرم تغییر شکل یافته‌ی میراگر پیشنهادی، تحت بار برشی در نشان داده شده است. میراگر جدید می‌تواند به عنوان جاذب انرژی در انواع سیستم‌ها، از جمله: دیوارهای برشی همبسته، مهاربندهای واگرا و یا اتصال‌های سازه‌های فولادی استفاده شود. مصالح میراگر باید از فولاد نرمه با دست کم ۲۵٪ قابلیت درازشوندگی در آزمایش کوپان کششی باشد تا رفتار شکل‌پذیر و چرخه‌های پایدار را برای آن تضمین کند. یکی از مکان‌هایی که می‌توان از میراگر بیضوی در سازه‌ها استفاده کرد، به عنوان فیوز در سیستم دیوار برشی هیبرید است. مطابق شکل ۱، میراگر پیشنهادی به دو ورق فولادی جوش داده شده و سپس ورق‌های ذکر شده با استفاده از پیچ به ورق‌های فولادی جوش شده به تیرهای انتهایی متصل شده‌اند. همچنین، پارامترهای هندسی میراگر، شامل:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $t$ ,  $H$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  و  $r$  در شکل ۲ تعریف شده‌اند.



شکل ۱. میراگر بیضوی پیشنهادی و تغییر شکل برشی آن.



شکل ۲. پارامترهای هندسی مشخص‌کننده‌ی ابعاد میراگر.

ضعیف ستون به کار برده و نشان داده است که تسلیم و ورود به محدوده‌ی خمیری فقط در میراگر پیشنهادی اتفاق می‌افتد و تیر و ستون تا مرحله‌ی بارگذاری نهایی در محدوده‌ی کشسان باقی می‌مانند. همچنین کوتا‌کا با آزمایش‌های چرخه‌یی نشان داد میراگر معرفی شده، رفتار هیستریزس پایدار در محدوده‌ی تغییر شکل بزرگی دارد. [۱۸] ملکی و باقری (۲۰۱۰)، ایده‌ی استفاده از لوله‌های فولادی به عنوان وسیله‌ی برای استهلاک انرژی را مطرح کردند [۱۹] و میراگرهای لوله‌یی و لوله‌یی دابل را پیشنهاد دادند و با استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی، رفتار آنها را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که لوله‌های پُر شده با بتن، تحت بارگذاری برشی چرخه‌یی به سبب خرد شدن بتن، در یک مود شکست ترد تخریب می‌شوند. همچنین آزمایش‌های انجام شده روی لوله‌های فولادی ساده نشان داد که میراگرهای مذکور، استهلاک انرژی و رفتار هیستریزس عالی دارند. همچنین یک مدل دوخطی برای رفتار هیستریزس میراگر لوله‌یی پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، سختی اولیه و مقاومت نهایی میراگر لوله‌یی در مقایسه با سایر وسایل استهلاک انرژی غیرفعال، کمتر است. این نقیصه می‌تواند با استفاده از چند میراگر لوله‌یی در یک تراز جبران شود. [۴، ۲۰] ملکی و محبوبی (۲۰۱۴)، با جوش دادن دو لوله و قرار دادن دو لوله‌ی کوچک‌تر داخل آنها و پُر کردن فضای بین آنها توسط روی یا سرب، میراگر IPD را معرفی کردند، که سختی و مقاومت بیشتری نسبت به میراگر لوله‌یی دابل دارد و انرژی بیشتری مستهلک می‌کند. [۲۱] و همکاران (۲۰۲۰)، میراگر لوله‌یی با سطح خارجی لوله به شکل سهمی را که با سرب پُر شده بود، ارائه کردند و نشان دادند که میراگر پیشنهادی ایشان در مقایسه با میراگرهای لوله‌یی ذکر شده‌ی اخیر قادر به تحمل نیروی محوری و تغییر شکل‌های خمشی است؛ در حالی که میراگرهای لوله‌یی فقط می‌توانستند تغییر شکل‌های خمشی داشته باشند. [۲۲] گو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با قرار دادن دو نصف لوله، که در جهت خلاف هم قرار گرفته بودند، هسته‌ی X شکل را پیشنهاد کرده‌اند، که در آن فقط قسمت‌های بسیار مؤثر میراگر لوله‌یی دابل باقی مانده بود، که سبب بهبود میزان استهلاک انرژی نسبت به مقدار مصالح به کار رفته شده بود. [۳]

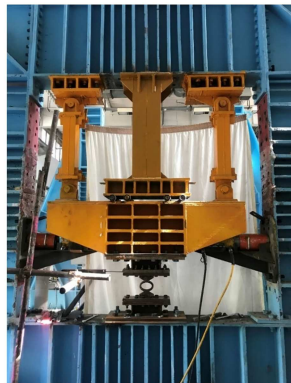
کوو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، با ۷ آزمایش چرخه‌یی با مقیاس کامل میراگر U شکل را معرفی کردند، که انرژی لرزه‌یی را با تسلیم خمشی ورق فولادی به شکل U مستهلک می‌کرد. [۲۳] ایده‌ی استفاده از حلقه‌ی دایروی در مطالعات تعدادی از پژوهشگران بررسی و قابلیت کاربرد آنها در مهاربندهای قطری و مهاربندهای خارج از مرکز مطالعه شد. [۲۴-۲۶] به منظور بالا بردن سهولت ساخت و کاربرد لوله‌های با قطرهای مختلف استفاده از دو نیم حلقه به عنوان میراگر بررسی شد. [۲۷، ۲۸] آزندریانی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، نیز میراگر حلقوی دابل را ارائه کردند، که در آن میراگر استهلاک انرژی با عملکرد خمشی حلقه‌ها صورت گرفته بود. [۱۱] در پژوهش حاضر، یک میراگر فولادی به منظور استفاده در تیر پیوند دیوارهای برشی کوپل پیشنهاد شده است، که هدف از معرفی آن، اضافه کردن سختی و مقاومت قابل توجهی به سازه، علاوه بر ظرفیت استهلاک انرژی مناسب بوده است. میراگر مذکور یک حلقه‌ی بیضوی دارد، که با تغییر شکل برشی غیرکشسان خود، انرژی لرزه‌یی را مستهلک می‌کند و علاوه بر قابلیت تعویض‌پذیری پس از زلزله‌های بزرگ، به عنوان فیوز برشی در تیرهای پیوند فولادی استفاده خواهد شد. نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی میراگر به منظور بررسی رفتار آن ساخته و تحلیل شدند. پس از بارگذاری چرخه‌یی نمونه‌ی آزمایشگاهی، نتایج آن به منظور صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شدند. سپس با استفاده از تحلیل پارامتریک، تأثیر تغییر پارامترهای مؤثر حلقه‌ی بیضوی در رفتار میراگر بررسی شده است.

جدول ۱. ابعاد نمونه‌ی آزمایش.

$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$t$ (mm)	$a$ (mm)	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$r$ (mm)	$\alpha$	$H$ (mm)
۱۳۰	۹۵	۱۵	۲۵	۱۳۵	۲۰۰	۶	۱۲۰	۵۲



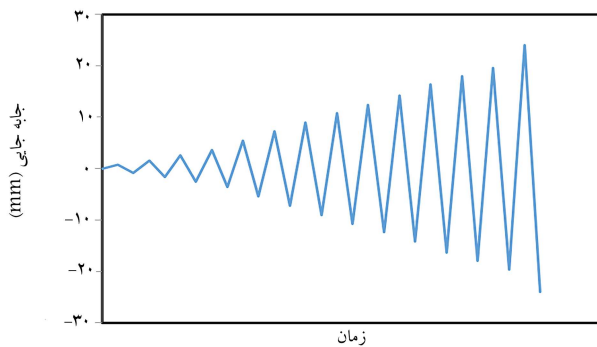
ب) مدل تحلیلی بر پایش آزمایشگاهی؛



الف) بر پایش آزمایش؛

ج) جزئیات میراگر آزمایش شده.

شکل ۳. تصویر بر پایش آزمایشگاهی، به همراه نمونه‌ی نصب شده در آن.



شکل ۴. تاریخچه‌ی بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ی آزمایشگاهی. [۱۵]

### ۲.۳. بارگذاری چرخه‌ی نمونه و خصوصیات مصالح

برای آزمایش حاضر، تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ی مشابه با آنچه برای آزمایش میراگر مثلثی ۱۱ به کار رفته است، [۱۵] در نظر گرفته شده است. تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ی، شامل یک چرخه برای هر گام جابه‌جایی است (شکل ۴). علاوه بر این، جابه‌جایی در هر گام برابر جابه‌جایی گام قبلی به علاوه‌ی یک مقدار تقریباً ثابت در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، فقط حلقه‌ی بیضوی در انالاف انرژی نقش دارد و باله‌ها برای نصب در برپایش آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌اند و قابلیت حذف یا کمینه‌سازی را نیز دارند.

به منظور اعمال نیرو به نمونه‌ی آزمایشگاهی، از دو جک هیدرولیکی استفاده شده است. اعمال نیرو توسط جک به صورتی تنظیم می‌شود که جابه‌جایی با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه افزایش یابد. برای اندازه‌گیری نیرو برای هر یک از جک‌ها از یک بارسنج و برای اندازه‌گیری جابه‌جایی از یک جابه‌جایی‌سنج ۳۰ سانتی‌متری استفاده شده است. نتایج نیرو و تغییر مکان توسط داده بردار ثبت و به عنوان خروجی آزمایش ذخیره شده‌اند.

به منظور استخراج خصوصیات مصالح استفاده شده در آزمایشگاه لازم است تا آزمایش کشش مستقیم برای مصالح مصرفی انجام پذیرد. نمونه‌ی استاندارد آزمایش

### ۳. بررسی آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ی میراگر پیشنهادی

#### ۱.۳. برپایش<sup>۹</sup> آزمایشگاهی

آزمایش بارگذاری چرخه‌ی شبه استاتیکی به منظور ارزیابی ظرفیت جذب انرژی، عملکرد چرخه‌ی و رفتار میراگر بیضوی روی نمونه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته است. به منظور تعیین ابعاد نمونه‌ی آزمایشگاهی، مطالعات عددی اولیه روی نمونه‌های با ابعاد مختلف انجام شده است. پس از تحلیل نمونه‌هایی با ابعاد مختلف، نمونه‌ی که بر اساس معیارهای مختلف عملکرد مطلوبی داشت، انتخاب شد، که در جدول ۱، ابعاد آن ارائه شده است (پارامترهای ذکر شده در جدول ۱، معرفی شده‌اند). خصوصیات مصالح ورق‌های فولادی و پیچ‌ها به ترتیب از نوع S۲۳۵(St-۳۷) و A۴۹۰ بوده است. میراگر مورد نظر از فولاد St-۳۷ با استفاده از برش پلاسما CNC<sup>۱۰</sup> تهیه و به دو ورق فولادی انتهایی جوش داده شده است. میراگر از طریق جوش گوشه به ورق‌های فولادی متصل و از ۴ خط جوش برای اتصال هر طرف میراگر به ورق فولادی استفاده شده است. عمق نفوذ جوش‌های گوشه، دست‌کم ۱۰ میلی‌متر بوده است، که با سه پاس جوش با الکتروود ۴ میلی‌متری ایجاد شده است. ورق‌های انتهایی به ورق‌های متصل به قاب آزمایشگاهی پیچ شده‌اند.

به منظور شبیه‌سازی شرایط تکیه‌گاهی واقعی، یک سر مجموعه‌ی تیر پیوند باید به صورت گیردار باشد و انتهای دیگر به صورت غلتکی برشی و با یک درجه‌ی آزادی عمل کند. برای این منظور، یک سر تیر پیوند به مجموعه قاب‌های صلب متصل به کف قوی و انتهای دیگر آن به یک مجموعه‌ی تیر صلب با یک درجه‌ی آزادی متصل شده است. تیر صلب فوقانی که قرار است فقط در یک جهت جابه‌جایی داشته باشد، با اتصال صفحه‌ی انتهایی و به صورت گیردار به تیر پیوند متصل و جهت جلوگیری از درجه‌ی آزادی چرخشی آن، از دو سیستم هم‌زمان استفاده شده است. در سامانه‌ی آزمایشگاهی مذکور، دو سر تیر صلب از طریق دو ستون دو سر مفصل با مقطع ۲۱UNP۱۶۰، به تیر فوقانی قاب صلب آزمایشگاه متصل شده‌اند. با توجه به سختی بالای ستون‌های مذکور، تغییر شکل محوری آنها ناچیز بوده و مجموعه‌ی تیر صلب دوزنقه‌ی شکل و ستون‌های دو سر مفصل، یک قاب یک درجه‌ی آزادی تشکیل داده‌اند. جهت اطمینان از عدم چرخش تیر صلب، یک سیستم دیگر جهت جلوگیری از چرخش آن و به صورت موازی با ستون‌های دو سر مفصل نصب شده است، که در آن، یک صفحه‌ی صلب متصل به قاب اصلی متصل در بالای تیر صلب قرار گرفته و با قرار دادن ۴ غلتک فولادی بین صفحه و تیر، از چرخش تیر اصلی جلوگیری شده است. به منظور بارگذاری نمونه، از دو جک و بارسنج ۱۰۰ تنی در طرفین تیر صلب استفاده شده است، که هر کدام از آنها از طریق فشار و با تکیه بر قاب اصلی، بارگذاری چرخه‌ی را به سیستم تیر پیوند وارد می‌کردند. در شکل ۳ - الف جزئیات استقرار و بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، که مطابق آن، قاب اصلی صلب مجموعه‌ی آزمایش با رنگ آبی کم‌رنگ و قطعات فولادی سامانه‌ی برپایش آزمایش با رنگ زرد مشخص شده است. در شکل‌های ۳ - ب و شکل ۳ - ج، به ترتیب، مدل تحلیلی برپایش آزمایشگاهی و تصویر نمونه قبل از نصب در برپایش مشاهده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات فولاد به کار رفته در آزمایشگاه.

مشخصات جرمی		مشخصات کشسان		مشخصات خمیری	
چگالی	مدول کشسانی	ضریب تنش تسلیم	سخت شونندگی	تنش معادل	سخت شونندگی
(kg/m <sup>۳</sup> )	(MPa)	پواسون	پارامتر سخت شونندگی	(MPa)	Q <sub>∞</sub>
			(b)		
۷۸۵۰	۲ × ۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۳	۵/۸	۶۶۷	۲۲۷۸۰۰۰۰۰

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2} \quad (۱)$$

که در آنها،  $\sigma_m$  و  $\bar{\sigma}$  به ترتیب تنش‌های میانگین و معادل هستند.

رابطه تنش سه‌محوره با کرنش شروع خرابی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲

بیان کرد:

$$\bar{\epsilon}_p^{pl} = \begin{cases} \infty & , \quad \eta \leq -1/3 \\ C_1 / (1 + 3\eta) & , \quad -1/3 \leq \eta \leq 0 \\ C_1 + (C_2 - C_1) (\eta / \eta_0)^2 & , \quad 0 \leq \eta \leq \eta_0 \\ C_2 \eta_0 / \eta & , \quad \eta_0 \leq \eta \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن، پارامتر  $C_2$ ، که گاهی ضریب شکل‌پذیری فلز نیز خوانده می‌شود، از طریق کاهش سطح مقطع ( $A_R$ ) نمونه استاندارد آزمایش کشش، به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$C_2 = -Ln(1 - A_R) \quad (۳)$$

به منظور محاسبه‌ی ضریب  $C_1$  نیز می‌توان از رابطه‌ی ۴ استفاده کرد:

$$C_1 = C_2 \left( \sqrt{3} / 2 \right)^{\frac{1}{m}} \quad (۴)$$

که در آن، پارامتر  $m$  با توجه به رابطه‌ی توانی تنش-کرنش واقعی مصالح ( $\sigma = k \epsilon^m$ ) به دست می‌آید. همچنین به طور خاص،  $\eta_0$  برای کشش تک‌محوره بیش از  $1/3$  کالیبره شده است، که  $\eta_0 = 1/3$  تقریب خوبی از تنش سه‌محوره در مرکز نمونه است.<sup>[۳۱]</sup>

به منظور مدل‌سازی شکست مصالح در نمونه و استفاده از رابطه‌ی ۲ در نرم‌افزار، نیاز به تعیین پارامترهایی چون کاهش سطح مقطع ( $A_R$ ) و جابه‌جایی خمیری معادل ( $\bar{\epsilon}^{pl}$ ) حاصل از آزمایش کشش نمونه استاندارد است. برای تعیین پارامترهای اخیر از روش سعی و خطا استفاده می‌شود. بدین منظور، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E۸/E۸M در نرم‌افزار مدل‌سازی و به‌ازاء پارامترهای مختلف، رفتار تنش-کرنش ماده با رفتار آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

تعداد ۹ عدد نمونه استاندارد کششی با مقادیر مختلف ضریب شکل‌پذیری ( $C_2$ ) در نرم‌افزار مدل‌سازی شدند تا با مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای خرابی تعیین شوند. نمودارهای حاصل در شکل ۵ مشاهده می‌شوند، که مطابق آن پارامتر  $C_2 = 0/۷۲۵$  نتایج نزدیک‌تری به خصوصیات واقعی مصالح، مخصوصاً در محدوده‌ی خرابی، به دست می‌دهد. در شکل ۶، نیز تصویر نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی متناظر پس از شکست مشاهده می‌شود.

اخیر مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM E۸/E۸M<sup>[۲۹]</sup> و از ورق فولادی، که برای ساخت میراگر استفاده شده، ساخته شده است. نمونه‌ی دمبلی<sup>۱۲</sup> آزمایش کنونی از نوع ورق استاندارد<sup>۱۳</sup> ساخته و آزمایش شده است. مشخصات مصالح فولادی استفاده شده در نمونه‌ی آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۴. مدل اجزاء محدود و راستی‌آزمایی آن

### ۴.۱. مدل سازی میراگر بیضوی

در نوشتار حاضر، مطالعه‌ی پارامتریک با استفاده از تحلیل عددی انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل‌های عددی، مدل آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار آباکوس<sup>۱۴</sup> شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل‌پذیری زیاد مصالح و با فرض ثابت گرفتن حجم مصالح در تغییرشکل‌های زیاد، از المان سه‌بعدی ۸ گرهی C3D۸R با روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده شده است. رفتار غیر خطی مصالح و هم‌چنین رفتار غیر خطی ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ در مدل در نظر گرفته شده است. منحنی‌های تنش-کرنش واقعی بر اساس نتایج آزمایش کوپان فولاد محاسبه و در مدل‌سازی مصالح استفاده شده است. با توجه به تمرکز تنش در قسمت میانی میراگر، اندازه‌ی شبکه‌ها در قسمت میانی نسبت به قسمت‌های دیگر مدل ریزتر انتخاب شده است، تا تحلیل عددی دقت بیشتری داشته باشد. تحلیل حساسیت شبکه‌بندی، به منظور بررسی ابعاد المان‌ها بر روی نتایج صورت پذیرفته است. مطابق با منحنی بار-تغییرمکان آزمایشگاهی، تاریخچه‌ی جابه‌جایی به مدل اجزاء محدود اعمال شده است.

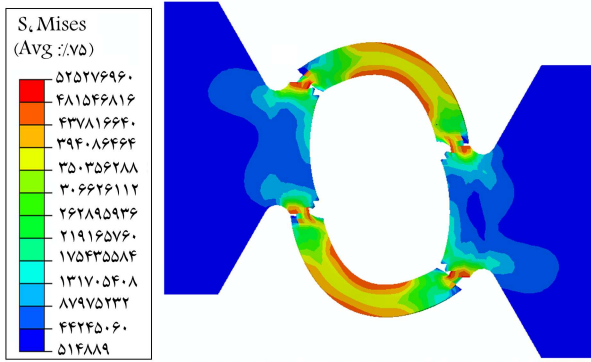
به منظور مدل‌سازی دقیق تر مصالح و مشاهده‌ی محل شکست در مدل عددی، باید از یکی از معیارهای خرابی موجود در نرم‌افزار استفاده شود. بدین منظور از معیار خرابی استفاده شده برای فلزات انعطاف‌پذیر، که بر اساس وجود حفره و رشد آن در فلزات است، استفاده شده است. به صورت ایده‌آل، مواد مختلف بدون حفره و خلل و فرج در نظر گرفته می‌شوند، اما عملاً قطعات حفره‌ها و ریزترک‌هایی دارند. زمانی که قطعات مذکور تحت بار (کششی یا فشاری یا ترکیبی) قرار می‌گیرند، ریزحفره‌های ذکر شده به هم می‌پیوندند، ایجاد ترک می‌کنند و در ادامه، با پیوستن ترک‌ها به یکدیگر، شکست نرم صورت می‌گیرد.

مدل خرابی المان، مشابه با آنچه توسط لی و ویرزیکی<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۴) کالیبره شده است،<sup>[۳۰]</sup> برای المان‌های فولادی در نظر گرفته شده است. مدل مذکور برای مصالح شکل‌پذیر کاربرد دارد، و کرنش شکست به عنوان تابعی از تنش سه‌محوره مطابق روابط ۱ تعریف می‌شود:

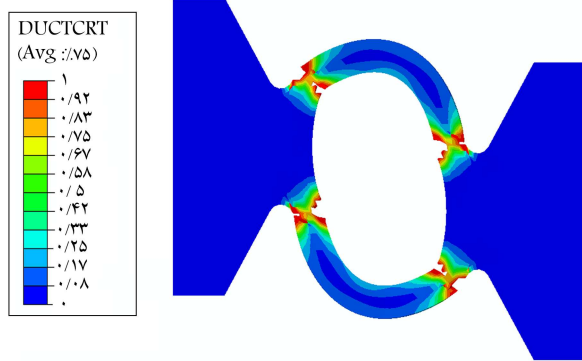
$$\bar{\epsilon}_p^{pl} = \bar{\epsilon}_p^{pl}(\eta)$$

$$\eta = \sigma_m / \bar{\sigma}$$

where

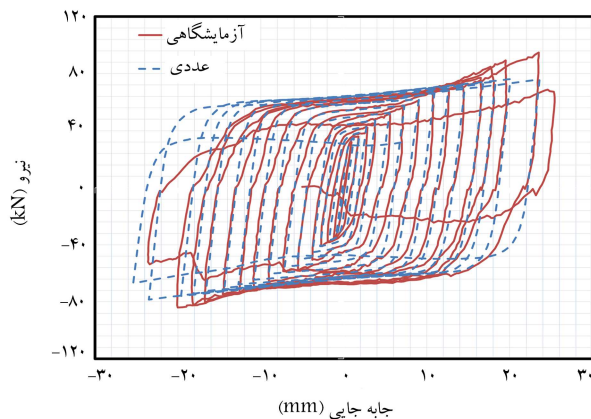


الف) کانتور تنش فون میسز؛



ب) کانتور معیار شروع خرابی شکل پذیر در نمونه عددی.

شکل ۸. نتایج تحلیل عددی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

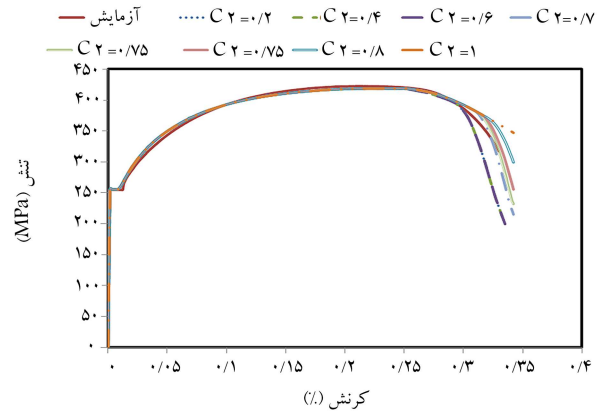


شکل ۹. مقایسه‌ی نمودار بار - تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی.

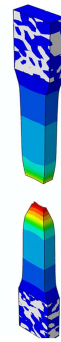
شکل گرفته و با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری و گسترش ترک‌ها، شکست در نمونه رخ داده است. در محل وقوع ترک‌ها، بیشترین تمرکز تنش برشی وجود داشته و گسترش تنش‌های برشی در ناحیه‌ی وقوع ترک‌ها، منجر به شکست نمونه شده است. در شکل ۷ - ب نیز مود خرابی میراگر بیضوی مشاهده می‌شود.

همچنین در شکل ۸، نتایج توزیع تنش و معیار شروع خرابی شکل‌پذیر در نمونه‌ی عددی در جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، الگوی خرابی در مدل عددی مطابق نمونه‌ی آزمایشگاهی است که در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین تمرکز تنش در نقاطی که نمونه‌ی آزمایشگاهی دچار شکست شده است، مشاهده می‌شود.

نمودار بار - تغییرمکان حاصل از نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۹ مشاهده



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج آزمون کشش در آزمایشگاه و شبیه‌سازی اجزاء محدود.



ب) شبیه‌سازی اجزاء محدود.



الف) نمونه آزمایشگاهی؛

شکل ۶. تصویر شکست نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی آزمون کشش.



ب) مود خرابی نمونه.



الف) محل شروع ترک در نمونه؛

شکل ۷. تصاویر نمونه‌ی آزمایشگاهی در طول چرخه‌های پایانی بارگذاری.

به منظور محاسبه‌ی سخت‌شوندگی، از ضرایب مدل خمیری لمایتره و چابوچی استفاده شده است، که مقدار آنها برای فولاد ساختمانی ایران مطابق جدول ۲ محاسبه شده است. مقادیر تنش و کرنش مهندسی از نرم‌افزار آباکوس استخراج و با مقادیر تنش و کرنش حاصل از آزمایش مقایسه شده است. پارامتری که نتایج مدل ساخته شده با آن، بیشترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی را دارد، به عنوان پارامتر خرابی فولاد مورد نظر انتخاب شده است.

## ۲.۴. نتایج مدل آزمایشگاهی و راستی‌آزمایی مدل عددی

در شکل ۷، تصاویری از نمونه در حین بارگذاری و پس از انجام آن مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۷ - الف، ترک‌ها ابتدا در محل اتصال حلقه‌ی بیضوی به بخش کناری

جدول ۳. مشخصات میراگرهای در نظر گرفته شده برای تحلیل پارامتریک.

شماره‌ی نمونه	$D_1(mm)$	$D_1/D_2$	$t/D_1$	$H/D_1$
۱	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴۶
۲	۱۵۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴۶
۳	۲۱۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴۶
۴	۳۴۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴۶
۵	۴۰۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴۶
۶	۲۷۰	۱/۱	۰/۱۱	۰/۴۶
۷	۲۷۰	۱/۵	۰/۱۱	۰/۴۶
۸	۲۷۰	۱/۷۵	۰/۱۱	۰/۴۶
۹	۲۷۰	۲	۰/۱۱	۰/۴۶
۱۰	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۴
۱۱	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۵
۱۲	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۵۵
۱۳	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۱	۰/۶
۱۴	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۰۷	۰/۴۶
۱۵	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۵	۰/۴۶
۱۶	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۶	۰/۴۶
۱۷	۲۷۰	۱/۳۶	۰/۱۸	۰/۴۶

تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ی بر اساس پروتکل بارگذاری ۴۰-ATC<sup>[۳۲]</sup> در نظر گرفته شده است. بر این اساس، برای جابه‌جایی‌های کمتر از ۳ برابر جابه‌جایی تسلیم، سه چرخه در هر گام اعمال شده و برای جابه‌جایی‌های بیشتر از ۳ برابر جابه‌جایی تسلیم، دو چرخه برای هر گام در نظر گرفته شده است.

نتایج مربوط به تحلیل پارامتریک در جدول ۴ ارائه شده است. پارامترهای نشان‌دهنده‌ی رفتار میراگر شامل: جرم، نیروی تسلیم ( $P_y$ )، مقاومت بیشینه ( $P_u$ )، جابه‌جایی نهایی قابل تحمل ( $\Delta_u$ )، سختی کشسان ( $K_s$ )، شکل‌پذیری ( $\mu_c = (\Delta_u/\Delta_y)$ )، نسبت میرایی و اسکوز معادل ( $\xi$ ) و انرژی مستهلک شده در ۲۹ چرخه بارگذاری ( $E_D$ ) هستند.

نسبت میرایی و اسکوز معادل برای میراگرهای فلزی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد.<sup>[۱۳]</sup>

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (5)$$

که در آن،  $E_D$  برابر انرژی کل جذب شده توسط میراگر در یک چرخه (که مساوی سطح داخلی یک چرخه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی است) و  $E_S$  برابر انرژی کرنشی کشسان است. با استفاده از رابطه‌ی ۵، نسبت میرایی هر میراگر توسط نمودار بار - تغییر مکان محاسبه شده است.

### ۱.۵. تأثیر قطر بزرگ بیضی

تغییرات مشخصه‌های پاسخ میراگر با تغییر قطر بزرگ بیضی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای  $\frac{t}{D_1}$ ،  $\frac{H}{D_1}$  و با تغییر قطر بزرگ بیضی از ۱۵ تا ۴۰ سانتی‌متر، میزان تغییر سختی اولیه‌ی میراگرها کمتر از ۸٪ بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که تغییر قطر بزرگ بیضی تأثیر چندانی در

می‌شود، که بر اساس آن، پاسخ میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ی به فرم منظم و پایدار است. میراگر پیشنهادی، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بالایی از خود نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افت ناگهانی مقاومت و سختی در چرخه‌های هیستریزس در محدوده‌ی جابه‌جایی مناسب رخ نداده است.

جابه‌جایی در نقطه‌ی تسلیم کمتر از ۱ میلی‌متر، با یک انتقال هموار از فاز کشسان به فاز خمیری است. میراگر ۱۵ چرخه‌ی بارگذاری را تحمل کرده است، در حالی که بیشینه‌ی نیرو برای ۳ چرخه‌ی آخر در جهت‌های مخالف حدود ۸ و ۹ تن است. بیشینه‌ی نیرو و جابه‌جایی تحمل شده توسط نمونه ذکر شده، به ترتیب برابر ۹/۵ تن و ۲۵/۴ میلی‌متر بوده است. مساحت داخلی چرخه‌های هیستریزس برابر ۳۲ کیلوژول بوده است، که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت اتلاف انرژی مناسب میراگر پیشنهادی است.

همچنین مطابق نمودار بار - تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی در شکل ۹، تطابق خوبی بین نمودارهای بار - تغییرمکان عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. پس از راستی‌آزمایی مدل عددی میراگر پیشنهادی، می‌توان از تحلیل عددی به منظور انجام مطالعه‌ی پارامتریک روی میراگر مذکور استفاده کرد، که در بخش بعدی ارائه شده است.

## ۵. مطالعه‌ی پارامتریک

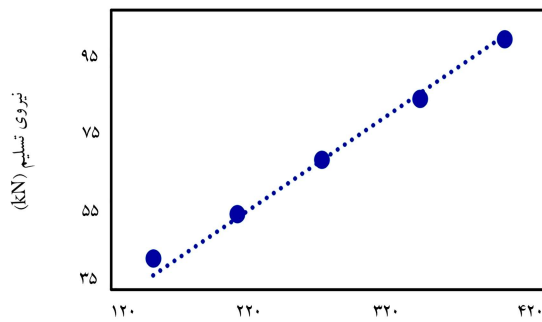
در بخش کنونی بر اساس مدل اجزاء محدود توسعه پیدا کرده در بخش اخیر، مطالعه‌ی بر روی میراگرهای بیضوی با ابعاد مختلف به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار میراگر انجام شده است. هدف از مطالعه‌ی پارامتریک، بررسی تأثیر تغییر ابعاد میراگر در رفتار آن است. مدل‌ها به گونه‌ی ساخته شده‌اند که وقتی یک پارامتر تغییر می‌کند، سایر پارامترها ثابت می‌مانند. بدین منظور برای بررسی تأثیر هر پارامتر در رفتار میراگر، ۵ نمونه مدل‌سازی شده است. پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده برای تحلیل پارامتریک شامل  $D_1$ ،  $\frac{t}{D_1}$ ،  $\frac{H}{D_1}$  هستند. پارامترهای اخیر طوری انتخاب شده‌اند که مستقلاً در نتایج خروجی تأثیر داشته باشند. پارامترهای تعریف‌کننده‌ی هندسه‌ی میراگر در شکل ۲ معرفی شده‌اند. مقادیر پارامترهای  $L_1$ ،  $a$  و  $\alpha$  به ترتیب برابر با  $L_1 = 1/0.4D_1$ ،  $a = \frac{D_1}{4}$  و  $\alpha = 120^\circ$  فرض شده است. ضخامت عمود بر صفحه برای کلیه‌ی میراگرها ۴ سانتی‌متر بوده است. با توجه به در نظر گرفتن یک نمونه‌ی مبنا برای مطالعه‌ی پارامتریک و ۴ نمونه‌ی دیگر برای بررسی تأثیر هر پارامتر، در مجموع ۱۷ مدل عددی با مشخصات مندرج در جدول ۳ ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ی قرار گرفته‌اند. نمونه‌ی ۱، به عنوان نمونه‌ی مبنا در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی تأثیر اندازه‌ی قطر بزرگ بیضی در نتایج، نمونه‌های ۱ تا ۵ ساخته و تحلیل شده‌اند، به طوری که قطر بزرگ آنها از ۱۵ تا ۴۰ سانتی‌متر متغیر بوده است. پارامتر مهم دیگری که به نظر می‌رسد تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد، نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیضی است. نمونه‌های ۱، ۶، ۷، ۸ و ۹ به منظور مطالعه‌ی تأثیر پارامتر ذکر شده و با تغییر آن در محدوده‌ی ۱/۱ تا ۲ در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر نمونه‌ی ۱، چهار نمونه‌ی ۱۰ الی ۱۳ نیز به منظور بررسی تأثیر ارتفاع ناحیه‌ی اتصال در پاسخ میراگر بررسی شده‌اند، که در آنها نسبت ارتفاع ناحیه‌ی اتصال به قطر بزرگ بیضی از ۴/۰ تا ۶/۰ تغییر کرده است. پارامتر مؤثر دیگر، ضخامت حلقه‌ی بیضوی است، که با ساختن نمونه‌های ۱، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ و تغییر مقدار آن در محدوده‌ی ۲ تا ۵ سانتی‌متر، تأثیر آن بررسی شده است. خصوصیات مصالح به کار رفته در مدل‌های اجزاء محدود، مطابق جدول ۲ است. برای مطالعات بخش حاضر،

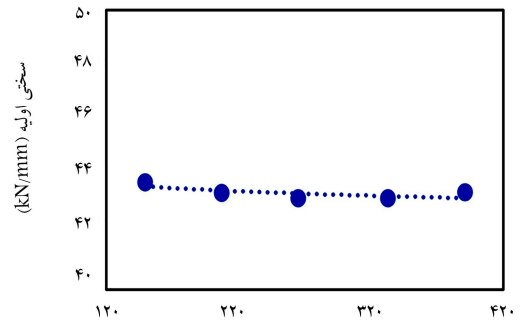
جدول ۴. نتایج تحلیل پارامتریک میراگر پیشنهادی.

شماره‌ی نمونه	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)*	$K$ ( $\frac{kN}{mm}$ )	$\xi$ (%)	$\mu_c$	$E_D$ (J)
۱	۶۹/۸۶	۱۲۴/۱۳	۱۷/۴۴	۴۵/۳۲	۴۸	۱۱/۱۸	۵۵۵۵۶
۲	۴۳/۳۹	۷۲/۵۴	۱۰/۵۲	۴۵/۶۷	۴۸	۱۰/۱۲	۲۱۵۵۵
۳	۵۵/۲۷	۹۸/۹	۱۴/۴۲	۴۵/۵	۴۹	۱۱/۰۹	۳۷۳۱۰
۴	۸۶/۱۳	۱۵۴/۱۲	۲۱/۲۷	۴۵/۰۶	۴۸	۱۱/۲۵	۸۲۸۸۷
۵	۱۰۲/۲۸	۱۷۹/۶۶	۲۵/۰۷	۴۵/۲۸	۴۹	۱۱/۰۹	۱۱۶۶۲۴
۶	۵۵/۷۵	۹۹/۴۶	۲۳/۳۵	۲۶/۹۵	۴۸	۱۱/۲۳	۵۹۰۵۳
۷	۷۸/۱۸	۱۳۶/۹۲	۱۵	۵۶/۸۱	۴۹	۱۱/۶۳	۴۹۵۳۷
۸	۹۱/۷۷	۱۶۰/۶۹	۱۲/۴۴	۷۹/۹۶	۴۸	۱۱/۲۱	۵۶۰۵۳
۹	۱۰۶/۲۶	۱۸۲/۵۸	۱۱/۴۷	۱۰۵/۹۵	۴۹	۱۱/۲۴	۵۴۱۳۷
۱۰	۶۶/۴۹	۱۱۸/۴۵	۱۸/۶۶	۳۹/۳۱	۴۷	۱۱/۵۹	۵۳۴۶۴
۱۱	۷۲/۳۱	۱۲۸/۹۷	۱۶/۷۷	۵۰/۲۱	۴۹	۱۱/۰۳	۵۶۷۲۲
۱۲	۷۶/۲۴	۱۳۶/۰۳	۱۵/۰۵	۵۷/۳۱	۴۸	۱۱/۲۳	۵۲۰۳۸
۱۳	۸۱/۵۶	۱۴۴/۴۷	۱۴/۱۷	۶۶/۰۶	۴۹	۱۱/۰۷	۵۳۲۸۰
۱۴	۲۹/۷۹	۵۴/۴۳	۲۲/۴۵	۱۴/۱۳	۴۹	۱۱/۹۴	۲۷۳۷۳
۱۵	۱۳۴/۴۳	۲۳۶/۱۶	۱۴/۱۷	۱۰۲/۸۹	۴۹	۱۰/۳۴	۹۲۳۹۸
۱۶	۱۶۳/۲۷	۲۷۵/۸۵	۱۳/۹	۱۲۳/۶۲	۴۸	۱۰/۶۱	۱۰۲۴۵۷
۱۷	۲۲۳/۸	۳۸۳/۷۷	۱۳/۰۶	۱۷۵/۸۲	۴۸	۱۰/۱۳	۱۳۷۴۹۱

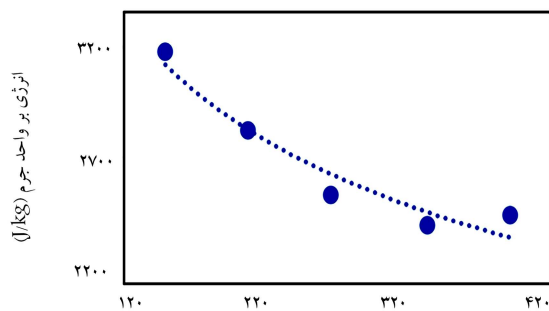
\* جابه جایی نهایی در نقطه‌ی متناظر با ۸۵/ مقاومت نهایی میراگر اندازه‌گیری شده است.



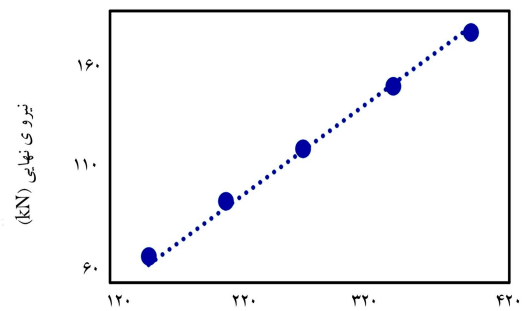
ب) نیروی تسلیم؛  
قطر بزرگ (mm)



الف) سختی اولیه؛  
قطر بزرگ (mm)

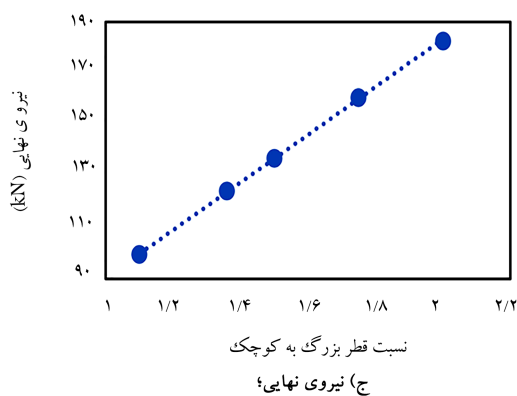
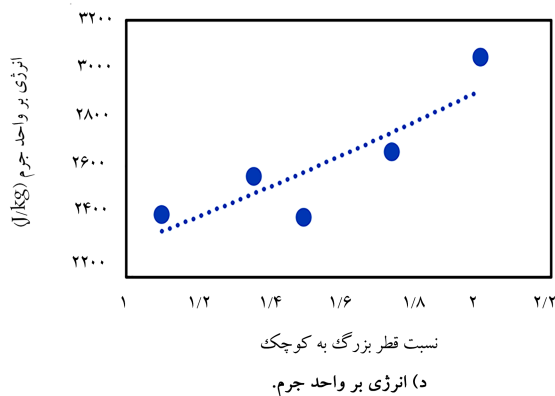
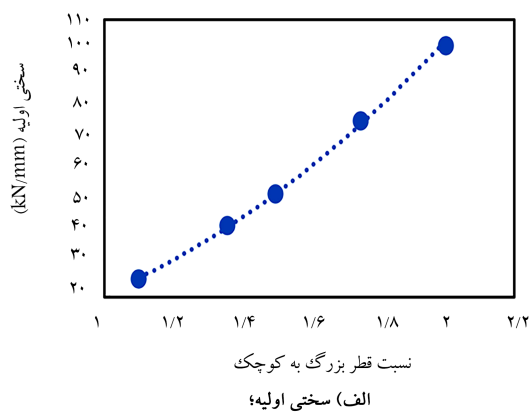
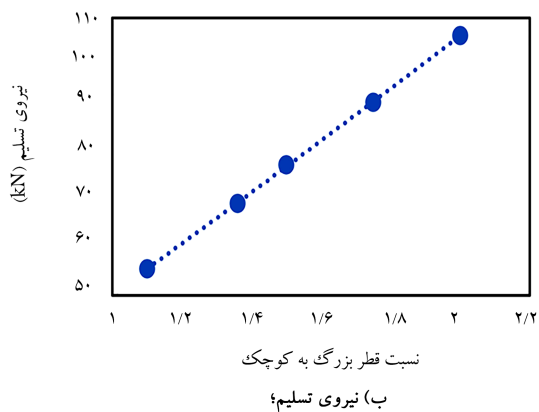


د) انرژی بر واحد جرم.  
قطر بزرگ (mm)



ج) نیروی نهایی؛  
قطر بزرگ (mm)

شکل ۱۰. تغییر کمیت‌های پاسخ میراگر با تغییر قطر بزرگ بیضی.



شکل ۱۱. تغییر کمیت‌های پاسخ میراگر با تغییر نسبت قطرهای بیضی.

مود خرابی نامطلوب در شکل ۱۴ و مود خرابی مطلوب در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

سختی اولیه‌ی میراگر ندارد. با افزایش قطر بزرگ بیضی، مقاومت تسلیم و نهایی میراگر افزایش یافته است. با افزایش قطر بزرگ، رابطه‌ی جابه‌جایی نهایی و نسبت انرژی به جرم میراگرها افزایشی بوده است.

#### ۴.۵. تأثیر ضخامت حلقه‌ی بیضوی

تأثیر تغییر نسبت ضخامت به قطر بزرگ بیضی در کمیت‌های پاسخ میراگر در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. در بخش حاضر، پارامترهای  $D_1$  و  $\frac{D_1}{D_2}$  و  $\frac{h}{D_1}$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند. با تغییر ضخامت بیضی از ۲ الی ۵ سانتی‌متر، کمیت‌های: سختی اولیه، سختی ثانویه، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی و نسبت انرژی بر واحد جرم افزایش می‌یابند. به عنوان مثال، با افزایش ضخامت بیضی، میزان افزایش نسبت انرژی مستهلک شده بر جرم، بیش از ۳۰٪ بوده است. با افزایش ضخامت به بیش از ۵ سانتی‌متر، چنانچه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مود خرابی تغییر کرده و از حالت مطلوب، که سبب استهلاک انرژی بالایی در میراگر می‌شود، فاصله گرفته است.

نسبت انرژی مستهلک شده به جرم میراگر، نسبت میرایی و یسکوز معادل، هزینه‌ی ساخت، سهولت تولید و شخصی سازی میراگر بیضوی با ملاک قرار دادن نتایج نمونه‌ی ۱۷ به دست آمده و با عملکرد تعدادی از میراگرهای شناخته شده‌ی فلزی معرفی شده در مطالعات پیشین مقایسه و در جدول ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که میراگر بیضوی عملکرد فوق‌العاده‌ی با هزینه‌ی ساخت بسیار پایین دارد. نسبت انرژی مستهلک شده به جرم میراگر بیضوی، از سایر میراگرهای مقایسه شده به جز میراگر لانه زنبوری، بیشتر بوده است. لازم به ذکر است که انرژی مستهلک شده توسط میراگر بیضوی پیشنهادی، برای ۲۹ چرخه‌ی بارگذاری محاسبه شده است. چنانچه نتایج مذکور با احتساب تمام چرخه‌های استاندارد بارگذاری و تا مرحله‌ی

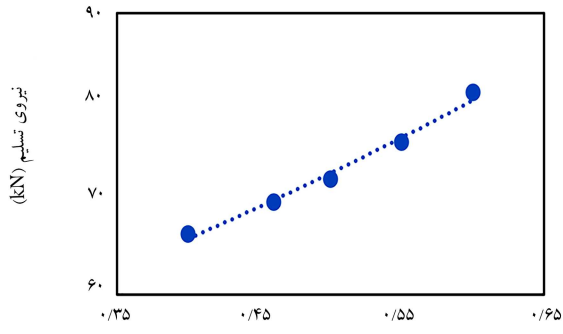
#### ۲.۵. تأثیر نسبت قطرها

در شکل ۱۱، تأثیر نسبت قطرهای میراگر در پاسخ چرخه‌ی میراگر مشاهده می‌شود. با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای  $D_1$ ،  $\frac{D_1}{D_2}$  و  $\frac{h}{D_1}$  و با افزایش نسبت قطرها از ۱/۱ تا ۲، مقاومت تسلیم و نهایی میراگرها، به ترتیب، به مقدار ۸۹ و ۸۴ درصد افزایش یافته‌اند. همچنین سختی اولیه و ثانویه‌ی میراگر، رابطه‌ی مستقیم با افزایش نسبت قطرها داشته‌اند، به طوری که با افزایش نسبت قطرها از ۱/۱ به ۲، سختی اولیه حدود ۲۹۳٪ افزایش یافته است.

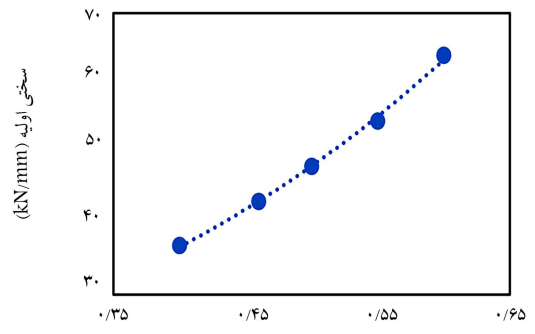
#### ۳.۵. تأثیر ارتفاع ناحیه‌ی اتصال

با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای  $D_1$ ،  $\frac{D_1}{D_2}$  و  $\frac{h}{D_1}$ ، تأثیر تغییر پارامتر  $\frac{h}{D_1}$  در کمیت‌های پاسخ میراگر بررسی شده است، که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت  $\frac{h}{D_1}$  از ۰/۴ تا ۰/۶، کمیت‌های سختی اولیه، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی و انرژی مستهلک شده تا حدی افزایش یافته‌اند. به عنوان مثال، با تغییر نسبت ذکر شده در محدوده‌ی بیان شده، نسبت انرژی مستهلک شده بر جرم، حدود ۱۴٪ افزایش یافته است. شایان ذکر است چنانچه نسبت ارتفاع ناحیه‌ی اتصال بر قطر بزرگ بیضی کوچک‌تر از ۰/۴ در نظر گرفته شود، خرابی در ناحیه‌ی اتصال اتفاق می‌افتد، که مود خرابی نامطلوب است.

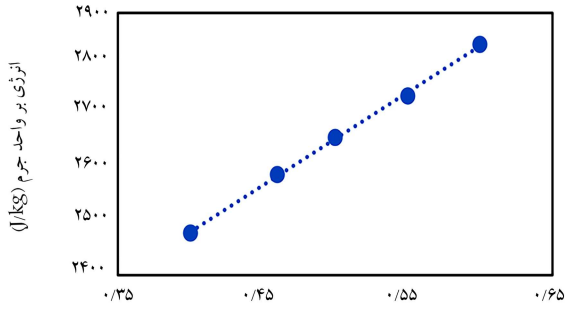




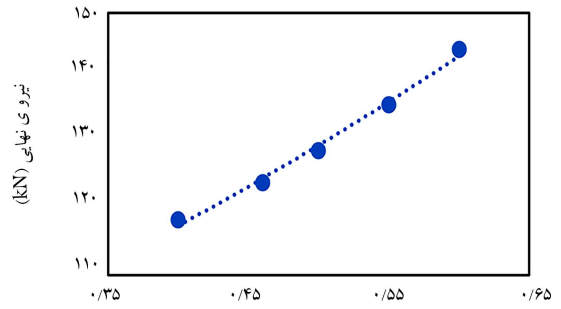
نسبت ارتفاع ناحیه اتصال به قطر بزرگ  
(ب) نیروی تسلیم؟



نسبت ارتفاع ناحیه اتصال به قطر بزرگ  
(الف) سختی اولیه؟

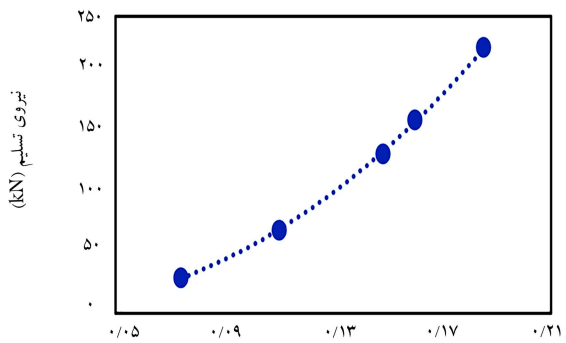


نسبت ارتفاع ناحیه اتصال به قطر بزرگ  
(د) انرژی بر واحد جرم.

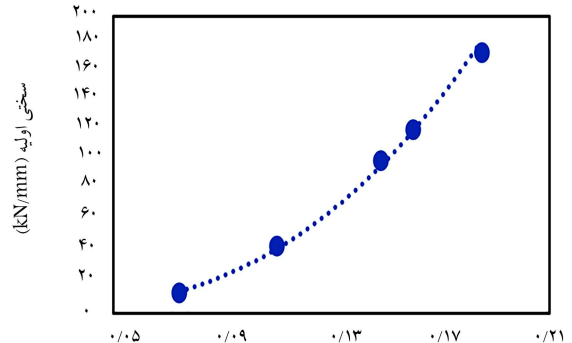


نسبت ارتفاع ناحیه اتصال به قطر بزرگ  
(ج) نیروی نهایی؟

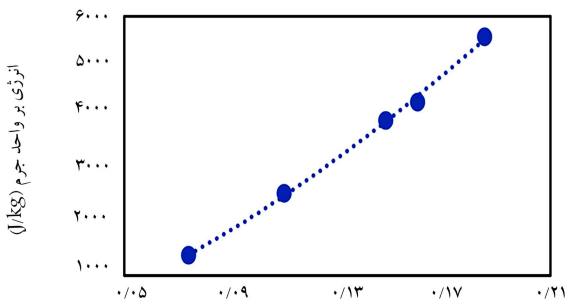
شکل ۱۲. تغییر کمیت‌های پاسخ میراگر با تغییر نسبت ارتفاع ناحیه اتصال به قطر بزرگ بیضی.



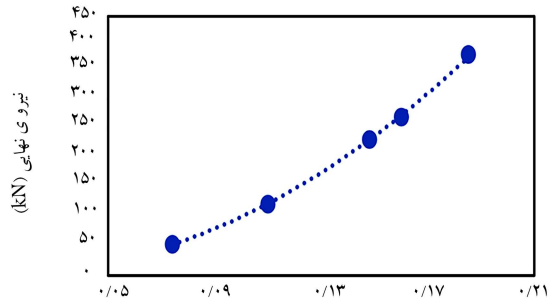
نسبت ضخامت به قطر بزرگ  
(ب) نیروی تسلیم؟



نسبت ضخامت به قطر بزرگ  
(الف) سختی اولیه؟



نسبت ضخامت به قطر بزرگ  
(د) انرژی بر واحد جرم.



نسبت ضخامت به قطر بزرگ  
(ج) نیروی نهایی؟

شکل ۱۳. تغییر کمیت‌های پاسخ میراگر با تغییر نسبت ضخامت به قطر بزرگی بیضی.

جدول ۵. مقایسه‌ی ویژگی‌های میراگر بیضوی پیشنهادی با سایر میراگرهای تسلیم‌شونده فولادی.

نوع میراگر						پارامتر
میراگر بیضوی	میراگر تاداس [۱۵]	میراگر اسلیت [۳۳]	میراگر لوله‌یی [۱۹]	میراگر لوله‌یی دوبل [۲۰]	میراگر قاب برشی [۳۴ و ۳۵]	میراگر لانه‌زنبوری [۱۴]
خیلی کم	زیاد	کم	خیلی کم	خیلی کم	کم	خیلی زیاد
۱۵/۱۳	۱۲	۳/۳۲	ناموجود	۷/۴۵	۴/۰۷	۳۴/۸۱
%۴۸	%۴۶	%۴۰	%۴۰	%۴۵	%۲۲/۵	%۴۵
زیاد	کم	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط

پارامتریک با استفاده از مدل‌های عددی و با در نظر گرفتن ۴ پارامتر مستقل انجام و اثر پارامترهای در نظر گرفته شده در کمیت‌های پاسخ میراگر بررسی شده است. نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

- ۱- میراگر بیضوی پیشنهادی مزایای مشخصی نسبت به تعداد زیادی از میراگرهای فلزی پیشین دارد. میراگر مذکور سبک است و نسبت انرژی مستهلاک شده به وزن بالایی نسبت به تعداد زیادی از میراگرهای پیشین دارد.
- ۲- دیگر مزایای میراگر پیشنهادی، هزینه‌ی ساخت بسیار پایین، سهولت تولید و شخصی‌سازی آن نسبت به تعداد زیادی از میراگرهای پیشین است.
- ۳- میراگرهای با ابعاد مختلف مقدار قابل‌توجهی انرژی بین ۲۲ تا ۱۳۷ کیلو ژول جذب می‌کنند، بنابراین متناسب با نیاز طراحی، می‌توان از میراگر بیضوی مورد نظر استفاده کرد.

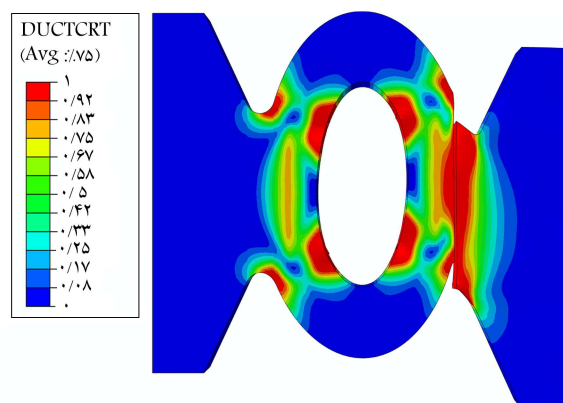
۴- نمونه‌های مختلف میراگر پیشنهادی، چرخه‌های هیستریزس پایدار تا جابه‌جایی‌های نسبتاً بزرگ دارند. آنها با وجود مشکلات موجود در هم‌گرایی مدل عددی، دست‌کم ۲۹ چرخه‌ی بارگذاری را تحمل کردند.

۵- از بین پارامترهای مؤثر در رفتار میراگر، تغییر ضخامت بیشترین تأثیر را دارد. با افزایش ضخامت، کمیت‌های نیروی تسلیم، نیروی نهایی تحمل شده توسط میراگر و همچنین انرژی مستهلاک شده افزایش یافته است، ولی جابه‌جایی نهایی قابل تحمل کاهش یافته است. همچنین با افزایش ضخامت به بیش از ۵ سانتی‌متر، مود خرابی میراگر به مود خرابی نامطلوب تغییر کرده و خرابی در ناحیه‌ی اتصال اتفاق افتاده است.

۶- تغییر ارتفاع ناحیه‌ی اتصال، کمترین تأثیر را در پاسخ میراگر دارد. اگر نسبت ارتفاع ناحیه‌ی اتصال به قطر بزرگ بیضی از ۴/۰ کمتر شود، خرابی در ناحیه‌ی اتصال و به صورت نامطلوب اتفاق می‌افتد.

۷- انتخاب هوشمندانه‌ی هندسه‌ی میراگر سبب ایجاد چرخه‌های هیستریزس چاق و پایدار تا جابه‌جایی‌های نسبتاً بزرگ، به همراه ظرفیت استهلاک انرژی عالی شده است.

میراگر پیشنهادی علاوه بر ظرفیت اتلاف انرژی، سختی و مقاومت بالا، شکل‌پذیری مناسبی دارد. به همین دلیل، از میراگر بیضوی معرفی شده می‌توان به عنوان وسیله‌ی مفید برای کنترل غیرفعال سازه‌ها استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با انجام مطالعه‌ی پارامتریک جامع، روابطی برای سختی و نیروی تسلیم میراگر بیضوی به صورت تابعی از پارامترهای هندسی آن تخمین زده شوند.



شکل ۱۴. مود خرابی نامطلوب میراگر بیضوی.

شکست نمونه محاسبه شوند، مقداری انرژی مستهلاک شده از مقدار اخیر هم بیشتر خواهد شد.

## ۶. نتیجه‌گیری

به منظور افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در ساختمان‌ها و کنترل خسارت در اعضاء اصلی، یک میراگر بیضوی معرفی و تحلیل شده است، که از یک قسمت اصلی حلقه‌ی بیضوی به همراه دو قسمت کناری جهت اتصال به دیگر اعضاء سازه‌ی تشکیل شده است. تحت تغییرمکان نسبی جانبی، بیضی مذکور آزادانه تغییرشکل می‌دهد، وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شود و انرژی را جذب می‌کند. به منظور بررسی رفتار میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه‌یی، نمونه‌یی از آن با ابعاد مشخص در آزمایشگاه آزمون شده است. نتایج نشان دادند که میراگر پیشنهادی با ظرفیت اتلاف انرژی بالا، به همراه سختی و ظرفیت تحمل نیروی مناسب است. میراگر پیشنهادی هزینه‌ی ساخت کمی دارد و به آسانی ساخته می‌شود و در کنار نصب آسان، کارایی بالایی دارد. علاوه بر این، پس از زلزله‌های شدید به راحتی قابل تعویض است. استهلاک انرژی در میراگر بیضوی اساساً بر اساس تغییرشکل خمیری در فرم برشی است.

به منظور انجام مطالعه‌ی پارامتریک، مدل اجزاء محدود میراگر بیضوی ساخته و در برابر نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. نتایج تحلیل عددی نشان داد که مدل عددی به خوبی قادر است نتایج آزمایشگاهی را بازسازی کند. مطالعه‌ی

## پانویسها

1. ADAS
2. TADAS
3. BRB
4. Koetaka
5. Luo
6. Guo
7. Qu
8. Azandariani
9. set-up
10. computer numerical control
11. TADAS
12. dumbbell specimen
13. plate-type
14. the general purpose FE analysis program, ABAQUS
15. Lee & Wierzbicki

## منابع (References)

1. Dong, Y.-R., Xu, Z.-D., Guo, Y.-Q. and et al. "Experimental study on viscoelastic dampers for structural seismic response control using a user-programmable hybrid simulation platform", *Engineering Structures*, **216**, 110710 (2020).
2. Khatibinia, M., Jalaipour, M. and Gharehbaghi, S. "Shape optimization of U-shaped steel dampers subjected to cyclic loading using an efficient hybrid approach", *Engineering Structures*, **197**, 108874 (2019).
3. Guo, W., Wang, X., Yu, Y. and et al. "Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halve", *Journal of Constructional Steel Research*, **170**, 106087 (2020).
4. Mahjoubi, S. and Maleki, S. "Seismic performance evaluation and design of steel structures equipped with dual-pipe dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, **122**, pp. 25-39 (2016).
5. Zahrai, S.M. and Sheibani, M. "AOTADTITBOSWR-SWS", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **34.2**(1.1), pp. 3-11 (2018).
6. Zhai, Z., Guo, W., Yu, Z. and et al. "Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application", *Engineering Structures*, **221**, 111006 (2020).
7. Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.-E. and et al. "A state-of-the-art review of structural control systems", *Journal of Vibration and Control*, **21**(5), pp. 919-937 (2015).
8. Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K. and et al. "State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **27**(2), pp. 455-478 (2020).
9. Zheng, J., Zhang, C. and Li, A. "Experimental investigation on the mechanical properties of curved metallic plate dampers", *Applied Sciences*, **10**(1), pp. 269 (2020).
10. Chen, Y., Chen, C., Jiang, H. and et al. "Study of an innovative graded yield metal damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **160**, pp. 240-254 (2019).
11. Azandariani, M.G., Azandariani, A.G. and Abdolmaleki, H. "Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs)", *Journal of Constructional Steel Research*, **172**, 106145 (2020).
12. Nik, H. and Kafi, M. "Experimental and analytical study of steel yield damper with the aim of improving its seismic performance", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **36**(3.1), pp. 107-115 (2020).
13. Bergman, D.M. and Goel, S.C. "Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness", *Department of Civil Engineering, University of Michigan*, **37** pp (1987).
14. Kobori, T., Miura, Y., Fukuzawa, E. and et al. "Development and application of hysteresis steel dampers", *In the Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, **2341**, pp. 2341-2346 (1992).
15. Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P. and et al. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
16. Ko, E., Kimura, I., Clark, P. and et al "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices", *Proceedings, 68th annual convention Santa Barbara, California, Sructural Engineers association of California* (Oct 1999).
17. Amadeo, B.C., OH, S.-H. and Akiyama, H. "Ultimate energy absorption capacity of slit-type steel plates subjected to shear deformations", *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, **63**(503), pp. 139-147 (1998).
18. Koetaka, Y., Chusilp, P., Zhang, Zh. and et al. "Mechanical property of beam-to-column moment connection with hysteretic dampers for column weak axis", *Engineering Structures*, **27**(1), pp. 109-117 (2005).
19. Maleki, S. and Bagheri, S. "Pipe damper, part I: experimental and analytical study", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(8-9), pp. 1088-1095 (2010).
20. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "Dual-pipe damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **85**, pp. 81-91 (2013).
21. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "Infilled-pipe damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **98**, pp. 45-58 (2014).
22. Luo, W., Li, H., Zhou, Y. and et al. "Seismic performance of lead-filled steel tube damper: Laboratory test, parameter identification and application", *Engineering Structures*, **219**, 110764 (2020).
23. Qu, B., Dai, C., Qiu, J. and et al. "Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates", *Engineering Structures*, **179**, pp. 625-639 (2019).
24. Abbasnia, R., Vetr, M., Ahmadi, R. and et al. "Experimental and analytical investigation on the steel ring ductility", *Sharif J. Sci. Technol.*, **52**, pp. 41-48 (2008).
25. Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and et al. "Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames", *Steel & Composite Structures*, **12**(5) pp. 445-464 (2012).

26. Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M. and et al. "Evaluating the performance of steel ring in special bracing frame", *Presented at the Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference of Seismology and Earthquake Engineering* (2011).
27. Andalib, Z., Kafi, M.A, Kheyroddin, A. and et al. "Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates", *Journal of Constructional steel research*, **103**, pp. 77-88 (2014).
28. Deihim, M. and Kafi, M.A "A parametric study into the new design of a steel energy-absorbing connection", *Engineering Structures*, **145**, pp. 22-33 (2017).
29. ASTM International, "ASTM E8/E8M-09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" (2011).
30. Lee, Y.-W. and Wierzbicki, T. "Quick fracture calibration for industrial use", *Massachusetts Institute of Technology, Impact & Crashworthiness Laboratory Report*, **115**, (2004).
31. Bao, Y. and Wierzbicki, T. "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space", *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**(1), pp. 81-98 (2004).
32. California Seismic Safety Commission, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", *ATC40, Applied Technology Council* (1996).
33. Chan, R.W. and Albermani, F. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", *Engineering Structures*, **30**(4), pp. 1058-1066 (2008).
34. Li, Z., Albermani, F., Chan, R.W. and et al. "Pinching hysteretic response of yielding shear panel device", *Engineering Structures*, **33**(3), pp. 993-1000 (2011).
35. Chan, R.W., Albermani, F. and Williams, M.S. "Hysteretic damping of shear panel energy dissipater", *5<sup>th</sup> Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007, Brisbane, Australia*, **159**, pp.159 (10-12 Dec 2007).