

ارایه میراگرهای جدید شکافدار فولادی با شکاف بیضی شکل در اتصال بادبندی و مقایسه آن‌ها با میراگرهای شکافدار فولادی با عرض شکاف یکنواخت به صورت آزمایشگاهی و عددی

کیانوش نیک هوش^۱، محمدعلی کافی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*mkafi@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۱۲

چکیده

سیستم‌های کنترلی از جمله سیستم‌های مدرن طراحی سازه‌ها هستند که امروزه کاربرد زیادی در صنعت ساختمان پیدا کرده‌اند. یکی از این سیستم‌های کنترل، استفاده از میراگر است. میراگر فلزی تسلیمی بیشتر از فلز یا آلیاژهای خاص ساخته می‌شود که به راحتی تسلیم شده و عملکرد قابل قبولی را برای استهلاک انرژی در هنگام اعمال بارهای شدید لرزه‌ای داشته باشد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی میراگرهای فولادی شکافدار پرداخته شده است به این صورت که یک میراگر بدون شکاف به عنوان مبنای مطالعه، ۴ میراگر دارای شکاف با عرض یکنواخت و نوارهای با مقطع یکنواخت و ۳ میراگر با شکاف بیضی و نوارهای با مقطع متغیر، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و نتایج حاصل از آنها ارایه و با یکدیگر مقایسه شد. همچنین میراگرها با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس مدل سازی شدند و نتایج حاصل از آنها هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که میراگرهای با شکاف بیضی عملکرد بهتری از نظر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی و به ترتیب با میانگین افزایش ۷۳/۷۶، ۱۵/۹۱ و ۱۲۹/۴۹ درصدی نسبت به میراگرهای با شکاف ثابت از خود نشان دادند. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی و عددی، طول بیشتری از نوارهای میراگر با شکاف بیضی شکل نسبت به میراگرهای با عرض یکنواخت در اتلاف انرژی و تحمل نیرو و تنش شرکت داشتند.

واژگان کلیدی: میراگر تسلیمی شکافدار، بارگذاری چرخه‌ای، شکاف بیضی شکل، قاب مهاربندی، اجزای محدود.

۱- مقدمه

بعد از زلزله‌هایی مانند کوبه و نرثریج پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور استفاده مصالح و سیستم‌های مختلف به منظور مقابله با آثار زلزله و بهبود رفتار سازه‌های فولادی انجام گرفته است. یکی از این سیستم‌ها که استفاده از آنها گسترش فراوانی پیدا کرده است، سیستم‌های کنترل لرزه‌ای است. سیستم‌های کنترل سازه شامل کنترل غیر فعال سازه، کنترل فعال سازه، کنترل نیمه فعال سازه و کنترل ترکیبی سازه است. هدف اصلی به کار گیری سیستم‌های کنترل لرزه‌ای علاوه بر حفظ ایمنی سازه‌ای و اجزای غیر سازه‌ای، افزایش سطح عملکرد بر اساس کاهش نیروی جانبی وارد بر طبقات، کاهش شتاب وارد بر طبقات و کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات است. سیستم کنترل غیر فعال سیستم‌هایی هستند که نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند. این ابزار از نیروهایی که در پاسخ به حرکت سازه در داخل آنها ایجاد می‌شود بهره می‌گیرند. سیستم جداسازی پایه، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای فلزی تسلیم شونده، میراگرهای ویسکو الاستیک، میراگرهای سیال لزج، میراگر جرمی تنظیم شده و میراگرهای مایعی تنظیم شده از انواع این سیستم‌ها هستند. در میراگرهای فلزی تسلیم شونده انرژی منتقل شده به سازه صرف تسلیم و رفتار غیر خطی در قطعات به کار رفته در میراگر می‌شود و از تغییر شکل غیرالاستیک فلزات شکل پذیری مانند فولاد و سرب برای اتلاف انرژی استفاده می‌شود.

میراگرهای تسلیمی فولادی شکافدار برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار توسط چان و همکاران معرفی شد که در مطالعه آنها اثر شکاف‌های ایجاد شده در سه آرایش مختلف مورد بررسی قرار گرفت [1]. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۵ اثر شکاف با ارتفاع‌های متغیر بررسی، و نشان داده شد که اگر پره‌های میانی لاغرتر و پره‌های کناری ضخیم‌تر باشند انرژی تلف شده در بارگذاری چرخه‌ای مقداری افزایش می‌یابد [2]. در مطالعه دیگری که در همین سال توسط ترانا و همکاران روی این

میراگرها انجام شد، نشان داده شد که در صورتی که لبه شکاف‌های ایجاد شده به صورت محدب باشد در بارگذاری چرخه‌ای رفتار باثبات‌تری را نشان می‌دهد [3]. در سال ۲۰۱۲. چیوفنگ و همکاران عملکرد دمپره‌های پنل برشی فولادی با فولاد دارای مقاومت جاری شوندگی پایین را تحت بارگذاری سایکلیک به صورت استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند [4]. کیخسروی و آقایی در سال ۲۰۱۶، به ارزیابی ضریب اصلاح پاسخ در قاب‌های بتن آرمه و قاب های بتن آرمه مقاوم سازی شده با مهاربندهای شورون دارای میراگر فولادی شکافدار پرداختند [6]. در سال ۲۰۱۷، لیم و کیم میراگرهای فولادی شکافدار را در اتصال تیر به تیر در قاب پیش ساخته بتنی به کاربردند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از این میراگرها باعث افزایش جذب انرژی و بهبود عملکرد سازه‌ای می‌شود [7]. لی و کیم در سال ۲۰۱۷، رفتار یک میراگر جعبه‌ای که از ۴ صفحه فولادی شکافدار تشکیل شده بود را تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند [8]. چایوفنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی امکان پیش‌بینی عملکرد دمپره‌های پنل برشی به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود پرداختند و استفاده تنها از این نرم‌افزار را در بررسی عملکرد این نوع از دمپرها مفید دانستند [10]. مرتضی قلی و زهرایی در سال ۲۰۱۸ با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود، یک رابطه برای طراحی میراگرهای بیضی شکل ارایه دادند [11]. اکبری لر و همکاران در سال ۲۰۱۸ از دو میراگر I- شکل برای اتصال تیر به ستون فولادی استفاده کردند و عملکرد این نوع از اتصال را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که این نوع از اتصالات ظرفیت چرخشی بالاتری را دارند همچنین می‌توانند ممان بیشتری را در مقایسه با اتصالات معمولی تحمل کنند و رفتار چرخه‌ای مناسبی را از خود نشان دهند [12]. در سال ۲۰۱۹، نعیم و کیم یک میراگر جدید چند شکافه را برای محافظت لرزه‌ای قاب‌های سازه‌ای ارایه کردند. آنها این میراگرها را به صورت آزمایشگاهی بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که این میراگرها در مقایسه با میراگرهای

۳- مطالعه آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات نمونه ها

در این مطالعه تعداد ۸ میراگر فولادی ساخته شدند و درون قاب مهاربندی قرار گرفتند و تحت بارگذاری چرخه قرار گرفتند. به منظور سهولت در ساخت و انتخاب ابعاد دلخواه، همه میراگرها از تیر ورق ساخته شده‌اند. یکی از میراگرها بدون شکاف (با ورق جان توپر) بوده و به عنوان نمونه مرجع مدنظر قرار گرفته شده است. ۴ نمونه دارای شکاف‌های با عرض یکنواخت (به صورت نواری و با مقطع یکنواخت) ولی با ارتفاع‌های مختلف بوده و ۳ نمونه نیز دارای شکاف‌های بیضی شکل با ابعاد هندسی مختلف هستند. به منظور بررسی طول بیشتر میراگر در عملکرد چرخه ای آنها، در گروه اول یک نمونه با طول بیشتر نیز در نظر گرفته شد (نمونه DSSH4). میراگرهای معرفی شده و پارامترهای هندسی آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد هندسی میراگرها و همچنین شیارها برای همه نمونه‌ها در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است.

شکافدار معمولی، در کاهش پاسخ لرزه‌ای، موثرتر عمل می‌کنند [13]. قو و همکاران در همین سال، به بررسی نوع جدیدی از دمپ‌های لرزه‌ای که دارای صفحات فلزی قابل تعویض U شکل بودند، پرداختند. [14]. در سال ۲۰۱۷، گریوانی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر فلزی جاری شونده جدیدی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که این میراگرها توانایی استهلاک انرژی بالایی را دارند [15]. در سال ۲۰۱۵، کرمی محمدی و همکاران با استفاده از نرم افزار اجزای محدود به مطالعه رفتار میراگر TADAS در تغییر مکان‌های بزرگ پرداختند و نتیجه گرفتند که سختی میراگر در تغییر مکان‌های بزرگ به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد [16].

در این مطالعه تعداد ۸ میراگر شکافدار با مقطع و ضخامت ثابت در دو گروه میراگرهای شکافدار با شکاف دارای عرض یکنواخت و ارتفاع مختلف و میراگرهای شکافدار با شکاف بیضی و ارتفاع مختلف ساخته شده و به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته‌اند و تاثیر متغیرهایی مانند شکل هندسی و ابعاد شیارها روی رفتار چرخه‌ای اینگونه از میراگرها مثل: ظرفیت برشی، انرژی جذب شده، میرایی و شکل پذیری بررسی شده است. همچنین به منظور درستی‌آزمایی نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی، یک مطالعه عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود (ABAQUS) انجام گرفت. ویژگی برجسته این مطالعه، بررسی آزمایشگاهی میراگرهای فولادی با شکاف بیضی با ابعاد مختلف در قاب مهاربندی است که تاکنون توسط پژوهشگران پیشین انجام نشده است. از مشخصات بارز این پژوهش نصب و آزمایش میراگرها در داخل قاب مهاربندی شده به منظور شبیه‌سازی رفتار میراگرها در شرایط واقعی و مشاهده تاثیر رفتار قاب روی آنها است، همچنین در این پژوهش به منظور بسط دامنه انتخاب نسبت‌های ابعاد هندسی متنوع از مقاطع تیر-ورق استفاده شده که این مهم می‌تواند در ایجاد طیف و دامنه متنوعی از ابعاد هندسی مختلف میراگر در زمان طراحی آنها و از سوی طراح سازه موثر باشد.

گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات مصالح فولاد استفاده شده

Specimen	Maximum strain	Ultimate strength N/mm^2	Yield strength N/mm^2
St 37	0.4	434	250

Table 3. Mechanical Properties of steel

۳-۳- سامانه آزمایشگاهی، تجهیزات و پروتکل بارگذاری

به منظور فراهم کردن شرایط واقعی، بررسی رفتار میراگر داخل قاب و در نظر گرفتن عواملی مانند کماتش مهاربند قبل از تسلیم میراگر، مطابق شکل (۲ و ۳)، میراگرها برای آزمایش درون یک قاب فولادی مهاربندی شده با مهاربندهای شورون قرار گرفتند. بعد از محاسبه ظرفیت برشی میراگر مرجع با استفاده از روابط ارایه شده در بخش قبل، مهاربندهای داخل قاب به گونه‌ای طراحی شدند که ظرفیت الاستیک و ظرفیت کماتشی آنها به میزان قابل توجهی از ظرفیت پلاستیک نمونه مرجع بیشتر باشد، تا عملکرد فیوز کنترل و تمرکز سازوکار تخریب در میراگر تضمین شود.

برای اعمال بارگذاری، نمونه‌ها در پایین به صفحه اتصال دو مهاربند و در بالا نیز به یک تیر صلب متصل شدند. بار جانبی توسط یک جک هیدرولیکی که قابلیت اعمال ۱۰۰ تن در کشش و ۲۰۰ تندر فشار را داشت به تیر صلب اعمال شد. برای اندازه‌گیری میزان بار اعمال شده به نمونه از یک Load Cell که قابلیت اندازه‌گیری ۱۰۰ تن در کشش و فشار را دارد، استفاده شد. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیر صلب و اعمال برش یکنواخت به نمونه (عدم چرخش تیر صلب به منظور شبیه سازی سقف صلب)، تیر صلب در بالای به سیستم LM-guide (Linear Motion Guide) متصل گردید. LM-guide شامل بلوک سخت با یک صفحه متحرک است که روی دو ریل متصل شده و می‌تواند

شکل ۱. هندسه و پارامترهای تعیین کننده مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی (کلیه اندازه‌ها به میلی‌متر)

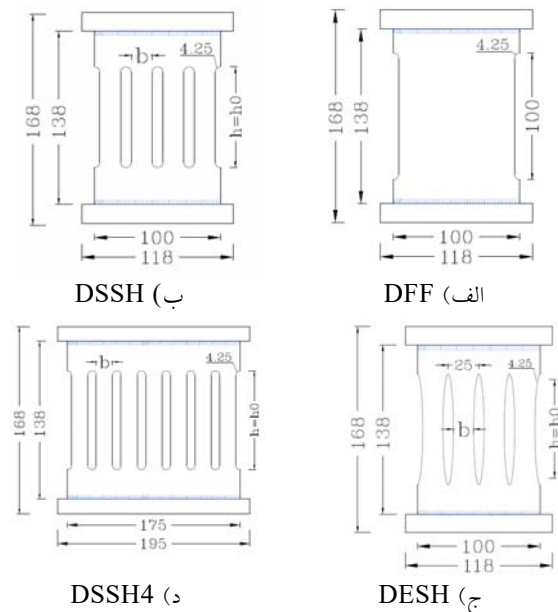


Fig. 1. The geometry and parameters determining the specifications of the specimens (all sizes are in mm)

جدول ۱. مشخصات هندسی میراگرهای شکافدار با عرض ثابت (گروه اول)

t (mm)	b (mm)	L (mm)	$h_0=h$ (mm)	h/b	Specimen
8	16.5	100	80	4.85	DSSH1
8	16.5	100	90	5.45	DSSH2
8	16.5	100	100	6.06	DSSH3
8	16.5	175	100	6.06	DSSH4

Table 1. The geometrical specifications of slit dampers with constant width of blades (First group)

جدول ۲. مشخصات هندسی میراگرهای شکافدار با شکاف بیضی شکل (گروه دوم)

t (mm)	b (mm)	L (mm)	$h_0=h$ (mm)	h/b	Specimen
8	16.5	100	80	4.85	DESH1
8	16.5	100	90	5.45	DESH2
8	16.5	100	100	6.06	DESH3

Table 2. The geometrical specifications of elliptical slit dampers (Second group)

۳-۲- مشخصات مصالح

به منظور حصول مشخصات مکانیکی فولاد استفاده شده در ساخت میراگرها در این مطالعه، آزمایش کشش استاندارد بر روی یک نمونه منشوری با مقطع مستطیل به ابعاد ۲/۷ در ۶ میلی‌متر، طبق استاندارد DIN 17100 [17] انجام

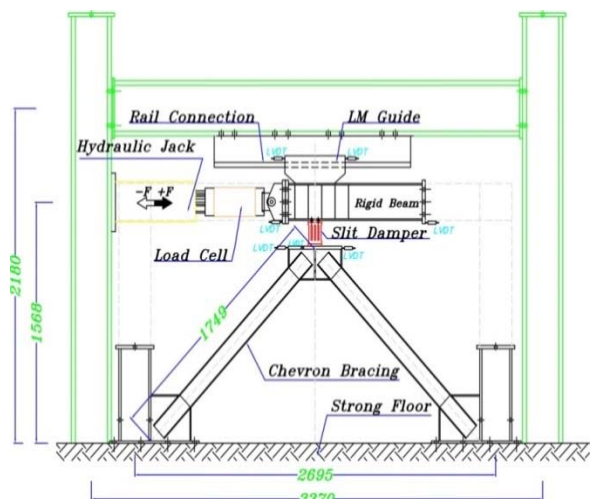


Fig. 2. Schematic of test setup

شکل ۳. سامانه استفاده شده برای آزمایش نمونه‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی



Fig. 3. Test layout system and the installations

شکل ۴. نمای نزدیک از LM-Guide



Fig. 4. Close view of LM-Guide

حرکت مستقیم خطی را در محدوده مورد نظر انجام دهد. همچنین حرکت و درجه آزادی انتقالی یا چرخشی را در سایر جهات محدود و مقید می‌نماید. که به این ترتیب مدل‌سازی صلیبیت سقف به صورت مطلوبی در سامانه آزمایشگاهی لحاظ شده است همچنین با توجه به این که اتصال تیر و ستون در قاب به صورت مفصلی است، با شبیه‌سازی معادل رفتار قاب، اتصال تیر به ستون حذف شده است.

برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی صفحه متحرک LM-Guide، تیر صلب و صفحه متصل‌کننده دو مهاربند جمعا از ۶ عدد LVDT استفاده شد. همچنین به منظور کنترل حرکت خارج از صفحه قاب، از یک LVDT در جهت عمود بر صفحه حرکت صفحه متصل‌کننده مهاربندها و میراگر و قاب استفاده شد. سامانه آزمایشگاهی و تجهیزات بارگذاری و اندازه‌گیری به صورت شماتیک و واقعی به ترتیب در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل (۴) نمای بسته‌ای از سیستم LM-Guide مشاهده می‌شود. نوع بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها به صورت استاتیکی چرخه‌ای و از نوع جابه‌جایی کنترل بوده و طبق پروتکل نشان داده شده در شکل (۵) است. برای انتخاب این پروتکل برای بارگذاری از راهنمای ATC-24 [18] استفاده شده است. اعمال بار به این صورت است که جابه‌جایی‌های مشخص با سه بار تکرار به صورت رفت و برگشت به نمونه اعمال شده و رفتار نمونه تحت این جابه‌جایی‌ها ثبت می‌شود.

شکل ۲. شماتیک از سامانه آزمایشگاهی

شکل ۵ پروتکل بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها

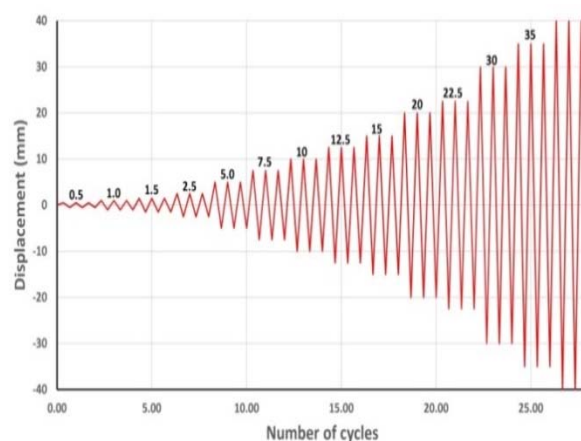


Fig. 5. The loading protocol

۴- نتایج آزمایشگاهی

بعد از انجام آزمایش‌ها روی نمونه‌ها و به دست آوردن منحنی‌های چرخه‌ای حاصل از آزمایش نمونه‌ها، پارامترهای مختلف مانند ظرفیت برشی، جذب انرژی، شکل پذیری، میرایی و شاخص آسیب محاسبه شده و همچنین تجزیه و تحلیل این نتایج به صورت مقایسه‌ای در این بخش ارائه می‌شوند. منحنی‌های چرخه‌ای همه نمونه‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

شکل ۶. نمودارهای چرخه‌ای حاصل از آزمایش نمونه‌ها

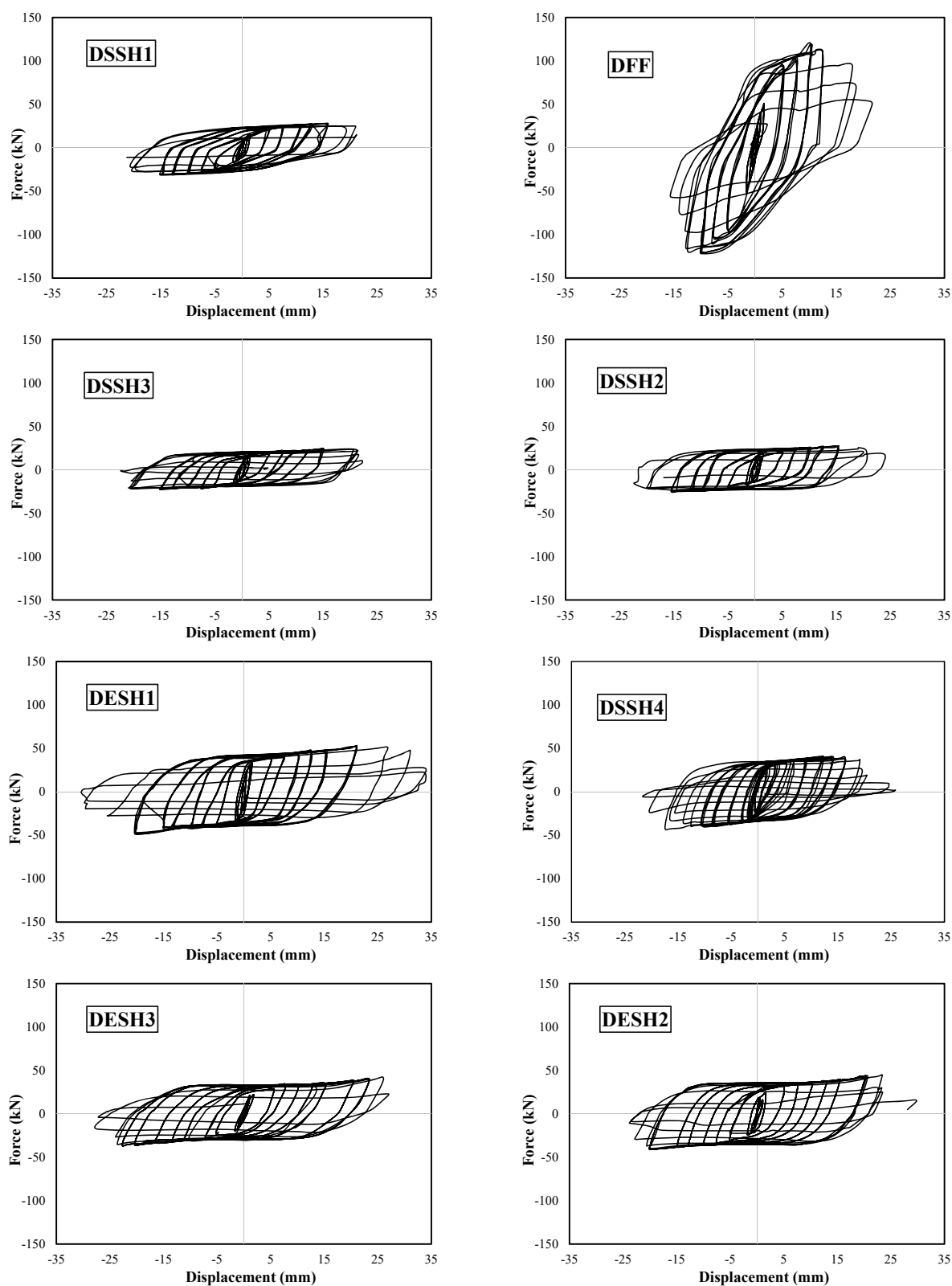


Fig. 6. The cyclic force-displacement behavior of the specimens

۱-۴- ظرفیت برشی و نوع شکست

منظور از ظرفیت برشی حداکثر نیرویی است که آن نمونه از شروع بارگذاری تا لحظه شکست تحمل می‌کند. مقدار ظرفیت برشی نمونه‌ها (F_{max}) در جدول (۴) آورده شده است. مطابق انتظار نمونه مرجع دارای بیشترین ظرفیت برشی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ظرفیت برشی نمونه‌های گروه دوم بیشتر از گروه اول است. در هر دو گروه با افزایش ارتفاع شیارها ظرفیت برشی نمونه کاهش می‌یابد. در گروه اول مشاهده می‌شود که افزایش طول میراگر و دو برابر شدن تعداد شیارها (۱/۷۵ برابر شدن تعداد پره‌ها) باعث افزایش ۶۵/۳۱ درصدی در ظرفیت برشی نسبت به نمونه مشابه ولی با طول کمتر شده است.

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در نمونه‌های گروه یک با افزایش جابه‌جایی، قسمت‌های انتهایی نوارها به ترتیب دچار تغییر شکل الاستیک و پلاستیک شده و در نهایت دچار گسیختگی و خرابی می‌شوند. در هر سه این نمونه‌ها اولین گسیختگی در نوارها در جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر مشاهده شده است. در این میراگرها تمرکز تنش در قسمت‌های انتهایی نوارها رخ داده و قسمت‌های میانی نوارهای میراگر در استهلاک انرژی و پاسخ چرخه‌ای نقش چندانی نداشته‌اند. در مورد نمونه‌های دارای شکاف بیضی، با توجه به این که قسمت‌های انتهایی نوارها دارای عرض بیشتری هستند، و این قسمت‌ها نقش مهمی در تحمل تنش‌ها دارند در نتیجه قسمت‌های بیشتری از نوارها در این نمونه‌ها در تحمل نیروی برشی و استهلاک انرژی نقش داشته و همچنین این نمونه‌ها در جابه‌جایی‌های بالاتری دچار گسیختگی و خرابی می‌شوند که در شکل (۷) به روشنی قابل ملاحظه است. در نمونه‌های DESH1 و DESH2 اولین گسیختگی در جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر و در نمونه DESH3 اولین گسیختگی در جابه‌جایی ۲۲/۵ میلی‌متر مشاهده شد.

۲-۴- انرژی جذب شده

منظور از انرژی جذب شده، مساحت زیر حلقه‌های منحنی چرخه‌ای است. انرژی جذب شده تجمعی برای همه نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف محاسبه شده و در شکل (۸) آمده است.

با مشاهده نمودارهای انرژی می‌توان دریافت که نمونه‌های دارای شیار بیضی انرژی بیشتری را نسبت به نمونه‌های دارای شیار معمولی جذب کرده‌اند. همچنین در هر دو گروه با افزایش نسبت h/b میزان انرژی جذب شده کاهش یافته است.

شکل ۷. نوع شکست در نمونه‌های مختلف



Fig. 7. Type of damage in different specimens

سختی اولیه در نمونه مرجع دارای بیشترین مقدار است و سرعت کاهش سختی آن با افزایش جابه‌جایی، بیشتر از بقیه نمونه‌ها است. در هر دو گروه نمونه‌های دارای نسبت h/b برابر با ۴/۸۵ دارای بیشترین سختی اولیه را دارند و با افزایش h/b سختی اولیه کاهش می‌یابد. در مورد نمونه با طول بیشتر در گروه اول مشاهده می‌شود که افزایش طول میراگر باعث افزایش سختی اولیه می‌شود. با توجه به شکل (۱۰) به طور کلی سختی موثر نمونه‌های گروه دوم بیشتر از نمونه‌های گروه اول هستند. سرعت تغییر سختی موثر نمونه‌ها در گروه دوم کمتر از گروه اول است و در بازه جابه‌جایی ۲/۵ تا ۷/۵ میلی متر میزان سختی نمونه‌های گروه اول به شدت کاهش یافته است.

شکل ۱۰. مقدار سختی موثر برای نمونه‌های آزمایش شده در جابه‌جایی‌های مختلف

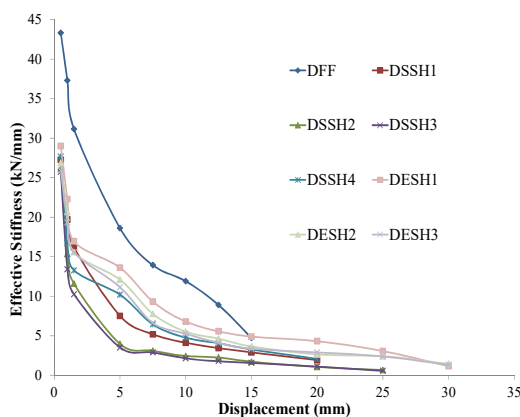


Fig. 10. The effective stiffness in various displacements for tested specimens

۴-۴- شکل پذیری

منظور از شکل‌پذیری نسبت جابه‌جایی نهایی (D_u) به جابه‌جایی جاری شدگی (D_y) است در این مطالعه با استفاده از دو خطی کردن نمودار پوش مقدار شکل‌پذیری برای نمونه‌ها محاسبه می‌شود. برای دو خطی کردن روش‌های متفاوتی وجود دارد. در این مطالعه از روش انرژی الاستیک- پلاستیک مطابق استاندارد ASTM E2126-09 [20] استفاده شده است. جزئیات این روش در شکل (۱۱) آمده است. منحنی دو خطی باید به گونه‌ای رسم شود که مساحت‌های A1 و A2 برابر شوند و هرکدام

در مورد گروه اول، نمونه دارای طول بیشتر بعد از نمونه مرجع، نمونه DESH1 و به همراه نمونه DESH2 دارای بیشترین انرژی جذب شده تا جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر است. اگر انرژی تجمعی در نقطه نهایی را که مقدار آن برای همه نمونه‌ها در جدول (۴) آمده است مقایسه کنیم در میابیم که نمونه DESH1 دارای بیشترین انرژی تجمعی و مقدار آن برابر با ۱/۲۳ برابر نمونه مرجع است.

شکل ۸. نمودار انرژی جذب شده تجمعی

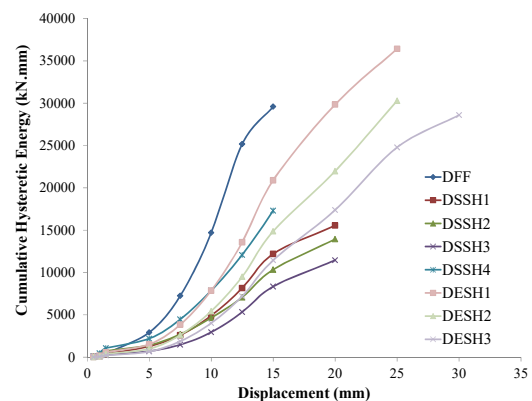


Fig. 8. The cumulative absorbed energy diagram

۴-۳- سختی معادل

برای محاسبه سختی موثر می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$K_{i,eff} = \frac{1}{(|\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-|)} \quad (1)$$

پارامترهای استفاده شده در معادلات ۸ و ۹ در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. نمودار سختی موثر برای همه نمونه‌ها در شکل (۱۰) آمده است. همچنین سختی اولیه نمونه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

شکل ۹. سختی موثر و انرژی چرخه‌ای در بارگذاری چرخه‌ای [19]

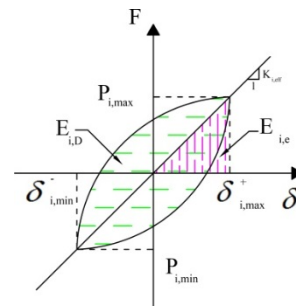


Fig. 9. The effective stiffness and the cyclic energy in cyclic loading [19]

این مقدار در همه نمونه‌ها بیشتر از نمونه مرجع هستند. در گروه یک با افزایش نسبت h/b تغییر چندانی در مقادیر جابه‌جایی نهایی دیده نمی‌شود و با افزایش طول میراگر (DSSH4) این مقدار کاهش می‌یابد. مقادیر نیروی جاری شدگی (F_y) و تغییر مکان متناظر با آن (Δ_y) نیز در این گروه با افزایش نسبت h/b کاهش می‌یابد اما در نمونه دارای طول بیشتر این مقادیر افزایش یافته است. در گروه دو با افزایش نسبت h/b مقدار جابه‌جایی نهایی و مقدار نیروی جاری‌شدگی کاهش و مقدار تغییر مکان جاری‌شدگی افزایش می‌یابد. در مورد شکل‌پذیری نیز در گروه یک با افزایش h/b مقدار آن افزایش یافته که نشان می‌دهد با غالب شدن رفتار برشی شکل‌پذیری نمونه کمتر شده است اما نکته جالب توجه این است که در نمونه‌های دارای شیار بیضی با افزایش نسبت h/b (کاهش رفتار برشی نمونه) مقدار شکل‌پذیری افزایش یافته است به طوری که نمونه‌ای که بیشترین برش را تحمل کرده دارای بیشترین شکل‌پذیری نیز هست که این می‌تواند نکته مهمی در این میراگرها محسوب شود.

از این مساحت‌ها حداقل مقدار را داشته باشند. در این صورت D_y (جابه‌جایی جاری شدگی) به دست خواهد آمد. مقادیر جابه‌جایی نهایی، جابه‌جایی جاری‌شدگی و شکل‌پذیری برای نمونه‌های مختلف محاسبه شده و در جدول (۴) آورده شده است.

شکل ۱۱. استفاده از روش دو خطی معادل برای محاسبه جابه‌جایی تسلیم

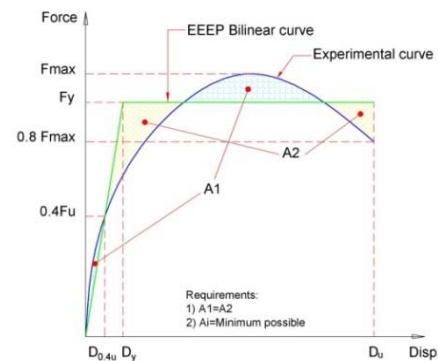


Fig. 11. Using the Equivalent Energy Elastic-Plastic (EEEP) bilinear model

همان‌گونه که از جدول (۴) مشاهده می‌شود مقادیر جابه‌جایی نهایی در گروه دو بیشتر از گروه یک است. اما به طور کلی

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمایشگاهی

Specimen	$\Delta_y (mm)$	$F_y (kN)$	$\Delta_u (mm)$	μ	$F_{max} (kN)$	$\Delta_{Fmax} (mm)$	$E_A (J)$	$K_{initial}$
DFE	3.13	101.43	17.86	5.71	118	10.21	29735.53	43.32
Group 1								
DSSH1	2.2	25.14	21.06	9.57	28.2207	15.62	15559.83	27.27
DSSH2	1.63	24.72	21.42	13.14	27.5	15.36	14789.10	26.15
DSSH3	1.16	21.92	21.51	18.54	24.5	15.09	11454.67	25.74
DSSH4	2.39	37.55	19.48	8.15	40.5	16.28	20372.76	27.67
Group 2								
DESH1	1.8	46.13	31.74	17.63	53	21.13	36415.50	29.01
DESH2	1.92	37.47	25.37	13.21	44	23.4	30284.54	26.89
DESH3	2.25	36.22	26.37	11.72	42.5	25.88	28598.79	25.91

Table 4. Summary of experimental results

استفاده شده است. منحنی چرخه‌ای حاصل از مدل‌سازی عددی یک نمونه از هر گروه به همراه منحنی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی در شکل (۱۲) آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مطالعه عددی و آزمایشگاهی دارای هماهنگی خوبی با هم هستند. در مطالعه آزمایشگاهی خرابی و شکست در قسمت‌های

۵- مقایسه با پیش‌بینی‌های عددی

در این مطالعه، به منظور درستی‌آزمایی نتایج آزمایشگاهی، تمامی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود (ABAQUS) [21] مدل‌سازی شده و منحنی‌های چرخه‌ای حاصل از آنها به دست آمد. مشخصات مکانیکی فولاد تعریف شده به نرم‌افزار مطابق با آزمایش کشش استاندارد است. برای درستی‌آزمایی از المان Shell

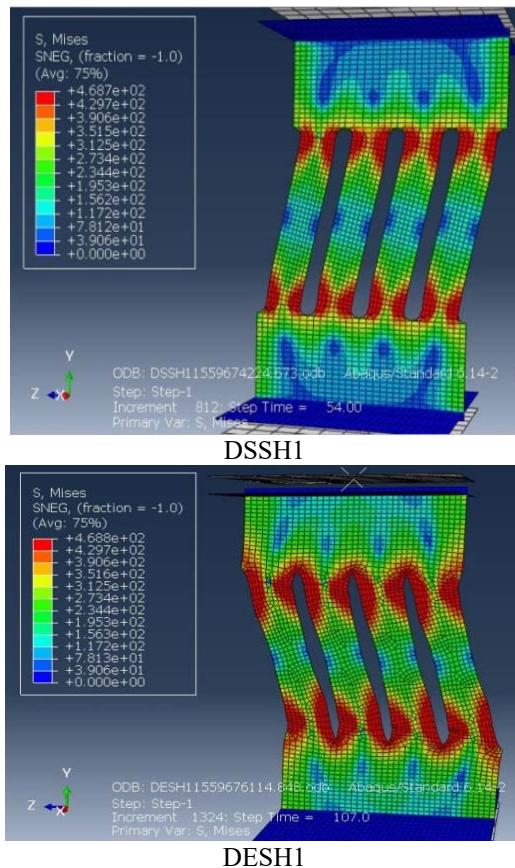


Fig. 13. Von mises stress in specimens

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک عدد میراگر بدون شکاف و تعدادی میراگر تسلیمی شکافدار با شیارهای با شکل هندسی متفاوت در دو گروه (با عرض یکنواخت و بیضی شکل) با نسبت‌های مختلفی از طول به عرض پره (h/b)، ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی قرار گرفت و خروجی‌های حاصل از آزمایش آنها ارایه شد. همچنین نتایج نمونه‌های آزمایش شده به وسیله مطالعه عددی مورد تایید قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- ظرفیت باربری نمونه‌های دارای شکاف بیضی به طور متوسط افزایش ۷۳/۷۶ درصدی نسبت به نمونه‌های دارای شکاف با عرض یکنواخت داشته و در هر گروه با افزایش نسبت ارتفاع به عرض نوار (h/b)، میزان ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.
- میزان سختی اولیه در نمونه های دارای شکاف با عرض یکنواخت کمتر از نمونه‌های دارای شکاف بیضی با h/b برابر

انتهایی نوارها اتفاق افتاد که همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده میشود در مطالعه عددی نیز در قسمت‌های انتهای نوارها بیشترین تمرکز تنش وجود دارد و خرابی و آسیب در این نواحی اتفاق افتاده است. با مقایسه نمونه‌ها در شکل (۱۳) می‌توان دریافت که در نمونه‌های دارای شیار بیضی، در قسمت‌های انتهای نوارها، نواحی گسترده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای شیار با عرض یکنواخت دارای حداکثر تنش هست همچنین در میراگرهای دارای شکاف بیضی، قسمت‌های میانی نوارهای میراگر تنش‌های بیشتری را نسبت به نمونه‌های دارای شیار با عرض یکنواخت تجربه کرده‌اند در نتیجه به علت مشارکت بیشتر قسمت‌های میانی نوارها، توزیع تنش‌های فون میسر در میراگر دارای شکاف بیضی نسبت به میراگر با شکاف معمولی بهتر بوده و موجب بهبود پاسخ چرخه‌ای میراگر فولادی شکافدار خواهد شد.

شکل ۱۲. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی

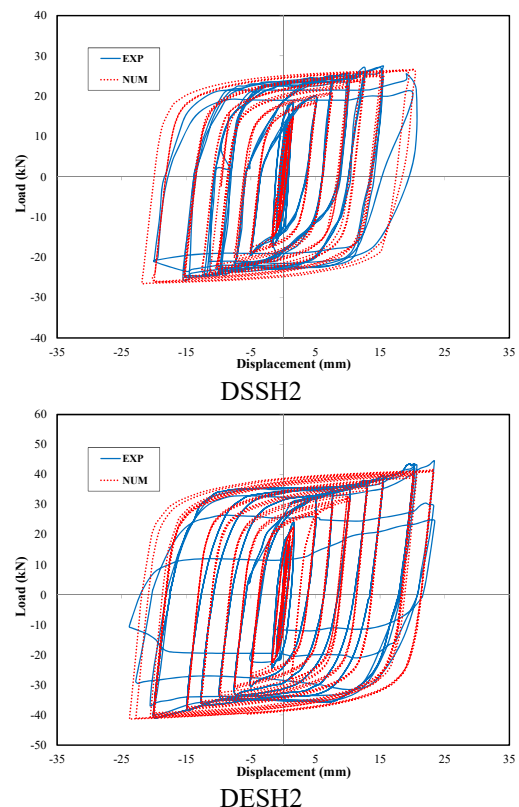


Fig. 12. Comparison of experimental and numerical results

شکل ۱۳. تنش های ون میسر در نمونه‌ها

مراجع

- [1] Chan RWK, Albermani F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Eng Struct* 2008; 30: 1058–1066.
- [2] Zheng J, Li A, Guo T. Analytical and experimental study on mild steel dampers with non-uniform vertical slits. *Earthq Eng Eng Vib* 2015; 14: 111–123.
- [3] Teruna DR, Majid TA, Budiono B. Experimental Study of Hysteretic Steel Damper for Energy Dissipation Capacity. *Adv Civ Eng* 2015; 2015: 1–12.
- [4] Zhang C, Zhang Z, Zhang Q. Static and dynamic cyclic performance of a low-yield-strength steel shear panel damper. *J Constr Steel Res* 2012; 79: 195–203.
- [5] Deng K, Pan P, Sun J, et al. Shape optimization design of steel shear panel dampers. *J Constr Steel Res* 2014; 99: 187–193.
- [6] Keykhosravi A, Aghayari R. Evaluating response modification factor (R) of reinforced concrete frames with chevron brace equipped with steel slit damper. *KSCE J Civ Eng* 2017; 21: 1417–1423.
- [7] Lim W-Y, Kim S. Experimental assessment of seismic vulnerability of precast concrete beam-to-beam connections with steel slit damper. *Int J Steel Struct* 2017; 17: 1249–1260.
- [8] Lee J, Kim J. Development of box-shaped steel slit dampers for seismic retrofit of building structures. *Eng Struct* 2017; 150: 934–946.
- [9] Chaofeng Z, Youchun W, Longfei W, et al. Hysteretic mechanical property of low-yield strength shear panel dampers in ultra-large plastic strain. *Eng Struct* 2017; 148: 11–22.
- [10] Zhang C, Wang L, Sun C, et al. Feasibility of the evaluation of the deformation capacity of the shear panel damper by FEM. *J Constr Steel Res* 2018; 147: 433–443.
- [11] Mortezaagholi MH, Zahrai SM. Proposed Relationship for Proper Shear Strength of Elliptical Damper Based on Its Geometrical Parameters. *Int J Steel Struct* 2018; 18: 880–890.
- [12] Lor HA, Izadinia M, Memarzadeh P. Experimental and numerical study of I-shape slit dampers in connections. *Lat Am J Solids Struct*; 15. Epub ahead of print 14 November 2018. DOI: 10.1590/1679-78254416.
- [13] Naeem A, Kim J. Seismic performance evaluation of a multi-slit damper. *Eng Struct* 2019; 189: 332–346.
- [14] Qu B, Dai C, Qiu J, et al. Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Eng Struct* 2019; 179: 625–639.
- [15] Garivani S, Aghakoochak AA, Shahbeyk S. Introducing Comb-Teeth Yielding Metallic Dampers (In Persian). *IJBQ* 2015; 15: 199–212.
- [16] Karami mohammadi R, Nasri A, Ghamari H.

است که در هر دو گروه نمونه دارای h/b برابر با $4/85$ دارای بیشترین سختی اولیه است.

- نمونه‌های دارای شکاف بیضی انرژی بیشتری را نسبت به نمونه‌های دارای شکاف با عرض یکنواخت جذب کردند. در گروه اول و دوم بیشترین انرژی جذب شده برای نمونه‌های دارای ارتفاع به عرض نوار (h/b) برابر با $4/85$ است.
- به طور کلی میزان شکل پذیری در همه نمونه‌های دارای شکاف قابل قبول و بالاتر از نمونه مرجع است (میزان افزایش شکل پذیری حداقل $67/6$ درصد می‌باشد). ظرفیت تغییر مکانی نیز در نمونه‌های گروه دو بیشتر از نمونه‌های گروه یک است.

- افزایش 75 درصدی طول میراگر در گروه اول باعث افزایش $65/3$ درصدی در ظرفیت باربری، افزایش $77/85$ درصدی در انرژی جذب شده، افزایش $7/49$ درصدی در سختی اولیه و کاهش 56 درصدی مقدار شکل پذیری نسبت به نمونه مشابه خود (h/b برابر) شده است.

نتایج مطالعه عددی هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان دادند. استفاده از میراگر شکافدار با شکاف بیضی نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت موجب توزیع بهتر تنش های فون میسر در میراگر و مشارکت بیشتر قسمت های میانی نوارها در جذب انرژی شده است.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی به دست آمده از این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میراگرهای با شکاف بیضی با توجه به عملکرد بهتر از نظر ظرفیت باربری، جذب انرژی، شکل پذیری و ظرفیت تغییر مکانی تاثیر چشمگیری در بهبود عملکرد لرزه‌ای نسبت به میراگرهای دارای شکاف با عرض یکنواخت دارد و در این میراگرها (با شکاف بیضی) نسبت ارتفاع به عرض شکاف (h/b) برابر با $4/85$ بهترین عملکرد را نسبت به دیگر نسبت‌های h/b از خود نشان داده است.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی در این مقاله وجود ندارد.

- Some probable mistakes in the design of geometric configuration of TADAS damper (In Persian). *IQBQ* 2017; 16: 153–163.
- [17] ASTM E8M-04. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. 2008.
- [18] ATC-24. *Guidelines of Cyclic Seismic Testing on Components For Steel Structures, Applied Technology Council, Redwood City, Calif, USA*, <https://books.google.com/books?id=hQpZs4k38sEC> (1992).
- [19] Ahmadie Amiri H, Najafabadi EP, Estekanchi HE. Experimental and analytical study of Block Slit Damper. *J Constr Steel Res* 2018; 141: 167–178.
- [20] ASTM. Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings. *E2126-09*.
- [21] Abaqus Theory Manual, Version 6.12 (2012). Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

Introduction of New Steel Slit Dampers with Elliptical Slit in Bracing Connection and Comparison with Steel Slit Dampers with Constant Slit Width by Experimental and Numerical Study

K. Nik Hoosh¹, A. Kafi^{2*}

1. PhD Student, Civil Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

2. Associate Professor, Civil Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

mkafi@semnan.ac.ir

Abstract:

Controlling systems are modern systems of designing structures that have become widely used in the building industry today. One of these control systems is the use of a damper. These systems can be generally categorized into active, inactive, semi-active, and hybrid systems. Among the mentioned systems, the inactive dampers do not require the use of an external power source. Contrary to conventional methods of designing earthquake resistant structures in which major earthquake energy is absorbed by the yielding of specific points of the structure (typically, the ends of the beams and columns in the moment frame systems), in inactive control systems, the major part of this energy is absorbed by certain devices which are called seismic dampers. One of these types of dampers, which can be replaced after damage from large earthquakes, is the Steel Slit Damper (SSD). Steel slit damper is a kind of inactive energy depreciator with behavior dependent on displacement. Steel Slit dampers are mainly made of metal or special alloys that are easily yielded and have an acceptable performance to dissipate energy under severe seismic loads. In these dampers, the blades between the slits dissipate seismic energy by absorbing non-elastic deformations and prevent it from being transferred to the main structural members.

In this study an investigation on experimental behavior of steel slit dampers was performed. One specimen was considered as a reference without any slit, 4 specimens had slit with constant width and cross section but different height and 3 specimens had elliptical slit with constant cross section and different height. Cyclic loading was applied to all the specimens in the form of displacement control and the results of experiments such as load capacity, absorbed energy, stiffness, ductility and damping were presented and compared. In addition a numerical study was performed by finite element software (ABAQUS) and the results showed a good correlation in comparison to experimental results. The experimental study showed that elliptical split dampers had better performance in terms of bearing capacity, ductility and energy absorption, with a mean increase of 73.76%, 15.91% and 129.49%, compared to slit steel dampers with constant width, respectively. A noticeable point about the steel dampers with elliptical slit was that in addition to increasing the bearing capacity, the displacement capacity as well as ductility increased, while in the dampers that have been investigated, the simultaneous increase in load capacity and ductility has not been found. Also in dampers with elliptical slit the more length of slits was participated in energy dissipation, strength and stress tolerance compared to the dampers with constant width. According to the experimental and numerical results obtained from this study, it can be concluded that the use of elliptical slit dampers with respect to the performance in terms of bearing capacity, energy absorption, ductility and displacement capacity, has a significant effect on seismic performance improvement in comparison to dampers with constant slit width. In these dampers (with elliptical slit), the ratio of height to slit width (h/b) equal to 4.85, has shown the best performance compared to other h/b ratios.

Keywords: Steel slit damper, Cyclic loading, Elliptical slit, Bracing frame, Finite element.