

DOI: 10.48303/bese.2024.2012334.1137

## نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

سیستم مهاربندی همگرا به دلیل ظرفیت پایین در اتلاف انرژی و کماتش تحت بارهای فشاری، با چالش‌هایی مواجه است. در سال‌های اخیر، استفاده از میراگرهای تسلیم شونده برای بهبود این سیستم‌ها پیشنهاد شده است، اما این میراگرها معمولاً دارای معایبی همچون رفتار متفاوت در کشش و فشار، پیچیدگی در ساخت، و نبود روش طراحی ساده هستند. در این مقاله، میراگر انرژی جدیدی به نام میراگر فولادی لوله مربع شکل دابل معرفی شده است که برای نصب در المان‌های مهاربندی طراحی شده است. این میراگر رفتار مشابهی در فشار و کشش دارد، ساخت آن آسان است، و طراحی آن به راحتی انجام می‌شود. عملکرد این میراگر با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل اجزا محدود بررسی شده و دو فرمول ساده برای سختی اولیه و مقاومت تسلیم آن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این میراگر در ساختمان‌های با مهاربندی شورون می‌تواند حداکثر شتاب سقف و برش پایه را به ترتیب حدود ۳۰ و ۲۰ درصد کاهش دهد. رفتار هیستریزس پایدار و متقارن این میراگر، نشان‌دهنده قابلیت جذب انرژی بالا و عملکرد بهتر در مقایسه با مهاربند‌های مرسوم است. همچنین، این میراگر به دلیل قطعات قابل تعویض، صرفه اقتصادی بالایی دارد و سطح عملکرد سازه را از LS به IO ارتقاء می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** کماتش، اتلاف انرژی، هیستریزس، میراگر، مهاربند.

## میراگر فولادی ساخته شده از دو لوله مربع شکل برای مهاربندی با رفتارهای مشابه در کشش و فشار

## لیلا منتظریان

دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

## حیدر دشتی نصرآبادی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران، [dashti@iauc.ac.ir](mailto:dashti@iauc.ac.ir)

## مرتضی جمشیدی

استادیار، گروه عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

## محمود حسینی

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه مدیترانه شرقی (EMU)، فاماگوستا، قبرس شمالی

## ۱- مقدمه

استفاده از میراگرهای فلزی در نقاط مختلف ساختمان، منجر به تمرکز آسیب در محل میراگر شده و از بروز آسیب در اعضای اصلی ساختمان جلوگیری می‌کند. کلی و همکاران (Kelly et al., 1972) ایده استفاده از میراگرهای انرژی در سازه را مطرح کردند. اسکینر و همکاران (Skinner et al., 1977) کاربرد میراگر فولادی طره‌ای را بررسی کردند، کورادلی و ریرا (Curadelli & Riera, 2004) سازه‌های فولادی و بتنی مجهز به میراگر فولادی سیلندری را تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی ارزیابی کردند.

مطابق شکل (۱-الف)، میراگر سیلندری با حلقه‌های سربی تحت جابه‌جایی نسبی، انرژی را جذب کرده و احتمال خرابی ساختمان را تا پنج برابر کاهش می‌دهد، اما ساخت آن پیچیده است. مطابق شکل (۱-ب)، پاچیده و همکاران (Pachideh et al., 2020)، میراگر فلزی DFMD را معرفی کردند. این میراگر تحت آزمایش‌های شبه‌استاتیکی و میز لرزان با رکوردهای زلزله با دامنه‌های متغیر قرار گرفت و با نرم‌افزار ANSYS تحلیل شد. نتایج نشان داد این میراگر ۴۳ تا ۸۷ درصد انرژی زلزله را مستهلک می‌کند، اما معایبی مانند پیچیدگی ساخت و امکان کماتش دارد.

حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2012) میراگر فلزی با دو حلقه فولادی را بررسی کردند. آنها رابطه‌ای با رگرسیون بیش از ۹۵ درصد بین نیرو، اتلاف انرژی و ضخامت حلقه ارائه دادند. نتایج نشان داد که با کاهش قطر و افزایش ضخامت حلقه، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. در قاب مجهز به این میراگر، برش پایه ۳۵ درصد قاب معمولی بود و جابه‌جایی اغلب کمتر از قاب با مهاربند معمولی مشاهده شد.

حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2012) میراگر فلزی با دو حلقه فولادی را بررسی کردند. آنها رابطه‌ای با رگرسیون بیش از ۹۵ درصد بین نیرو، اتلاف انرژی و ضخامت حلقه ارائه دادند. نتایج نشان داد که با کاهش قطر و افزایش ضخامت حلقه، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. در قاب مجهز به این میراگر، برش پایه ۳۵ درصد قاب معمولی بود و جابه‌جایی اغلب کمتر از قاب با مهاربند معمولی مشاهده شد.

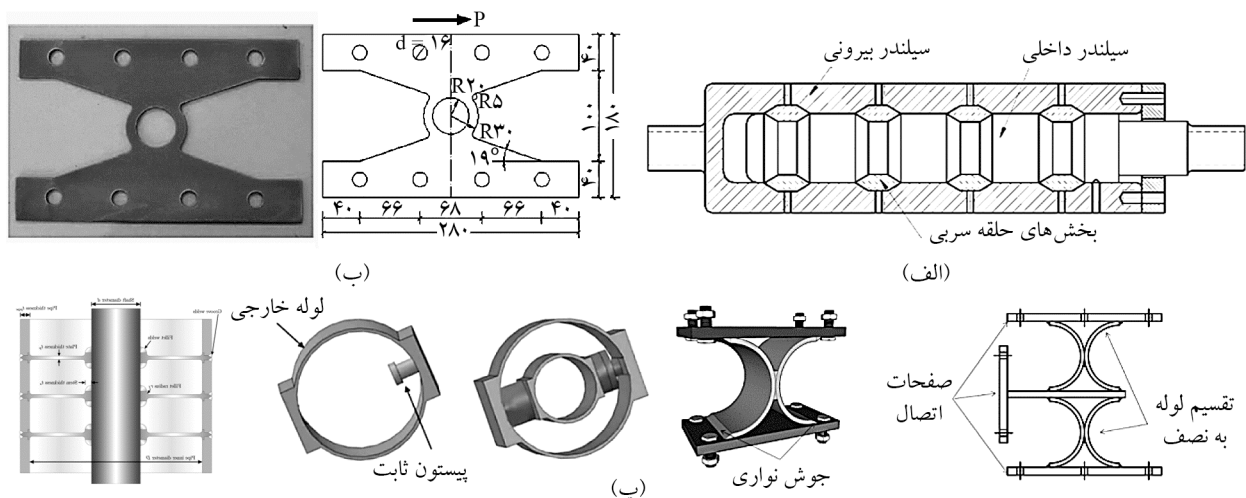
داخلی را به لوله بیرونی متصل می‌کند. نتایج نشان داد PMD حلقه‌های هیستریزس پایدار ایجاد می‌کند و انرژی زیادی را مستهلک می‌نماید. افزایش ضخامت صفحات یا نسبت قطر شفت به لوله، شکل حلقه‌ها را تغییر داده و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد. این میراگر نیازمند امکانات کارخانه‌ای برای ساخت است و رفتار آن به متغیرهای زیادی وابسته است.

کیو و همکاران (Qiu et al., 2020)، یک فیوز فلزی مستهلک کننده انرژی برای اتصال پیش ساخته بتنی پیشنهاد دادند که نتایج آن نمودار هیستریزس پایدار و بدون افت مقاومت و قابلیت مرکزگرایی عالی را نشان داده است. نمودار هیستریزس این میراگر در شکل (۲-ب) قابل مشاهده است که عدم تقارن رفتار میراگر در کشش و فشار مشهود است. در موردی دیگر میراگر زانویی منحنی شکل فولادی توسط ژیانو و همکاران (Xiao et al., 2022) پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که کرنش نهایی تا ۰/۲۰ و میرایی تقریباً ۰/۲۹-۰/۴۴ بوده است. در شکل (۲-پ) نمودار هیستریزس این میراگر نشان داده است که رفتار نامتقارن در کشش و فشار آن مشهود است. نوزو و همکارانش (Nuzzo et al., 2019)، یک روش کارآمد و آسان برای استفاده در طراحی لرزه‌ای یا مقاوم سازی قاب‌های مجهز به میراگرهای هیستریزس با در نظر گرفتن مهاربند پشتیبانی که معمولاً برای اتصال دستگاه به قاب خارجی ارائه می‌شود، بیان کردند.

لی و لی (Li & Li, 2007) یک فیوز کمانش ناپذیر متشکل از میله، غلاف و گروت ارائه کردند و مدلی تحلیلی برای پیش بینی منحنی بار-تغییر مکان میراگر پیشنهاد دادند. شکل (۲-الف) نمودار هیستریزس بار-تغییر مکان این میراگر را نشان می‌دهد که رفتار نامتقارن آن در کشش و فشار مشهود است. لی و همکاران (Lee et al., 2015) عملکرد المان‌های زانویی را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند. آنها سیستم‌های قاب خمشی ویژه (SMRF) و قاب خمشی مجهز به مهار زانویی (KBRF) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی KBRFها افزایش قابل توجهی می‌یابد، و دریافت مجاز برای KBRF با کمانش داخل صفحه بیشتر بود.

هسو و هالیم (Hsu & Halim, 2018) میراگر A-brace را معرفی کردند که ترکیبی از میراگر منحنی شکل فولادی و مهاربند مرسوم است. آزمایش‌ها نشان داد این سیستم دارای نمودار هیستریزس پایدار است، تا ۵ درصد دریافت طبقات را بدون کمانش موضعی تحمل می‌کند. میراگر با نسبت عمق به ضخامت کمتر از ۴ دچار کمانش نمی‌شود.

مطابق شکل (۱-پ)، جراح و همکاران (Jarrah et al., 2019) میراگر فلزی پیستونی (PMD) را معرفی کردند. این میراگر شامل صفحات دایره‌ای توخالی موازی است که شفت

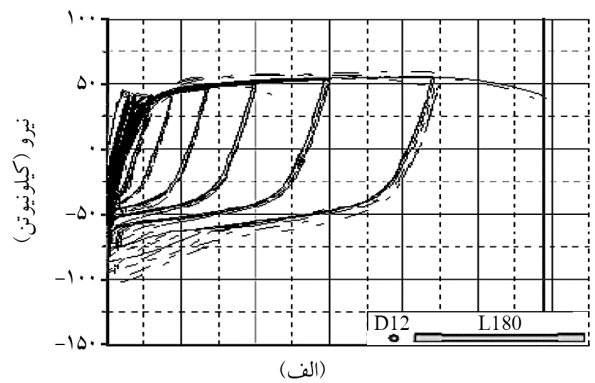


شکل (۱): نمونه‌هایی از مطالعات بر روی میراگرهای فولادی.

در این روش منحنی ظرفیت قاب مهاربندی شده با استفاده از روابط تحلیلی ساده ساخته می‌شود و توسط یک منحنی دو خطی یا سه خطی که وابسته به رفتار قاب است تقریب زده می‌شود. ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2019) میراگر صفحه فولادی منحنی شکل جدیدی را معرفی کردند. آنها تحلیل تئوریک میراگر را با استفاده از فرمول‌های مربوط به پارامترهای کلیدی انجام دادند و چهار مجموعه نمونه را آزمایش کردند. نتایج نشان داد میراگر دارای سختی اولیه بزرگ، حلقه‌های هیستریزس کامل، تغییر شکل و اتلاف انرژی خوب است. فرمول‌های پارامترهای میراگر با نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه شد و ضریب اصلاحی مناسبی تعیین گردید. صحت مدل المان محدود نیز تأیید شد.

کیو و همکاران (Qiu et al., 2020) ترکیب المان‌های SMA با میراگرهای فولادی دارای صفحات خمشی را مطالعه کردند. در این میراگر جدید، بخش فولادی انرژی را مستهلک می‌کند و میله‌های SMA تغییر شکل‌های غیر الاستیک را بازیابی می‌کردند. میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شد و در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی گردید. نتایج عددی و آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی داشتند و نشان دادند که میراگر ترکیبی دارای قابلیت میرایی بالا و مرکز گرایی مطلوبی است.

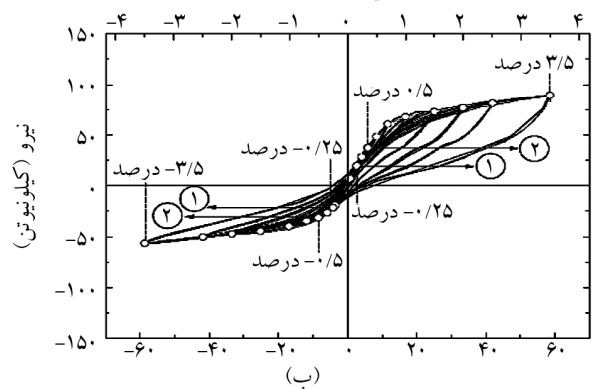
همچنین ژای و همکاران (Zhai et al., 2021)، X-shaped Pipe Damper (XPD) را مطابق شکل (۱-د)، برای نصب در محل اتصال مهاربند شورون، پیشنهاد کرده‌اند. روابط ارائه شده برای پیش‌بینی سختی اولیه تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. در این پژوهش مطالعه‌ی پارامتری به منظور ارائه‌ی روابطی برای پیش‌بینی مقاومت و سختی انجام نشده است. آذندریانی و همکاران (Azandariani, 2021) سیستم ابتکاری میراگر حلقه فولادی SRD را برای بهبود رفتار هیستریزس و عملکرد میراگر حلقه فولادی SDRD مطالعه کردند. دو نوع SDRD با اتصالات متفاوت بین حلقه‌های داخلی و خارجی ارائه شد. مطالعات پارامتریک نشان داد SDRD نسبت به SRD افزایش قابل توجهی در ظرفیت تسلیم (۸/۶۷ درصد)،



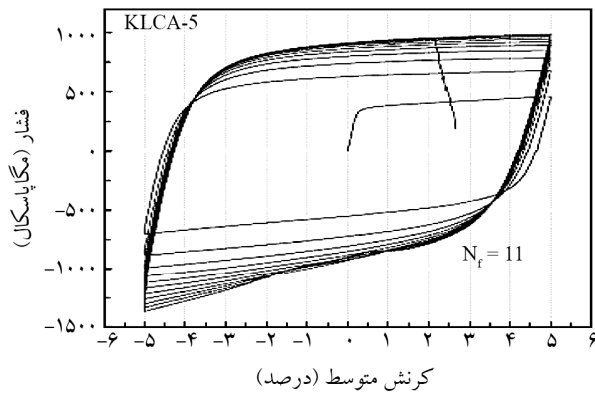
(الف)



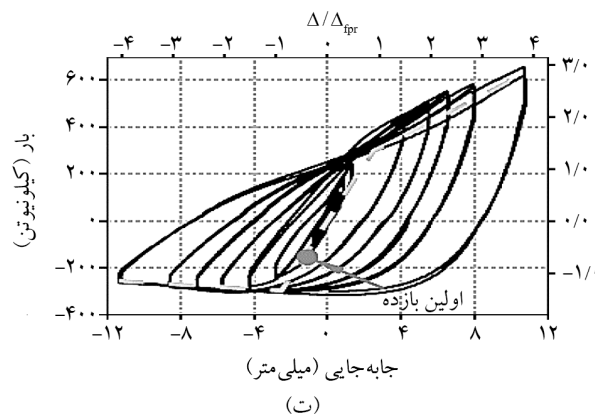
دریافت (درصد)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل (۲): رفتار هیستریزس برخی از میراگرهای مطالعه شده قبلی.

این تحقیق یک میراگر جدید را معرفی می کند که نواقص میراگرهای پیشین را برطرف کرده است. ابتدا، میراگر با مقیاس ۱/۴ ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شد. سپس، میراگر در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. در ادامه، یک مطالعه پارامتریک با ۲۵ نمونه مختلف برای بررسی تأثیر ضخامت و ابعاد اضلاع میراگر انجام گرفت. بر اساس این مطالعه، رابطه‌ای تحلیلی برای ارتباط سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی تسلیم با ابعاد میراگر ارائه شد. در نهایت، عملکرد میراگر پیشنهادی در یک ساختمان فولادی مهاربندی شده تحت هفت رکورد زلزله در دو جهت مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این برای بررسی تأثیر ضخامت و ابعاد اضلاع میراگر بر رفتار آن یک مطالعه پارامتریک که شامل نمونه‌ها با ضخامت ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ میلی‌متر و طول اضلاع با مقادیر ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی‌متر که در مجموع شامل ۲۵ نمونه می‌باشد در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شد و سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی تسلیم آنها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک رابطه تحلیلی برای بیان ارتباط این کمیت‌ها با ابعاد اضلاع، ضخامت و عرض میراگر ارائه شد. علاوه بر این، جهت بررسی عملکرد میراگر پیشنهادی، یک ساختمان فولادی مهاربندی شده با و بدون میراگر با اعمال هفت رکورد زلزله در دو جهت x و y تحت تحلیل تاریخچه زمانی تحلیل شده است.

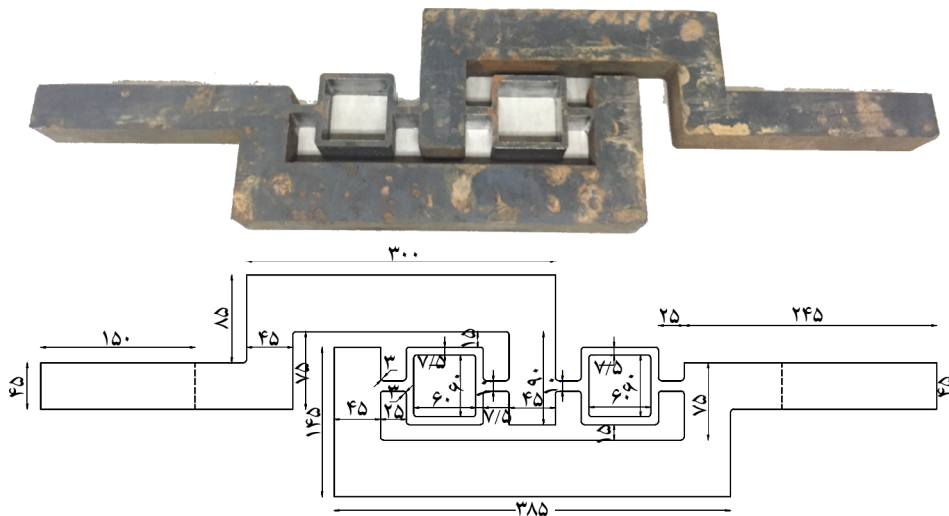
## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

در شرایط آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی با مقیاس ۱/۴ نمونه واقعی مدل‌سازی شد. ابعاد مدل آزمایشگاهی برابر بود با طول ضلع ۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۷/۵ میلی‌متر که برای ایجاد شرایط کشش و فشار بارگذاری به صورت چرخه‌ای به آن اعمال شد. مدل آزمایشگاهی و شکل شماتیک نمونه به همراه ابعاد آن در شکل (۳) قابل مشاهده است. میراگر پیشنهادی شامل دو مربع توخالی می‌باشد که وظیفه مستهلک کردن انرژی را بر عهده دارند. مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده جهت ساخت میراگر در جدول (۱) آورده شده است.

انعطاف‌پذیری (۴۴/۰ درصد) و اتلاف انرژی (۶۰/۹ درصد) دارد. همچنین، جزئیات اتصالات حلقه‌ها تأثیر مهمی بر عملکرد و رفتار هیستریزس SDRD دارد.

قابوسی و همکاران (Ghabussi et al., 2021) میراگرهای منحنی فولادی را در قاب‌های مهاربندی شده برون مرکز مطالعه کردند. پنج میراگر با زوایای مختلف (۳۰، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه) تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. نتایج نشان داد افزایش زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه، مقاومت قاب و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد، اما زوایای بیش از ۷۵ درجه اثر معکوس دارند. میراگر با زاویه ۶۰ درجه بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت و اتلاف انرژی داشت. استفاده از این میراگرها بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها ایجاد کرد.

بخشایش و همکاران (Bakhshayesh et al., 2021) برای بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا (CBF) و جلوگیری از خسارت در آنها یک میراگر با مکانیسم عملکرد برشی معرفی کردند که علاوه بر اقتصادی بودن، تعویض آن پس از زلزله راحت‌تر است. نتایج عددی نشان داد رفتار هیستریزس CBF‌ها با استفاده از میراگر پیشنهادی بهبود می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد میراگر پیشنهادی می‌تواند با اتلاف بیش از ۹۹ درصد انرژی سیستم به عنوان فیوز سازه‌ای عمل کند و آسیب را در خود متمرکز نماید. به گونه‌ای که اجزای اصلی سازه در برابر خسارت محافظت شوند. ژای و همکاران (Zhai et al., 2021) میراگر شیاردار فولادی جدیدی برای بهبود عملکرد ساختمان‌های بلندمرتبه در مناطق با شدت لرزه‌ای زیاد معرفی کردند. این میراگر شامل غلاف خارجی، داخلی و نوارهای فولادی است. آزمایش‌ها نشان داد میراگر دارای ظرفیت اتلاف انرژی خوب با حلقه‌های هیستریزس کامل و پایدار است. مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شد و یک ساختمان ۲۰ طبقه بر اساس آن طراحی و مقاوم‌سازی گردید. یک مدل هیستریزس برای پیش‌بینی رفتار بار-تغییر مکان میراگر ارائه شد که با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشت. نمودار هیستریزس میراگر (شکل ۲-د) رفتار نامتقارن در کشش و فشار را نشان می‌دهد.



شکل (۳): میراگر معرفی شده که از دو لوله مربعی شکل ساخته شده (DSTYP).

جدول (۱): مشخصات مکانیکی فولاد.

Parts	Poisson Ratio	Ultimate Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strain	Yielding Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Elasticity Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Gravity (Kg/mm <sup>3</sup> )
Steel	0.3	370	0.15	280	205000	7.85E-6

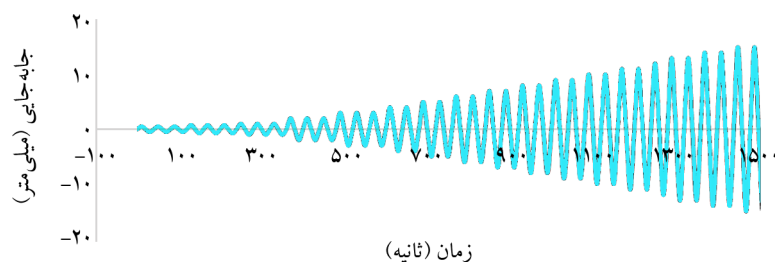


شکل (۴): دستگاه بارگذاری یونیورسال جهت اعمال بار به قطعه تحت آزمایش.

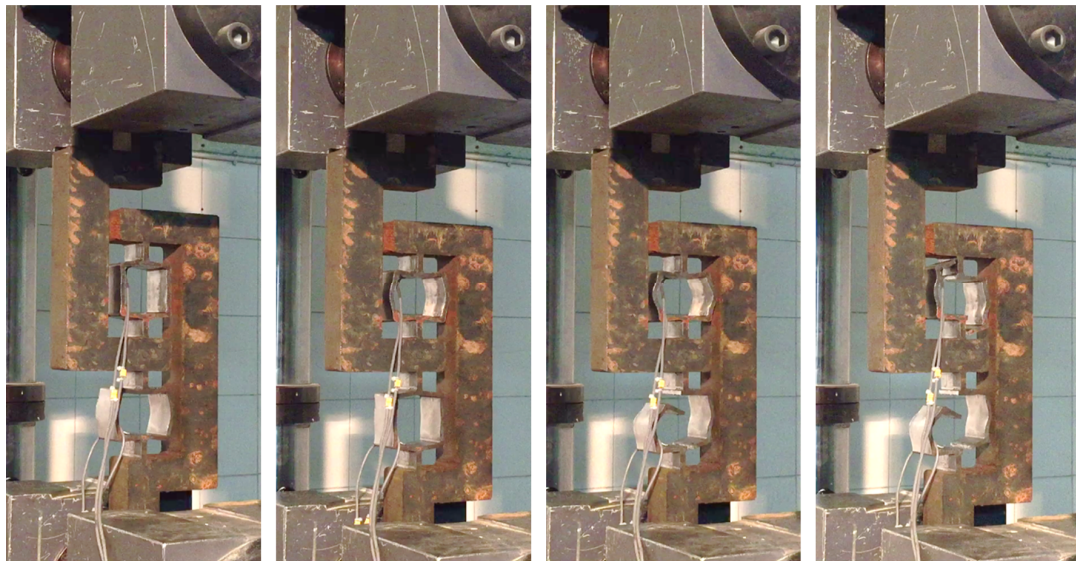
برای اعمال بارگذاری از دستگاه یونیورسال (Servo hydraulic Universal Testing Machine) با ظرفیت ۶۰ تن استفاده شد.

در شکل (۴) دستگاه اعمال بارگذاری و در شکل (۵) پروتکل بارگذاری قابل مشاهده است. بارگذاری دارای ۳۸ سیکل با حداکثر جابه‌جایی ۶۰ میلی‌متر است. در آزمایش از شش کرنش‌سنج برای ثبت جابه‌جایی میراگر استفاده شد.

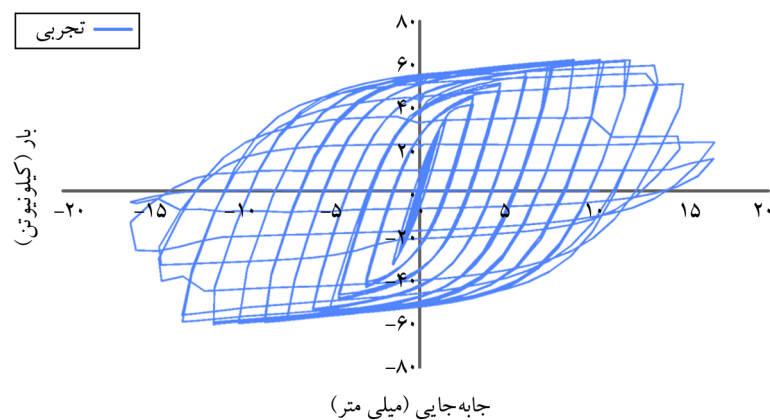
مراحل وارد شدن آسیب به میراگر و نمودار نیرو-جابه‌جایی آن تحت آزمایش به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. نتایج حاکی از این است که آسیب در قوطی‌ها متمرکز است و با گسیختگی آنها همراه است.



شکل (۵): پروتکل بارگذاری.



شکل (۶): مراحل مختلف تغییر شکل.



شکل (۷): رفتار هیستریزیس (DSTYP).

قرار داده شد. در مدل سازی اعضا میراگر از المان C3D8R استفاده شد که C معرف پیوسته، 3D معرف فضای سه بعدی، ۸ تعداد گره و R بیانگر انتگرال کاهش یافته است. برای مدل سازی خصوصیات میراگر از مقادیر داده شده در جدول (۱) استفاده شد.

به منظور ایجاد شرایط مرزی همانند نمونه آزمایشگاهی در مدل عددی تمام درجات آزادی در نقطه ابتدایی به صورت بسته مدل سازی شد و همچنین تمام درجات آزادی نقطه انتهایی به غیر از ux نیز به صورت بسته مدل سازی شد تا بتوان پروتکل بارگذاری را به این نقطه اعمال نمود. برای اتصال تمامی قطعات میراگر به یکدیگر به دلیل اینکه به

### ۳- شبیه سازی عددی میراگر فولادی ساخته شده از دو لوله مربع شکل (DSTYP)

#### ۳-۱- صحت سنجی

علاوه بر مدل آزمایشگاهی، میراگر در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS نیز مدل سازی شد و مورد مطالعه پارامتریک قرار گرفت. ابتدا جهت صحت سنجی نتایج مدل عددی با آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. میراگر مدل سازی شده در آباکوس در شکل (۶) قابل مشاهده است. میراگر پیشنهادی شامل دو قوطی مربع شکل است که وظیفه استهلاک انرژی را بر عهده دارند، در مطالعه پارامتریک طول اضلاع و ضخامت این قوطی ها متغیر در نظر گرفته شد و تأثیر آنها بر نتایج مورد بررسی

جدول (۲): حساسیت مش بندی.

Mesh Size (mm)	Hysteretic Energy-FEM (kN. m)	Hysteretic Energy-Experimental (kN. m)	Error (%)
5	34.00	34.83	2.38
10	34.84	34.83	0.03
20	66.52	34.83	90.98
30	69.00	34.83	98.11

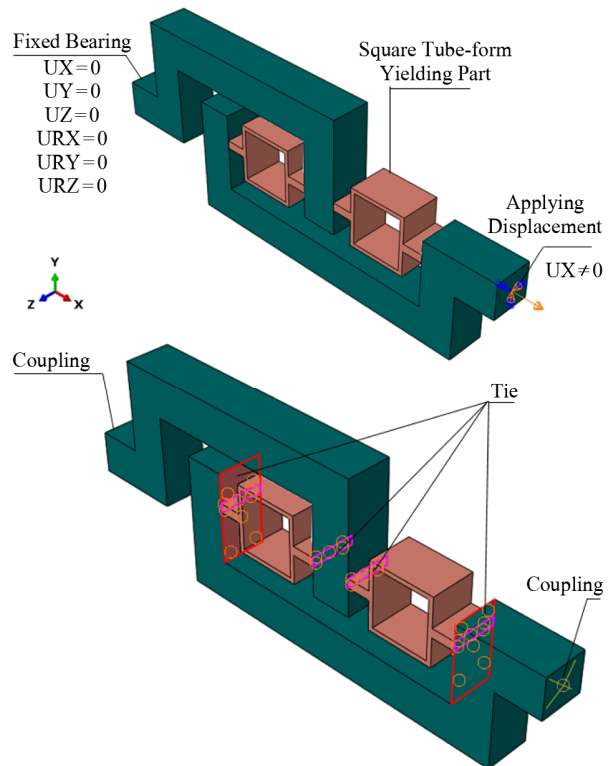
### ۳-۲- مش بندی

در مدل سازی اجزای محدود یکی از موارد تأثیر گذار بر همگرایی نتایج اندازه مش قطعات است، البته علاوه بر این بر زمان حل نیز تأثیر گذار است؛ بنابراین باید اندازه مش به گونه ای انتخاب گردد تا علاوه بر همگرایی مناسب نتایج عددی با آزمایشگاهی دارای زمان حل منطقی باشد. به همین دلیل میراگر با اندازه مش های مختلف ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر تحت بار گذاری چرخه ای تحلیل شد و نمودار بار- تغییر مکان آنها مورد مقایسه قرار گرفت.

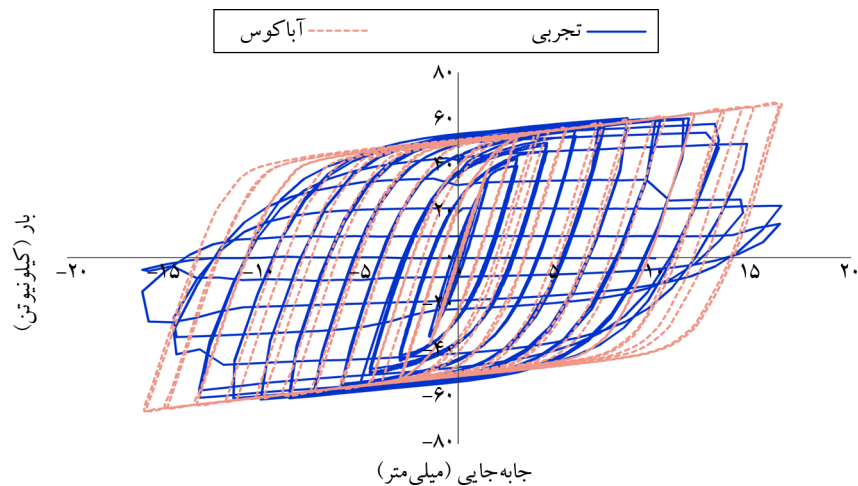
در شکل (۱۰) نمودار بار- تغییر مکان مدل های اجزای محدود با آزمایشگاهی نمایش داده شده است. همچنین در جدول (۲) انرژی هیستریزس مدل های اجزای محدود با نمونه آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که قابل مشاهده است مدل با اندازه مش ۱۰ با نمونه آزمایشگاهی اختلاف اندکی دارد بنابراین در ادامه مدل سازی از این اندازه مش استفاده شد.

یکدیگر جوش شده اند در مدل سازی از قید تای (Tie) استفاده شد.

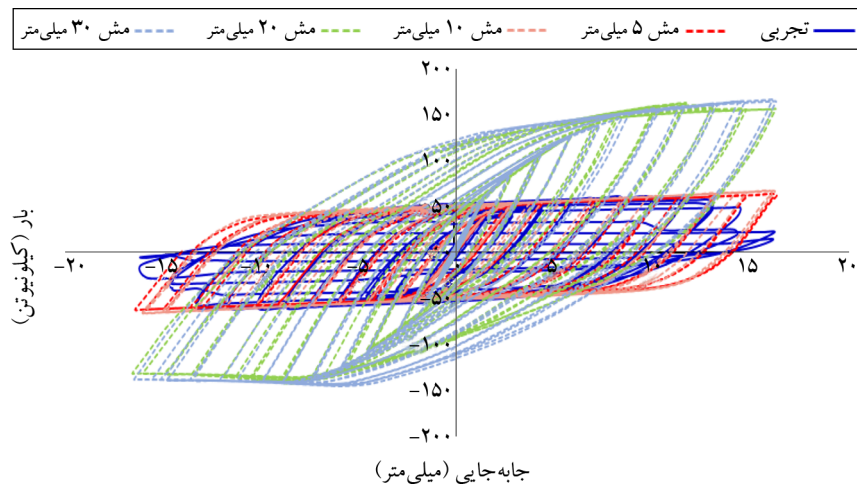
در شکل (۸) شرایط مرزی و اندرکنش سطوح میراگر نمایش داده شده است. نمودار نیرو- جابه جایی مدل سازی عددی با آزمایشگاهی در شکل (۹) مقایسه قرار داده شده است که نشان می دهد بر یکدیگر منطبق هستند.



شکل (۸): مدل سه بعدی DSTYP، جزئیات هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و اندرکنش ها.



شکل (۹): صحت سنجی مدل عددی و آزمایشگاهی.



شکل (۱۰): تأثیر سایز مش.

آورده شده است. با توجه به شکل های (۱۳) تا (۱۷) مشاهده می شود با افزایش ضخامت، سختی اولیه میراگر افزایش می یابد و با افزایش طول ضلع نمونه سختی اولیه میراگر کاهش می یابد.

#### ۳-۴- تأثیر ضخامت مدل DSTYP بر تنش و سختی

در جدول (۳) سختی اولیه، ثانویه، بار تسلیم و بار معادل تغییر مکان ۶۰ میلی متر برای نمونه های مختلف ارائه شده است. همچنین در شکل (۱۸) سختی اولیه، سختی ثانویه بر حسب نسبت طول ضلع قوطی به ضخامت آن قابل مشاهده است. برای پیش بینی سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی تسلیم بر اساس نسبت طول ضلع به ضخامت DSTYP ( $D/t$ ) یک نمودار نمایی ارائه شد. این نمودار نشان می دهد با افزایش ضخامت، سختی اولیه میراگر افزایش می یابد و با افزایش طول ضلع نمونه سختی اولیه میراگر کاهش می یابد.

با توجه به نمودارهای (۱۳) تا (۱۷) مشاهده گردید نسبت  $D/t$  می تواند به عنوان یک متغیر برای رفتار میراگر به عنوان مبنا قرار بگیرد و بر اساس نتایج عددی روابط تجربی استخراج گردید و نمودارهای قابل مشاهده در شکل (۱۸) حاصل شد که این روابط بر اساس پارامترهای مقاومت تسلیم، مقاومت متناظر با تغییر مکان ۶ سانت و سختی اولیه و ثانویه می باشد. مشاهده می گردد که در همه حالات ضریب رگرسیون اشکال نمودارهای حاصله بیشتر از ۹۶ درصد می باشد که نشان دهنده ی دقت مناسب برای کارهای تحلیلی است.

#### ۴- مطالعه تأثیر متغیرها بر روی DSTYP

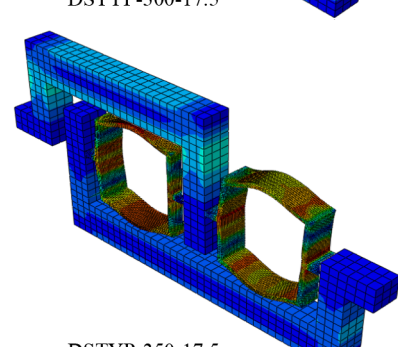
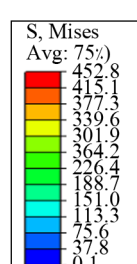
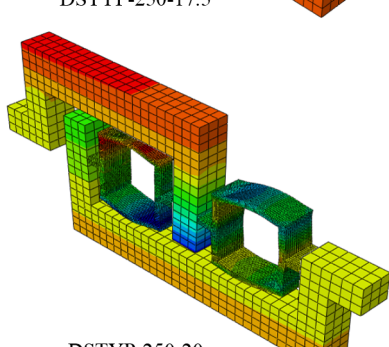
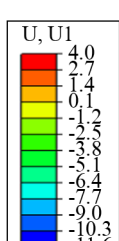
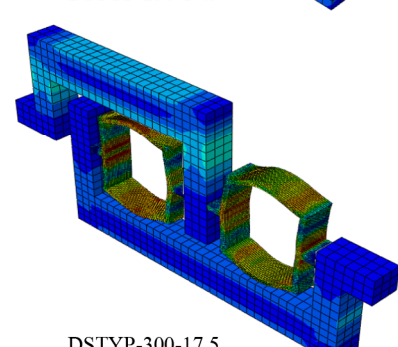
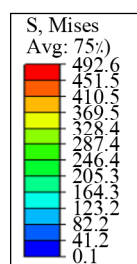
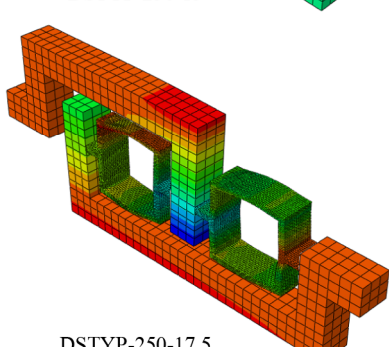
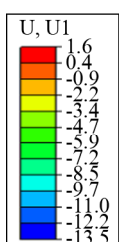
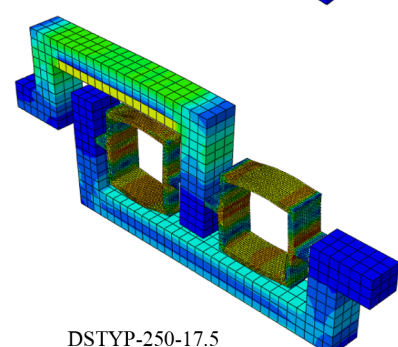
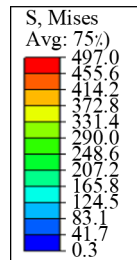
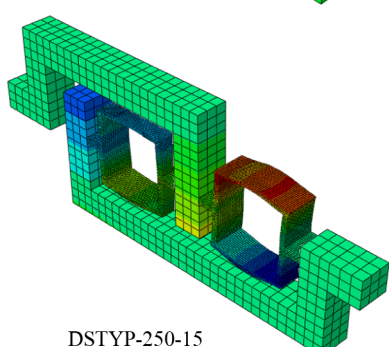
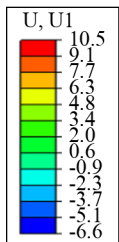
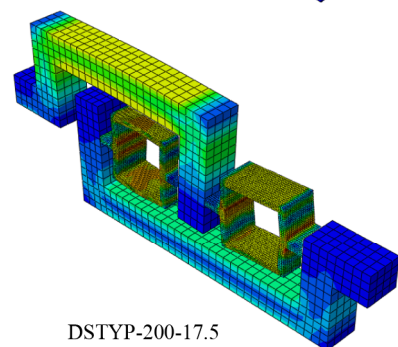
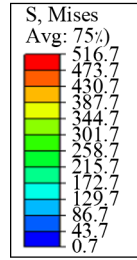
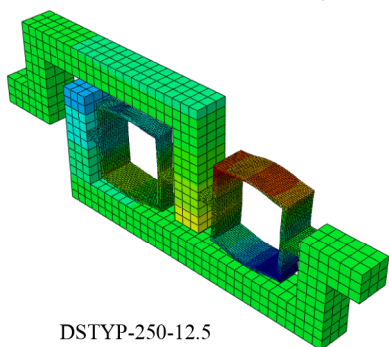
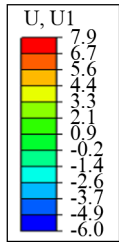
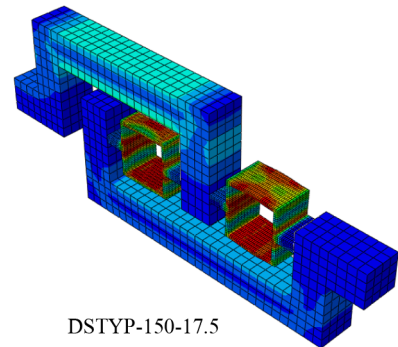
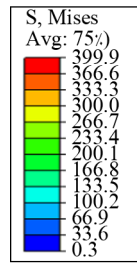
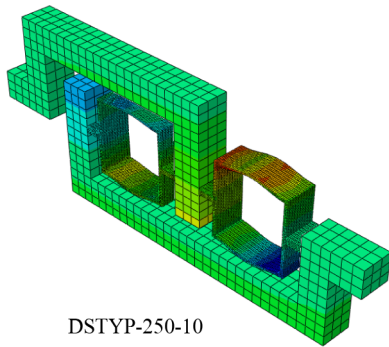
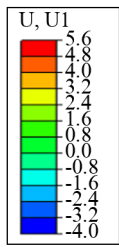
به منظور بررسی تأثیر ضخامت و ابعاد اضلاع میراگر پیشنهادی، نمونه های مختلف با ضخامت های ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ میلی متر و ابعاد ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی متر در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شدند. نام گذاری نمونه ها به صورت DSTYP-L-t انجام شد که در آن L معرف طول اضلاع و t معرف ضخامت میراگر است. به عنوان مثال نام گذاری DSTYP-150-10 بیانگر میراگر با طول اضلاع ۱۵۰ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر است. بارگذاری اعمالی به میراگرها به صورت چرخه ای و از نوع تغییر مکان کنترل است و برای بررسی عملکرد نمونه ها نمودار بار- تغییر مکان آنها مورد بحث قرار گرفت.

#### ۴-۱- توزیع تنش و تغییر شکل

برای یافتن مقدار تنش و نواحی تمرکز تنش از توزیع تنش میزب بهره گرفته شد، برای نمونه های با ضخامت ۰.۱۷، ۵ میلی متر و طول اضلاع ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی متر توزیع تنش میزب در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. علاوه بر این تغییر شکل نمونه با ضخامت های ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ میلی متر و طول اضلاع ۲۵۰ میلی متر در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

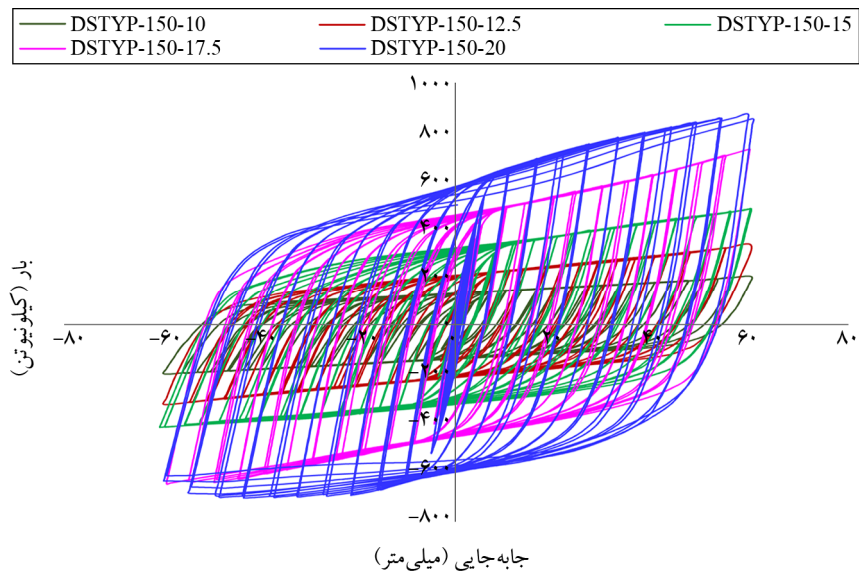
#### ۴-۲- پاسخ هیستریزیس

نمودار هیستریزیس بار- جابه جایی نمونه های مدل سازی شده با ضخامت و طول اضلاع مختلف در شکل های (۱۳) تا (۱۷)

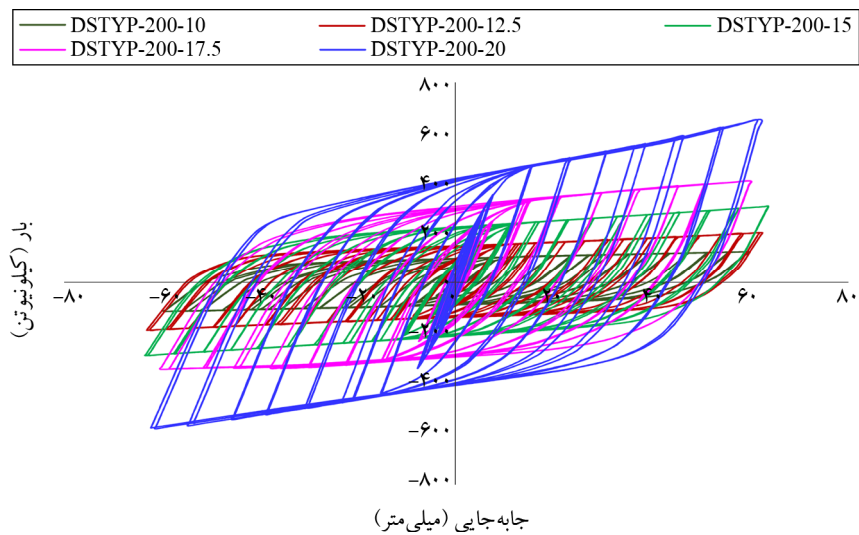


شکل (۱۲): تغییر شکل DSTYP-250 برای ضخامت ۲۰ میلی‌متر.

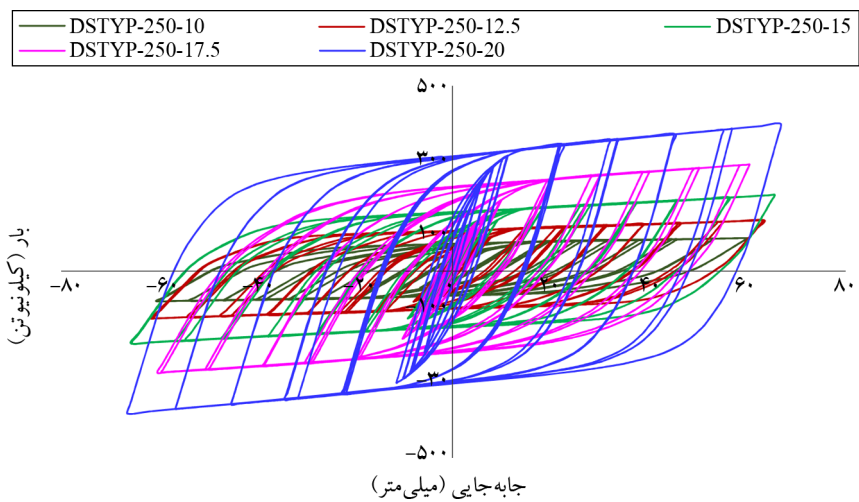
شکل (۱۱): توزیع تنش DSTYP برای ضخامت ۱۷/۵.



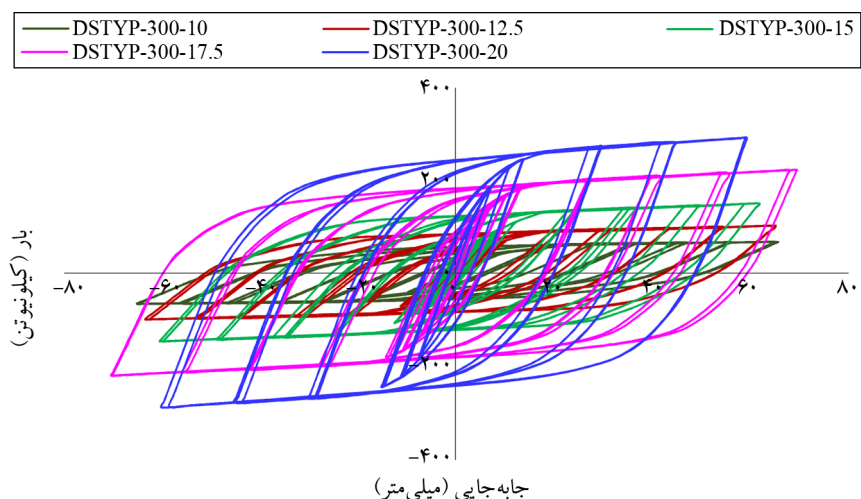
شکل (۱۳): پاسخ DSTYP-150 برای ضخامت‌های مختلف.



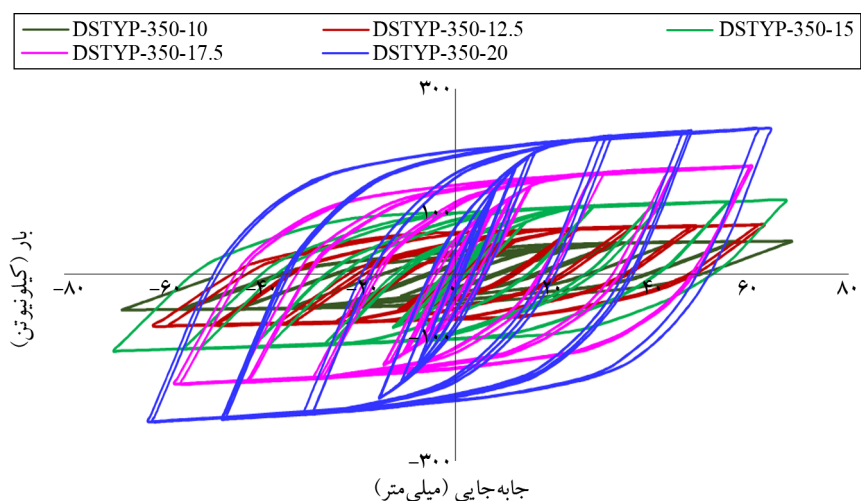
شکل (۱۴): پاسخ DSTYP-200 برای ضخامت‌های مختلف.



شکل (۱۵): پاسخ DSTYP-250 برای ضخامت‌های مختلف.



شکل (۱۶): پاسخ DSTYP-300 برای ضخامت‌های مختلف



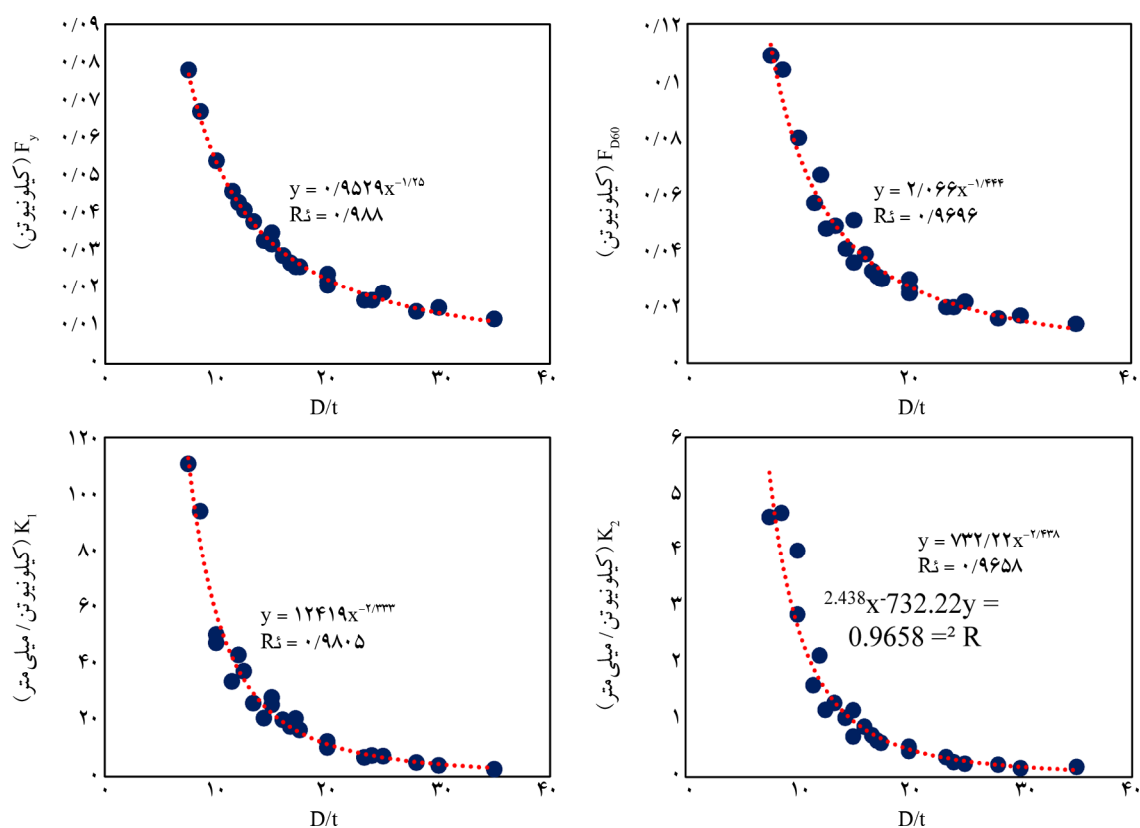
شکل (۱۷): پاسخ DSTYP-350 برای ضخامت‌های مختلف

جدول (۳): تنش و سختی نمونه‌ها.

Models	$F_y$ (kN/mm)	$F_{D60}$ (kN)	$K_1$ (kN/mm)	$K_2$ (kN/mm)
DSTYP-150-10	0.035	0.051	28.000	1.182
DSTYP -150-12.5	0.043	0.067	43.000	2.145
DSTYP -150-15	0.054	0.080	50.154	2.868
DSTYP-150-17.5	0.067	0.104	94.000	4.673
DSTYP-150-20	0.078	0.109	110.714	4.596
DSTYP-200-10	0.024	0.030	12.125	0.462
DSTYP-200-12.5	0.029	0.039	20.137	0.892
DSTYP-200-15	0.038	0.049	26.023	1.309
DSTYP-200-17.5	0.046	0.057	33.684	1.624
DSTYP-200-20	0.054	0.080	47.283	3.996
DSTYP-250-10	0.019	0.022	7.400	0.240
DSTYP-250-12.5	0.022	0.027	12.414	0.487
DSTYP-250-15	0.027	0.033	17.778	0.745
DSTYP-250-17.5	0.033	0.041	20.708	1.047
DSTYP-250-20	0.041	0.048	37.241	1.189

ادامه جدول (۳).

Models	F <sub>y</sub> (kN/mm)	F <sub>D60</sub> (kN)	K <sub>1</sub> (kN/mm)	K <sub>2</sub> (kN/mm)
DSTYP-300-10	0.015	0.017	4.069	0.165
DSTYP-300-12.5	0.017	0.020	7.565	0.268
DSTYP-300-15	0.021	0.025	10.417	0.521
DSTYP-300-17.5	0.026	0.031	20.556	0.647
DSTYP-300-20	0.032	0.036	25.400	0.720
DSTYP-350-10	0.012	0.014	2.717	0.187
DSTYP-350-12.5	0.014	0.016	5.079	0.226
DSTYP-350-15	0.017	0.020	6.933	0.356
DSTYP-350-17.5	0.021	0.025	12.500	0.542
DSTYP-350-20	0.026	0.030	16.560	0.611



شکل (۱۸): رابطه بین نسبت طول ضلع به ضخامت میراگر با دیگر پارامترهای میراگر.

در رابطه (۱) تا (۴)،  $E$ : مدول الاستیسیته،  $\sigma_y$ : تنش تسلیم فولاد و  $b$ ،  $t$  و  $D$  به ترتیب عرض، ضخامت و طول اضلاع میراگر DSTYP می‌باشد.

#### ۵- ارزیابی عملکرد میراگر DSTYP

برای بررسی تأثیر میراگر DSTYP بر عملکرد ساختمان‌های فولادی یک ساختمان پنج طبقه مجهز به مهاربند شورون در نرم‌افزار Perform مدل‌سازی شد که در شکل (۱۹) ساختمان

$$F_y = 3.97 \times \sigma_y \times \left(\frac{t}{D}\right)^{1.25} \quad (1)$$

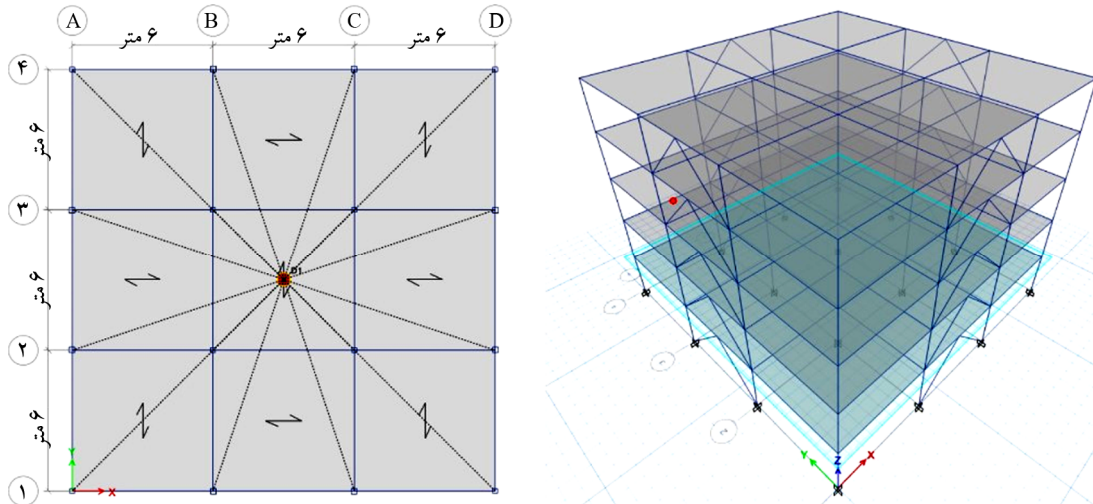
$$F_{D60} = 8.6 \times \sigma_y \times \left(\frac{t}{D}\right)^{1.44} \quad (2)$$

$$K_1 = 0.606 \times E \times b \times \left(\frac{tD}{D}\right)^{2.33} \quad (3)$$

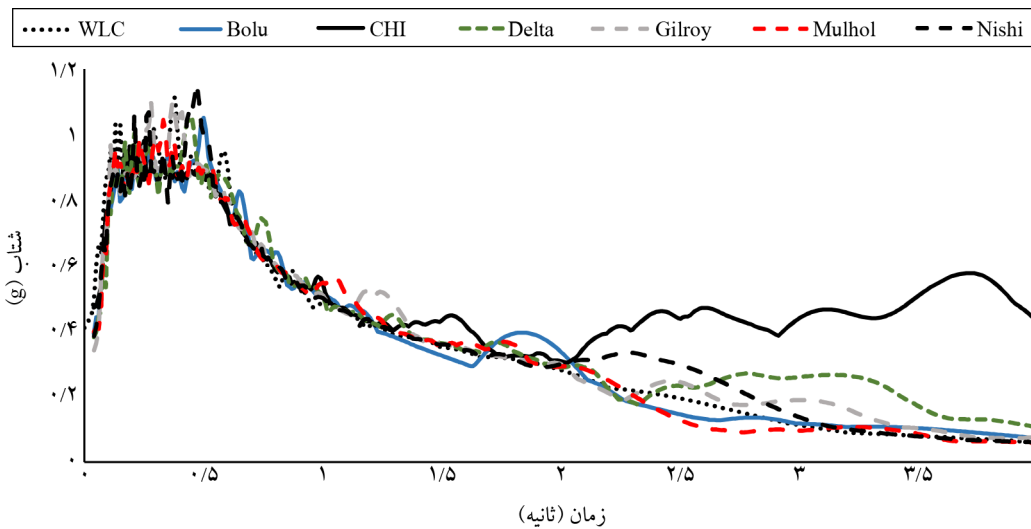
$$K_2 = 0.036 \times E \times b \times \left(\frac{tD}{D}\right)^{2.438} \quad (4)$$

مورد ارزیابی نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر DSTYP دو نمونه با و بدون DSTYP و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه از هفت رکورد زلزله شامل نورثریج (Northridge)، دوژی (Duzce)، امپریال ولی (Imperial Valley)، کوبه (Kobe)، لوما پریتا (Loma Prieta) و چی چی (Chi-Chi) استفاده شد که در جدول (۴) و شکل (۲۰) به ترتیب مشخصات و طیف شتاب این زلزله‌ها آورده شده است.

شکل (۱۹): ساختمان ۵ طبقه مورد نظر.



شکل (۱۹): ساختمان ۵ طبقه مورد نظر.

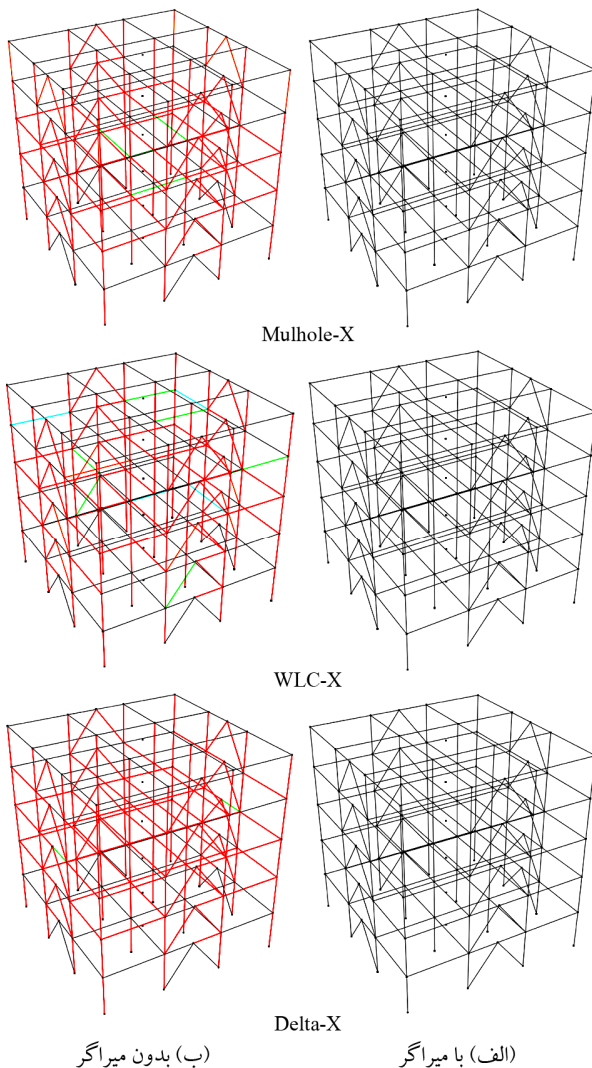


شکل (۲۰): طیف بازتاب.

جدول (۴): مشخصات المان‌های سازه.

طبقه	مقطع ستون	تیر متصل به مهاربند	تیر غیر متصل به مهاربند
۱	TUBOX 220×220×12.5	IPE300	IPE270
۲	TUBOX 220×220×12.5	IPE300	IPE270
۳	TUBOX 200×200×12.5	IPE270	IPE240
۴	TUBOX 200×200×12.5	IPE270	IPE240
۵	TUBOX 200×200×12.5	IPE270	IPE240

در نهایت رفتار مناسب سازه است. این در حالی است که مطابق شکل (۲۲) آسیب‌ها اکثراً در DSTYP متمرکز شده است و به این شکل از اعضای سازه‌ای محافظت به عمل آمده است. مشخصات ساختگاه یک ساختمان مسکونی در ناحیه با خطر نسبی بسیار زیاد در خاک نوع ۲ مدل‌سازی شد. بارگذاری ثقلی اعم از بار مرده و زنده بر طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان انجام شد که میزان بار مرده با احتساب تیغه‌ها ۶۰۰، و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم نیرو بر مترمربع می‌باشد. ضرایب لازم برای میرایی رابلی با فرض میرایی پنج درصد برای کل سازه به دست آمده‌اند، ولی در این پژوهش میرایی میراگرهای افزوده شده به سازه حائز اهمیت است و میرایی عمومی کل سازه تأثیر چندانی در اتلاف انرژی ندارد.



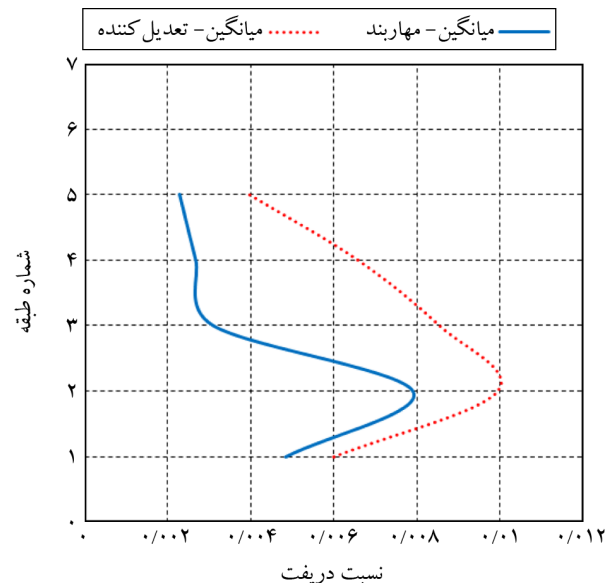
شکل (۲۲): مقایسه سطح عملکرد ساختمان در حالت (الف) با میراگر و (ب) بدون میراگر در برابر برخی از زلزله‌های اعمال شده.

برای تعریف میراگر از یک لینک غیرخطی با مشخصاتی مطابق جدول (۵) استفاده شده است. مقادیر به دست آمده برای تعریف رفتار میراگر با یک روند سعی و خطا به دست آمده است. زلزله‌های مورد استفاده برای تحلیل ساختمان مطابق جدول (۶) می‌باشد، همچنین مشخصات میراگر به کار برده شده در جدول (۷) قابل مشاهده است. نتایج حاکی از این است با افزودن میراگر DSTYP با استفاده از میراگرهای پیشنهادی با سختی و استحکام مناسب می‌توان حداکثر شتاب سقف و حداکثر برش پایه ساختمان را به ترتیب در حدود ۳۰ و ۲۰ درصد نسبت به ساختمان با مهاربندی معمولی کاهش داد. ساختمان رفتار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد و مطابق شکل (۲۱) دریفت بین طبقات افزایش می‌یابد، اما همچنان در حالت LS باقی می‌ماند.

در مهاربندهای هم‌مرکز دریفت کم است ولی به دلیل کماتش مهاربند رفتار سازه نامناسب و جذب انرژی مهاربند بسیار پایین است اما در میراگر معرفی شده با وجود افزایش دریفت همچنان در محدوده LS باقی می‌ماند و سطح زیر نمودار هیستریزس نشان‌دهنده‌ی جذب انرژی بالای این میراگر و

جدول (۵): مشخصات مصالح فولاد ایزوتروپیک.

مشخصات فولاد	$F_y$ (MPa)	$F_{ue}$ (MPa)	$F_u$ (MPa)
S240	276	425.5	370



شکل (۲۱): جابه‌جایی نسبی.

**جدول (۶): زلزله‌های مورد استفاده برای تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی.**

Earthquake	Country	Year	Mech	Mag	Station	Dir	R <sub>jb</sub> (km)	PGA	PGV
Northridge	America	1994	reverse	6.7	Beverly Hills Mulhol	X	12.39	0.62	28.8
Northridge	America	1994	reverse	6.7	Beverly Hills Mulhol	Y	12.39	0.45	31.39
Northridge	America	1994	reverse	6.7	Canyon Country - WLC	X	12.44	0.4	44.38
Northridge	America	1994	reverse	6.7	Canyon Country - WLC	Y	12.44	0.47	41
Duzce	Turkey	1999	Strike slip	7.1	Bolu	X	12.02	0.73	55.93
Duzce	Turkey	1999	Strike slip	7.1	Bolu	Y	12.02	0.8	65.87
Kobe	Japan	1995	Strike slip	6.9	Nishi-Akashi	X	7.1	0.48	46.8
Kobe	Japan	1995	Strike slip	6.9	Nishi-Akashi	Y	7.1	0.46	38.25
Imperial Valley	America	1979	Strike slip	6.5	Delta	X	22.03	0.23	26
Imperial Valley	America	1979	Strike slip	6.5	Delta	Y	22.03	0.35	33
Loma Prieta	America	1989	Obilique	6.9	Gilroy Array #3	X	12.42	0.368	45
Loma Prieta	America	1989	Obilique	6.9	Gilroy Array #3	Y	12.42	0.56	36
Chi-Chi	Taiwan	1999	Obilique	7.6	CHY101	X	9.94	0.34	65
Chi-Chi	Taiwan	1999	Obilique	7.6	CHY101	Y	9.94	0.4	109

**جدول (۷): مشخصات میراگر.**

Damper	K <sub>1</sub> (kN/mm)	K <sub>2</sub> (kN/mm)	F <sub>Y</sub> (kN)	F <sub>D60</sub> (kN)
DSTYP	99.26	4.63	516.28	679.07

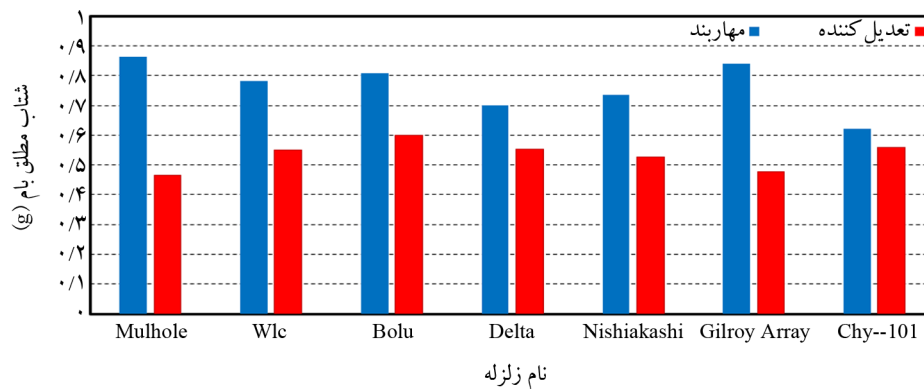
نشان‌دهنده‌ی یک سطح از تغییر شکل دائمی است که ممکن است نیاز به تعمیرات جزئی بعد از زلزله داشته باشد، اما سازه کلی هنوز پایدار است.

رنگ نارنجی نشان‌دهنده‌ی عملکرد غیر الاستیک با تغییر شکل‌های متوسط است. در این وضعیت، اجزا به حالت تغییر شکل‌های بیشتر و نزدیک به حد تخریب وارد شده‌اند و تحت تغییر شکل‌های قابل توجهی قرار دارند که ممکن است خطر تخریب را به همراه داشته باشد. تعمیرات اساسی بعد از وقوع زلزله در این حالت ضروری است. رنگ قرمز نشان‌دهنده‌ی نزدیک به خرابی یا تخریب اجزا است. اجزا به مرز شکست رسیده‌اند یا از آن عبور کرده‌اند که این نشان‌دهنده‌ی خرابی کامل یا نزدیک به خرابی است و احتمال فروپاشی سازه وجود دارد. در این حالت، ایمنی سازه به شدت به خطر افتاده است و اقدامات فوری برای تخلیه و بازسازی لازم است. این رنگ‌ها در Perform-3D به مهندسین و تحلیل‌گران این امکان را می‌دهد تا به سرعت نواحی با مشکلات سازه‌ای را شناسایی کرده و تصمیمات لازم برای تعمیرات و تقویت سازه را اتخاذ کنند. فهم صحیح این رنگ‌ها در تحلیل نتایج می‌تواند به بهبود طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌ها کمک کند. برای بررسی تأثیر DSTYP در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) شتاب مطلق بام، برش پایه برای رکوردهای مختلف و با و بدون DSTYP آورده شده است.

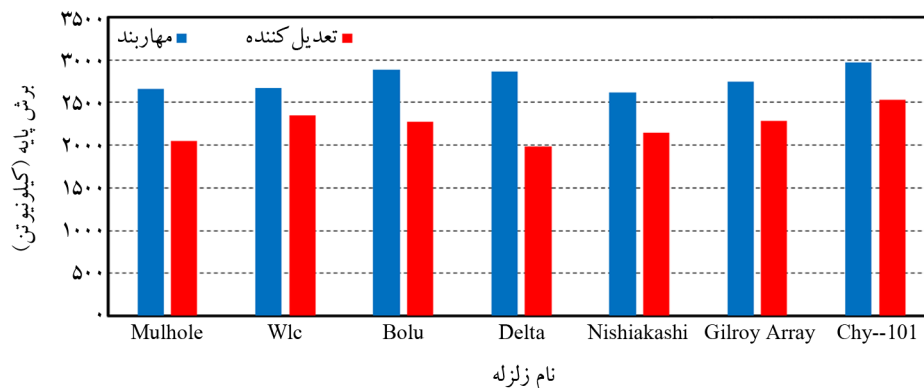
برای مدل‌سازی تیر از المان Beam (frame element) برای ستون از المان column (frame element) و برای میراگر از Damping elements for brace استفاده شده است. زمان تناوب اصلی ساختمان در حالت بدون میراگر ۰/۳۵ و با میراگر ۰/۳۰ ثانیه می‌باشد.

شکل (۲۲-الف) سازه با میراگر و شکل (۲۲-ب) سازه بدون میراگر را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که در حالت بدون میراگر اکثر مهاربندها به رنگ قرمز و نارنجی رسیده و سطح عملکردشان دچار فروپاشی (collapse) شده است در حالی که شکل‌ها با میراگر در سطح عملکرد IO باقی‌مانده‌اند. سطوح عملکرد به‌طور کلی به شرح زیر تفسیر می‌شوند:

رنگ سبز نشان‌دهنده‌ی عملکرد الاستیک اجزا است که در این محدوده بدون تغییر شکل‌های دائمی و به‌طور کامل در حالت الاستیک عمل می‌کنند. این وضعیت نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب سازه است و بارهای وارده به خوبی تحمل می‌شوند. رنگ زرد نشان‌دهنده‌ی عملکرد نزدیک به الاستیک یا تغییر شکل‌های محدود است. اجزا به محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک وارد شده‌اند ولی همچنان عملکرد مطلوبی دارند. این



شکل (۲۳): شتاب مطلق بام.



شکل (۲۴): برش پایه.

قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از میراگرهای پیشنهادی با سختی و استحکام مناسب می‌توان حداکثر شتاب سقف و حداکثر برش پایه ساختمان را به ترتیب در حدود ۳۰ درصد و ۲۰ درصد نسبت به ساختمان با مهاربندی معمولی کاهش داد. در ادامه نتایج مهم این مطالعه آورده شده است:

۱. نمودار هیستریزس نیرو- جابه‌جایی DSTYP علاوه بر پایدار بودن دارای جذب انرژی بالایی است.
۲. سختی اولیه، مقاومت تسلیم و نهایی با افزایش ضخامت میراگر پیشنهادی افزایش یافت ولی با افزایش طول اضلاع نتیجه برعکس بود.
۳. برای پیش‌بینی سختی اولیه، سختی ثانویه و مقاومت تسلیم DSTYP، رابطه پیشنهادی با ضریب رگرسیون بالای ۹۶ درصد نشان داد دارای دقت مطلوبی است.
۴. نتایج نشان داد جایگذاری DSTYP در ساختمان فولادی با مهاربند شورون منجر به محافظت از اعضای سازه‌ای آن

همان‌طور که قابل مشاهده است استفاده از DSTYP منجر به کاهش شتاب مطلق بام و برش پایه ساختمان شده است ولی جابه‌جایی بام به دلیل نرم‌تر شدن ساختمان در اثر استفاده از DSTYP افزایش یافته است

## ۵- نتایج

در سیستم قاب فولادی مهاربندی شده، مهاربندها به‌عنوان فیوز سازه‌ای عمل می‌کنند و در هنگام وقوع نیرو جانبی شدید مهاربندهای تحت کشش وارد ناحیه غیر الاستیک می‌شوند و انرژی وارد شده را مستهلک می‌کنند، ولی برخلاف عملکرد خوب مهاربندهای تحت کشش، مهاربندهای تحت فشار دچار کمزش می‌شوند. به همین دلیل در تحقیق حاضر برای مقابله با این ضعف یک نوع میراگر جدید به نام میراگر فولادی ساخته شده از دو لوله مربع شکل که در کشش و فشار دارای رفتار یکسان است پیشنهاد شد و تحت مطالعه آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی

Lee, C.H., Ju, Y.K., Min, J.K., Lho, S.H., & Kim, S.D. (2015). Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. *Engineering Structures*, 99, 192-204. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.04.052

Li, H.N., & Li, G. (2007). Earthquake-resistant design of RC frame with "dual functions" metallic dampers. In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, 4286, 43-53. doi: 10.1115/PVP2007-26450

Nuzzo, I., Losanno, D., & Caterino, N. (2019). Seismic design and retrofit of frame structures with hysteretic dampers: A simplified displacement-based procedure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 2787-2819.

Pachideh, G., Kafi, M., & Gholhaki, M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, 467-481, Elsevier.

Qiu, C., Wang, H., Liu, J., Qi, J., & Wang, Y. (2020). Experimental tests and finite element simulations of a new SMA-steel damper. *Smart Materials and Structures*, 29(3), 035016.

Skinner, R.I., Heine, A.J., & Tyler, R.G. (1977, January). Hysteretic dampers to provide structures with increased earthquake resistance. In *Proceedings Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi.

Xiao, L., Li, Y., Hui, C., Zhou, Z., & Deng, F. (2022). Experimental study on mechanical properties of shear square section steel tube dampers. *Metals*, 12(3), 418.

Zhai, Z., Guo, W., Yu, Z., Hu, Y., & Ma, C. (2021). Seismic performance assessment of steel strip dampers equipped in high-rise steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 106437.

Zheng, J., Zhang, C., & Li, A. (2019). Experimental investigation on the mechanical properties of curved metallic plate dampers. *Applied Sciences*, 10(1), 269.

می‌شود درحالی‌که میراگر وارد ناحیه غیر الاستیک شده و انرژی وارده را مستهلک می‌کند.

۵. بهره‌گیری از DSTYP منجر به کاهش شتاب مطلق و برش پایه ساختمان شد درحالی‌که به دلیل نرم‌تر شدن ساختمان در اثر استفاده از DSTYP جابه‌جایی بام افزایش یافت.

## References

## مراجع

Azandariani, M.G., Rousta, A.M., Usefvand, E., Abdolmaleki, H., & Azandariani, A.G. (2021, February). Improved seismic behavior and performance of energy-absorbing systems constructed with steel rings. In *Structures*, 29, 534-548, Elsevier (in Persian).

Bakhshayesh, Y., Shayanfar, M., & Ghamari, A. (2021). Improving the performance of concentrically braced frames utilizing an innovative shear damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, 106672 (in Persian).

Curadelli, R. O., & Riera, J. D. (2004). Reliability-based assessment of the effectiveness of metallic dampers in buildings under seismic excitations. *Engineering Structures*, 26(13), 1931-1938.

Ghabussi, A., Marnani, J.A., & Rohanimanesh, M.S. (2021). Seismic performance assessment of a novel ductile steel braced frame equipped with a steel curved damper. In *Structures* 31, 87-97, Elsevier (in Persian).

Hosseini, M., Mirzaaghaee, Y., & Tabrizi, B. E. (2012). A two-ring energy dissipating device with similar behaviors in tension and compression to create buckling-resistant braces. *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon (PT)* (in Persian).

Hsu, H.L., & Halim, H. (2018). Brace performance with steel curved dampers and amplified deformation mechanisms. *Engineering Structures*, 175, 628-644.

Jarrah, M., Khezzzadeh, H., Mofid, M., & Jafari, K. (2019). Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 99-109 (in Persian).

Kelly, J.M., Skinner, R.I., & Heine, A.J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake-resistant structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3), 63-88.

## Steel Damper Made of Two Square Tubes for Bracing with Similar Behaviors in Tension and Compression

Leila Montazerian<sup>1</sup>, Heydar Dashti Naserabadi<sup>2\*</sup>, Morteza Jamshidi<sup>2</sup> and Mahmood Hosseini<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran,  
\*Corresponding Author: dashti@iauc.ac.ir
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Eastern Mediterranean University (EMU), Famagusta, North Cyprus via Mersin 10, Turkey

The convergent bracing system has served as a lateral load-bearing mechanism in buildings for many decades. Despite its widespread application, it exhibits two significant weaknesses: low energy dissipation capacity and susceptibility to buckling under high compressive loads. To address these issues, yielding dampers have been introduced in recent decades. These dampers enhance the energy dissipation capacity of bracing elements in convergent bracing frames and help prevent buckling. Numerous types of yielding dampers have been proposed; however, most suffer from one or more of the following drawbacks: they exhibit different behaviors in tension and compression, they are complex and difficult to manufacture, and they lack a straightforward design methodology.

This paper introduces a novel yield-based energy damper known as the double square tube steel damper. This system is designed for installation in bracing elements and demonstrates consistent behavior under both compression and tension, making it simple to manufacture and design. The proposed damper dissipates energy through two square tubular sections, which are integrated with the bracing element, in such a way that when subjected to axial force, one section experiences tension while the other experiences compression.

The paper initially presents the hysteretic load-displacement behavior of the damper through laboratory testing and finite element analysis. The laboratory samples and finite element models provide insights into the damper's performance, confirming its capacity for stable and efficient energy dissipation. Based on the results of the finite element analysis for the double square steel damper, which considers various sizes and thicknesses of the square parts, two simple formulas are derived. These formulas relate the initial stiffness and yield strength of the damper to the mechanical and geometric characteristics of the yielding components, providing a straightforward method for design.

To further demonstrate the effectiveness of the proposed damper in reducing the seismic response of buildings, its performance is evaluated in a five-story building equipped with chevron bracing. This evaluation is conducted through a series of nonlinear time history analyses that simulate the building's response to seismic events. The results of these analyses reveal that the implementation of the proposed dampers, with appropriate stiffness and strength, can significantly mitigate seismic impacts. Specifically, the maximum roof acceleration and the maximum base shear of the building can be reduced by approximately 30% and 20%, respectively, compared to a building utilizing conventional bracing systems.

The force-displacement hysteresis diagram of the double square tube steel damper exhibits symmetrical geometry and an optimal width, which indicate its stability and high energy absorption capacity. This symmetrical behavior in both tension and compression presents a significant advantage over the buckling-prone behavior of conventional braces. The consistent performance under different loading conditions ensures that the damper can reliably dissipate energy, enhancing the overall resilience of the structure during seismic events.

Another significant advantage of the proposed damper is its replaceable nature within the bracing system. This feature not only facilitates maintenance and replacement but also offers substantial economic benefits. By allowing easy replacement of the damper after a seismic event, the overall cost of structural maintenance and repair are reduced.

Moreover, the improved performance characteristics of the damper elevate the structure's performance level from Life Safety (LS) to Immediate Occupancy (IO), offering improved protection for both the building and its occupants.

In conclusion, the double square tube steel damper addresses the critical weaknesses of conventional convergent bracing systems by offering improved energy dissipation and resistance to buckling. Its simple design, ease of manufacturing, and reliable performance under both tension and compression make it a practical and effective solution for enhancing the seismic resilience of buildings. The positive results from both experimental testing and finite element analysis, coupled with its successful application in a five-story building, underscore the potential of this innovative damper to enhance safety and economic efficiency of seismic design.

**Keywords:** Energy Dissipaters, Yielding Dampers, Hysteretic Behavior, Finite Element Analysis, Seismic Response Reduction