

بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال گیردار تیر به ستون با استفاده از میراگر شکافدار فولادی اصلاح شده

جواد حسن زاده^۱، سیدرضا سرافرازی^۲، محسن خطیبی نیا^{۳*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران، سازه، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند

*m.khatibinia@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۳

چکیده

میراگر شکافدار فولادی تسلیم شونده در اتصالات سازه‌های فولادی باعث استهلاک انرژی ورودی لرزه‌ای از طریق ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک می‌شود و از صدمات مخرب به المان‌های اصلی سازه (تیر و ستون) جلوگیری می‌کند. شکل شکاف‌ها در این میراگر نقش زیادی در بهبود شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای رفتار قاب‌های خمشی فولادی دارد. در این مطالعه، شکل هندسی جدیدی برای شکاف‌ها در این میراگر به منظور بهبود رفتار میراگر و اتصالات گیردار قاب‌های خمشی فولادی ارائه شده است. به منظور بررسی عملکرد این میراگر پیشنهادی، رفتار یک اتصال گیردار با میراگر شکافدار رایج و میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه‌ای و بار افزون در نرم‌افزار اجزای محدودی آباکوس ارزیابی شده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد کاهش عرض شکاف‌های میراگر در دو انتهای شکاف و عریض شدن قسمت میانی شکاف‌ها (نوارها) در میراگر پیشنهادی، عملکرد بهتری را نسبت به نمونه رایج دارد. به گونه‌ای که میراگر شکافدار پیشنهادی با وزن یکسان نسبت به نمونه رایج آن تحت برش خالص، ۴۱ درصد جذب انرژی بیشتری دارد. همچنین استفاده از آن در زیر بال تیر اتصال گیردار تیر به ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای، باعث افزایش ۵۱/۸ درصدی اتلاف انرژی نسبت به نمونه رایج شده است. بنابراین عملکرد میراگر شکافدار پیشنهادی تحت برش به گونه‌ای است که ابتدا، قسمت میانی نوارها مانند فیوز عمل کرده و شکل‌پذیری مناسبی را فراهم می‌کند. سپس بیشترین تنش‌ها به قسمت مستقیم بالایی و پایینی نوارهای میراگر انتقال یافته و به علت توزیع تنش در سطح بیشتری از شکاف‌ها، مقاومت نهایی میراگر و اتصال افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: میراگر شکافدار فولادی، شکل هندسی، استهلاک انرژی، اتصال گیردار

۱. مقدمه

ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی تخریب‌شده در زلزله‌های شدید مانند نورتریج و کوبه نشان داد که ظرفیت استهلاک

تأمین شده به وسیله تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها برای زلزله‌های بزرگ کافی نبوده است. پس نیاز به تقویت و افزایش شکل‌پذیری در محل اتصالات تیر به ستون و در محل بادبندها بیش‌ازپیش احساس شد [1]. به‌منظور استفاده بی‌وقفه از ساختمان‌های مهم پس از زلزله‌های طراحی، ترجیح داده می‌شود که خرابی در المان‌های مستهلک‌کننده انرژی که رفتار هیستریزس مناسبی نشان می‌دهند، محدود شود. ازجمله سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی، میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده هستند که با استهلاك انرژی و جذب تغییرشکل‌های پلاستیک در خود، مانع از آسیب رسیدن به اجزای اصلی سازه‌ای می‌شوند. یکی از انواع میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده، میراگرهای شکافدار فولادی هستند که در سال‌های اخیر به‌عنوان منبع استهلاك انرژی در محل اتصال بادبند به تیر طبقات و اتصال گیردار تیر به ستون در سازه‌های فولادی استفاده می‌شوند.

وادا و همکارانش در سال ۱۹۹۷ میلادی، مطالعات آزمایشگاهی روی میراگر شکافدار فولادی شامل یک ورق فولادی با تعدادی شکاف‌های عمودی، انجام دادند. آن‌ها میراگر پیشنهادی را در یک ساختمان ۲۶ طبقه در ژاپن استفاده کردند که موجب جذب ۴۸ درصدی انرژی ورودی لرزه‌ای، توسط این میراگر شد [1]. سال ۲۰۰۲ میلادی، لی و همکارانش برای جلوگیری از کماتش بادبندها و جذب انرژی لرزه‌ای، از میراگر شکافدار فولادی در محل اتصال بادبندها به تیر استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که میراگر شکافدار فولادی در معرض نیروهای برشی، رفتار هیستریزس پایداری داشته است [2]. نوع دیگری از میراگر شکافدار فولادی توسط چان و آلبرمانی به صورت استفاده از یک مقطع بال‌پهن استاندارد همراه با تعدادی شکاف برش شده در جان مقطع معرفی شد. نتایج نشان داد که میراگر شکافدار فولادی رفتار بسیار پایدار هیستریزس با انتقال تدریجی از حالت الاستیک به پلاستیک داشته است [3]. سال ۲۰۰۹ میلادی، آه و همکارانش به‌منظور رفع مشکل ضعف اتصال تیر به ستون قاب‌های خمشی فولادی در برابر زلزله، اتصال سازه‌ای جدیدی را مجهز به میراگرهای شکافدار فولادی پیشنهاد کردند. نتایج آزمایش نشانگر بهبود رفتار هیستریزس اتصال مجهز به میراگر شکافدار فولادی

بود. همچنین استهلاك انرژی و تغییرشکل پلاستیک فقط در میراگرهای شکافدار متمرکز شده و از تغییرشکل غیرالاستیک تیر و ستون جلوگیری شده است [4]. به‌منظور بهبود عملکرد میراگر شکافدار فولادی، قبابی و همکارانش از روش بهینه‌سازی سازه‌ای تکاملی دو جهته (IBESO) برای یافتن شکل هندسی بهینه میراگر استفاده کردند. نتایج نشان داده است که نمونه بهینه‌شده نسبت به نمونه اولیه، ۳۷ درصد استهلاك انرژی بیشتری داشته است [5]. خوشنودیان و کیانی عملکرد میراگر شکافدار فولادی را در یک سازه فولادی ۱۰ طبقه توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داده است افزودن تعداد میراگرها در طبقات تا یک حد معین در بهبود پاسخ سازه مؤثر بوده است [6]. در پژوهش آزمایشگاهی توسط کوکن و کروگلو، سه اتصال معمولی، تقویت‌شده و مجهز به میراگر شکافدار را بررسی شدند. نتایج نشان داد که در اتصال مجهز به میراگر شکافدار، تمام تغییرشکل‌های پلاستیک را میراگر جذب نموده و این در حالی است که امکان تعمیر اتصال پس از زلزله وجود دارد [7]. یک طراحی لرزه‌ای بر مبنای کمترین خرابی برای ساختمان‌های فولادی توسط کاراواسیلیس و همکارانش ارائه شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که ترکیب هم‌زمان میراگرهای ویسکوز و میراگرهای شکافدار فولادی در قاب‌های خمشی فولادی می‌تواند تغییر مکان‌های نسبی در سازه را به صورت هم‌زمان کاهش دهد [8]. به‌منظور افزایش شکل‌پذیری اتصالات خمشی، صفاری و همکارانش اتصالات با میراگرهای شکافدار را بررسی کردند. آن‌ها یک مطالعه پارامتری با استفاده از روش المان محدود روی هندسه میراگرهای شکافدار با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف طول و عمق تیر انجام دادند و بهترین پارامترهای طراحی برای دستیابی به شکل‌پذیری موردنظر اتصال پیشنهاد شده است [9]. در یک پژوهش دیگر توسط هدایت، پیش‌بینی لحظه شکست میراگر فلزی جاری شونده کماتش‌ناپذیر بررسی شد. به این منظور، شش نمونه از میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده که در آزمایشگاه تحت بررسی قرار گرفته و به صورت عددی مدل‌سازی شدند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که معیار کرنش پلاستیک تجمعی می‌تواند معیار خوبی برای تخمین لحظه شکست میراگر باشد [10].

انرژی میراگر پیشنهادی در مقایسه با میراگرهای موجود از افزایش قابل توجهی برخوردار است.

۲. میراگر شکافدار فولادی

میراگر شکافدار فولادی شامل یک ورق با تعدادی شکاف بریده شده در جان آن است که تحت تغییر شکل های نسبی کوچک بین دو بال تکیه گاهی، تغییر شکل می دهند [3]. در میراگر شکافدار فولادی نوارهایی که بین شکاف ها قرار دارند، تغییر شکل های غیرالاستیک را جذب کرده و با تشکیل مفاصل پلاستیک، موجب استهلاک انرژی ورودی زلزله می شود و از تمرکز خسارت و خرابی در اتصال تیر به ستون جلوگیری می کند. طبق پژوهش های صورت گرفته توسط لی و همکارانش [2]، برای پیش بینی مقاومت تسلیم و جابه جایی تسلیم میراگر شکافدار فولادی، نوارهای میراگر شکافدار مطابق شکل (۱)، ایده آل سازی شده است.

شکل ۱. میراگر شکافدار فولادی [2]

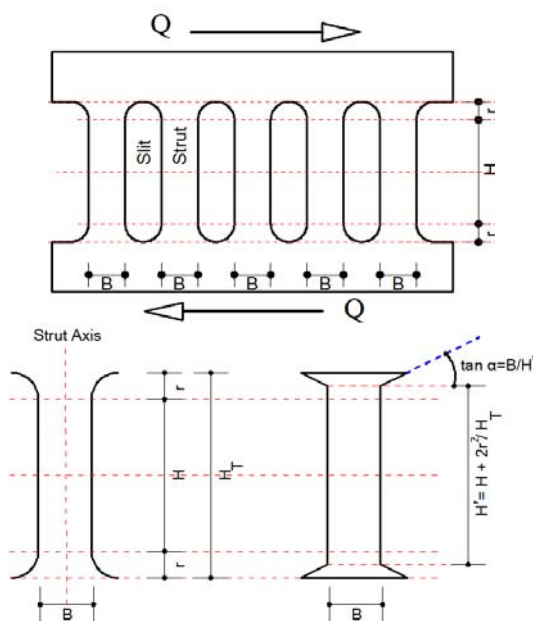


Fig. 1. Steel slit damper [2]

مقاومت تسلیم میراگر شکافدار فولادی طبق رابطه (۱) و مقاومت نهایی آن با رابطه (۲) قابل محاسبه است [2]:

$$P_y = \min \left\{ n \frac{\sigma_y t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_y t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (1)$$

$$P_u = \min \left\{ n \frac{\sigma_u t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_u t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (2)$$

تاگوا و همکارانش یک سیستم پیشنهادی مهاربندی متشکل از میراگر شکافدار فولادی را ارائه کردند. در ابتدا، چگونگی محاسبه سختی جانبی و مقاومت این سیستم مهاربندی همراه با میراگر شکافدار فولادی مطرح شد و در نهایت نیز یک مدل سه خطی هیستریزیس برای پیش بینی رفتار این سیستم ارائه نمودند [11]. میراگر فلزی جدیدی تحت عنوان میراگر شکافدار بلوکی توسط احمدیه امیری و همکارانش ارائه شد که از ظرفیت برشی بالایی برخوردار است. در این پژوهش، نخست با استفاده روابط تئوری به محاسبه پارامترهای مهم ابعادی این میراگر پرداختند و سپس برای بررسی رفتار چرخه ای سیستم پیشنهادی، ۵ نمونه با نسبت های عرض و ارتفاع مختلف آزمایش شد [12]. بیات و شکسته بند به بررسی عملکرد اتصال صلب به همراه میراگر شکافدار فولادی T شکل پرداختند. روش المان محدود غیرخطی برای مدل سازی استفاده، و تمام جنبه های رفتاری شامل مقاومت، استهلاک انرژی، شکل پذیری و تنش فون میسز محاسبه ارزیابی شد [13].

شکل شکاف ها در میراگر شکافدار فولادی نقش زیادی در رفتار و عملکرد آن دارد، بطوریکه در شکل رایج آن، تمرکز تنش و شکست در انتهای میان شکاف ها (نوارها) اتفاق می افتد. پس یافتن یک شکل هندسی مناسب شکاف ها برای این میراگر می تواند در جذب انرژی ورودی لرزه ای و جلوگیری از ایجاد خسارت در اتصالات گیردار قاب های فولادی، به عنوان یک چالش اساسی در پیشروی پژوهشگران بوده است. از این رو هدف اصلی این پژوهش، پیشنهاد یک شکل هندسی مناسب برای میراگر شکافدار فولادی به منظور دستیابی به عملکرد بهتر نسبت به نمونه های رایج آن است. برای این منظور، شکل شکافها بطور مناسبی اصلاح شده در حالیکه وزن میراگر پیشنهادی با نمونه های رایج یکسان است. در ادامه برای بررسی عملکرد میراگر شکافدار پیشنهادی، ابتدا رفتار میراگرهای پیشنهادی تحت بارافزون در نرم افزار آباکوس با یک نمونه رایج آن مقایسه شده است و بهترین شکل شکاف مشخص شده است. سپس عملکرد اتصال گیردار فولادی مجهز به بهترین نوع میراگر پیشنهادی با میراگر شکافدار رایج، تحت بار چرخه ای از نظر مقاومت (حد تسلیم و نهایی) و جذب انرژی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که مقاومت و ظرفیت جذب

است. واحد کمیت‌های ورودی و نتایج خروجی در نرم‌افزار آباکوس به صورت جدول (۱)، در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. واحدهای مفروض برای کمیت‌های مختلف در نرم‌افزار آباکوس

quantity	Unit	quantity	Unit
length	Mm	time	s
force	N	stress	N/mm ²
mass	Kg	energy	KJ

Table. 1. The units used for various quantities in ABAQUS software

۳-۱- درستی آزمایشی مدل سازی نمونه D0300-2

در این بخش، درستی آزمایشی مدل سازی میراگر شکافدار در نرم‌افزار با میراگر شکافدار D0300-2 [2] ارائه شده است. ابعاد میراگر شکافدار D0300-2 در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. ابعاد هندسی میراگر شکافدار D0300-2 [2]

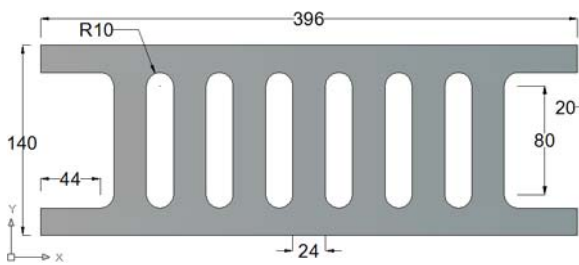


Fig. 3. Dimensional geometry of D0300-2 slit damper [2]

در این مدل سازی، از المان‌های Shell و مطابق شکل (۴)، از روش مش بندی منظم و درجه هندسی خطی به صورت چهار گرهی S4R بهره گرفته شده است.

شکل ۴. مش بندی میراگر D0300-2 در نرم‌افزار آباکوس

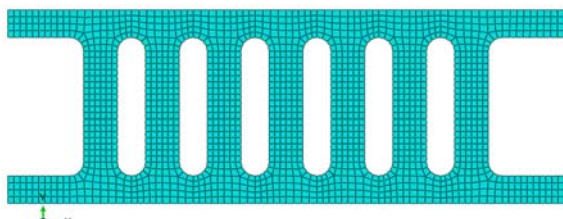


Fig. 4. Meshing of D0300-2 damper in ABAQUS software

مشخصات فولاد مصرفی مطابق جدول (۲) است؛ که در آن E مدول الاستیسیته، ρ چگالی، ν نسبت پواسون، σ_y تنش تسلیم، σ_u تنش نهایی و E_{lo} کرنش نهایی فولاد است.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی فولاد: نمونه D0300-2 [2]

در روابط (۱ و ۲)، σ_y تنش تسلیم مواد، σ_u تنش نهایی مواد، n تعداد نواریهای میراگر، t ضخامت ورق آن و B عرض نواریها است.

اگر مدل تئوری اتصال گیردار مجهز به میراگر شکافدار فولادی مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته شود:

شکل ۲. مدل تئوری اتصال میراگر شکافدار فولادی

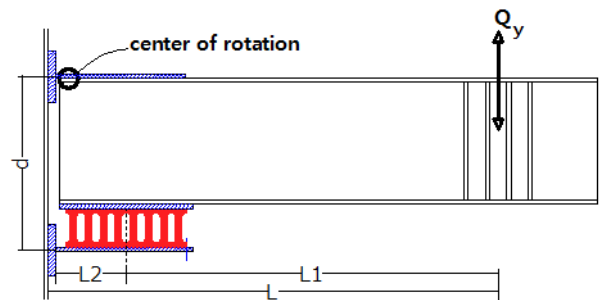


Fig. 2. Analytical model of steel slit damper connection

سختی میراگر شکافدار فولادی (K_d)، از رابطه (۳) قابل

محاسبه خواهد بود:

$$K_d = \frac{P_y}{\delta_y} \quad (3)$$

همچنین نیروی برشی تیر (Q_y) و لنگر در وجه ستون (M_y) در حالت تسلیم، از روابط (۴ و ۵) و در حالت نهایی، بیشترین نیروی برشی تیر (Q_u) و بیشترین لنگر در وجه ستون (M_u)، از روابط (۶ و ۷) محاسبه می‌شود [4].

$$Q_y = \frac{P_y d}{L_1} \quad (4)$$

$$M_y = Q_y \cdot L = \frac{P_y d L}{L_1} \quad (5)$$

$$Q_u = \frac{P_u d}{L_1} \quad (6)$$

$$M_u = Q_u \cdot L = \frac{P_u d L}{L_1} \quad (7)$$

۳. درستی آزمایشی مدل اجزای محدود

در این پژوهش، از نرم‌افزار آباکوس برای مدل سازی و درستی آزمایشی اجزای محدودی استفاده شده است. به منظور بررسی درستی مدل سازی، نتایج تحلیل حاصل از نرم‌افزار با نتایج مدل آزمایشگاهی میراگر شکافدار ساخته شده توسط لی و همکارانش [2] و همچنین اتصال خمشی مجهز به میراگر شکافدار ساخته شده توسط آه و همکارانش [4]، مقایسه شده

به علت تقارن قاب موردنظر، تنها نیمی از آن به همراه میراگر در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است (شکل ۸).

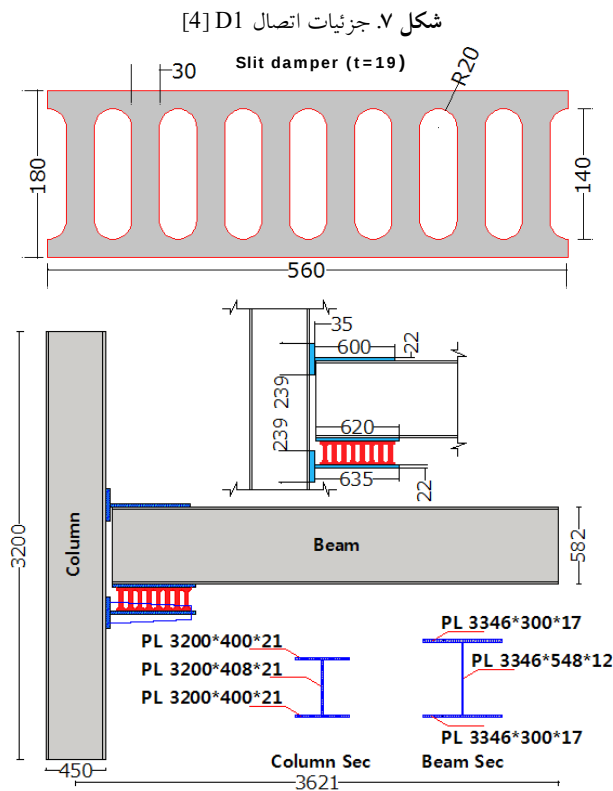


Fig. 7. Detail of D1 connection [4]

چگالی فولاد و نسبت پواسون، مشابه جدول (۲) و مابقی مشخصات مکانیکی فولاد در جدول (۳) خلاصه شده است [4].

شکل ۸. مدل اجزای محدود اتصال D1

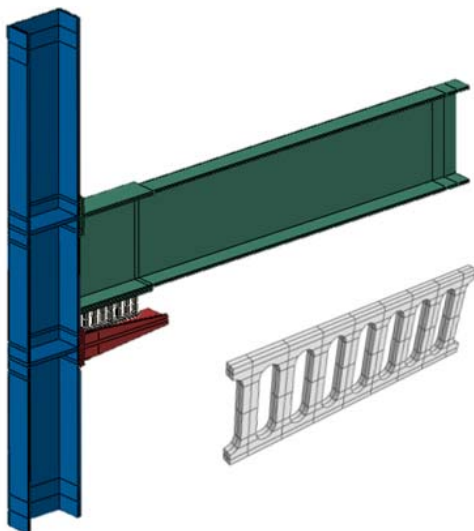


Fig. 8. Finite element model of D1 connection

E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Elo (%)
214	7850	0.3	307	451	28

Table 2. Mechanical properties of steel: specimen D0300-2 [2]

در مدل‌سازی از اثر وزن چشم‌پوشی شده و مدل تحت اعمال جابه‌جایی افقی به صورت بار افزون در جهت x، به اندازه ۶۶ میلی‌متر قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با مرجع [2] در شکل (۵) نشان می‌دهد که نتایج مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی همپوشی بسیار خوبی دارد. همچنین، کانتور تنش فون‌میسز مدل‌سازی در شکل (۶) نشان داده شده است.

شکل ۵. مقایسه منحنی نیرو-جابجایی بین تحلیل اجزای محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی D0300-2

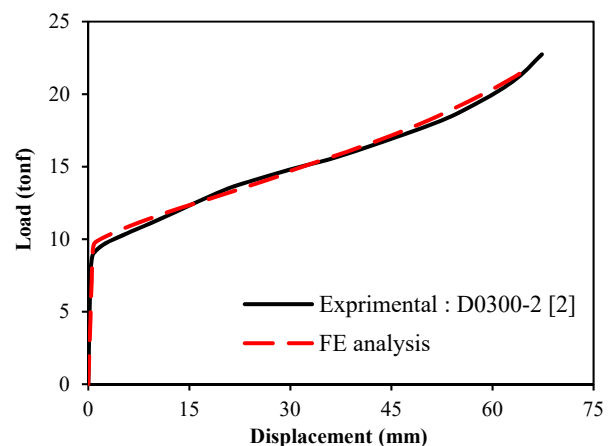


Fig. 5. Comparison of force-displacement curve between finite element analysis and D0300-2 experimental specimen

شکل ۶. کانتور تنش فون‌میسز D0300-2

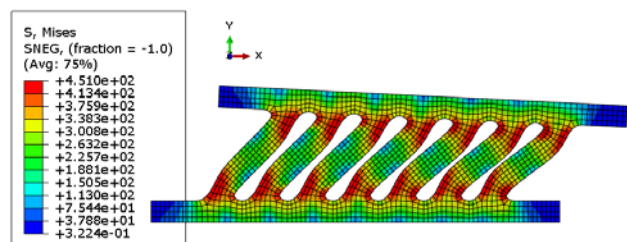


Fig. 6. Von Mises stress contour of D0300-2 specimen

۲-۳- درستی آزمایشی مدل‌سازی اتصال D1

در این بخش، درستی آزمایشی مدل‌سازی اجزای محدود اتصال D1 مجهز به میراگر شکافدار در مرجع [4] بیان شده است. در شکل (۷)، مشخصات این اتصال نشان داده شده است. برای مدل‌سازی این اتصال، از المان‌های Solid استفاده شده است و

به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی، مفصلی برای نگهداری دو انتهای ستون در نظر گرفته شده است. از طرفی در شرایط آزمایشگاهی به منظور جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه تیر، تکیه‌گاه‌های جانبی در دو طرف تیر قرار داده شده است که با مقید کردن جابه‌جایی سطح خارجی مدل در جهت خارج از صفحه‌ی تیر، همین عمل نتیجه می‌شود. منحنی هیستریزس لنگر-دوران حاصل از تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی اتصال D1 [4] در شکل (۱۱) مقایسه شده است. مشاهده می‌شود مدل نرم‌افزاری به‌خوبی توانسته مقادیر لنگر خمشی و دوران را در قسمت الاستیک و پلاستیک پیش‌بینی کند.

شکل ۱۱. مقایسه منحنی هیستریزس لنگر-دوران اتصال D1 بین نتایج تحلیل اجزای محدود و آزمایشگاهی

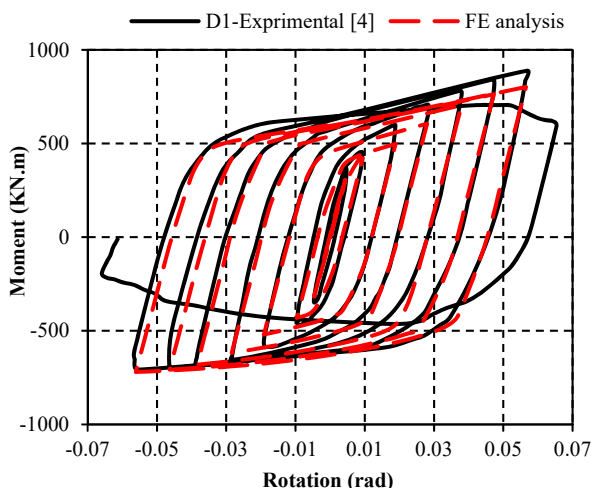
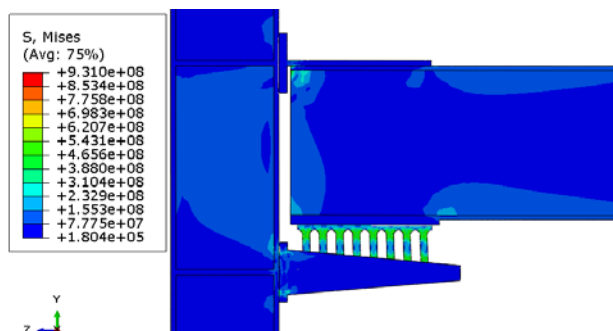


Fig. 11. Comparison of hysteretic moment-rotation curves of D1 connection between FE analysis and experimental results

همچنین کانتور تنش فون میسز اتصال در شکل (۱۲) حاکی از تمرکز تنش در میراگر شکافدار است.

شکل ۱۲. کانتور تنش فون میسز اتصال D1



مطابق شکل (۹)، چگونگی مش‌بندی در نرم‌افزار آباکوس برای تمامی قطعات اتصال از نوع Structured و منظم است. برای تمامی قطعات، از المان‌های Solid و نوع شبکه ۲۰ گرهی C3D20 درجه دو استفاده شده است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی فولاد اتصال D1 [4]

Test specimen	σ_y (Mpa)	σ_u (Mpa)	Elo (%)	E (GPa)
Beam	Flange	318	480	30
	Web	339	488	27
Column	Flange	378	551	24
	Web	395	554	27
Split	Flange	386	573	24
	Web	388	577	25
Slit plate	288	464	30	210

Table. 3. Mechanical properties of steel of D1 connection [4]

شکل ۹. مش‌بندی اتصال D1 در نرم‌افزار آباکوس

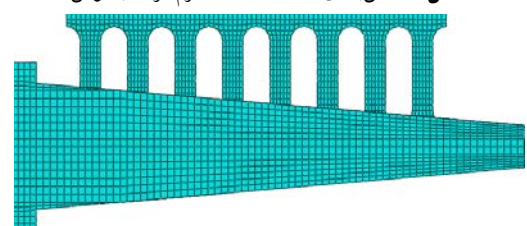


Fig. 9. Meshing of D1 connection in ABAQUS software

در بارگذاری اتصال D1 در نرم‌افزار، از اثر وزن صرف‌نظر شده و بارگذاری چرخه‌ای، طبق دستورالعمل FEMA-350 [14]، به صورت تغییر مکان به انتهای تیر در راستای Y مطابق شکل (۱۰) اعمال شده است.

شکل ۱۰. تاریخچه بارگذاری

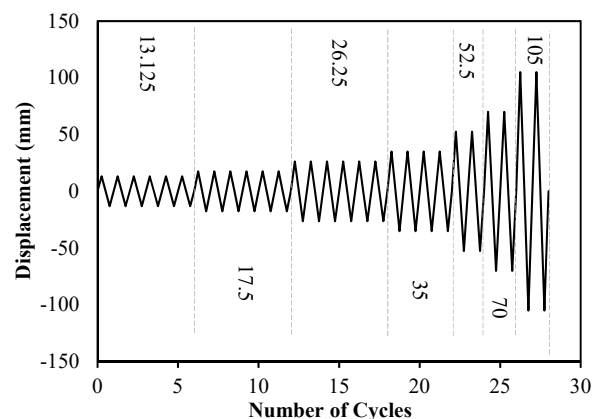


Fig. 10. Loading history

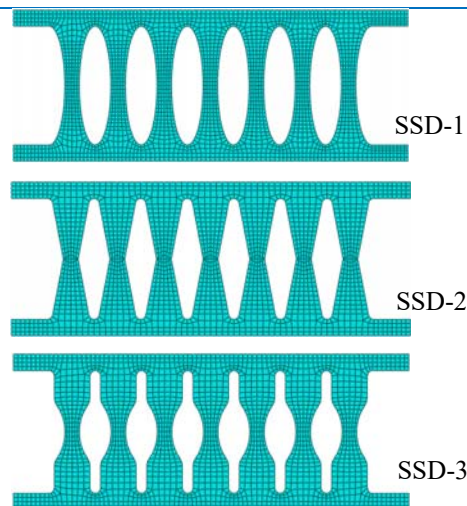


Fig. 14. Meshing of the proposed slit dampers

۴-۱- مقایسه عملکرد میراگر شکافدار SSD-3 با میراگر D0300-2

در این بخش عملکرد میراگرهای پیشنهادی با نمونه D0300-2 مقایسه شده است. لازم به ذکر است که شکل‌های پیشنهادی، حاصل تعداد زیادی سعی و خطا و مقایسه عملکرد آن‌ها است. در نهایت نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های پیشنهاد شده با نمونه D0300-2 در شکل (۱۵)، مقایسه شده است.

شکل ۱۵. مقایسه عملکرد میراگرهای شکافدار پیشنهادی با نمونه مرجع [2] تحت بار افزون

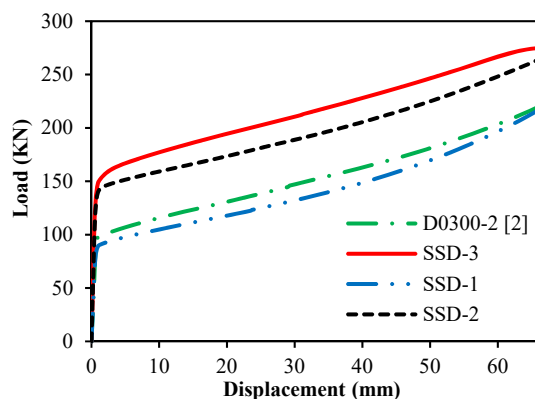


Fig. 15. Comparison of the performance of the proposed slit dampers with specimen [2] under monotonic loading

شکل (۱۵) نشان می‌دهد که عملکرد نمونه‌های SSD-2 و SSD-3 بسیار مناسب‌تر از نمونه D0300-2 است همچنین کانتورهای تنش فون میسز و چگونگی توزیع تنش‌ها نمونه‌های پیشنهادی در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند.

شکل ۱۶. کانتور تنش فون میسز میراگرهای شکافدار پیشنهادی

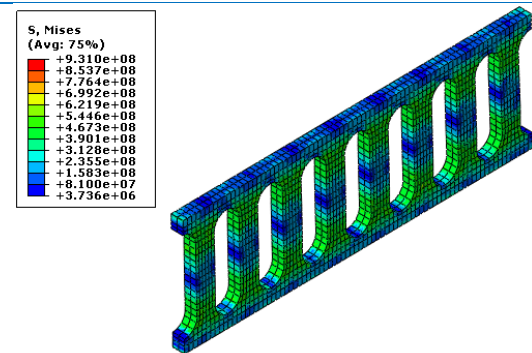


Fig. 12. Von Mises stress contour of D1 connection

۴. میراگرهای شکافدار فولادی پیشنهادی

در این بخش، سه نمونه میراگر شکافدار با تفاوت در شکل هندسی نواری مطابق شکل (۱۳) ارائه شده است به شکلی که وزن تمامی نمونه‌های پیشنهادی با وزن نمونه D0300-2 کاملاً یکسان و برابر ۳/۰۶۲ کیلوگرم است. همچنین ضخامت نمونه‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است.

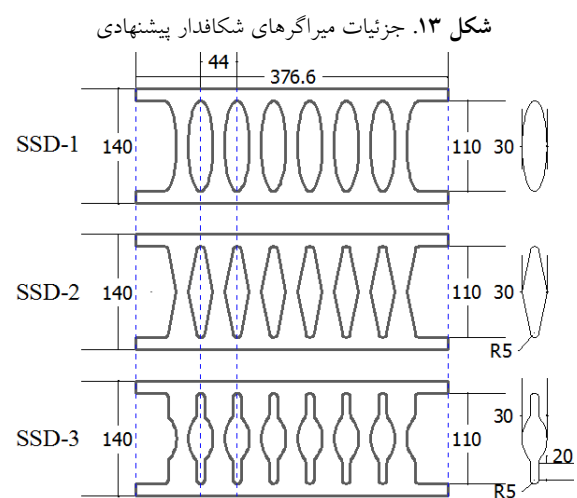


Fig. 13. Details of the proposed slit dampers

جدول ۴. ضخامت میراگرهای شکافدار پیشنهادی

Slit Damper	SSD-1	SSD-2	SSD-3
Thickness (mm)	14.39	12.73	12.00

Table 4. Thickness of the proposed slit dampers

مشخصات فولاد نمونه‌ها و تمامی روند مدل‌سازی و بارگذاری، کاملاً مشابه آنچه در بخش ۱-۳ بیان شده می‌باشد. مش بندی منظم نمونه‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

شکل ۱۴. مش بندی میراگرهای شکافدار پیشنهادی

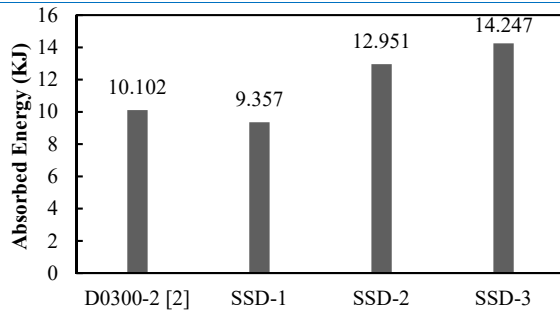


Fig. 17. Assessment of energy absorption capacity of the proposed slit dampers

از طرفی مطابق جدول (۵)، بار حدتسلیم میراگر SSD-3 حدود ۸۰ درصد، بار نهایی آن حدود ۲۵ درصد و سختی آن حدود ۸۳ درصد نسبت به نمونه D0300-2 [2]، بهبود یافته است.

جدول ۵. خلاصه نتایج تحلیل اجزای محدود نمونه‌های پیشنهادی

Specimen	P_y (KN)	P_{max} (KN)	δ_y (mm)	K_d (KN/mm)
SSD-3	159.69	274.58	0.63	253.47
SSD-2	130.86	263.87	0.57	229.58
SSD-1	68.39	216.70	0.46	148.67
D0300-2[2]	88.50	219.73	0.64	138.28

Table 5. The summary of finite element results of the proposed slit dampers

۴-۲- مقایسه عملکرد میراگر شکافدار SSD-3 با میراگر بهینه‌شده

در این بخش، عملکرد میراگر پیشنهادی SSD-3 با میراگر TSSD ارائه‌شده توسط قبرایی و همکارانش [5] (که با استفاده از بهینه‌سازی بدست آمده است) مقایسه شده است. برای ارزیابی عملکرد آن دو میراگر، طول و عرض میراگر پیشنهادی SSD-3 برابر با میراگر TSSD انتخاب شده است و ابعاد آن در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. (ابعاد بر حسب میلی‌متر است). شایان توجه است که وزن دو میراگر تقریباً یکسان است. در جدول (۶)، وزن و ضخامت میراگرها بیان شده است.

جدول ۶. وزن و ضخامت میراگرهای SSD-3 و TSSD

Slit Damper	Weight (Kg)	Thickness (mm)
SSD-3	0.6845	9
TSSD	0.6922	12

Table 6. Weight and thickness of SSD-3 and TSSD dampers

شکل ۱۸. جزئیات میراگرهای SSD-3 و TSSD [2]

SSD-3

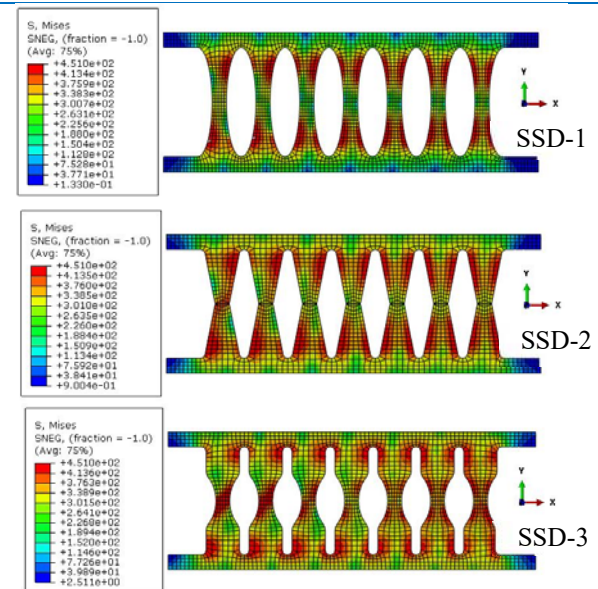


Fig. 16. Von Mises stress contour of the proposed slit dampers

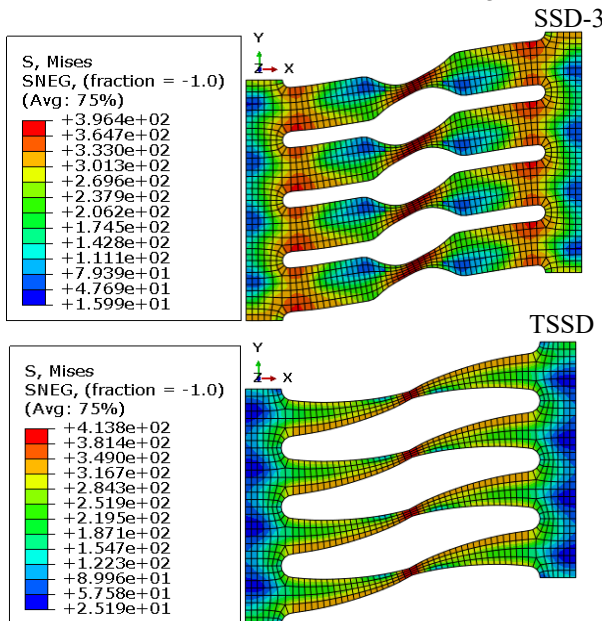
مقایسه کانتور تنش در شکل (۱۶) با شکل (۶) نشان می‌دهد که به محض قرارگرفتن میراگر شکافدار تحت برش، ابتدا قسمت میانی نوارهای آن، مانند تیر پیوند در بادبندهای واگرا، عمل کرده و تغییرشکل پلاستیک را در خود جذب می‌کند و بعد از آن گوشه‌های بالایی نوارها وارد عمل شده و کرنش‌های پلاستیک را جذب می‌کنند. علاوه بر این، فاصله کم دو قسمت صاف بالایی و پایینی نوارها، باعث بهبود مقاومت این میراگر شده است. از طرفی، قسمت مدور میانی نوارها مانند فیوز عمل کرده و شکل‌پذیری این میراگر را فراهم می‌کند. سپس تنش‌های بیشینه به قسمت صاف بالایی و پایینی نوارهای میراگر رفته و چون سطح بیشتری برای پخش و توزیع تنش دارند از این‌رو مقاومت افزایش می‌یابد. سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی در شکل (۱۵)، نشان‌دهنده انرژی جذب‌شده است. پس مقایسه انرژی جذب شده نمونه‌ها در شکل (۱۷) نشان داده شده است. نتایج شکل (۱۷) نشان می‌دهد میراگر پیشنهادی SSD-3 می‌تواند ۴۱ درصد انرژی بیشتری نسبت به نمونه D0300-2 [2] را مستهلک نماید.

شکل ۱۷. ارزیابی ظرفیت جذب انرژی میراگرهای پیشنهادی

Table. 7. The summary of analytical results of SSD-3 and TSSD specimens

نتایج جدول (۷)، بیانگر افزایش ۲/۲۳ برابری سختی نمونه SSD-3، بهبود ۴۵ درصدی مقاومت تسلیم و ۱۶ درصدی مقاومت نهایی آن است. کانتور تنش فونمیسز نمونه‌ها در شکل (۲۰)، نشان‌گر جذب تنش بیشتر توسط میراگر SSD-3 است.

شکل ۲۰. کانتور تنش فونمیسز میراگرهای SSD-3 و TSSD

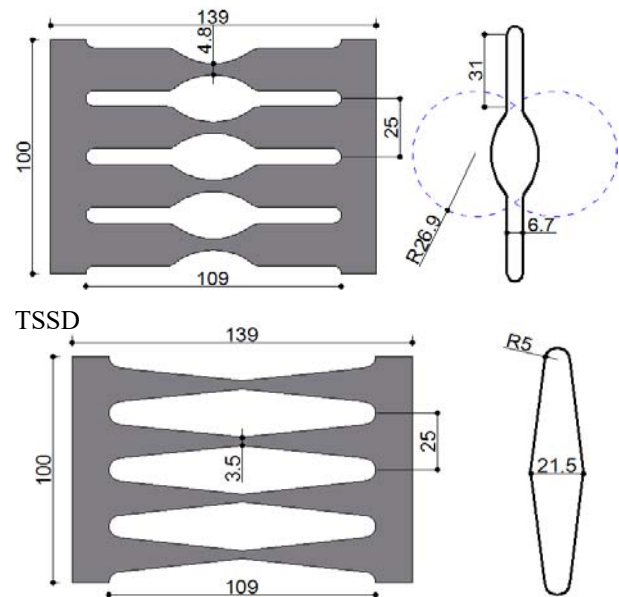
**Fig. 20.** Von Mises stress contour of SSD-3 and TSSD dampers

۵. ارزیابی عملکرد اتصال قاب خمشی مجهز به میراگر شکافدار پیشنهادی

در این بخش، عملکرد اتصال قاب خمشی فولادی مرجع [4] (که در بخش ۲-۳ بیان شد) مجهز به میراگر شکافدار پیشنهادی SSD-3 بررسی شده است. لازم ذکر است که در این بخش، نام میراگر پیشنهادی AD فرض شده است. مشخصات هندسی میراگر AD در شکل (۲۱) نشان داده شده است (ابعاد برحسب میلی‌متر است). روند مدل‌سازی و بارگذاری نیز کاملاً مشابه بخش ۲-۳ است. شایان توجه است که در اتصال خمشی، دو ردیف از این میراگرها استفاده شده است و ابعاد میراگر پیشنهادی طوری انتخاب شده است که وزن دو ردیف از میراگرها در اتصال طبق جدول (۸)، تقریباً یکسان باشد.

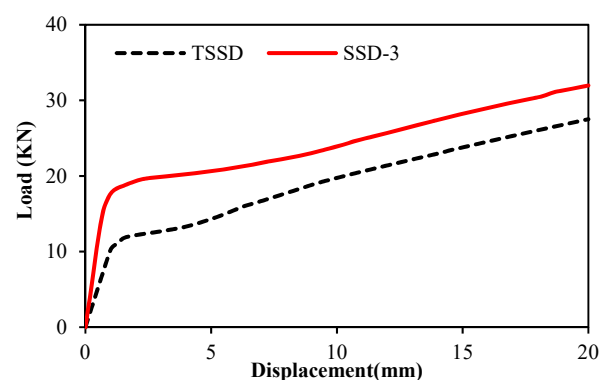
جدول ۸ وزن میراگرهای شکافدار AD و D1

Slit Damper	Weight (Kg)	Thickness (mm)
AD	17.32	15.5

**Fig. 18.** Detail of SSD-3 and TSSD [2] dampers

مشخصات فولاد دو نمونه مطابق جدول (۲) است. مدل، تحت جابه‌جایی افقی به صورت بار افزون در جهت Y، به‌اندازه ۲۰ میلی‌متر قرار گرفته است. از المان‌های Shell چهار گرهی برای مدل‌سازی استفاده شده است. نتایج تحلیل اجزای محدود نمونه‌ها در شکل (۱۹)، مقایسه شده است.

شکل ۱۹. مقایسه عملکرد میراگرهای SSD-3 و TSSD

**Fig. 19.** Comparison of performance of SSD-3 and TSSD

سطح زیر دو منحنی نیرو-جابه‌جایی، نشان‌دهنده جذب ۲۶/۹ درصدی انرژی بیشتر، توسط میراگر شکافدار SSD-3 است. همچنین سایر نتایج تحلیل در جدول (۷) ذکر شده است.

جدول ۷. خلاصه نتایج تحلیل عددی نمونه‌های SSD-3 و TSSD

Specimen	P_y (KN)	P_{max} (KN)	δ_y (mm)	K_d (KN/mm)
SSD-3	17.34	31.97	0.75	23.12
TSSD	11.98	27.52	1.16	10.33

داده است که در آن E_D انرژی مستهلک‌شده، E_{SO} انرژی الاستیک ذخیره‌شده و ξ_{eq} ، نسب میرایی معادل می‌باشد که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [3]:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (۸)$$

شکل ۲۳. انرژی مستهلک‌شده در یک چرخه [3]

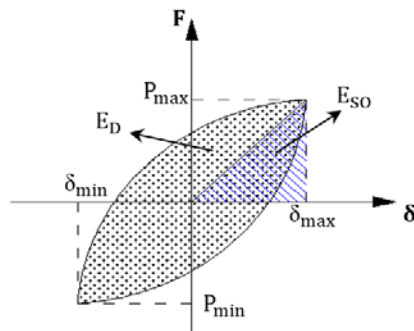


Fig. 23. The dissipated energies in a single cycle [3]

بنابراین مطابق با شکل‌های (۲۲ و ۲۳)، دیگر مشخصات اتصال محاسبه و در جدول (۹) بیان شده است.

جدول ۹. مقایسه نتایج اتصالات AD و D1

Specime	M_y (KN.m)	M_{max} (KN.m)	E_D (KJ)	E_{SO} (KJ)	ξ_{eq}
AD	755	1255	124.28	36.30	0.27
D1	464	820	81.85	22.90	0.28

Table. 9. Comparison of results of AD and D1 connections

با بررسی نتایج جدول (۹)، می‌توان دریافت که با وزن و ویژگی‌های مصالح یکسان، اتصال مجهز به میراگر AD از قابلیت ۵۱/۸ درصد جذب انرژی بیشتری برخوردار است. همچنین میزان تحمل لنگر در اتصال مجهز به AD نسبت به اتصال مجهز به D1 در حالت تسلیم (M_y)، حدود ۶۳ درصد و در حالت بیشینه (M_{max})، حدود ۵۳ درصد افزایش داشته است و میرایی معادل در هر دو اتصال تقریباً یکسان است. با اتصال نقاط اوج منحنی هیستریزیس لنگر-دوران در هر دوره بارگذاری و تبدیل آن به منحنی نیرو-جابجایی، منحنی اسکلتون اتصال مطابق شکل (۲۴) به دست می‌آید. مطابق با شکل (۲۴)، سختی، جابه‌جایی تسلیم، نیروی حد تسلیم و نیروی بیشینه در دو اتصال محاسبه و در جدول (۱۰) نمایش داده شده است.

جدول ۱۰. خلاصه نتایج منحنی اسکلتون

Specimen	P_y (KN)	P_{max} (KN)	δ_y (m)	K_d (KN/m)
AD	215.71	358.57	0.03	7190
D1	132.57	234.28	0.02	6628

D1[4]	17.82	19
-------	-------	----

Table. 8. Weight of AD and D1 slit dampers

شکل ۲۱. جزئیات هندسی میراگر شکافدار پیشنهادی AD

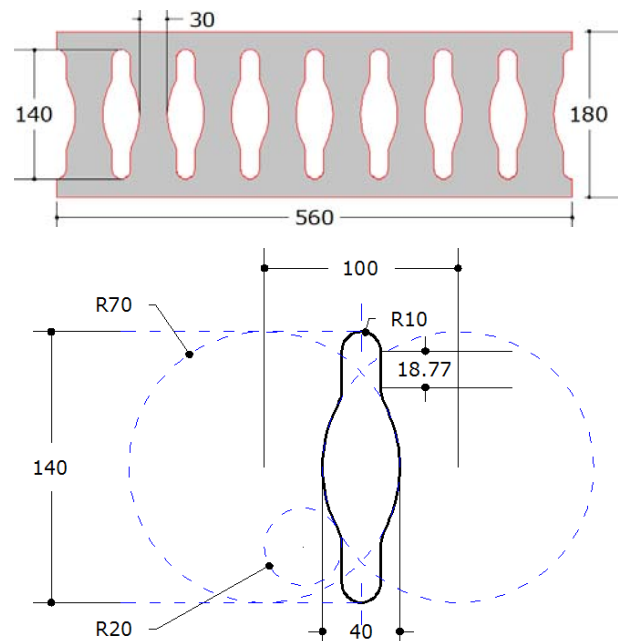


Fig. 21. Detail of the proposed AD slit damper

مقایسه منحنی هیستریزیس لنگر-دوران اتصال قاب خمشی مجهز به میراگر شکافدار فولادی پیشنهادی AD و D1 [4] تحت اثر بار چرخه‌ای در شکل (۲۲) ترسیم شده است.

شکل ۲۲. مقایسه منحنی هیستریزیس لنگر-دوران بین نمونه‌های AD و D1

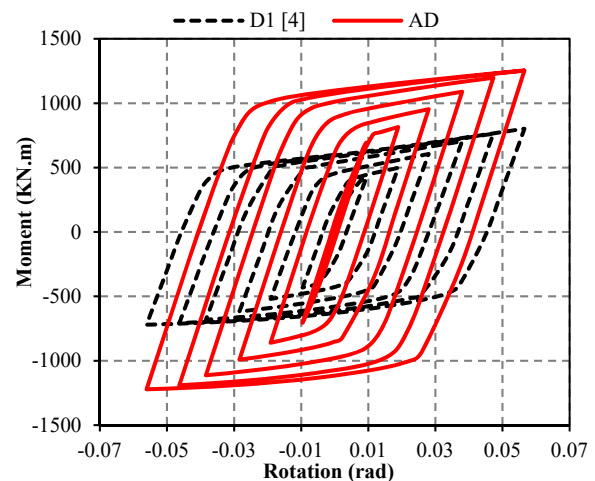


Fig. 22. Comparison of hysteretic moment-rotation curves between specimens AD and D1

مطابق شکل (۲۲)، تقارن منحنی هیستریزیس نشانگر یکسان بودن رفتار اتصال مجهز به میراگر AD در بارگذاری چرخه‌ای است و افزایش چشمگیر مقاومت اتصال مشهود است. در شکل (۲۳)، تصویر شماتیک یک چرخه از منحنی هیستریزیس را نشان

همچنین کانتورهای کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و نواحی تسلیم شده (AC YIELD) میراگرها در شکل های ۲۶ و ۲۷ آمده است.

شکل ۲۶. کانتور کرنش معادل پلاستیک میراگرهای D1 و AD

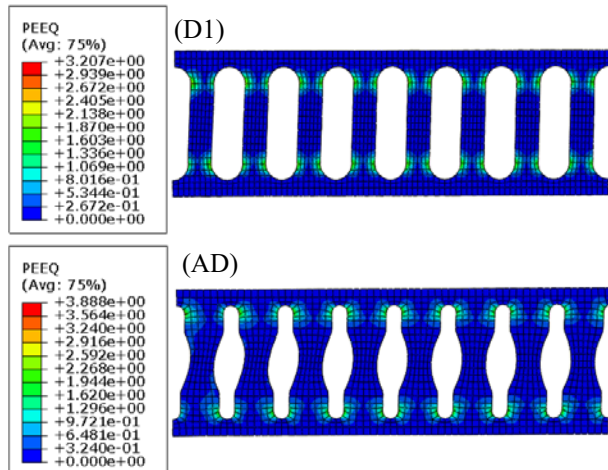


Fig. 26. Equivalent plastic strain contour of D1 and AD dampers
بررسی شکل های (۲۶ و ۲۷) نشان می دهد که در میراگر اتصال AD قسمت های بیشتری وارد مرحله پلاستیک شده و سهم جذب انرژی در قسمت های میانی نوارها نسبت به نمونه D1 بیشتر است. علاوه بر این، بیشینه مقادیر کرنش های معادل پلاستیک نیز نسبت به نمونه D1، تقریباً ۲۱ درصد افزایش یافته که نشان دهنده تمرکز خرابی ها در میراگر پیشنهادی است.

شکل ۲۷. کانتور کرنش نواحی تسلیم میراگرهای D1 و AD

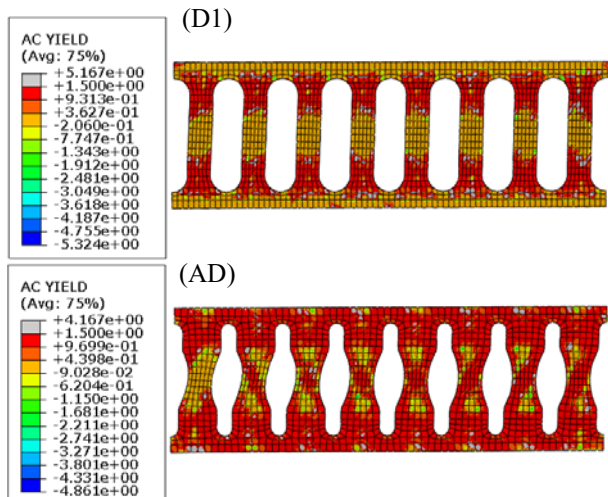


Fig. 27. Contour of yield points of parts in D1 and AD dampers
از دیگر نمونه های آزمایش شده توسط آه و همکارانش [4]، اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون به نام W است. نقص این اتصال که اجرای آن در سازه ها نیز رایج است، کماتش موضعی

Table. 10. The summary of skeleton curve results

شکل ۲۴. مقایسه منحنی اسکلتون نمونه های AD و D1

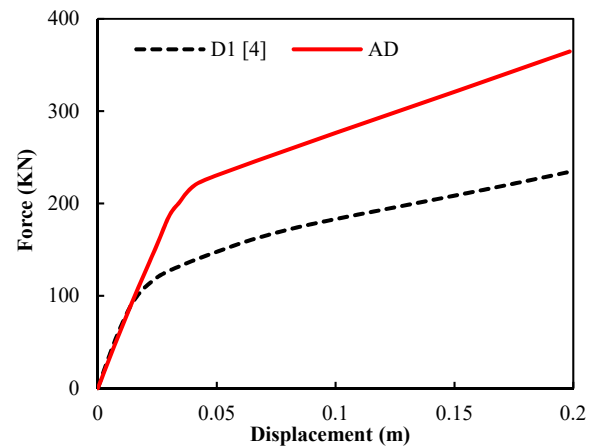


Fig. 24. Comparison of Skeleton curve of specimens AD and D1
مطابق جدول (۱۰)، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی اتصال مجهز به میراگر AD به ترتیب ۶۳ درصد و ۵۳ درصد نسبت به اتصال مجهز به میراگر D1 افزایش یافته است که بیانگر عملکرد بهتر میراگر AD نسبت به میراگر D1 است. کانتور تنش فون میسز اتصال مجهز به میراگر AD در شکل (۲۵) نمایش داده شده است. مقایسه شکل (۲۵) با شکل (۱۲) بیانگر این است که اتصال AD، جذب تنش بیشتری داشته است.

شکل ۲۵. کانتور تنش فون میسز نمونه ی AD

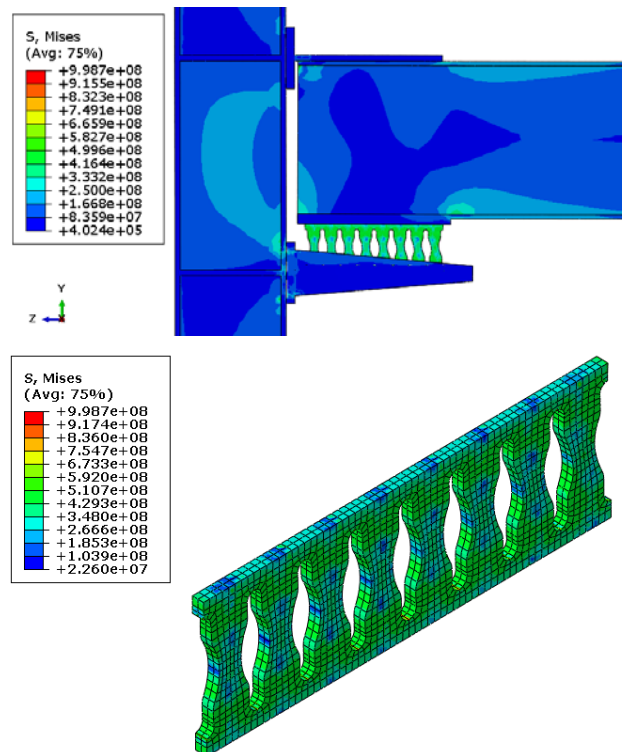


Fig. 25. Von Mises stress contour of AD specimen

۱. کاهش عرض شکاف‌های میراگر، در دو انتهای شکاف و عریض شدن قسمت میانی نوارهای بین شکاف‌ها، عملکرد بسیار بهتری را به همراه داشته است. این برتری هم از لحاظ افزایش مقاومت و هم از نظر افزایش قابلیت اتلاف انرژی قابل بحث است.

۲. میراگر شکافدار پیشنهادی، تحت برش خالص با وزن یکسان نسبت به نمونه‌ی رایج آن، ۴۱ درصد جذب انرژی بیشتر داشته و استفاده از آن در اتصال گیردار تیر به ستون، تحت بارگذاری چرخه‌ای، باعث ۵۱/۸ درصد اتلاف انرژی بیشتر شده است.

۳. کاهش عرض میانی نوارهای میراگر شکافدار، موجب کاهش مقادیر تنش‌های فونمیسز در اعضا اصلی سازه‌ای مثل تیر و ستون و سبب افزایش تمرکز تنش در خود میراگر شده است. علت این امر این است که برخلاف نمونه رایج این میراگر، علاوه بر ابتدا و انتهای شکاف، قسمت‌های میانی نوارها نیز از همان ابتدای بارگذاری در جذب تغییرشکل‌های پلاستیک سهیم هستند.

۴. توزیع کرنش معادل پلاستیک در میراگر پیشنهادی، نشان‌دهنده مصون ماندن اعضای سازه‌ای (تیر و ستون) از تغییرشکل‌های پلاستیک است؛ که این ویژگی سبب می‌شود تا بتوان پس از اتمام زلزله، میراگر آسیب‌دیده را تعمیر و یا تعویض نمود.

۵. بیشترین مقدار نیرو و لنگر اتصال در منحنی‌های هیستریزس با ارائه هندسه خاص شکاف‌ها در میراگر شکافدار فولادی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

۶. استفاده از این میراگر پیشنهادی در اتصال قاب خمشی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای اتصال جوشی رایج تیر به ستون شود؛ زیرا استفاده از این شکل هندسی میراگر شکافدار فولادی، علاوه بر جذب بیشتر انرژی، از کمانش موضعی بال تیر حین زلزله نیز جلوگیری می‌کند.

۷. مراجع

- [1] Wada A., Huang Y.H., Yamada T., Ono Y., Sugiyama S., Baba M. & Miyabara T. 1997 Actual size and real time speed tests for hysteretic steel damper. *Proceedings of Stessa*, 97, 778-785.
- [2] Lee M. H., Oh S. H., Huh C., Oh Y. S., Yoon M. H. & Moon T. S. 2002 Ultimate energy absorption capacity of steel plate slit dampers

بال تیر پس از تحمل چندین چرخه‌ی بارگذاری است. مقایسه نمودار لنگر-دوران اتصال جوشی و اتصال مجهز میراگر پیشنهادی AD در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

شکل ۲۸. مقایسه منحنی هیستریزس لنگر-دوران بین نمونه‌های AD و W

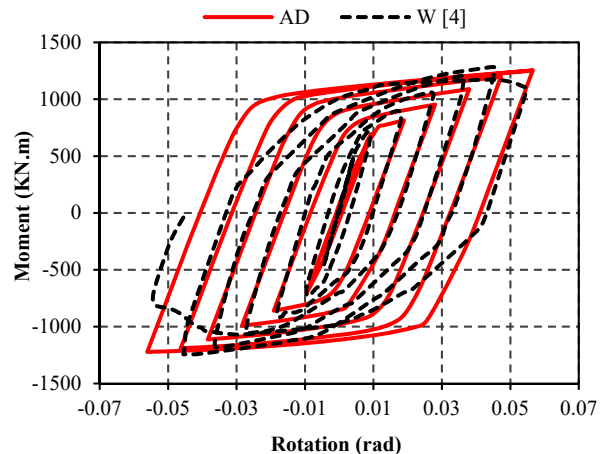


Fig. 28. Comparison of hysteretic moment-rotation curves between AD and W specimens

مطابق شکل (۲۸) و با بررسی نمودار لنگر-دوران دو اتصال، نتیجه می‌شود اتصال مجهز به AD از جذب انرژی بیشتری برخوردار است. همچنین از نشانه‌های بارز در این منحنی، پایداری و ثبات سختی اتصال AD در چرخه‌های متوالی است. بنابراین میراگر AD می‌تواند جایگزین مناسبی برای اتصال جوشی رایج باشد و می‌تواند از کمانش موضعی بال‌ها جلوگیری کند؛ زیرا خرابی‌ها تنها در میراگر متمرکز شده و آسیبی به تیر و ستون وارد نمی‌شود. همچنین، پس از اتمام زلزله می‌توان میراگری جدید را جایگزین آن نمود.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور رفع مشکل ضعف اتصال تیر به ستون در قاب‌های خمشی فولادی در برابر زلزله، شکل هندسی جدیدی برای میراگرهای شکافدار فولادی پیشنهاد شد. با توجه به تغییر پارامترهای هندسی مؤثر در این میراگر، تأثیر آن‌ها در توزیع تنش‌های فونمیسز، کرنش‌های معادل پلاستیک، منحنی‌های نیرو-جابجایی، لنگر-دوران و همچنین میزان استهلاک انرژی، بررسی شده است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل‌شده از این پژوهش، به شرح زیر است:

- [9] Saffari H., Hedayat A.A. & Poorsadeghi Nejad M. 2013 Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, **80**, 138-152.
- [10] Hedayat A.A. 2015 Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *Journal of Constructional Steel Research*, **114**, 30-50.
- [11] Tagawa H., Yamanishi T., Takaki A. & Chan R. 2016 Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, **117**, 24-34.
- [12] Ahmadie Amiri H., Pournamazian Najafabadi E. & Estekanchi H.E. 2018 Experimental and analytical study of Block Slit Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, **141**, 167-178.
- [13] Bayat K. & Shekastehband B. 2019 Seismic performance of beam to column connections with T-shaped slit dampers. *Thin-Walled Structures*, **141**, 28-46.
- [14] FEMA-350. 2000 Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings. *SAC Joint Venture*.
- subjected to shear force. *Steel Structures*, **2**(2), 71-79.
- [3] Chan R. & Albermani F. 2008 Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, **30**(4), 1058-1066.
- [4] Oh S.H., Kim Y.J. & Ryu H.S. 2009 Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Engineering Structures*, **31**(9), 1997-2008.
- [5] Ghabraie K., Chan R., Huang X. & Xie Y.M. 2010 Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures*, **32**(8), 2258-2267.
- [6] Khoshnoodian F. & Kiani M. 2010 Seismic performance of steel slit dampers in steel structurals with special moment frames. *First national conference on structure, earthquake and geotechnics, Babolsar* (In Persian).
- [7] Koken A. & Koroglu M.A. 2011 Steel plate slit damper using on steel frames. *Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences*, **6**, 1093-1101.
- [8] Karavasilis T.L., Kerauala, S. & Hale E. 2012 Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, **70**, 358-367.

Seismic performance enhancement of rigid beam to column moment connection using modified steel slit damper

J. Hassanzadeh¹, S.R. Sarafrazi², M. Khatibinia^{3*}

1. M.Sc. Graduated in Structural Engineering, University of Birjand
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand

*m.khatibinia@birjand.ac.ir

Abstract

The high ductile of steel moment-resisting frames (SMRFs) during earthquakes has been challenged due to the brittle fractures of their welded (or rigid) beam to column connections. Consequently, SMRFs have suffered severe damages and have produced collapse in main structural members (such as beams and columns). During previous years, energy dissipative devices in the connectionsof beam to column of SMRFs have been developed by some researchers to resolve the ductility problem in rigid beam to column connections of SMRFs. Slit steel damper (SSD) as one of these devices contains a plate or a standard section with a number of slits in its web. The damper can dissipate the seismic input energy with the inelastic deformation absorption and also prevent seismic energy transmission to the main structural members (such as beam and column). Due to the uniform strut width of SSD, the stress concentration at the end parts of the damper struts is produced and the unbalanced distribution of von-Mises stresses along the struts is shown. Furthermore, slit dampers are commonly fractured in the end parts of its struts. The low participation of the middle parts of struts in the energy dissipation is caused. Henec, finding the best shape of slits has been attracted by researchers. In this study, a new geometry shape of the SSD slits was proposed in order to improve the performance of the rigid beam to column connection of steel structures subjected earthquake loading. For investigating the performance of the proposed damper, the behavior of a rigid connection with the common and proposed SSD was assessed subjected to monotonic and cyclic loads in ABAQUS software. The proposed SSD has the same weight in comparison with that of the common SSD. The results of the assessment were shown that in the proposed SSD reducing the width of damper slits in two its ends and increasing its middle parts improved its seismic performance in comparison with that of the common SSD. The proposed damper in comparison with common one subjected to shear load can effectively contribute to about 41% of the total dissipated energy. Furthermore, using the proposed damper in a rigid beam to column connection subjected to cyclic loading can effectively contribute to about 51.8% of the total dissipated energy. The performance of the proposed SSD shown that first, the middle part of strip treats as fuse and the stress concentration at the end parts of the damper struts is not produced. The distribution of stress is caused that the suitable ductility can provide in the connection. Then, the maximum stresses transfer to the top and bottom of strips. Due to the distribution of maximum stresses in more area of SSD, the strength of the proposed damper increases. Therefore, withstanding a large number of loading cycles until the failure in this proposed damper, it can be used instead of welded connection in SMRFs. In the future studies, the best geometry shape of the SSD slits subjected cyclic loading can be found in the framework of an optimization problem.

Keyword: Slit steel damper, Geometry shape, Slit, Dissipation of energy, Rigid connection.