

توسعه میراگر شکافدار در محل اتصال تیر به ستون با ایجاد شکاف‌های

بیضی

سعید فراهی شهری^۱، سید روح الله موسوی^{۲*}

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۱۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۴/۳]

چکیده - میراگر شکافدار فولادی یک ورق یا پروفیل استاندارد فولادی با تعدادی شکاف بریده شده در جان آن است. نوارهای باقیمانده در جان میراگر، با جذب تغییر شکل های غیر الاستیک، انرژی لرزه‌ای را مستهلک کرده و مانع از انتقال آن به اعضای سازه‌ای اصلی می‌شوند. میراگرهای شکافدار فولادی با عرض نوار یکنواخت، به منظور جلوگیری از شکست ترد اتصالات و خرابی اعضای سازه‌ای اصلی، در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده اند. طبق تحلیل‌های صورت گرفته در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، استفاده از میراگرهای شکافدار با عرض نوار یکنواخت در پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی، موجب تمرکز تنش در قسمت‌های انتهایی نوارها، توزیع نامتوازن تنش‌های فون میسز در طول نوارها و عدم مشارکت قسمت‌های میانی نوارهای میراگر شکافدار در استهلاک انرژی شده است. بنابراین، به منظور رفع این مشکل و افزایش سطح جذب انرژی در قسمت‌های انتهایی نوارها، میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی پیشنهاد شده و با میراگر شکافدار ارائه شده در مقالات قبلی، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحلیل اتصالات تحت بارگذاری تناوبی، نشان داد که استفاده از میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی، موجب توزیع بهتر تنش‌ها در طول نوارهای میراگر، عملکرد هیستریزس بهتر و افزایش میزان جذب انرژی در اتصال شده است. نتایج نشان داد که میزان استهلاک انرژی و بیشینه دوران پلاستیک تجمعی تحمل شده به وسیله‌ی اتصال مجهز به میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی نسبت به میراگر شکافدار با عرض شکاف ثابت، به ترتیب، ۹۹/۶ و ۲۶/۸ درصد افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: زلزله، اتصال تیر به ستون، میراگر شکافدار فولادی، شکاف بیضی.

۱- مقدمه

شکل‌پذیری اتصالات انجام شد و تعداد زیادی از اتصالات اصلاح شده پیشنهاد شد. در سال ۱۹۹۷، وادا و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی روی میراگر شکافدار فولادی انجام دادند [۲]. میراگر شکافدار در محل برکت نصب شده روی تیر، در قاب اصلی مونتاژ شده است. نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی نشان داد که میراگر شکافدار فولادی حلقه هیستریزس پایداری داشته است.

در سال ۲۰۰۲، لی و همکاران به منظور جلوگیری از کمانش بادبندهای ضربدری و جذب انرژی ناشی از زلزله، از میراگر شکافدار فولادی در محل اتصال بادبندهای ضربدری استفاده

در پی وقوع زلزله‌های نورتریج در آمریکا (سال ۱۹۹۴ میلادی) و کوبه در ژاپن (سال ۱۹۹۵ میلادی) بسیاری از ساختمان‌ها دچار خرابی شدید و نابودی اعضای سازه‌ای شدند. در سازه‌های فولادی، بیشتر خرابی‌های ظاهر شده در محل اتصالات اتفاق افتاده است. اتصالات صلب طراحی شده قبل از این زمین لرزه‌ها به علت ظرفیت چرخش پلاستیک کمی که داشتند، دچار شکست ترد شده و در نهایت منجر به خرابی کل سازه شده‌اند [۱]. پس از وقوع این زمین لرزه‌ها، پژوهش‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای به منظور مقاوم‌سازی و افزایش

در سال ۲۰۱۰، قبرایی و همکاران به منظور بهینه‌سازی شکل میراگر شکافدار از روش بهینه‌سازی سازه‌ای تکاملی دو جهته (BESO) استفاده کردند [۷]. یک میراگر شکافدار که پیش‌تر به وسیله‌ی چان و البرمانی ارائه شده بود [۵]، به عنوان طرح اولیه در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به استهلاک انرژی بالا در واحد حجم، تابع استهلاک انرژی مجموع، حداکثر شده است. برای ساده‌سازی و کاهش هزینه ساخت، محدودیت‌هایی نیز در بهینه‌سازی اعمال شده است. نتایج نشان داد که نمونه بهینه با شکاف‌های لوزی شکل نسبت به نمونه اولیه در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی و تاریخچه بارگذاری، ۳۷ درصد استهلاک انرژی بیشتری داشته است.

در سال ۲۰۱۰، خوشنودیان و کیانی عملکرد میراگر شکافدار را در یک سازه فولادی ۱۰ طبقه به وسیله‌ی تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی بررسی کردند [۸]. این پژوهش به منظور انتخاب یک معیار مناسب برای ارزیابی تاثیر میراگر روی پاسخ سازه و دستیابی به توزیع مناسب جانمایی میراگر در پلان و ارتفاع سازه انجام شد. در بررسی‌های انجام شده معیار جابه‌جایی نسبی طبقات به عنوان یک معیار مناسب در بررسی عملکرد میراگر شکافدار در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است که افزودن تعداد میراگرها در طبقات تا یک حد معین، در بهبود پاسخ سازه موثر بوده است اما افزودن تعداد میراگرها بیش از آن حد، تاثیری در بهبود پاسخ سازه نداشته است.

در سال ۲۰۱۱، کاراواسیلیس و همکاران یک طراحی لرزه‌ای بر مبنای حداقل خرابی را برای ساختمان‌های فولادی مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. سیستم‌های مجهز به وسایل استهلاک انرژی به علت عدم امکان کاهش هم‌زمان تغییر مکان نسبی و شتاب کل طبقات قادر به تفکیک خرابی سازه‌ای و غیر سازه‌ای نیستند، اما کاراواسیلیس و همکاران نشان دادند که با ترکیب هم‌زمان میراگرهای ویسکوز و میراگرهای شکافدار در قاب‌های خمشی فولادی تغییر مکان‌های نسبی و شتاب‌های کل را می‌توان به صورت هم‌زمان کاهش داد.

در سال ۲۰۱۲، توحیدی مقدم و سعیدمنیر گونه جدیدی از میراگرهای شکافدار فولادی با مقطع لوله را بررسی کردند

کردند [۳]. در طی این پژوهش که هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تئوری انجام شد؛ ظرفیت نهایی جذب انرژی به وسیله‌ی میراگر شکافدار فولادی تحت نیروهای برشی مورد بررسی قرار گرفت. لی و همکاران به وسیله‌ی روش مدل سه خطی، منحنی بار-جابه‌جایی را تحت بار یکنواخت پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که میراگر شکافدار فولادی در معرض نیروهای برشی، رفتار هیستریزس پایداری داشته است.

در سال ۲۰۰۸، بناونت روش طراحی لرزه‌ای با مفهوم ترکیبی سختی و انعطاف پذیری را در سازه بتن مسلح مورد استفاده قرار داد [۴]. به همین منظور ستون‌ها لاغر و با آرماتور برشی سنگین طراحی شدند تا شکل پذیری داشته باشند و وسایل استهلاک انرژی و دیوارهای بتن مسلح کمکی که میراگرهای شکافدار را به قاب متصل می‌کردند؛ عمداً با سختی زیاد ساخته شدند.

در سال ۲۰۰۸، چان و البرمانی میراگر شکافدار را در محل اتصال بادبند شورون به تیر استفاده کردند و به منظور دستیابی به بهترین نسبت عرض به طول نوار، نمونه‌های مختلف میراگر شکافدار را تحت آزمایش تناوبی قرار دادند [۵]. میراگر شکافدار، ظرفیت استهلاک انرژی در محدوده‌ی ۶/۹ تا ۱۰/۳ کیلوژول را تأمین کرده است. نتایج نشان داد که این میراگرها به طور متوسط، پس از تغییر مکان تجمعی ۵۰۰ میلی‌متر دچار شکست شده‌اند. میراگر شکافدار با کوچکترین نسبت عرض به طول نوار، کمترین نیرو و نمونه میراگر شکافدار با بزرگترین نسبت عرض به طول نوار، بزرگترین نیرو را تحمل کرده است. در سال ۲۰۰۹، آه و همکاران به منظور رفع مشکل ضعف اتصالات تیر به ستون قاب‌های خمشی فولادی در برابر زلزله، اتصال سازه‌ای با میراگر شکافدار را پیشنهاد کردند [۶]. آزمایش بارگذاری تناوبی، رفتار هیستریزس خوب اتصال مجهز به میراگرهای شکافدار را نشان داد. همچنین، استهلاک انرژی و تغییر شکل پلاستیک، فقط در میراگرهای شکافدار متمرکز شده و از رفتار غیرالاستیک تیر و ستون جلوگیری شده است. میانگین دوران پلاستیک اتصالات ۰/۳۷ رادیان بوده و تقریباً ۹۴ درصد از کل انرژی به وسیله‌ی میراگرها جذب شده است.

در سال ۲۰۱۲، مشتاق و همکاران کاربرد میراگر شکافدار لوله‌ای را بر رفتار خرابی شبکه‌های تخت دو لایه فضاکار مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. این میراگر با اصلاح بار کماتشی عضو، فرصت توزیع مجدد نیرو را در اعضای دیگر داده و مانع از خرابی پیش رونده شده است. مشتاق و همکاران همچنین تاثیر استفاده از میراگرهای شکافدار لوله‌ای را در خرابی پیش رونده قاب های سازه ای بررسی کردند [۱۶]. استفاده از میراگر شکافدار لوله‌ای علاوه بر کاهش تغییر مکان نسبی طبقات، در مواقع خرابی موضعی یک عضو، موجب کاهش نیروی محوری ستون‌ها و مهاربندها شده و از خرابی پیش رونده جلوگیری کرده است.

در سال ۲۰۱۳، صفاری و همکارانش به منظور افزایش شکل پذیری اتصالات خمشی تیر به ستون، نمونه‌های جدیدی از اتصالات با میراگرهای شکافدار پیشنهادی را ارائه کردند [۱]. آن‌ها برای یافتن بهترین شکل میراگرهای شکافدار، 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 به منظور دستیابی به شکل‌پذیری مورد نظر در اتصال را ارائه کردند.

با توجه به تمرکز تنش ایجاد شده در قسمت‌های انتهایی نوارهای میراگر شکافدار استفاده شده در مقالات گذشته، شکست اتصال در این نواحی اتفاق افتاده است؛ بنابراین، در این مقاله به منظور بهبود عملکرد اتصال، میراگرهای شکافدار با عرض متغیر نوارها به گونه‌ای که قسمت‌های میانی نوارها، سطح جاذب انرژی کمتری داشته و قسمت‌های انتهایی نوارها سطح جاذب بیشتری داشته باشند، پیشنهاد شده است. با توجه به مطالب گفته شده، میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی با میراگر شکافدار استفاده شده در مقالات قبلی که عرض شکاف‌های آن ثابت بوده، مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- معرفی میراگر شکافدار فولادی

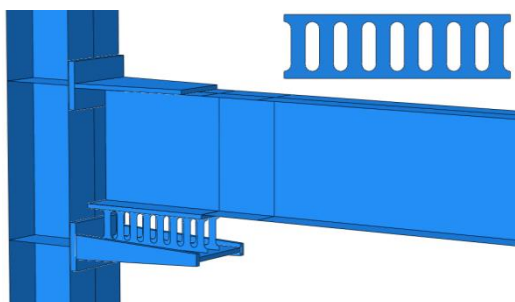
میراگر شکافدار فولادی یک ورق یا یک پروفیل استاندارد فولادی با تعدادی شکاف بریده شده در جان آن است. تحت

[۱۰]. در این میراگر به جای ایجاد شکاف در جان پروفیل I شکل، شکاف‌هایی در جدار لوله ایجاد شده است. یک قاب فولادی ۵ طبقه مجهز به مهاربند قطری شامل میراگر شکافدار لوله ای مدل‌سازی شده و نتایج نشان داد که استفاده از این میراگر موجب کاهش چشمگیر جابه‌جایی و برش پایه شده است. بیشینه مقدار برش پایه در حالت استفاده از میراگر تقریباً ۳۶ درصد کاهش داشته است. توحیدی مقدم و سعیدمنیر همچنین میراگرهای شکافدار لوله‌ای را در محل اتصال تیر به ستون در یک سازه قاب خمشی ۱۵ طبقه مدل‌سازی کردند [۱۱]. به منظور جلوگیری از وقوع طبقه نرم در تمامی طبقات از میراگر شکافدار استفاده شد. نتایج تحلیل سازه با میراگر، اتلاف انرژی بالا، کاهش جابه‌جایی طبقات و برش پایه را نسبت به سازه بدون میراگر نشان داد.

در سال ۲۰۱۲، زهرائی و امین دهقان عملکرد مهاربند قوطی در قوطی [۱۲] و لوله در لوله [۱۳] را تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. این مهاربندها به ترتیب، متشکل از دو قوطی (داخلی و بیرونی) و دو لوله (داخلی و بیرونی) بوده است. به منظور استهلاک انرژی لرزه ای و جلوگیری از کماتش زود هنگام اعضای مهاربندی در طول محدودی از جدار قوطی و لوله بیرونی شکاف‌هایی مشابه میراگر شکافدار ایجاد شده است. منحنی‌های هیستریزس حاصل از تحلیل، رفتار چرخه‌ای پایدار و ظرفیت استهلاک انرژی بالایی را نشان داده است [۱۲ و ۱۳].

در سال ۲۰۱۲، کوکن و کروگلو [۱۴] سه نمونه اتصال مختلف را تحت آزمایش تناوبی با مقیاس واقعی قرار دادند. نمونه اول یک اتصال تیر به ستون معمولی، نمونه دوم اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر لاستیکی و نمونه سوم، اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکافدار و میراگر لاستیکی بوده است. نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی نشان داده است که اتصال جدید پیشنهاد شده که ترکیبی از میراگر شکافدار فولادی و میراگر لاستیکی بوده، استهلاک انرژی و تغییر شکل های پلاستیک را در خود متمرکز کرده و مانع از انتقال آن به تیر و ستون شده است.

شده‌ی اتصال D2 در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در مدل‌سازی تیر، ستون، سخت‌کننده‌های ستون و میراگر از المان shell و در مدل‌سازی ورق‌های اتصال T شکل و ورق اتصال میراگرها به بال تحتانی تیر از المان solid استفاده شده است. مقطع H400x408x21x21 برای تیر و H582x300x12x17 برای ستون در نظر گرفته شده است. ابعاد سایر قسمت‌ها و الگوی بارگذاری تناوبی نیز مطابق مرجع [۶] در نظر گرفته شده است.



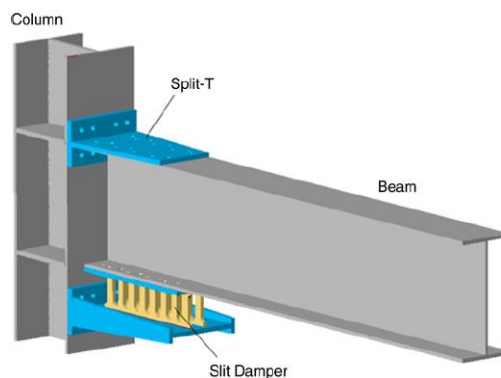
شکل (۲) مدل‌سازی اتصال D2 ارائه شده به وسیله‌ی آه و همکاران

رفتار فولادهای استفاده شده در حالت الاستیک و پلاستیک به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. به منظور انجام تحلیل غیرخطی اتصال تیر به ستون، آثار غیرخطی هندسی و ویژگی‌های پلاستیسیته فولاد برای هر یک از اعضاء تعریف شده است. مشخصات مکانیکی فولاد استفاده شده در جداول (۱) و (۲) گفته شده است. منحنی تنش-کرنش فولاد میراگر شکافدار در شکل (۳) آورده شده است. منحنی تنش-کرنش سایر اعضاء به صورت دوخطی در نظر گرفته شده است. رفتار پلاستیسیته فولاد بر اساس معیار تسلیم فون میسز در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی فولاد در مقاطع مختلف [۱۸]

مقطع	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (Kg/m ³)	ضریب پواسون
تیر، ستون و ورق‌های اتصال	۲۱۴	۷۸۵۰	۰٫۳
میراگر	۱۹۳	۷۸۵۰	۰٫۳

تغییر شکل‌های نسبی کوچک بین دو بال تکیه‌گاهی، نوارهای میراگر شکافدار فولادی مانند یک سری از تیرهای با انتهای نسبتاً ثابت عمل کرده و به صورت دو قوسی تغییر شکل می‌دهند [۵]. در میراگر شکافدار فولادی نوارهایی که بین شکاف‌ها قرار دارند، تغییر شکل‌های غیر الاستیک را جذب کرده و مفاصل پلاستیک در آنها ایجاد می‌شود که موجب استهلاک انرژی زلزله می‌شود [۶]. از هیچ تکنیک ویژه‌ای در ساخت این میراگرها استفاده نشده است؛ در نتیجه این میراگرها به آسانی قابل ساخت خواهند بود [۵]. مانند شکل (۱) با توجه به این که میراگر شکافدار فولادی ارائه شده به وسیله‌ی آه و همکاران، در بال تحتانی تیر در محل اتصال نصب می‌شود، تعمیر و جایگزینی آن پس از زلزله آسان بوده و نیازی به حذف بتن سقف ندارد. از طرف دیگر استفاده از اتصال پیچی میراگر شکافدار فولادی به وسیله‌ی بولت‌های پر مقاومت قابل تعویض به تیر و ستون، سبب امکان تعمیر و جایگزینی آسان‌تر آن نسبت به استفاده از جوش می‌شود. رفتار هیستریزس عالی، دسترسی آسان، سهولت جایگزینی پس از زلزله و هزینه مناسب میراگرهای شکافدار فولادی از دلایلی است که آنها را به عنوان یک گزینه مناسب مقاوم سازی سازه‌های فولادی معرفی کرده است [۶].



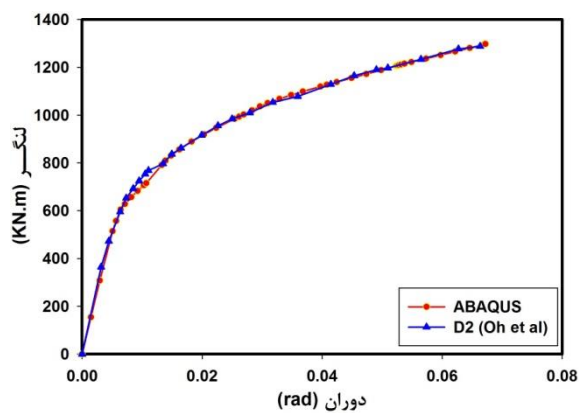
شکل (۱) اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکافدار فولادی [۶]

۳- روش مدل‌سازی و بررسی صحت سنجی

اتصال D2 آه و همکاران [۶] در نرم‌افزار المان محدود آباکوس [۱۷] مدل‌سازی شده است و درستی آزمایشی نتایج نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است. شکل (۲) نمونه مدل‌سازی

شده است.

مش‌بندی هر یک از قطعات به صورت جداگانه انجام شده است و مش استاندارد خطی برای همه قطعات در نظر گرفته شده است. برای المان‌های shell نوع مش S4R و برای المان‌های solid نوع مش C3D8R استفاده شده است. در شکل (۵) منحنی اسکلتون نمونه مدل‌سازی شده و نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده که نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی آه و همکاران [۶]، هماهنگی بسیار خوب و خطای متوسط کمتر از ۲ درصد را نشان داده است.



شکل (۵) صحت سنجی مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی

۴- مشخصات هندسی نمونه‌های مدل‌سازی شده

به منظور مقایسه میراگرهای شکافدار با شکاف بیضی و میراگر شکافدار ارائه شده در مقالات گذشته با عرض شکاف ثابت، نمونه‌های ESSD5 و D2-R20 مطابق شکل‌های (۶) و (۷) مدل‌سازی شده‌اند. مشخصات هندسی این میراگرها، در جدول (۳) گفته شده است. ابعاد شکاف‌ها به گونه‌ای محاسبه شده است که وزن نمونه‌ی D2-R20 تقریباً با وزن نمونه‌ی ESSD5 مساوی باشد.

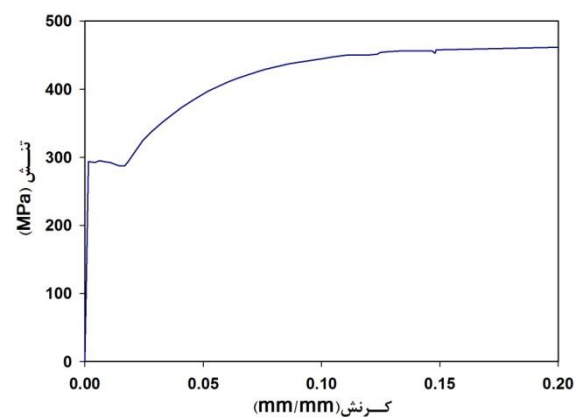
جدول (۳) مشخصات هندسی میراگرهای شکافدار با شکاف بیضی و

شکاف با عرض ثابت

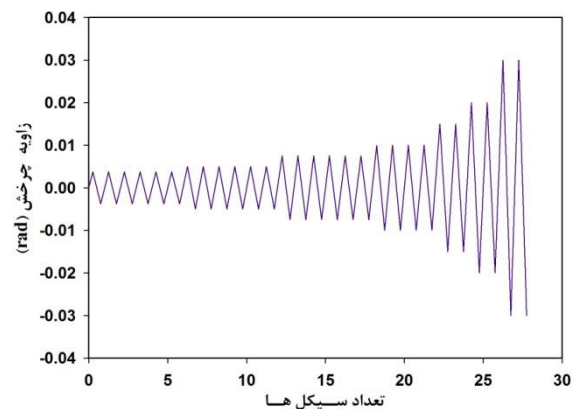
نام اتصال	B (mm)	r (mm)	H _r (mm)	L (mm)	t (mm)
ESSD5	۳۲	۲۴	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
D2-R20	۴۰	۲۰	۱۴۰	۶۴۰	۱۹

جدول (۲) مشخصات مکانیکی فولادهای استفاده شده [۱۸]

مقطع	F _y (MPa)	F _u (MPa)	Elongation (%)
جان تیر	۳۳۲/۶۶	۴۷۸/۵۰	۲۶/۶۳
بال تیر	۳۱۲/۰۹	۴۷۱/۲۱	۲۹/۶۰
میراگر	۲۸۷/۰۷	۴۵۴/۶۹	۲۹/۸۰
بال ستون	۳۰۹/۶۰	۴۵۰/۷۷	۳۰/۷۳
جان ستون	۳۳۵/۱۷	۴۶۱/۴۶	۲۵/۹۱

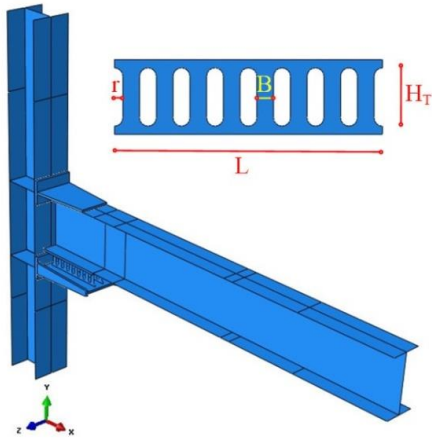


شکل (۳) منحنی تنش کرنش فولاد میراگر شکافدار [۱۸]

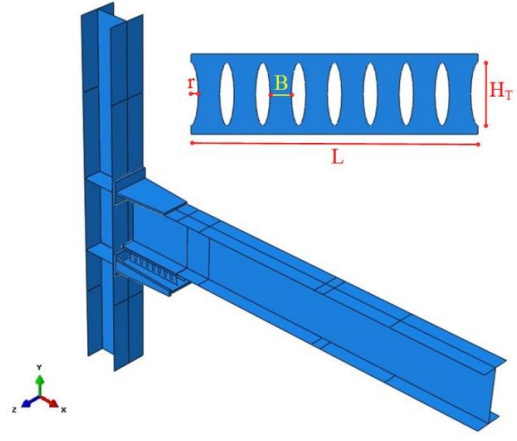


شکل (۴) الگوی بارگذاری FEMA-350

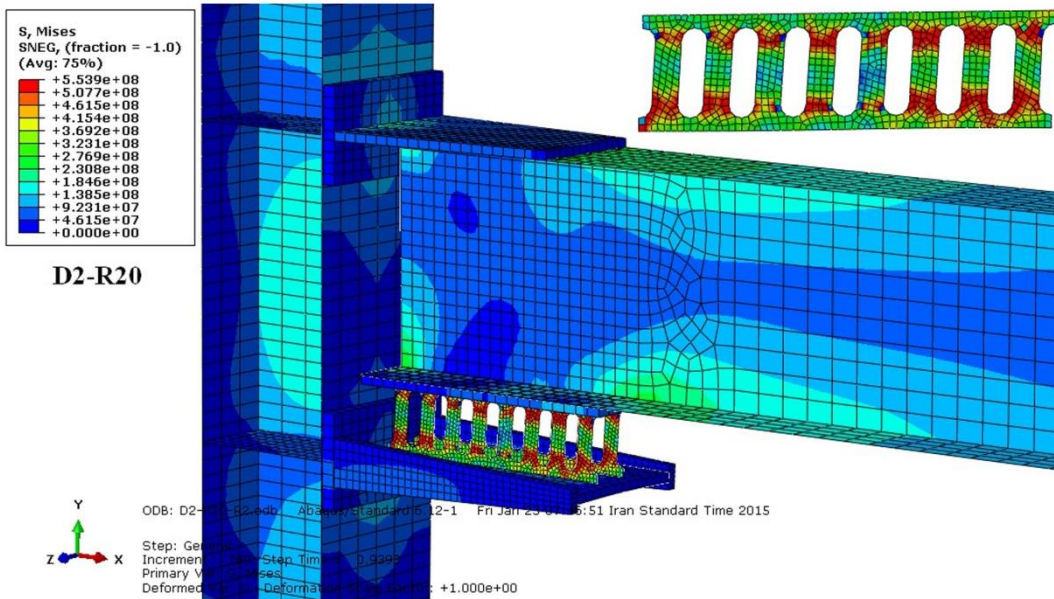
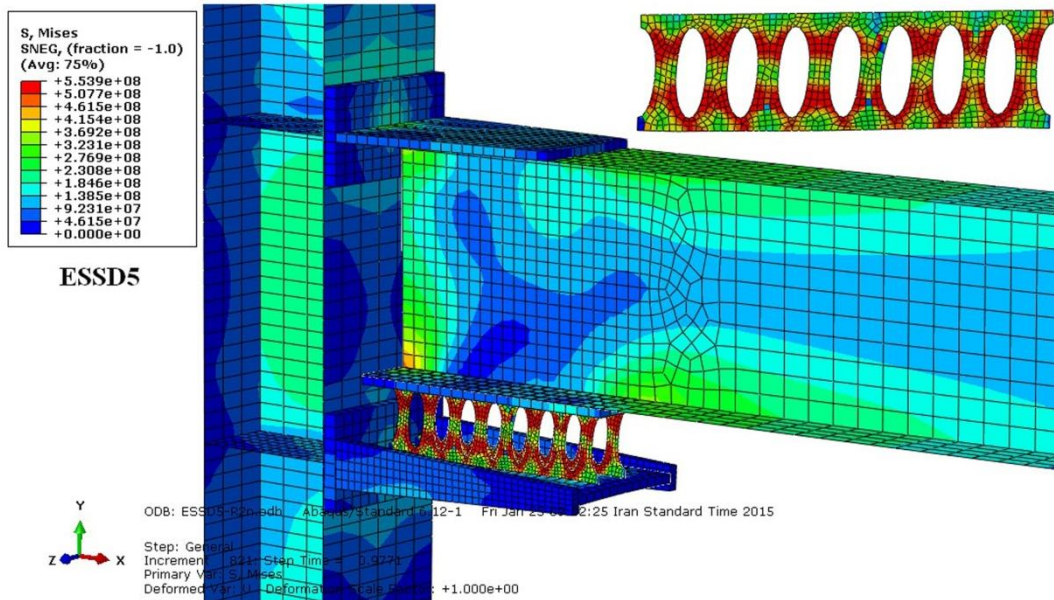
تحلیل استاتیکی غیرخطی با بارگذاری تناوبی مانند الگوی بارگذاری FEMA-350 [۱۹] طبق شکل (۴)، روی اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکافدار انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار اتصالات قاب‌های خمشی، ستون در دو انتها به صورت مفصلی مهار شده است و شرایط مرزی اتصال مفصلی در دو انتهای ستون در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه اتصال، در فاصله میانی تیر، تکیه‌گاه‌های جانبی در دو طرف تیر در نظر گرفته



شکل (۷) مدل‌سازی اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف ثابت



شکل (۶) مدل‌سازی اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف بیضی



شکل (۸) کانتور تنش فون میسز اتصالات ESSD5 و D2-R20

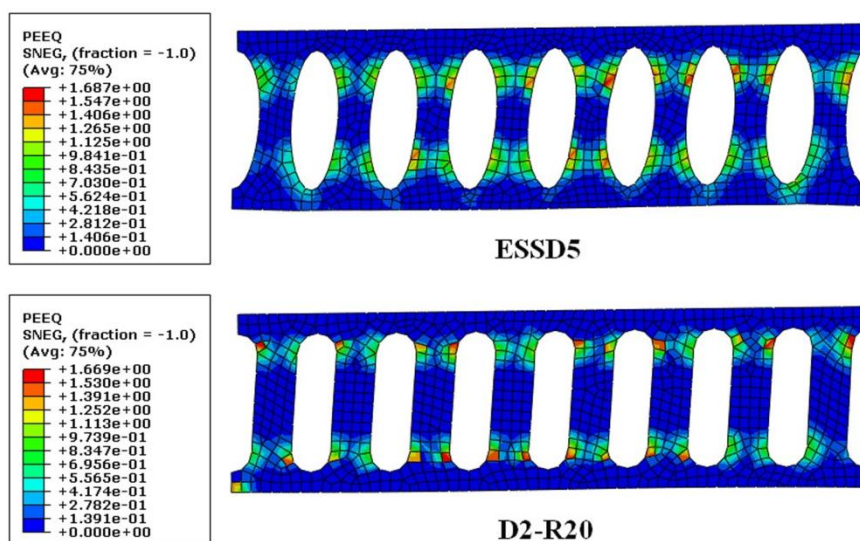
۵- مقایسه‌ی میراگرهای شکاف‌دار با شکاف بیضی و شکاف با عرض ثابت

کانتورهای تنش فون میسر اتصال ESSD5 با شکاف‌های بیضی و اتصال D2-R20 با شکاف‌های ثابت در شکل (۸) آورده شده است. طبق شکل (۸)، در هر دو اتصال، کمناش موضعی در اعضای اصلی سازه‌ای مشاهده نشده است و تیر وستون در محدوده‌ی الاستیک باقی مانده‌اند؛ درحالی‌که میراگرهای شکاف‌دار با جذب تغییرشکل‌ها، وارد محدوده‌ی پلاستیک شده‌اند. بیشترین تمرکز تنش در انتهای فوقانی و تحتانی نوارهای میراگر اتفاق افتاده است، با این تفاوت که در اتصال مجهز به میراگرهای شکاف‌دار با شکاف‌های بیضی (نمونه‌ی ESSD5)، قسمت‌های میانی نوارهای میراگر، تنش‌های بیشتری را نسبت به نمونه‌ی D2-R20 متحمل شده‌اند. بنابراین، به علت مشارکت بیشتر قسمت‌های میانی نوارها، توزیع تنش‌های فون میسر در میراگر شکاف‌دار با شکاف بیضی نسبت به شکاف با عرض یکنواخت، بهتر بوده است و موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ستون شده است.

کانتورهای کرنش معادل پلاستیک (PEEQ) اتصالات ESSD5 و D2-R20 در شکل (۹) آورده شده است. مقایسه‌ی کانتورهای کرنش معادل پلاستیک در دو اتصال مختلف نشان می‌دهد که در میراگر شکاف‌دار با شکاف بیضی (نمونه‌ی

ESSD5) المان‌های بیشتری وارد مرحله پلاستیک شده‌اند و سهم جذب انرژی در قسمت‌های میانی نوارها نیز نسبت به نمونه‌ی D2-R20 بیشتر بوده است. همچنین، علاوه بر توزیع بهتر کرنش‌های معادل پلاستیک در نمونه‌ی ESSD5، حداکثر مقادیر کرنش‌های معادل پلاستیک نیز نسبت به نمونه‌ی D2-R20 تقریباً یک درصد افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی افزایش تمرکز خرابی‌ها در میراگر شکاف‌دار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی و کاهش کرنش‌های پلاستیک در اعضای سازه‌ای اصلی است.

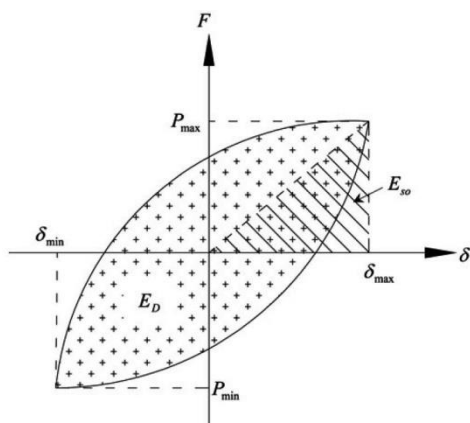
بر اساس شکل (۱۰)، با توجه به منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی مشخص است که حداکثر نیروی تحمل شده به وسیله‌ی اتصال مجهز به میراگر شکاف‌دار با شکاف بیضی (نمونه‌ی ESSD5) و نمونه‌ی D2-R20 تقریباً مساوی بوده است. در سیکل انتهایی بارگذاری قبل از وقوع شکست، افت سختی و مقاومت در نمونه D2-R20 مشاهده شده است، درحالی‌که برای نمونه‌ی ESSD5 افت سختی و مقاومت، مقدار ناچیزی بوده است. همچنین، نمونه‌ی ESSD5، با توجه به توزیع مناسب‌تر تنش‌ها در طول نوارهای میراگر، سیکل‌های بیشتری از بارگذاری تناوبی را تحمل کرده است و در نتیجه نسبت به نمونه‌ی D2-R20 شکل‌پذیری بیشتری نشان داده است.



شکل (۹) کانتورهای کرنش معادل پلاستیک میراگرهای ESSD5 و D2-R20

جدول (۴) مقایسه نسبت میرایی معادل اتصالات ESSD5 و D2-R20

نام اتصال	E_D (KJ)	E_{SO} (KJ)	ξ_{eq}
ESSD5	۱۰۳	۲۲/۵۲	۰/۳۶
D2-R20	۵۱/۶۱	۱۲/۸۷	۰/۳۲

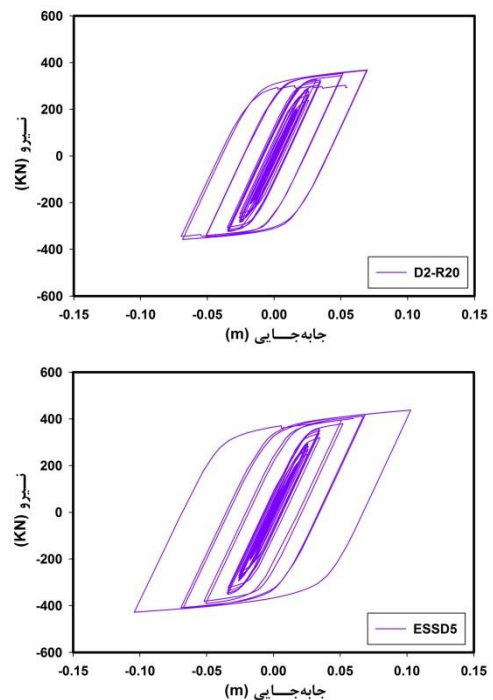


شکل (۱۱) نمایش پارامترهای مختلف در منحنی هیستریزس [۵]

مقایسه‌ی نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که در اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکاف‌دار با شکاف‌های بیضی نسبت میرایی معادل، تقریباً ۱۲/۵ درصد نسبت به میراگر شکاف‌دار با شکاف‌های ثابت بیشتر بوده است.

بر اساس شکل (۱۲)، با توجه به مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزس لنگر-دوران، نمونه‌ی ESSD5 دوران بیشتری را نسبت به نمونه‌ی D2-R20 تحمل کرده است. نمونه‌ی ESSD5 دوران ۰/۰۳۴ رادیان و نمونه‌ی D2-R20 دوران ۰/۰۲۴ رادیان را تحمل کرده است. هر دو اتصال لنگرهایی در حد لنگر پلاستیک تیر را متحمل شده‌اند، با این تفاوت که دوران تحمل شده به وسیله‌ی نمونه‌ی ESSD5 بیشتر بوده است. بنابراین، اتصال مجهز به میراگر شکاف‌دار با شکاف بیضی نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت، قابلیت تحمل دوران بیشتری را نشان داده است. همچنین تقارن مشاهده شده در منحنی‌های هیستریزس لنگر-دوران بیان‌گر یکسان بودن رفتار سازه در بارهای رفت و برگشتی است.

بنابراین اتصال تیر به ستون مجهز به نمونه‌ی ESSD5 نسبت به اتصال مجهز به نمونه‌ی D2-R20، جابه‌جایی بیشتری را تحمل کرده است که نشان از عملکرد هیستریزس بهتر آن دارد. سطح زیر منحنی هیستریزس نیرو-جابه‌جایی برای هر یک از اتصالات محاسبه شده است که معرف انرژی جذب شده در اتصال است. انرژی جذب شده به وسیله‌ی اتصال ESSD5 و D2-R20، به ترتیب، ۱۰۳ و ۵۱/۶۱ کیلوژول بوده است. بنابراین، اتصال مجهز به میراگر با شکاف بیضی نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت، ۹۹/۶ درصد انرژی بیشتری را مستهلک کرده است.



شکل (۱۰) منحنی نیرو-جابه‌جایی اتصالات ESSD5 و D2-R20

با توجه به شکل (۱۱)، به منظور محاسبه‌ی نسبت میرایی معادل اتصالات از رابطه زیر استفاده شده است [۵]:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_{SO}} \quad (۱)$$

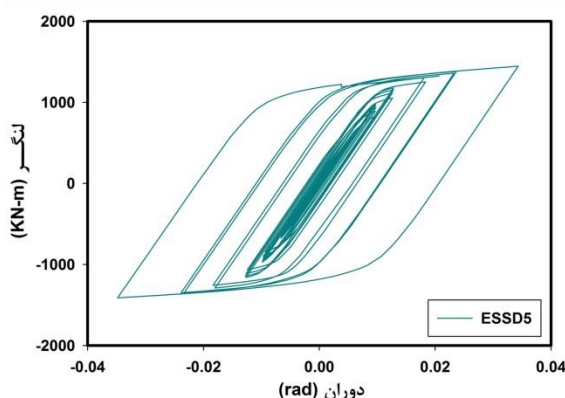
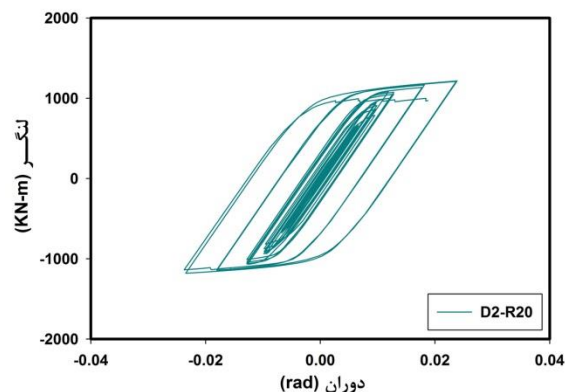
که در این رابطه ξ_{eq} نسبت میرایی معادل، E_D انرژی مستهلک شده و E_{SO} انرژی الاستیک ذخیره شده است. مقادیر عددی هر یک از این پارامترها در جدول (۴) خلاصه شده است.

توجه به تحمل سیکل‌های بیشتری از بارگذاری تناوبی، حداکثر دوران پلاستیک تجمعی تحمل شده به وسیله‌ی اتصال ESSD5 نسبت به اتصال D2-R20، ۲۶/۸ درصد بیشتر بوده است. بنابراین، استفاده از میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری اتصال تیر به ستون شده است.

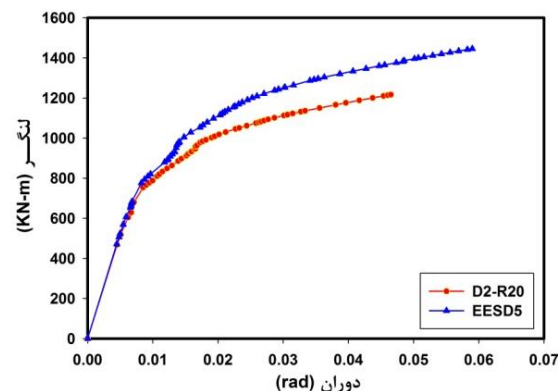
۶- نتیجه‌گیری

میراگرهای شکافدار فولادی به منظور جلوگیری از شکست ترد و خرابی اعضای سازه‌ای اصلی در وقوع زلزله‌ها، در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده‌اند. مطابق تحلیل‌های صورت گرفته در نرم افزار المان محدود آباکوس، استفاده از میراگرهای شکافدار فولادی با عرض نوار ثابت در پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی، موجب توزیع نامتوازن تنش‌ها در طول نوارها و عدم مشارکت قسمت‌های میانی نوارهای میراگر در استهلاک انرژی شده است. به منظور بهبود عملکرد اتصال، میراگرهای شکافدار با عرض متغیر نوارها به گونه‌ای که قسمت‌های میانی نوارها، سطح جاذب انرژی کمتری داشته و قسمت‌های انتهایی نوارها سطح جاذب بیشتری داشته باشند، با شکاف‌های بیضی پیشنهاد شده است. استفاده از میراگر شکافدار با شکاف بیضی نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت، موجب توزیع بهتر تنش‌های فون میسز در میراگر و مشارکت بیشتر قسمت‌های میانی نوارها در استهلاک انرژی شده است.

مقایسه منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر میراگر شکافدار با شکاف بیضی از نظر شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی بوده است، به گونه‌ای که نسبت میرایی معادل و انرژی مستهلک شده به وسیله‌ی اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی نسبت به میراگر با شکاف‌های ثابت، به ترتیب، ۱۲/۵ و ۹۹/۶ درصد افزایش یافته است. با توجه به منحنی‌های هیستریزس، افت سختی و مقاومت در اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف ثابت مشاهده شده است درحالی‌که در اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف بیضی، افت سختی و مقاومت ناچیز بوده



شکل (۱۲) منحنی لنگر- دوران اتصالات ESSD5 و D2-R20



شکل (۱۳) مقایسه‌ی منحنی اسکلتون اتصالات ESSD5 و D2-R20

منحنی اسکلتون در حالت مثبت بارگذاری، با استفاده از چیدمان قسمت‌های افزایشی منحنی لنگر- دوران هر یک از اتصالات، ترسیم شده است. بر اساس شکل (۱۳)، با مقایسه‌ی منحنی اسکلتون دو اتصال، مشخص است که سختی اولیه‌ی هر دو اتصال تقریباً یکسان بوده است. مقاومت نهایی اتصال ESSD5 نسبت به اتصال D2-R20، ۱۸/۹ درصد بیشتر بوده است. توزیع مناسب تر تنش‌ها در میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی، مانع از شکست زود هنگام اتصال شده و با

خمشی ویژه"، اولین همایش ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازندران، بابلسر، ۱۳۸۹.

[9] Karavasilis, T.L., Kerawala, S., Hale, E., "Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for steel buildings", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, 2012, pp. 358-367.

[۱۰] توحیدی مقدم، و. سعید منیر، ح.، "بررسی عملکرد میراگر شکافدار لوله ای تحت بارگذاری لرزه ای"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ۱۳۹۱.

[۱۱] توحیدی مقدم، و. سعید منیر، ح.، "کاربرد میراگر فولادی شکافدار لوله‌ای (CSSD) در سازه های قاب خمشی فولادی"، سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان، ۱۳۹۱.

[۱۲] زهرائی، س.م.، امین‌دهقان، ا.، "بررسی عملکرد یک سیستم میراگر فلزی نوین در بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای هم محور"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ۱۳۹۱.

[۱۳] زهرائی، س.م.، امین‌دهقان، ا.، "ارزیابی شکل پذیری و استهلاک انرژی میراگر فلزی نوین لوله در لوله برای کاربرد در قاب های فولادی مهاربندی شده"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ۱۳۹۱.

[14] Koken, A., Koroglu, M.A., "Waste rubber damper using on steel beam to column connection", *International Journal of Arts & Sciences*, Vol. 5, 2012, pp. 217-222.

[۱۵] مشتاق، ا.، شیدایی، م.ر.، توحیدی مقدم، و.، "کاربرد میراگر شکافدار لوله‌ای فولادی (CSSD) بر رفتار خرابی شبکه های تخت دو لایه فضاکار و ارزیابی خرابی پیشرونده در آنها"، سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان، ۱۳۹۱.

[۱۶] مشتاق، ا.، توحیدی مقدم، و. سعیدمنیر، ح.، "مطالعه و بررسی گسیختگی پیشرونده بر روی قاب های مقاوم سازی شده با میراگر شکافدار لوله ای"، دومین کنفرانس ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازندران، ۱۳۹۱.

[17] ABAQUS, Version9.10, Dassault Systemes., USA, 2010.

[18] Oh, S.-H., "Seismic design of energy dissipating multi-story frame with flexible-stiff mixed type connection", Ph.D. Thesis, Tokyo University, 1998.

[19] FEMA 350., "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings", *SAC Joint Venture*, 2000.

است. همچنین، طبق منحنی‌های هیستریزیس لنگر- دوران، اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف بیضی قابلیت تحمل دوران بیشتری نشان داده است.

مقایسه منحنی‌های اسکلتون، نشان داده است که حداکثر دوران پلاستیک اتصال مجهز به میراگر شکافدار با شکاف بیضی نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت، ۲۶/۸ درصد بیشتر بوده است. با توجه به بررسی های انجام شده، اتصالات مجهز به میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف بیضی از نظر توزیع تنش، میزان تحمل جابه‌جایی، قابلیت دوران، نسبت میرایی معادل و همچنین مقدار جذب انرژی عملکرد بهتری نسبت به میراگر با عرض شکاف ثابت داشته است و موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ستون شده است.

۷- مراجع

[1] Saffari, H., Hedayat, A.A., Poorsadeghi Nejad, M., "Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 80, 2013, pp. 138-152.

[2] Wada, A., Huang, Y.H., Yamada, T., Ono, Y., Sugiyama, S., Baba, M., Miyabara, T., "Actual size and real time speed tests for hysteretic steel damper", *Proceedings of Stessa*, Vol. 97, 1997, pp. 778-785.

[3] 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*, Vol. 2, 2002, pp. 71-79.

[4] Benavent-Climent, A., "Development and application of passive structural control systems in the moderate-seismicity mediterranean area", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 2008.

[5] Chan, R., Albermani, F., "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", *Engineering Structures*, Vol. 30, 2008, pp. 1058-1066.

[6] Oh, S.-H., Kim, Y.-J., Ryu, H.-S., "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering Structures*, Vol. 31, 2009, pp. 1997-2008.

[7] Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X., Xie, Y.M., "Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy", *Engineering Structures*, Vol. 32, 2010, pp. 2258-2267.

[۸] خوشنودیان، ف.، کیانی، م.، "بررسی عملکرد میراگر

فولادی شکافدار (SSD) در سازه های فولادی با سیستم قاب

Application of Elliptic Slits for Development of Slit Damper in Beam-to-Column Connection

S. Farahi Shahri¹, S. R. Mousavi^{2*}

1- M.Sc. Graduated in Structural Engineering, University of Sistan and Baluchestan

2- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan

s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

Abstract:

The rigid steel connections were suffered severe damage because of low rotational capacity during earthquakes. Hence many investigations have been performed on the connections of steel structures. In order to prevent brittle failure of connections and damage of main structural members, steel slit dampers with uniform strip width are used in the beam-to-column connections. Slit damper is a plate or a standard section with a number of slits in the web. The remaining strips in the web of damper, dissipate the seismic energy with inelastic deformation absorption and also prevent seismic energy transmission to the main structural members. No special fabrication technique was involved in the slit dampers, thus the device can be easily used in practice. To verify the accuracy of finite element modeling, the obtained results of ABAQUS finite element software were compared with an experimental study done by Oh et al (2009). The analytical results have a good agreement with experimental ones and the average error is about 2%. According to the analyses performed in the ABAQUS, using steel slit dampers with uniform strip width is resulted in stress concentration at the ends of the damper strips, unbalanced distribution of Von-Mises stresses along the strips length and low participation of middle parts of slit damper strips in the energy dissipation. Therefore, to resolve these problems and energy-absorbing area rise in the end parts of strips, elliptic slit damper is proposed and compared with the previous investigated slit damper. Slits dimensions of elliptic slit damper are calculated as such that both of present and previous slit dampers have the same weight. The objective of this paper is to improve the seismic performance of steel slit dampers. Nonlinear analyses are carried out in the beam-to-column connections equipped with slit dampers. Effects of geometrical and material nonlinearity are considered in the analyses. Nonlinear characteristics of steels are defined with stress-strain curves. Bilinear stress-strain curves are used for all steel parts except the slit damper which is defined with completed stress-strain curve. Plasticity behavior of steel materials is based on the Von-Mises yielding criteria. To simulate the behavior of rigid connections, pin boundary conditions are assigned to both ends of the column. Loading protocol recommended by FEMA-350 is used for cyclic analyses. All parts of connection are modeled using shell elements except the split-T plates and the upper plate of slit dampers which are modeled using solid elements. The results of connections analysis under cyclic loading show that the proposed elliptic slit damper causes better distribution of stresses along the damper strips, better hysteresis performance and increase the amount of energy dissipation in the beam-to-column connection. In the proposed slit damper with elliptic slits, stress concentration is decreased in the end parts of strips. Also elliptic slit damper leads to strength and ductility increment in the connection. Additionally, it is concluded that in the proposed elliptic slit damper compared to the slit damper with uniform strip width, the energy dissipation and the maximum plastic rotation of connection increase about 99.6 and 26.8%, respectively.

Keywords: Earthquake, Beam-to-column connection, Steel slit damper, Elliptic slit.