

کاربرد یک میراگر لوله‌ای شکاف‌دار جدید با مقطع استوانه‌ای در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها

حبیب سعیدمنیر^{۱*}، ندا فضل‌علیپور^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

^۲ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه ارومیه

چکیده

در این تحقیق، نوع جدیدی از یک میراگر فولادی شکاف‌دار معرفی می‌شود که می‌تواند به صورت بادبند 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. سادگی ساخت این میراگر نسبت به میراگرهای مشابه و نیز در دسترس بودن و سهولت بازرسی آن‌ها از مزایای این سیستم است. در این تحقیق، این میراگر شکاف‌دار جدید ابتدا در نرم‌افزار ABAQUS مورد تحلیل قرار گرفته و منحنی هیستریزیس آن به دست آمد. سپس برای بررسی اثر این دستگاه در جذب انرژی زلزله و کاهش پاسخ سازه‌ها، مدل یک سازه ۵ طبقه که براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی شده بود، در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد گردید. آن‌گاه این سازه، در حالت مجهز شده به میراگر و بدون آن، تحت ارتعاشات پایه مربوط به سه زلزله السنترو، کوبه و طیس 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 دررفت طبقات و برش پایه داشته است.

واژگان کلیدی: سیستم‌های اتلاف انرژی، کنترل غیر فعال، میراگر فلزی، کنترل لرزه‌ای.

۱- مقدمه

موجود، به سادگی قابل اجرا بوده و تولید و کاربرد آن برای ساختمان‌های متعارف از هر نظر اقتصادی باشد.

در حالت کلی، سیستم‌های کنترلی سازه‌ها به دو دسته مستهلک کننده‌های انرژی و جداسازی لرزه‌ای تقسیم می‌شوند. مستهلک کننده‌های انرژی را می‌توان به سه دسته فعال، نیمه-فعال و غیر فعال تقسیم‌بندی کرد. سیستم‌های غیر فعال به نوبه خود به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ۱- وابسته به سرعت حرکت مانند میراگرهای ویسکوز
- ۲- مستقل از سرعت حرکت (وابسته به تغییر مکان) مانند میراگرهای اصطکاکی و میراگرهای فلزی [۱].

میراگر مورد بحث در این مقاله، جزء میراگرهای فلزی می‌باشد. میراگرهای فلزی، میراگرهای تسلیمی هستند که می‌توانند انرژی را در یک زلزله در اثر تغییرات غیر الاستیک فلزات تلف کنند. این میراگرها در حقیقت درحالات خمشی، پیچشی، محوری یا برشی تسلیم می‌شوند. میراگرهای فلزی در

کنترل ارتعاشات روش جدیدی در روند بهسازی سازه‌ها و طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر بارهای دینامیکی است. این ایده باعث کنترل پاسخ سازه تحت بارهای دینامیکی شده و بدون این که نیاز به مقاوم‌سازی تک‌تک عناصر مقاوم سازه‌ای باشد با تعبیه وسایل و تجهیزات مناسبی در ساختمان باعث کاهش تغییر مکان و بهبود پاسخ دینامیکی سازه می‌شوند. این سیستم-ها با جذب و استهلاک درصد بالایی از انرژی ورودی به سازه‌ها، شرایط ایمن و پایداری را نسبت به ساختمان‌های مشابه فراهم می‌کنند. امروزه استفاده از میراگرها به عنوان روشی اقتصادی و عملی برای افزایش مقاومت دینامیکی سازه‌ها مطرح بوده و استفاده از آن جهت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و بناهای متعارف امکان‌پذیر می‌باشد. جهت گسترش روش‌های کنترل در سازه‌ها در کشور، باید به دنبال روش‌هایی بود که با توجه به امکانات

در میراگر SSD، نیروی تسلیم، بیشینه مقاومت صفحه باریکه و جابجایی نهایی باریکه‌ها از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$Q_y = \min \left\{ n \frac{f_y t b^2}{2h'}, n \frac{2f_y t b}{3\sqrt{3}} \right\}$$

$$Q_B = \min \left\{ n \frac{f_B t b^2}{2h'}, n \frac{2f_B t b}{3\sqrt{3}} \right\}$$

$$\delta_y = \frac{Q_y h^3}{n E t b^2} \left(1 + 3 \ln \frac{h+2r}{h'} \right) + \frac{3Q_y h'}{2n E t b G} \left(1 + \ln \frac{h+2r}{h'} \right)$$

$$h' = h + \left[2r^2 / (h + 2r) \right] \quad (1)$$

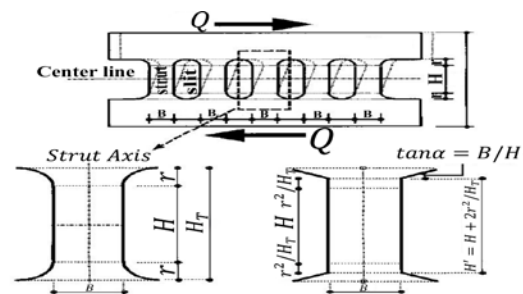
که در روابط فوق t ، b و r به ترتیب عرض، ضخامت و شعاع انتهایی نوار می‌باشند. n تعداد کل نوارها در میراگر بوده و f_y و f_B تنش‌های کششی تسلیم و بیشینه فولاد می‌باشد [۴].

از جمله تحقیقات انجام گرفته در مورد میراگرهای SSD می‌توان به تحقیقات Chan و Ricky [۵] اشاره کرد که به بررسی پارامترهای اصلی این میراگر از جمله ارتفاع و عرض باریکه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نمونه با کمترین مقدار نسبت عرض به ارتفاع، نیروی کمتری را تحمل می‌کند و در جابجایی بیشتری تسلیم می‌شود و نمونه با بیشترین نسبت عرض به ارتفاع، رفتار عکس را از خود نشان می‌دهد.

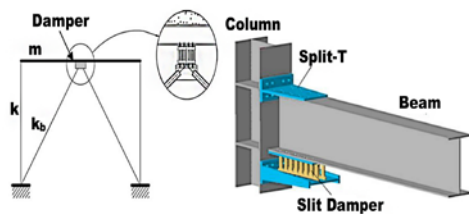
نوع دیگری از میراگرهای فلزی، میراگر کمانش‌ناپذیر (BRB) است. این نوع میراگرها دارای یک هسته صلیبی فلزی نرم هستند که در یک لوله فولادی قرار داده شده و با بتن یا ملات پر می‌شوند و به صورت قطری در داخل یک قاب فولادی به عنوان یک بادبند عادی نصب می‌شوند. هسته مرکزی فولادی BRB توانایی تحمل بارهای محوری بالایی را دارد و لوله بیرونی پر شده با بتن یا ملات از کمانش تحت نیروی فشاری محوری جلوگیری می‌کند. طی بررسی‌های انجام گرفته مشخص شد ضخامت ملات و شکل لوله فولادی در مقاومت گسیختگی کمانش مؤثر می‌باشند [۶]. شکل (۳) یک نمونه از این میراگر را نشان می‌دهد.

هنگام بارگذاری، جاری شده و در نتیجه موجب مستهلک نمودن مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه می‌گردند. اولین مطالعات در این زمینه توسط Kelly [۲] انجام شده است. از انواع میراگرهای فلزی می‌توان به میراگرهای شکاف دار فلزی^۱ (SSD)، میراگر کمانش‌ناپذیر^۲ (BRB) و میراگرهای لوله‌ای تودرتو^۳ (TTD) اشاره کرد. در ادامه، توضیح مختصری در مورد هر یک از این میراگرها آورده شده است.

میراگر شکاف‌دار SSD میراگری است که در آن با تعبیه شکاف‌هایی، یک‌سری نوارهای باریک بین شکاف‌ها ایجاد شده است. در اثر تغییر شکل‌های ناشی از تحریکات زلزله، این نوارها تسلیم شده و انرژی را مستهلک می‌کنند. شکل (۱) نمونه‌ای از یک میراگر SSD را نشان می‌دهد. این نوع میراگر باید در سازه به نحوی جاسازی گردد که در اثر جابجایی نسبی ناشی از بارهای جانبی، تحت تغییر شکل قرار گیرد. نحوه طراحی نیز باید به گونه‌ای باشد که میراگر قبل از عضو سازه‌ای وارد مرحله پلاستیک شود. در صورت عدم دقت در طراحی و جایگذاری، این میراگر مانند یک المان سازه‌ای متعارف به تحمل نیرو خواهد پرداخت و رفتار پلاستیک برای استهلاک انرژی از خود نشان نخواهد داد. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، این نوع میراگر در اتصالات بادبندی شورون و همچنین در اتصالات صلب تیر به ستون به کار می‌رود [۳].



شکل ۱- میراگر SSD



شکل ۲- کاربرد میراگر SSD

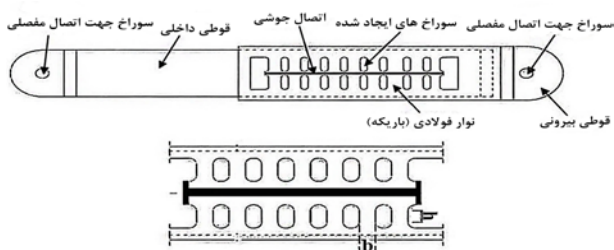
- 1- Steel slit damper
- 2- Buckling restrained brace
- 3- Tube-in-tube damper

پس از تحمل زلزله، مورد بازرسی و یا احیاناً تعویض قرار گیرد. همچنین هزینه‌های ساخت این میراگر نیز کمتر از BRB می باشد [۱۰]. در این تحقیق، تغییراتی روی میراگر TTD انجام گرفته و نوع جدیدی از میراگر فلزی تسلیمی معرفی شده است که هم خصوصیات میراگر TTD را دارا بوده و هم پروسه ساخت آن ساده‌تر از TTD می‌باشد. در این مقاله، به بررسی رفتار این میراگر پیشنهادی جدید پرداخته شده و عملکرد آن روی یک سازه‌ی فولادی پنج طبقه بررسی شده است.

۲- میراگر TTD

قبل از پرداختن به مشخصات میراگر شکافدار جدید، به بررسی جزئیات میراگر TTD می‌پردازیم. همان طوری که در شکل (۵) نشان داده شده است، این میراگر از دو قوطی با مقطع مربعی تشکیل شده است که به صورت تو در تو قرار گرفته‌اند و توسط جوش‌های نواری و انگشتی در نقاط خاصی به هم وصل شده‌اند. در مدل معرفی شده توسط Benavent در سال ۲۰۱۰ قوطی بیرونی با مقطع مربعی $160 \times 160 \times 8$ میلی‌متر که یک-سری سوراخ‌های نواری در دیواره خارجی آن ایجاد شده، با استفاده از جوش به قوطی داخلی با مقطع مربعی $140 \times 140 \times 8$ میلی‌متر متصل شده است. مشخصات سوراخ‌های لوبیایی ایجاد شده در دیواره خارجی قوطی بیرونی به صورت $h=20$ mm و $b=15$ mm است که $n=20$ تعداد باریکه، b عرض باریکه و h ارتفاع باریکه می‌باشد [۱۰].

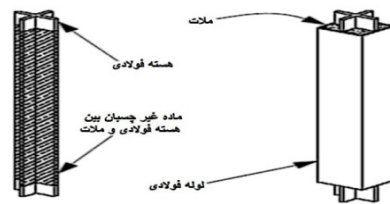
در ذیل، ابتداء مدل المان محدود میراگر TTD بررسی شده و سپس جزئیات و مدل‌سازی میراگر جدید تشریح می‌شود.



شکل ۵- شکل کلی میراگر TTD

۲-۱- مدل‌سازی میراگر TTD در نرم‌افزار ABAQUS

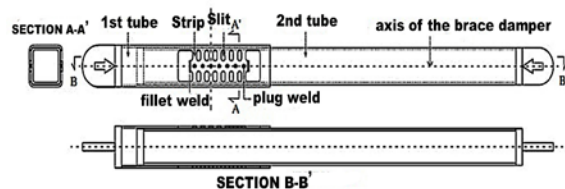
در این بخش، ابتدا به مدل‌سازی عددی میراگر TTD (که توسط Amadeo Benavent-Climent در سال ۲۰۱۰ معرفی شده است) پرداخته و سپس نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی این میراگر مقایسه گردیده تا صحت مدل عددی



شکل ۳- میراگر بادبندی کمانش‌ناپذیر

این میراگر به سازه‌های کمکی مثل بادبند شورون برای نصب در سازه نیازی ندارد ولی دارای برخی معایب می‌باشد. از معایب این سیستم، می‌توان به عدم امکان بازرسی هسته فولادی بدون تخریب کردن آن اشاره کرد. همچنین به منظور آزادی عمل بتن و فولاد در اثر تغییر شکل جانبی، مصالح و هندسه صفحه لغزان یا لایه غیر چسبان باید با دقت بالایی طراحی شود که به کارگیری این عوامل در هزینه ساخت میراگر مؤثر بوده و برای خیلی از سازه‌های معمولی غیراقتصادی است [۷-۹].

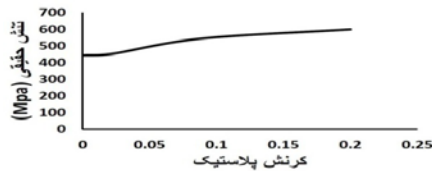
میراگر TTD نوع دیگری از میراگرهای شکافدار است که در سال ۲۰۱۰ توسط Benavent [۱۰] معرفی شد. در شکل (۴) نمایی از این میراگر نشان داده شده است.



شکل ۴- میراگر لوله‌ای TTD

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، میراگر TTD با تلفیق دو پروفیل توخالی استاندارد با مقاطع مربعی به صورت تو در تو درست شده است. در دیواره‌های مقطع میان تهی خارجی، تعدادی شکاف وجود دارد که باعث به وجود آمدن تعدادی نوار باریک در روی بدنه دستگاه شده است. دو قوطی توسط جوش‌های نواری و انگشتی در نقاط خاصی به هم وصل شده‌اند. تحت جابجایی‌های نسبی دو انتهای میراگر، باریکه‌ها به عنوان یک سری تیر با انتهای گیردار عمل کرده و با تغییر شکلی به صورت انحنای مضاعف، انرژی وارده را مستهلک می‌کنند. روابط معرفی شده برای میراگرهای SSD (رابطه (۱)) در میراگر TTD نیز صادق می‌باشند. از مزیت‌های این میراگر می‌توان به این مورد اشاره کرد که علاوه بر داشتن مزایای میراگر BRB عیب عمده آن نیز رفع شده است چرا که قسمت تسلیم شده میراگر می‌تواند

که در رابطه اخیر ϵ_{pl} کرنش پلاستیک واقعی، ϵ_t کرنش کلی واقعی، σ تنش واقعی و E مدول الاستیسیته فولاد می‌باشد [۱۱]. منحنی استفاده شده در حالت تنش حقیقی-کرنش پلاستیک در ABAQUS در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک فولاد مورد استفاده در میراگر TTD

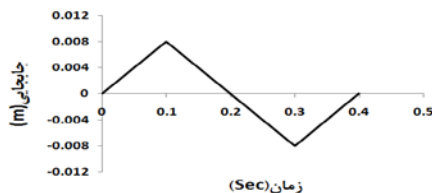
مشخصات فولاد مصرف شده برای میراگر TTD در جدول (۱) آورده شده است [۱۰].

جدول ۱- مشخصات فولاد مصرفی در میراگر TTD

f_y (MPa)	f_B (MPa)	E (MPa)
۴۴۹	۵۱۲	۲۰۰۶۲۶

f_y تنش تسلیم، f_B بیشترین تنش کششی و E مدول الاستیک فولاد می‌باشد.

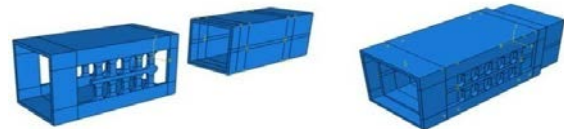
در این مدل‌سازی، میراگر مذکور در معرض یک جابجایی با دامنه بارگذاری ثابت، مطابق الگوی شکل (۹) قرار داده شد. بدین صورت که شرایط مرزی قوطی بیرونی در جهت U_z (جهت Z همان جهت طولی قوطی) بسته شد و برای قوطی درونی جابجایی مورد نظر مطابق الگوی شکل (۹) اعمال شد.



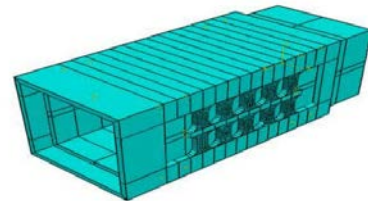
شکل ۹- الگوی بارگذاری با دامنه ثابت

بعد از وارد کردن مشخصات مصالح و مدل‌سازی آن‌ها، این سیستم تحت تحلیل Explicit Dynamic قرار گرفت که در شکل (۱۰) نتایج تحلیل همراه با کنتور کرنش برای میراگر TTD نشان داده شده است.

مورد تأیید قرار گیرد. بدین منظور از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. برای مدل کردن اجزاء میراگر در این نرم افزار، از المان‌های Solid از نوع C3D8R استفاده شده است. برای مدل‌سازی جوش به کار رفته در میراگر TTD نیز از قید Tie استفاده گردیده است. قید Tie دو صفحه جداگانه را به هم وصل کرده به گونه‌ای که حرکت نسبی میان آن‌ها محدود می‌شود. برای کنتکت بین لوله‌ها نیز از گزینه General Contact این نرم‌افزار استفاده شده است. شکل (۶) قطعات دمونتاژ شده میراگر و شکل (۷) مدل مش‌بندی شده میراگر را نشان می‌دهند.



شکل ۶- مدل دمونتاژ شده میراگر در نرم‌افزار ABAQUS



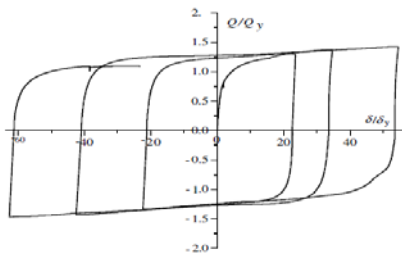
شکل ۷- مدل مش‌بندی میراگر در نرم‌افزار ABAQUS

برای مدل کردن خواص پلاستیک مواد در ABAQUS، باید از تنش-کرنش واقعی بجای تنش-کرنش مهندسی استفاده کرد تا نتایج دقیق‌تر به دست آیند (تنش مهندسی عبارت است از نیرو تقسیم بر سطح مقطع اولیه، ولی تنش حقیقی بر حسب سطح مقطع واقعی نمونه محاسبه می‌شود). تنش واقعی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$

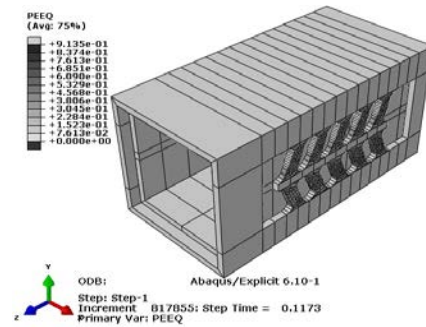
در رابطه فوق σ تنش واقعی و σ_{nom} نشانگر تنش مهندسی است. کرنش پلاستیک نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_t - \epsilon_{el} = \epsilon_t - \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$



شکل ۱۲- نمودار نیرو- تغییر مکان میراگر TTD/15/20/20 به

دست آمده توسط Benavent [۱۰]

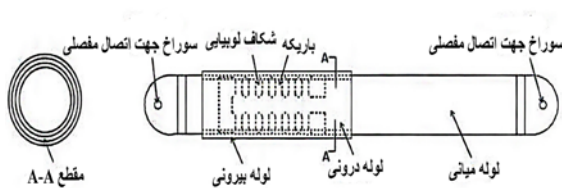


شکل ۱۰- تغییر شکل میراگر

که مطابقت خوبی با نتایج به دست آمده از تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد. بنابر این قابلیت مدل‌سازی این سیستم در نرم‌افزار ABAQUS مورد تأیید قرار می‌گیرد. در ادامه مشخصات و مدل‌سازی میراگر شکاف‌دار جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- میراگر تسلیمی شکاف‌دار جدید با مقاطع استوانه‌ای

مکانیسم عملکرد این میراگر جدید شبیه TTD می‌باشد با این تفاوت که در این میراگر جدید، از مقاطع لوله‌ای دایره‌ای به جای مقاطع مربعی استفاده شده است. این عمل باعث ساده‌تر شدن پروسه ساخت میراگر می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، میراگر تسلیمی جدید از سه لوله استوانه‌ای استاندارد تو خالی که به صورت تو در تو داخل هم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است.



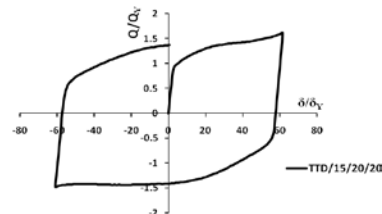
شکل ۱۳- نمای کلی میراگر تسلیمی با مقاطع استوانه‌ای

در جداره لوله میانی، چندین شکاف ایجاد شده است. انتهای شکاف‌ها گرد می‌باشد تا از تمرکز تنش در گوشه‌ها جلوگیری نمایند. همانند میراگر TTD، نوارهای باریکی بین این شکاف‌ها ایجاد شده است که انرژی وارده را با تغییر شکل پلاستیک خود جذب می‌کنند. لوله‌های داخلی و خارجی از کماتش خارج از صفحه لوله میانی جلوگیری می‌کند. در جداره این لوله‌ها نیز، در محل اتصال به لوله میانی، چندین سوراخ لوبیایی همانند شکل (۱۴) ایجاد شده است که جابجایی لوله میانی را به اندازه

هدف از طراحی و مدل‌سازی انجام گرفته، علاوه بر پیدا کردن پارامترهای مهم و مؤثر در عملکرد هرچه بهتر این میراگرها، به دست آوردن خواص و پارامترهایی از قبیل سختی و نیروی تسلیم می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از نرم افزار، می‌تواند بیانگر اثر این پارامترها باشد.

نمودار نیرو-تغییر مکان به دست آمده برای میراگر TTD در

شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار نیرو- تغییر مکان میراگر TTD/15/20/20

نیروی تسلیم و جابجایی تسلیم به دست آمده با استفاده از تحلیل المان محدود به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_Y = 321 \text{ kN} \quad \delta_Y = 0.243 \text{ m}$$

نیروی تسلیم و δ_Y جابجایی تسلیم می‌باشد.

نیروی تسلیم و جابجایی تسلیم به دست آمده توسط Benavent [۱۰] از طریق آزمایش به صورت زیر می‌باشد.

$$Q_Y = 323 \text{ kN} \quad \delta_Y = 0.216 \text{ m}$$

شکل (۱۲) نمودار هیستریزس نیرو-تغییر مکان به دست

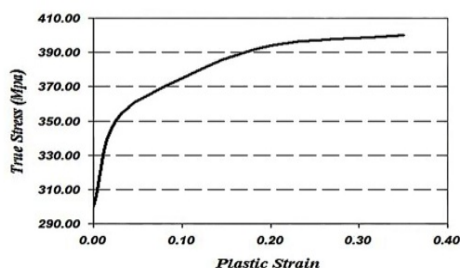
آمده از این آزمایش را نشان می‌دهد [۱۰].

نظر به تأیید مدل‌سازی TTD در ABAQUS توسط آزمایشات تجربی، مدل‌سازی این میراگر لوله‌ای نیز در این نرم-افزار انجام گرفته‌است. جزئیات مدل‌سازی شبیه مدل میراگر TTD می‌باشد با این تفاوت که در این نوع میراگر، جوشکاری مابین پروفیل‌ها (نمایش داده شده در شکل (۵)) حذف و برای اتصال سه لوله به همدیگر از سوراخ لوبیایی و پیچ مطابق شکل (۱۴) استفاده شده است. منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک به کار رفته برای فولاد مصرفی در شکل زیر آورده شده است. خصوصیات معرفی شده برای فولاد مصرفی در میراگر پیشنهادی (با توجه به خصوصیات لوله‌های رایج در بازار API- (5L-GRB) در جدول (۲) و شکل (۱۶) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات فولاد مصرفی در میراگر لوله‌ای جدید

f_y (MPa)	f_B (MPa)	E (MPa)
۳۴۹	۴۰۷	۲۱۰۰۰۰

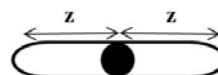
f_y تنش تسلیم، f_B بیشترین تنش کششی و E مدول الاستیسیته فولاد می‌باشد.



شکل ۱۶- نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک فولاد مورد استفاده در میراگر پیشنهادی

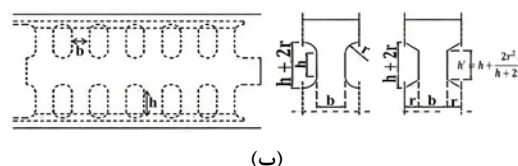
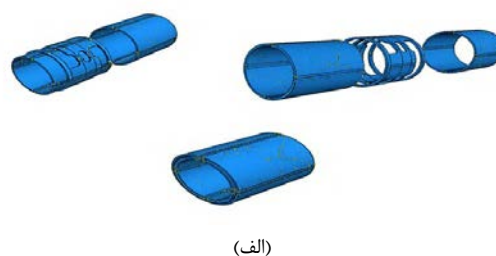
در مدل‌سازی میراگر جدید در نرم‌افزار ABAQUS، اصطکاک بین لوله‌های استوانه‌ای، صفر در نظر گرفته شده و همچنین در جاهایی از مدل که تمرکز تنش وجود داشت، مش-بندی ریزتر اعمال شده است. شکل (۱۷) مدل مش‌بندی شده میراگر را نشان می‌دهد. شکل (۱۸) مدل تغییر شکل یافته میراگر اصلاح شده را به همراه کنتورهای کرنش نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که انرژی از طریق تسلیم برشی- خمشی باریکه‌ها مستهلک می‌شود.

مشخصی محدود کرده تا به هنگام جذب انرژی، نوارهای مابین شکاف‌های این لوله آسیب ندیده و گسیخته نشوند. در صورت عدم وجود لوله‌های داخلی و خارجی، لوله میانی تحت بار محوری اعمال شده دچار کمانش و تغییر شکل خارج از صفحه می‌شود. این مورد هنگام تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS نیز مشهود بود.



شکل ۱۴- شکاف ایجاد شده در محل اتصال

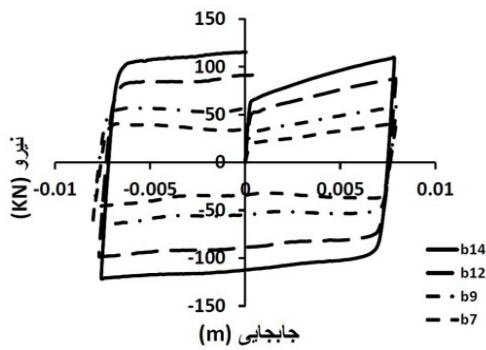
شکل (۱۵-الف) مشخصات کلی و (۱۵-ب) مشخصات هندسی میراگر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- (الف) مشخصات کلی میراگر، (ب) مشخصات هندسی میراگر

این میراگر لوله‌ای شکاف‌دار، تحت اعمال جابجایی در جهت محور طولی لوله، از ناحیه نوارهای ایجاد شده در دو طرف بدنه خارجی لوله میانی، تسلیم شده و انرژی مستهلک می‌گردد. به دلیل این که لوله‌ها در داخل هم قرار داده شده‌اند، ظرفیت کمانشی لوله‌ها افزایش می‌یابد. موقعیت شکاف‌ها و نوارهای ایجاد شده در لوله میانی کاملاً قابل تنظیم هستند و می‌توان برای سهولت در امر بازرسی، آن‌ها را در ابتدا، انتها و یا وسط لوله ایجاد نمود.

همان طوری که در شکل (۱۵-ب) نشان داده شده است b عرض باریکه، r شعاع انحنای شکاف، h ارتفاع باریکه و h' ارتفاع معادل باریکه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۹- منحنی هیستریزیس برای نمونه با قطر میانی ۱۱۴/۳

Q_y و δ_y : به ترتیب نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده از مدل سازی میراگر در نرم افزار ABAQUS می باشد.

Q_{yt} و δ_{yt} : به ترتیب نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده از فرمول معرفی شده برای میراگرهای SSD می باشد.

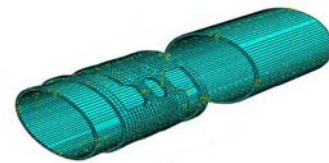
با توجه به نتایج ذکر شده در جدول (۴) مشاهده می شود که نمونه با کمترین مقدار b/h ، کمترین نیرو را تحمل می کند و نمونه با بیشترین مقدار b/h بیشترین نیرو را تحمل می کند یعنی مقدار نیروی تسلیم با مقدار b رابطه مستقیم دارد.

نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط Ricky و Chan [۵] روی میراگر SSD نیز گویای همین مطلب می باشد.

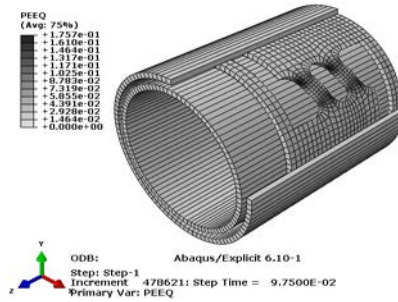
همچنین نتایج مدل سازی Q_y با Q_{yt} به دست آمده از روش تحلیلی (استفاده از رابطه (۱)) مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد با افزایش مقدار b نتایج مدل سازی و نتایج به دست آمده از روش تحلیلی مطابقت خوبی با هم داشته یعنی در نمونه هایی که کمترین لاغری را دارند (نمونه با بیشترین مقدار b/h) تأثیر انحنای کمتر بوده است. همچنین مشاهده شد با افزایش b (عرض باریکه)، باریکه ها در جابجایی کمتری تسلیم شدند.

δ_y حاصل از مدل سازی با δ_{yt} حاصل از روش تحلیلی، مقایسه شدند و مشاهده شد که این نمونه ها در جابجایی بیشتری نسبت به حالت تئوری تسلیم می شوند که این به دلیل انحنای باریکه ها می باشد.

در تمامی نمونه ها بیشترین بار معلوم Q_B باریکه ها، حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر مقدار نیروی تسلیم می باشد.



شکل ۱۷- نمونه مش بندی شده



شکل ۱۸- نمونه مدل تحلیل شده در ABAQUS

۴- بحث و بررسی نتایج حاصل از مدل سازی میراگر لوله-

ای شکاف دار در نرم افزار ABAQUS

۴-۱- بررسی تأثیر پارامتر b (عرض باریکه) بر روی نیروی تسلیم

برای بررسی تأثیر عرض باریکه بر روی نیروی تسلیم سه نوع نمونه با قطر لوله میانی ۸۸/۹، ۱۱۴/۳ و ۱۴۱/۳ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل تشابه در نتایج، صرفاً مشخصات نمونه با قطر ۱۱۴/۳ در جدول (۳) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در نمونه مذکور پارامتر عرض باریکه (b) متغیر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- میراگرهای مورد استفاده برای بررسی پارامتر B

n	b (mm)	d (mm)	h (mm)	t (mm)	میراگرهای مورد استفاده
۸	۹، ۷، ۱۴ و ۱۲	۱۹	۱۴	۴/۴	میراگر با قطر لوله میانی ۱۱۴/۳ میلی متر

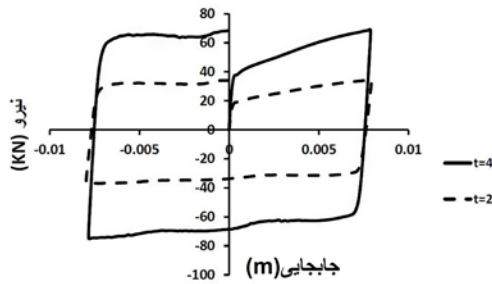
t : ضخامت باریکه d : قطر شکاف لوبیایی،

t : ارتفاع باریکه، b : عرض باریکه n : تعداد باریکه

نمودار هیستریزیس و خلاصه نتایج مربوط به این نمونه در شکل (۱۹) و جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای نمونه با قطر میانی ۱۱۴/۳ میلی متر

نمونه	b (mm)	b/h	$Q_y (kN)$	$Q_{yt} (kN)$	$\delta_y (mm)$	$\delta_{yt} (mm)$	$\left(\frac{Q_y - Q_{yt}}{Q_y}\right) \times 100$
۱	۷	۰/۵	۲۰/۸۴	۱۵/۴۵۹	۰/۴۶۳	۰/۱۵۳	٪۲۵/۸
۲	۹	۰/۷۵	۳۱/۴۰	۲۵/۵۵۵	۰/۴۵۱	۰/۱۲۸	٪۱۸/۶۱
۳	۱۲	۰/۸۵۷	۵۲/۴۰	۴۵/۴۳۱	۰/۴۴۲	۰/۱۳۲	٪۱۳/۲۹
۴	۱۴	۱	۶۵/۲۰	۶۱/۸۳۷	۰/۴۳	۰/۱۳۰	٪۵/۱۵



شکل ۲۰- منحنی هیستریزس برای نمونه با قطر میانی ۸۸/۹

با توجه به نتایج ذکر شده در جدول (۶) مشاهده می شود که مقدار نیروی تسلیم با مقدار t (ضخامت باریکه) رابطه مستقیم دارد. ولی این افزایش ضخامت نباید بیش از حد باشد چون در نتایج تحلیل مدل سازی میراگر با ضخامت های مختلف در نرم افزار ABAQUS، مشاهده گردید که با افزایش ضخامت، از تغییر شکل پلاستیک میراگر کاسته می شود و احتمال جاری نشدن میراگر در سازه وجود خواهد داشت. همچنین مشاهده شد که مقدار t (ضخامت باریکه) تأثیری در مقدار جابجایی تسلیم باریکه ها (δ_y) نداشته یعنی جابجایی تسلیم باریکه ها (δ_y) مستقل از مقدار t می باشد که نتایج تئوری نیز گویای همین مطلب می باشند.

جدول ۶- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای نمونه با قطر میانی ۸۸/۹ میلی متر

نمونه	t (mm)	b/h	$Q_y (kN)$	$Q_{yt} (kN)$	$\delta_y (mm)$	$\left(\frac{Q_y - Q_{yt}}{Q_y}\right) \times 100$
۱	۲	۰/۸۳	۱۹/۰۸	۱۶/۸۴۹	۰/۴۴۱	٪۱۱/۶۹
۲	۴	۰/۸۳	۳۷/۸۸	۳۳/۶۹۹	۰/۴۴۱	٪۱۱/۰۳۶

۴-۲- بررسی تأثیر پارامتر t (ضخامت باریکه) بر روی

نیروی تسلیم

دو نوع نمونه با قطرهای ۸۸/۹ و ۱۱۴/۳ میلی متر مطابق جدول زیر برای بررسی تأثیر ضخامت باریکه بر روی نیروی تسلیم انتخاب شدند. در جدول (۵) به دلیل تشابه نتایج، صرفاً مشخصات نمونه با قطر ۸۸/۹ آورده شده است و همان طور که مشاهده می شود در نمونه مذکور پارامتر ضخامت باریکه (t) متغییر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- انواع میراگرهای مورد استفاده برای بررسی پارامتر t

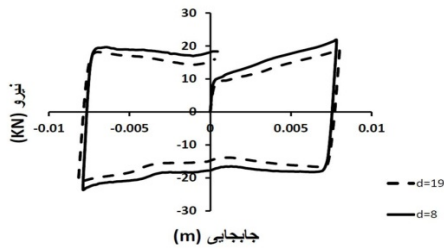
میراگرهای مورد استفاده	t (mm)	h (mm)	d (mm)	b (mm)	n
میراگر با قطر لوله میانی ۸۸/۹ میلی متر	۲ و ۴	۱۲	۱۶	۱۰	۸

نمودار هیستریزس و خلاصه نتایج مربوط به این نمونه در شکل (۲۰) و جدول (۶) نشان داده شده است.

۳-۴- بررسی تأثیر قطر شکافها بر روی نیروی تسلیم

برای بررسی تأثیر قطر شکافها بر روی نیروی تسلیم، نمونه‌ای با قطر لوله میانی ۱۱۴/۳ میلی‌متر انتخاب شد که مشخصات آن در جدول (۷) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامتر قطر شکافها (d) متغیر در نظر گرفته شده است.

شکل (۲۱) و جدول (۸) نشان داده شده است.



شکل ۲۱- منحنی هیستریزیس برای نمونه‌های جدول (۷)

با توجه به جدول (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش قطر سوراخ، مقدار نیروی تسلیم کمتر شده است. این بیانگر رابطه عکس بین قطر شکاف و مقدار نیروی تسلیم می‌باشد.

جدول ۷- میراگر مورد استفاده برای بررسی پارامتر r

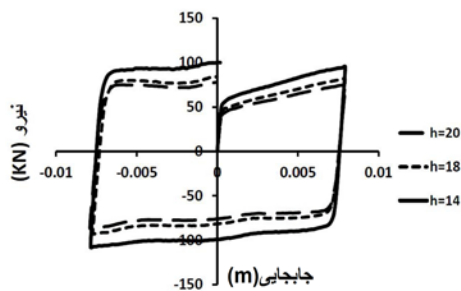
میراگر مورد استفاده	t (mm)	h (mm)	d (mm)	b (mm)	n
میراگر با قطر لوله میانی ۱۱۴/۳ میلی‌متر	۲	۱۴	۸ و ۱۹	۷	۸

نمودار هیستریزیس و خلاصه نتایج مربوط به این نمونه در

جدول ۸- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای نمونه ذکر شده

نمونه	d (mm)	b/h	Q_y (kN)	Q_{y1} (kN)	δ_y (mm)	$\left(\frac{Q_y - Q_{y1}}{Q_y}\right) \times 100$
۱	۸	۰/۵	۱۰/۱۲	۸/۸۵۲	۰/۴۵۲	٪۱۲/۵۲
۲	۱۹	۰/۵	۸/۷۶	۷/۰۲۶۹	۰/۴۶۲	٪۱۹/۷۸

نمودار هیستریزیس و خلاصه نتایج مربوط به این نمونه در شکل (۲۲) و جدول (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۲۲- منحنی هیستریزیس برای نمونه ذکر شده در جدول

(۹)

با توجه به نتایج ذکر شده در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع باریکه، مقدار نیروی تسلیم افزایش یافته که بیانگر رابطه معکوس بین مقدار نیروی تسلیم با ارتفاع باریکه می‌باشد که فرمول تئوری میراگرهای SSD نیز گویای همین مطلب است.

در نمونه ۲، با توجه به این که قطر شکاف بیش از دو برابر شده است، اما مقدار نیروی تسلیم ایجاد شده تفاوت کمی را با نمونه ۱ نشان می‌دهد. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت قطر شکاف، پارامتر تأثیرگذاری در مقدار نیروی تسلیم نمی‌باشد.

با افزایش قطر شکاف مقدار جابجایی تسلیم باریکه‌ها نیز افزایش یافته اما مقدار این افزایش بسیار ناچیز می‌باشد، بنابر این می‌توان نتیجه گرفت قطر شکاف تأثیر چندانی روی جابجایی تسلیم باریکه‌ها نخواهد داشت.

۴-۴- بررسی تأثیر پارامتر h (ارتفاع باریکه) بر روی

نیروی تسلیم

در این قسمت، به منظور بررسی تأثیر ارتفاع باریکه بر روی نیروی تسلیم، یک نمونه با قطر لوله میانی ۱۴۱/۳ میلی‌متر انتخاب شد که مشخصات آن در جدول (۹) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر ارتفاع باریکه (h)، متغیر در نظر گرفته شده است.

همچنین مشاهده شد با افزایش ارتفاع، میزان جابجایی تسلیم باریکه‌ها نیز افزایش یافته است.

۴-۵- بررسی تأثیر قطر لوله میانی بر نیروی تسلیم میراگر

برای بررسی تأثیر قطر لوله میانی میراگر بر روی نیروی تسلیم مطابق جدول (۱۱) دو نوع میراگر با قطرهای ۸۸/۹ و ۱۱۴/۳ میلی‌متر که دارای مشخصات مشابهی می‌باشند، انتخاب شد.

جدول ۹- میراگر مورد استفاده برای بررسی پارامتر h

میراگر مورد استفاده	t (mm)	h (mm)	d (mm)	b (mm)	n
میراگر با قطر لوله میانی ۱۴۱/۳ میلی-متر	۸/۴	۱۸، ۱۴ و ۲۰	۲۰	۱۲	۸

جدول ۱۰- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای نمونه ذکر شده

نمونه	h (mm)	b/h	Q_y (kN)	Q_{yt} (kN)	δ_y (mm)	$\left(\frac{Q_y - Q_{yt}}{Q_y}\right) \times 100$
۱	۱۴	۰/۸۵۷	۵۵/۳۱	۴۸/۵۳۷	۰/۴۳۱	٪۱۲/۲۴
۲	۱۸	۰/۶۷	۴۸/۲۷	۴۱/۴۷۸	۰/۴۴۴	٪۱۴/۰۷
۳	۲۰	۰/۶	۴۳/۳۲	۳۸/۵۹۶	۰/۴۴۷	٪۱۰/۹

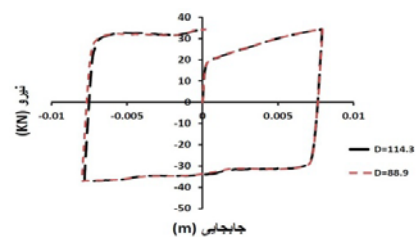
جدول ۱۱- میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر قطر

میراگر بر روی نیروی تسلیم

میراگرهای مورد استفاده	t (m)	h (mm)	d (mm)	b (mm)	n
میراگر با قطر لوله میانی ۱۱۴/۳ و ۸۸/۹ میلی‌متر	۲	۱۲	۱۶	۱۰	۸

نتایج حاصل از بررسی نشان دادند که میزان قطر لوله میانی میراگر تأثیری در مقدار نیروی تسلیم نداشته به این معنی که مقدار نیروی تسلیم، مستقل از اندازه قطر میانی میراگر می‌باشد. البته با افزایش قطر لوله میانی میراگر، میزان انحنای باریکه‌ها کمتر شده و این باعث به وجود آمدن اختلاف ناچیز بین مقدار نیروی تسلیم به دست آمده از روش مدل‌سازی و مقدار تئوری حاصل از فرمول معرفی شده برای میراگرهای SSD (فرمول (۱)) شده است. با توجه به مقایسات انجام شده که در انتهای جداول (۴)، (۶)، (۸)، (۱۰)، (۱۲) و (۱۴) به صورت درصد آورده شده است و بررسی کلیه پارامترها روی نیروی تسلیم، می‌توان چنین نتیجه گرفت که فرمول معرفی شده برای نیروی تسلیم در میراگرهای SSD (رابطه (۱))، در این نوع میراگر جدید نیز با تقریب قابل قبول، صادق می‌باشد.

نمودار هیستریزیس و خلاصه نتایج مربوط به این نمونه‌ها در شکل (۲۳) و جدول (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۲۳- منحنی هیستریزیس برای نمونه‌های جدول (۱۱)

جدول ۱۲- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای نمونه‌های ذکر شده

specimen	d (mm)	b/h	Q_y (kN)	Q_{yt} (kN)	δ_y (mm)	$\left(\frac{Q_y - Q_{yt}}{Q_y}\right) \times 100$
۱	۸۸/۹	۰/۸۳	۱۹/۰۸	۱۶/۸۴۹	۰/۴۴۳	٪۱۷/۸۱
۲	۱۱۴/۳	۰/۸۳	۱۸/۸	۱۶/۸۴۸	۰/۴۵	٪۱۰/۳۸

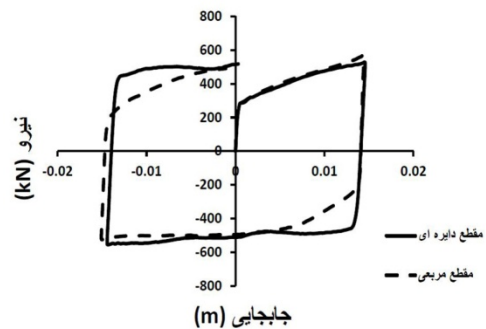
۴-۶- مقایسه رفتار میراگر اصلاح شده با میراگر TTD

در این قسمت رفتار میراگر فلزی اصلاح شده با میراگر TTD مورد مقایسه قرار گرفته شده است. بدین منظور رفتار میراگر TTD که در سال ۲۰۱۰ توسط Benavent [۱۰] ارائه شده بود با میراگر اصلاح شده با سطح مقطع معادل با TTD، مورد مقایسه قرار داده شد. شکاف‌های ایجاد شده در میراگر اصلاح شده دقیقاً همانند شکاف‌های موجود در میراگر TTD می‌باشد که مشخصات شکاف‌های مذکور در جدول (۱۳) آورده شده است.

جدول ۱۳- مشخصات میراگرهای مورد استفاده (mm)

نمونه	اندازه	h	d	b	t	n
میراگر با مقطع دایره‌ای	۲۰۳/۷	۲۰	۲۰	۱۵	۸	۲۰
میراگر با مقطع مربعی	۱۶۰×۱۶۰					

در شکل (۲۴) و جدول (۱۴) منحنی هیستریزس و خلاصه نتایج مربوط به دو نوع میراگر TTD و میراگر تسلیمی جدید آورده شده است.



شکل ۲۴- منحنی هیستریزس میراگر TTD و میراگر تسلیمی جدید

با توجه به نمودار هیستریزس دو میراگر مشاهده می‌شود که جابجایی تسلیم میراگر پیشنهادی فلزی با مقطع دایره‌ای بیشتر از میراگر TTD می‌باشد که به دلیل وجود انحنا در باریکه‌های میراگر پیشنهادی می‌باشد. نیروی تسلیم به وجود آمده در هر دو میراگر تقریباً نزدیک به هم بوده همچنین به خاطر داشتن مقطع دایره‌ای میراگر پیشنهادی، منحنی هیستریزس ایجاد شده تقریباً مستطیلی است.

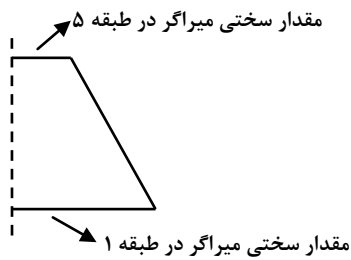
میراگرها دارای مشکلات عدیده‌ای هستند که عمده آن‌ها به مسائل ساخت بر می‌گردد. در این راستا، هرگونه تغییری که بتواند مشکلات ساخت را تسهیل کند مغتنم خواهد بود. میراگرهای متعددی، با اعمال تغییراتی هر چند اندک در سیستم‌های موجود، توانسته‌اند جایگاه عملی پیدا کنند. علی‌الرغم شباهت رفتاری میراگر جدید با میراگر TTD، میراگر جدید دارای پروسه ساخت راحت‌تری نسبت به TTD می‌باشد. یافتن دو قوطی مربعی استاندارد که کاملاً بتوانند درون همدیگر قرار بگیرند مشکل است در حالی که در مقاطع استوانه‌ای چنین نیست و با تراشکاری به راحتی برهم منطبق می‌شوند. میراگر پیشنهادی خیلی راحت‌تر از میراگر TTD توسط دستگاه CNC می‌توانند به تولید انبوه برسند. در میراگر پیشنهادی برای اتصال از جوش استفاده نشده است بنابر این ساخت و اجرای این نوع میراگر راحت‌تر و اقتصادی‌تر می‌باشد.

۵- کاربرد میراگر تسلیمی با مقطع استوانه‌ای در یک سازه فولادی ۵ طبقه

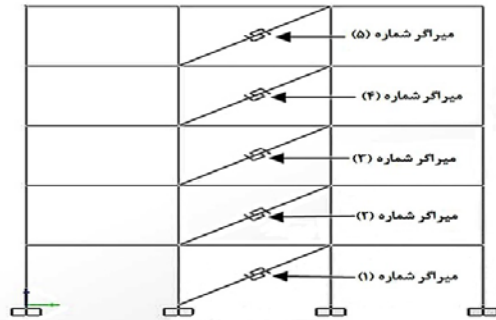
جهت تعیین تاثیرات میراگر شکافدار لوله‌ای جدید در پاسخ سازه‌ها، یک سازه ۵ طبقه با ضوابط آئین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی شد و تحت تحریک لرزه‌های مختلف قرار گرفت. جدول (۱۵) مشخصات زلزله‌های به کار گرفته شده برای تحلیل سازه مورد نظر را نشان می‌دهد.

جدول ۱۴- نیرو و جابجایی تسلیم به دست آمده برای میراگر TTD و میراگر تسلیمی جدید

نمونه	اندازه (mm)	b/h	$Q_y (kN)$	$Q_{y_i} (kN)$	$\delta_y (mm)$	$\left(\frac{Q_y - Q_{y_i}}{Q_y}\right) \times 100$
مقطع دایره‌ای	۲۰۳/۷	۰/۷۵	۲۸۶/۴	۲۵۱/۲۸	۰/۴۷۲	٪۱۲/۲۶
مقطع مربعی	۱۶۰×۱۶۰	۰/۷۵	۲۷۷	۲۵۱/۲۸	۰/۳۸۳	٪۹/۲۸



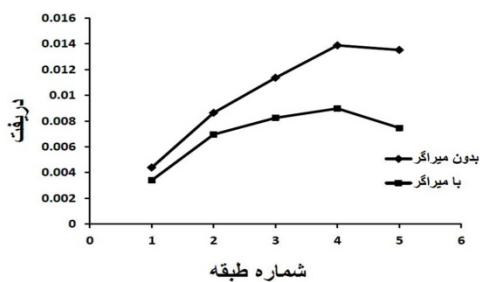
شکل ۲۶- نحوه توزیع سختی میراگر در طبقات



شکل ۲۷- تصویر یک قاب از سازه تحلیل شده

در جدول (۱۶) مشخصات میراگرهای استفاده شده در سازه ۵ طبقه آورده شده است.

لازم به ذکر است که در این بررسی، سازه تحت زلزله‌های شبیه‌سازی شده و مقیاس شده السنترو، کوبه و طیس با شتاب بیشینه $0.35g$ قرار گرفته که این مقیاس کردن بر طبق آئین- نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم انجام گرفته شده است. واضح است که افزودن میراگر به سیستم سازه‌ای تأثیرات بسیاری در پاسخ سازه دارد. در این مقاله هدف، بررسی تأثیر کلی دستگاه میراگر بر رفتار سازه فولادی می‌باشد. به همین منظور در شکل‌های (۲۸)، تا (۳۰) دریفت طبقات در حالت‌های با میراگر و بدون میراگر تحت سه زلزله کوبه، السنترو و طیس با شتاب ماکزیمم $0.35g$ مقایسه شده‌اند.

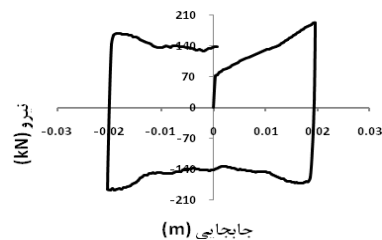


شکل ۲۸- مقایسه دریفت طبقات تحت زلزله کوبه

جدول ۱۵- مشخصات زلزله‌های اعمال شده به سازه‌ها

ردیف	زمین لرزه	بزرگی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	(۱۶-۰۹-۱۹۷۸) طیس	۷/۳۵	۳۳/۵۸۰۰	۵۶/۹۲۰۰
۲	(۱۹-۰۵-۱۹۴۰) السنترو	۶/۹۵	۳۲/۷۹۴۰	-۱۱۵/۵۴۹
۳	(۱۶-۰۱-۱۹۹۵) کوبه	۶/۹	۳۵/۴۸۵۰	۱۳۴/۲۴۰۰

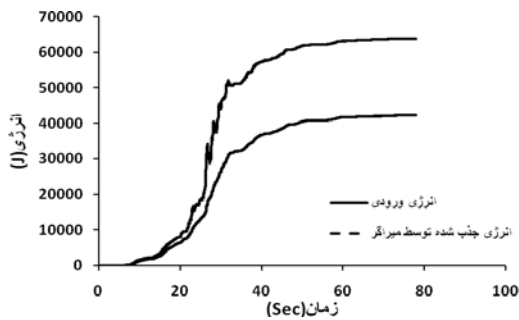
روش کار به این ترتیب می‌باشد که ساختمان مذکور با در نظرگیری آیین‌نامه‌های طراحی، اثرات بارهای ثقلی و $p-\Delta$ در دو حالت قاب خمشی بدون میراگر و قاب مهاربندی شده با میراگر تسلیمی با مقطع استوانه‌ای که در موقعیت بادبندی قطری سازه قرار گرفته، در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی نتایج ساختمان بدون میراگر، بدون این که تغییری در مقاطع طراحی شده ساختمان ایجاد شود، در هر طبقه از ساختمان، میراگر مورد نظر، با استفاده از المان Link در نرم‌افزار SAP2000 در مدل سازه نصب شده و سختی این المان‌ها در جهت U_1 اعمال شد [۱۲]. برای تعریف مشخصات رفتاری میراگر از نمودارهای هیستریزیس (نیرو-جابجایی) حاصل از تحلیل‌های انجام گرفته با نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. یک نمونه از منحنی هیستریزیس به کار رفته در شکل (۲۵) نشان داده شده است. البته باید توجه داشت که سختی و نیروی تسلیم این میراگرها بایستی در ارتفاع کاهش یابد تا از ایجاد طبقات نرم در سازه جلوگیری گردد. در این تحقیق، این توزیع به صورت دوزنقه‌ای مطابق شکل (۲۶) به سمت بالا کاهش یافته و مقدار بهینه این کاهش با در نظرگیری ایجاد کمترین برش پایه و کمترین مقدار جابجایی نسبی طبقات و با استفاده از روش آزمون و خطا به دست آمده است. در شکل (۲۷) نمایی از یک قاب از این سازه مجهز به میراگر نشان داده شده است.



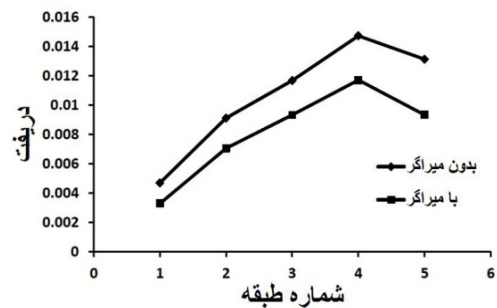
شکل ۲۵- نمودار هیستریزیس مربوط به میراگر شماره ۲

جدول ۱۶- تیپ‌بندی میراگرهای طبقات سازه ۵ طبقه

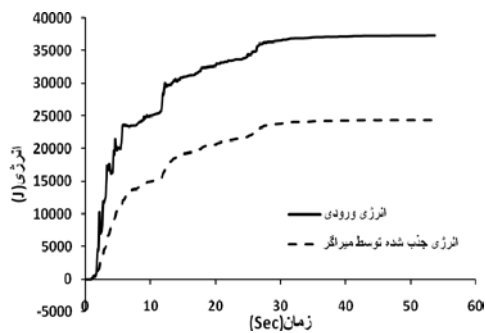
تیپ	طبقه	مقدار نیروی تسلیم (kN)	t (mm)	b (mm)	h (mm)	n
۱	۱	۸۰	۴/۸	۱۲	۱۴	۱۲
۲	۲	۷۰	۴/۸	۱۲	۱۸	۱۲
۳	۳	۶۰	۴/۸	۱۲	۲۰	۱۲
۴	۴	۵۰	۴/۸	۱۰	۱۲	۱۲
۵	۵	۴۰	۴/۸	۹	۱۸	۱۲



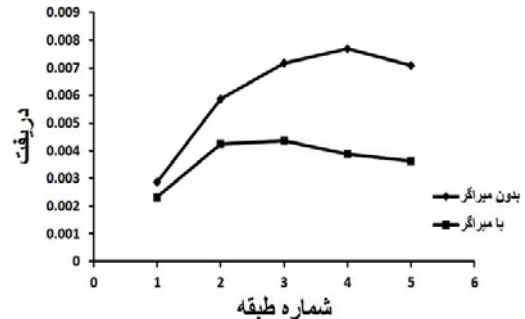
شکل ۳۱- منحنی انرژی ورودی به سازه و انرژی جذب شده توسط میراگر تحت زلزله کوبه



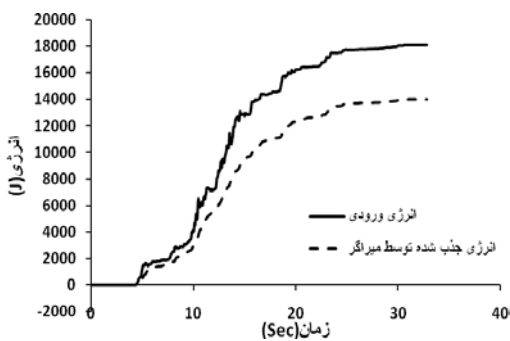
شکل ۲۹- مقایسه دررفت طبقات تحت زلزله السنترو



شکل ۳۲- منحنی انرژی ورودی به سازه و انرژی جذب شده توسط میراگر تحت زلزله السنترو



شکل ۳۰- مقایسه دررفت طبقات تحت زلزله طیس



شکل ۳۳- منحنی انرژی ورودی به سازه و انرژی جذب شده توسط میراگر تحت زلزله طیس

با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با نصب میراگر در سازه‌ها، دررفت طبقات حدود ۲۰ تا ۳۷ درصد در طبقات مختلف کاهش یافته که نشانگر عملکرد مناسب میراگر معرفی شده در این مقاله می‌باشد.

در شکل‌های (۳۱) تا (۳۳) میزان انرژی ورودی و انرژی مستهلک شده توسط میراگر پیشنهادی در سازه پنج طبقه تحت بارگذاری تاریخیچه زمانی سه زلزله مورد نظر نشان داده شده است.

جدول ۱۷- مقایسه حداکثر برش پایه سازه با و بدون میراگر (kgf)

برش پایه		طبس		کوبه		السنتر	
		x	y	x	y	x	y
ساختمان پنج طبقه	بدون میراگر	۱۱۱۶۶۹/۷۳	۱۱۱۳۴۳/۵۹	۱۵۸۷۸۵/۱۷	۱۴۰۰۲۳/۳۱	۱۵۶۷۰۰/۵۳	۱۷۱۷۸۶/۶۸
	با میراگر	۹۷۱۰۲/۸۷	۹۹۹۴۸/۶	۱۲۰۲۴۳/۵۶	۱۳۰۸۰۴/۵۸	۱۳۲۹۳۴/۰۳	۱۴۲۷۲۲/۶۴

- با افزایش قطر شکاف، مقدار جابجایی تسلیم باریکه‌ها نیز افزایش یافته اما مقدار این افزایش بسیار ناچیز بوده و می‌توان نتیجه گرفت قطر شکاف تأثیر چندانی روی جابجایی تسلیم باریکه‌ها ندارد.

- با کاهش ارتفاع باریکه، مقدار نیروی تسلیم افزایش می‌یابد که بیانگر رابطه معکوس بین مقدار نیروی تسلیم با ارتفاع باریکه می‌باشد.

- با بررسی کلیه پارامترها میراگر، می‌توان چنین نتیجه گرفت که رابطه (۱)، معرفی شده برای نیروی تسلیم میراگرهای SSD، در این نوع میراگر جدید نیز با تقریب قابل قبول صادق می‌باشد.

- با تحلیل یک سازه پنج طبقه فولادی و تجهیز آن به میراگر جدید مشاهده شد که دریفت طبقات به طور متوسط حدود ۲۰ تا ۳۷ درصد در طبقات مختلف کاهش پیدا کرده است.

- مشاهده شد که با تجهیز سازه پنج طبقه به میراگر جدید، کاهش در حدود ۱۴ درصد در برش پایه ایجاد شده است.

- منحنی‌های انرژی مربوط به هر کدام از سه زلزله در نظر گرفته شده نشان می‌دهند که با به کارگیری این میراگر در سازه، بیشتر انرژی ورودی به سازه توسط میراگر مذکور جذب شده است.

۷- مراجع

- [1] FEMA273, NEHRP, "Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings", Prepared by the Building Seismic Safety Council for Federal Emergency Management Agency, Washington DC, US, 1997.
- [2] Sarnoand, I. D., Elnashai, A. S., "Seismic Retrofitting of Steel and Composite Building Structures", University of Illinois, US, 2002.
- [3] Oh, S. H., Kim Y. J., Ryu, H. S., "Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers", Engineering Structures, 2009, 31, 1997-2008.

همان طور که مشاهده می‌شود بیشتر انرژی ورودی توسط میراگر مذکور جذب شده است.

همچنین به بررسی میزان برش پایه سازه مذکور تحت سه زلزله معرفی شده در جدول (۱۵) پرداخته شد که نتایج حاصله در جدول (۱۷) ذکر شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱۷) مشاهده می‌شود که میراگر موجب کاهش حدود ۱۴ درصدی برش پایه در سازه پنج طبقه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

- میراگر شکافدار اصلاح شده دارای رفتاری شبیه TTD می‌باشد و از رابطه (۱) (رابطه مربوط به SSD) پیروی می‌کند؛ ولی پروسه ساخت آن ساده‌تر بوده و قابلیت تولید از پروفیل‌های استاندارد را دارد. بنابر این از نظر هزینه ساخت و اجرا مقرون به صرفه‌تر از TTD می‌باشد. همچنین در این میراگر، امکان بازرسی بدون تخریب وجود دارد.

- نیروی تسلیم میراگر و میزان سختی آن وابسته به مشخصات نوارهای مابین شکاف‌ها می‌باشد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که مقدار نیروی تسلیم وابسته به عرض و ضخامت باریکه بوده و سختی سیستم به طول باریکه وابسته می‌باشد.

- با افزایش مقدار b ، نتایج مدل‌سازی و نتایج به دست آمده از روش تحلیلی مطابقت خوبی با هم نشان دادند. یعنی در نمونه‌هایی که کمترین لاغری را دارند تأثیر انحنای کمتر بوده است.

- برای افزایش نیروی تسلیم میراگر پیشنهاد می‌گردد که ابتدا ضخامت لوله میانی افزایش یابد که در این حالت جابجایی تسلیم ثابت خواهد ماند. برای تنظیم جابجایی تسلیم میراگر، می‌توان قطر لوله میانی را تغییر داد.

- مقدار نیروی تسلیم با مقدار t (ضخامت باریکه) رابطه مستقیم دارد و افزایش بیش از حد آن، احتمال جاری نشدن میراگر را فراهم می‌کند.

-
- [8] Morino, S., Kawaguchi, J., Shimokawa, H., "Hysteretic Behavior of Flat-Bar Braces", International Conference on Advances in Steel Structures, Hong Kong, 1996, pp 1127-1132.
- [9] Iwata, M., Kato, T., Wada, A., "Buckling-Restrained Braces as Hysteric Dampers", The Behavior of Steel Structures in Seismic Areas STESSA, Montreal, Canada, 2000, pp 33-38.
- [10] Benavent, A., "A Brace-Type Seismic Damper Based on Yielding the Walls of Hollow Structural Sections", Engineering Structure, 2010, 32, 1113-1122.
- [11] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., "ABAQUS/Standard User's Manual". Pawtucket (RI), US, 2002.
- [12] Computers and Structures, Inc., "SAP2000 User's Manual", Berkeley (CA), US, 2003.
- [4] Lee, M. H., Oh, S. H., Huh, C., Oh, Y. S., Yoon, M. H., Moon, T. S., "Ultimate Energy Absorption Capacity of Steel Plate Slit Dampers Subjected to Shear Force", Steel Structures, 2002, 2, 71-79.
- [5] Ricky, W. K., Chan, F. A., "Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation", Engineering Structures, 2008, 30, 1058-1066.
- [6] Takeuchi, T., Hajjar, F. J., Matsui, R., Nishimoto, K., Aiken, D. I., "Effect of Local Buckling Core Plate Restraint in Buckling Restrained Braces", Engineering Structures, 2012, 44, 304-311.
- [7] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., Devall, R., "Seismic Testing and Performance of Buckling-Restrained Bracing Systems", Canadian Journal Civil Engineering, 2006, 33 (2), 183-198.

EXTENDED ABSTRACT

Application of a New Cylindrical Slit Damper for Mitigation of Structural Vibrations

Habib Saeed Monir *, Neda Fazalipoor

Faculty of Civil Engineering, University of Urmia, Urmia 1531157561, Iran

Received: 19 April 2015; **Accepted:** 28 October 2015

Keywords:

Passive control, Energy dissipation, Steel damper, Seismic retrofitting

1. Introduction

This study introduces a new kind of steel slit damper which can be installed diagonally in steel frames as a brace-type vibration damper. This new damper consists of three standard cylindrical tubes which have been placed inside of each other. On the middle tube wall, several long slotted holes are created in a manner that under seismic excitation, axial forces are created in the braces and then by its transmission to the tubes, narrow strips between these long slotted holes are yielded and therefore energy is dissipated through shear/flexural yielding. The inner and the external tubes will prevent the out of plane deformation of the middle tube. For fixing these tubes to each other and limiting the forward and backward movement of the middle tube, two long slotted holes have been created on the tubes walls. In comparison to the other available brace-type dampers, such as buckling restrained brace, this damper is simpler and costs less. The yielding part of this modified damper can be easily inspected after an earthquake. This damper was analyzed in ABAQUS and its hysteresis curve and the effects of its mechanical characteristics such as strip length, strip depth, strip thickness were obtained. For checking the effectiveness of device in mitigation of structural responses, the model of a 5-story frame, which was already designed under Iranian 2800 seismic code, was created in SAP2000. Then this structure, with and without damper was analyzed under different ground motions such as Tabas, Kobe and Elcentro. The results were indicating that the lateral displacements and the base shears of the multi-story building have been significantly reduced

2. Methodology

2.1. Finite element modeling of TTD damper

ABAQUS program was used for finite element analyses of TTD damper. In this program, C3D8R type of solid element which is suitable for explicit analyses, was used for the modeling of steel tubes. In order to model the plastic properties of steel material in ABAQUS, real stress-strain properties were used instead of engineering stress and strain. Tie option was used for the modeling of welds [1]. In Fig. 1, a specimen modeled in ABAQUS program has been shown. The results of these analyses have been compared with the experimental results of the damper which was provided by Benavent [2]. By this comparison, the validity of the generated TTD models in ABAQUS software was proved.

2.2. FE modeling of the proposed damper

In the current research work, a slotted steel damper which uses tubes with circular cross sections instead of square profiles has been introduced. The same as TTD, it is used in the form of ordinary diagonal bracings. Fig. 2 shows this damper in detail. This damper consists of three standard cylindrical tubes which have been placed inside of each other. On the wall of middle tube, several long slotted holes are created in a manner that under seismic excitation, axial forces are created in the braces and then by its transmission to the tubes, narrow strips between these long slotted holes are yielded and therefore energy is dissipated through shear/flexural yielding. The inner and the outer tubes will prevent the out-of-plane deformation of the middle tube. For fixing these tubes to each other and

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.saeedmonir@urmia.ac.ir (Habib Saeed Monir), n_fazlalipoor@yahoo.com (Neda Fazalipoor).

limiting the forward and backward movement of the middle tube, two long slotted holes have been created on the tubes walls. Because TTD, a damper quite similar to this new one, has been already modeled by ABAQUS and its validity has been successfully proved, therefore, this modified damper was also analyzed by ABAQUS. During this analysis, the hysteresis curve of the device and the effects of its mechanical characteristics such as strip length, strip depth, and strip thickness were investigated.

2.3. FE modeling of 5-story steel structure

For checking the effectiveness of the device in mitigation of the responses of multistory structures, the model of a 5 story frame, which was already designed according to the Iranian 2800 seismic code, was created in SAP2000. Link element in the SAP2000 program was used for locating the damper in the braces of 5-story structure. The stiffness of these elements was applied in U_1 direction [3]. Nonlinear time history was conducted on this structure. Then this structure, with and without damper was analyzed under different ground motions such as Tabas, Kobe and Elcentro records. Relative displacement of stories and story shears by members and dampers were obtained.

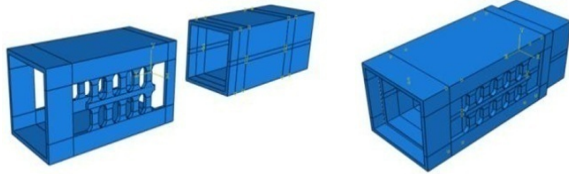


Fig. 1. The details of the TTD damper

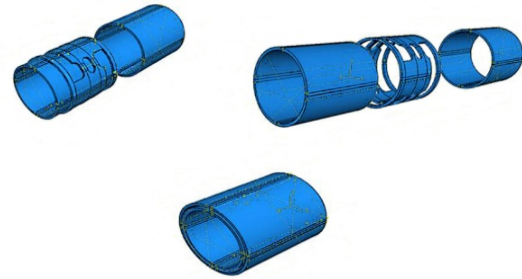


Fig. 2. The details of the modified damper with circular sections

3. Results and discussion

3.1. Results of FE modeling of the proposed damper

The effects of parameters such as b , t , d and h on this proposed damper were studied. The results showed that the equations of SSD damper (Eq. (1)) can be used in this proposed system as well.

$$Q_y = \min \left\{ n \frac{f_y t b^2}{2h'}, n \frac{2f_y t b}{3\sqrt{3}} \right\}, Q_B = \min \left\{ n \frac{f_B t b^2}{2h'}, n \frac{2f_B t b}{3\sqrt{3}} \right\}$$

$$\delta_y = \frac{Q_y h'^3}{n E t b^2} \left(1 + 3 \ln \frac{h + 2r}{h'} \right) + \frac{3 Q_y h'}{2 n E t b G} \left(1 + \ln \frac{h + 2r}{h'} \right) \quad (1)$$

$$h' = h + \left[2r^2 / (h + 2r) \right]$$

Q_y , Q_B and δ_y are the axial yielding load, maximum load and the yielding displacement of the strips, respectively. b and t are the strip width and thickness, respectively; r is the radius of the end part of the strips. and n is the total number of strips in the damper [2, 4].

3.2. The effects of the proposed damper in mitigation of the responses of structures

The results indicated that by installation of the modified damper in a 5-story building, drifts and base shear were decreased significantly in all excitations. The displacements were decreased around 20-37 percent and the base shear was decreased approximately 14 percent.

4. Conclusions

According to the results of performed analyses on the modified damper, it was shown that the modified damper had noticeable effect on the mitigation of seismic responses of steel structures. The base shear decreases about 14

percent and structural displacements decrease approximately about 20-37 percent. The proposed damper is made of the available materials and sections and does not need advanced technology for its productions. Inspection and repairing of this new damper are performed easier than the other similar systems.

5. References

- [1] Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., “ABAQUS/Standard User’s Manual”, Pawtucket (RI), 2002.
- [2] Benavent, A., “A Brace-type Seismic Damper Based on Yielding the Walls of Hollow Structural Sections”, *Engineering Structure*, 2010, 32, 1113-1122.
- [3] Computers and Structures, “SAP2000 User Manual”, Berkeley (CA): Computers and Structures Inc., 2003.
- [4] Sang-Hoon O., Young-Ju K., Hong-Sik R., “Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers”, *Engineering Structures*, 2009, 31, 1997-2008.