

بررسی تأثیر عرض نوارهای میراگر شکافدار بیضوی در عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ستون فولادی

سعید فراهی شهری^۱ و سیدروح‌الله موسوی^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(دریافت: ۹۵/۲/۱، پذیرش: ۹۵/۱۱/۶، نشر آنلاین: ۹۵/۱۱/۱۷)

چکیده

اتصالات صلب به علت ظرفیت چرخش پلاستیک کمی که دارند، در اثر وقوع زلزله‌های شدید دچار شکست ترد شده و منجر به خرابی کل سازه می‌شوند. به منظور جلوگیری از شکست ترد اتصالات و خرابی اعضای سازه‌ای اصلی، میراگرهای شکافدار فولادی در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده‌اند. 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 شکل‌های غیرالاستیک انرژی لرزه‌ای را مستهلک کرده و مانع از انتقال آن به تیر و ستون می‌شوند. طبق مطالعات انجام شده، استفاده از میراگرهای شکافدار با عرض نوار یکنواخت در تحقیقات آزمایشگاهی قبلی، موجب تمرکز تنش در قسمت‌های انتهایی نوارهای میراگر شده است؛ بنابراین به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای، میراگر با شکاف‌های بیضی پیشنهاد شده و تأثیر عرض نوارهای آن در عملکرد لرزه‌ای اتصال، بررسی شده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی اتصالات با بارگذاری تناوبی، در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از میراگر شکافدار پیشنهادی، موجب توزیع مناسب تنش‌ها در طول نوارهای میراگر شده است. در اتصالات مجهز به میراگر شکافدار بیضوی، با توجه به عدم وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی، در اثر کاهش ۱۲ میلی‌متری عرض نوارها، مقاومت نهایی ۴۱/۱ درصد و حداکثر دوران پلاستیک اتصال ۳۶/۹ درصد کاهش داشته است. یک رابطه خطی برای تعیین نسبت عرض نوار به شعاع شکاف میراگر شکافدار بیضوی، با توجه به حداکثر لنگر اتصال پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌ها: زلزله، اتصال تیر به ستون، میراگر شکافدار فولادی، شکاف‌های بیضی، عرض نوار.

۱- مقدمه

استفاده بی‌وقفه از ساختمان‌ها پس از زلزله، ترجیح داده می‌شود که خرابی در المان‌های جاذب انرژی که خصوصیات هیسترتیک^۳ خوبی دارند، محدود شود تا به اعضای سازه‌ای اصلی (تیر و ستون) منتقل نشود. این عامل موجب گردیده است تا استفاده از یک منبع استهلاک دیگر، غیر از تیر و ستون در اتصالات رواج پیدا کند (Saffari و همکاران، ۲۰۱۳). یکی از مکانیزم‌های محبوب استهلاک انرژی در سازه‌ها استفاده از تسلیم مواد فلزی است. تحقیق روی وسایل استهلاک غیر فعال فلزی در سه دهه اخیر انجام شده است و میراگرهای فلزی زیادی پیشنهاد و استفاده شده‌اند (Albermani و Chan، ۲۰۰۸).

Wada و همکاران (۱۹۹۷) یک مطالعه آزمایشگاهی روی میراگر شکافدار فولادی انجام دادند. آن‌ها میراگر شکافدار را در

از زلزله نورتریج^۱ و کوبه^۲ درس‌های زیادی گرفته شده است، از جمله این که ساختمان‌های با قاب خمشی در مواجهه با زلزله آن چنان که انتظار می‌رود، مؤثر عمل نمی‌کنند و ظرفیت استهلاک انرژی تأمین شده به وسیله مفاصل پلاستیک تشکیل شده در انتهای تیرها برای زلزله‌های بزرگ کافی نیست. در نتیجه بسیاری از مهندسين سازه، نحوه طراحی لرزه‌ای خود را تغییر دادند (Wada و همکاران، ۱۹۹۷). در سازه‌های فولادی، اکثر 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. به منظور

1. Northridge
2. Kobe

3. Hysteretic

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۵۴-۳۱۱۳۶۴۶۲

آدرس ایمیل: saeed_farahi@pgs.usb.ac.ir (س. فراهی شهری)، s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir (س.ر. موسوی).

محل براکت نصب شده بر روی تیر، در قاب اصلی مونتاژ کردند. نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی آن‌ها نشان داده است که میراگر شکافدار فولادی حلقه هیستریزس پایداری داشته است و پس از تسلیم تمایل به سخت شدگی دارد. Lee و همکاران (۲۰۰۲) به منظور جلوگیری از کمانش بادبندهای ضربدری و جذب انرژی لرزه‌ای، از میراگر شکافدار فولادی در محل اتصال بادبندهای ضربدری استفاده کردند. در طی این تحقیق ظرفیت نهایی جذب انرژی توسط میراگر شکافدار فولادی تحت نیروهای برشی مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها توسط روش مدل سه‌خطی، منحنی بار-جابجایی را تحت بار یکنواخت مورد پیش‌بینی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که میراگر شکافدار فولادی در معرض نیروهای برشی، رفتار هیستریزس پایداری داشته است. Benavent (۲۰۰۸) روش طراحی لرزه‌ای با مفهوم ترکیبی سختی و انعطاف‌پذیری را در سازه بتن مسلح مورد استفاده قرار داد. به همین منظور ستون‌ها لاغر و با آرماتور سنگین طراحی شدند تا شکل‌پذیری 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. Albermani و Chan (۲۰۰۸) استفاده از میراگر شکافدار را در محل اتصال بادبندهای شورون به تیر پیشنهاد کردند. آنها به منظور دستیابی به بهترین نسبت عرض به ارتفاع نوارها، ۹ نمونه‌ی مختلف میراگر شکافدار را تحت آزمایش بارگذاری تناوبی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌ی میراگر شکافدار با کوچک‌ترین نسبت عرض به ارتفاع نوار کم‌ترین نیرو و نمونه میراگر شکافدار با بزرگ‌ترین نسبت عرض به ارتفاع نوار بزرگ‌ترین نیرو را تحمل کرده است.

Oh و همکاران (۲۰۰۹) به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی فولادی، اتصال سازه‌ای با میراگرهای شکافدار فولادی را پیشنهاد کردند. نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی، رفتار هیستریزس خوب اتصال مجهز به میراگر شکافدار را نشان داده است. همچنین تغییر شکل پلاستیک، فقط در میراگرهای شکافدار متمرکز شده و از رفتار غیرالاستیک تیر و ستون جلوگیری شده است. میانگین دوران پلاستیک اتصالات ۰/۰۳۷ رادیان بوده و تقریباً ۹۴ درصد از کل انرژی توسط میراگرها جذب شده است. آزمایشات آن‌ها نشان داده است که با تشکیل ترک در قسمت‌های انتهایی نوارهای میراگر شکافدار، کاهش مقاومت اتصال شروع شده و در نهایت شکست نهایی در این قسمت‌ها اتفاق افتاده است. Ghabraie و همکاران (۲۰۱۰) به منظور بهینه‌سازی شکل میراگر شکافدار از روش بهینه‌سازی سازه‌ای تکاملی دو جهته (BESO) استفاده کردند. یک میراگر شکافدار که قبلاً توسط Chan و Albermani (۲۰۰۸) پیشنهاد شده بود، به عنوان طرح اولیه در نظر گرفته

شده و بهینه‌سازی شده است. البته برای ساده‌سازی و کاهش هزینه ساخت، محدودیت‌هایی نیز در بهینه‌سازی اعمال شده است. نتایج نشان داده است که نمونه بهینه نسبت به نمونه اولیه در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی و تاریخچه بارگذاری، ۳۷ درصد استهلاک انرژی بیشتری داشته است. Karavasilis و همکاران (۲۰۱۱) یک طراحی لرزه‌ای بر مبنای حداقل خرابی را برای ساختمان‌های فولادی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها 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. توحیدی مقدم و سعیدمنیر (۱۳۹۱) گونه جدیدی از میراگرهای شکافدار فولادی با مقطع دایره را مورد بررسی دادند. 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 لوله‌ای مدل‌سازی شده و نتایج نشان داده است که استفاده از این میراگر موجب کاهش چشمگیر جابجایی و برش پایه شده است. حداکثر مقدار برش پایه در حالت استفاده از میراگر تقریباً ۳۶ درصد کاهش داشته است.

Koken و Koroglu (۲۰۱۲) 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 ارائه شده که ترکیبی از میراگر شکافدار فولادی و میراگر لاستیکی بوده، تغییر شکل‌های پلاستیک را در خود متمرکز کرده و مانع از انتقال آن به تیر و ستون شده است. Saffari و همکاران (۲۰۱۳) به منظور افزایش شکل‌پذیری اتصالات خمشی تیر به ستون، نمونه‌های جدیدی از اتصالات با میراگرهای شکافدار و ورق‌های اتصال را ارائه کردند. آن‌ها یک مطالعه پارامتری را با استفاده از روش المان محدود روی میراگرهای شکافدار با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف طول و عمق تیر انجام دادند و در نهایت یک اتصال را به عنوان اتصال برتر معرفی کردند.

با توجه به مطالعات انجام شده، تمرکز تنش ایجاد شده در دو انتهای نوارهای میراگر شکافدار فولادی با عرض نوار یکنواخت، موجب شده است که شکست اتصال در این نواحی رخ دهد. 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 باشد، با شکاف‌های بیضی شکل پیشنهاد شده است و تأثیر عرض نوارهای میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی در عملکرد لرزه‌ای اتصال مورد بررسی قرار

شکافدار، σ_u تنش نهایی میراگر شکافدار، n تعداد نوارها، t ضخامت ورق میراگر شکافدار و B عرض نوار است (Oh و همکاران، ۲۰۰۹). جابجایی تسلیم میراگر شکافدار که از مجموع تغییر شکل خمشی و تغییر شکل برشی حاصل شده است، توسط رابطه (۴) قابل محاسبه است (Lee و همکاران، ۲۰۰۲):

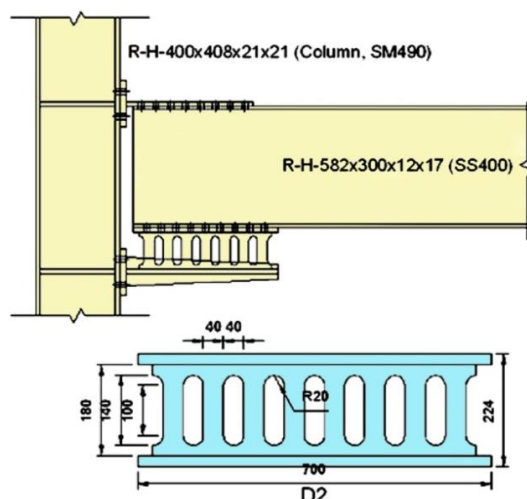
$$\delta_y = \frac{P_y (H')^3}{nEtB^3} \left(1 + 3 \ln \frac{H_T}{H'} \right) + \frac{3P_y H'}{2ntBG} \left(1 + \ln \frac{H_T}{H'} \right) \quad (4)$$

که در آن E مدول الاستیسیته ورق میراگر شکافدار، G مدول برشی ورق میراگر و δ_y جابجایی تسلیم میراگر است. با ساده‌سازی رابطه (۴) رابطه زیر حاصل شده است:

$$\delta_y = \frac{1.5P_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (5)$$

۳- روش مدل‌سازی و بررسی صحت‌سنجی

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی، الگوی بارگذاری اعمال شده توسط Oh و همکاران (۲۰۰۹) در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS (۲۰۱۰) در نظر گرفته شده است که بر اساس دوران تسلیم اتصال می‌باشد. دوران تسلیم اتصال با توجه به مشخصات هندسی میراگر، از روابط ارائه شده قابل محاسبه است. برای سایر اتصالات، الگوی بارگذاری تناوبی FEMA-350 (۲۰۰۰) استفاده شده است. اتصال تیر به ستون و میراگر شکافدار D2 که توسط Oh و همکاران (۲۰۰۹) تحت آزمایش قرار گرفته، در شکل (۱) و نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS، در شکل (۲) نشان داده شده است. 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. تماس بین قطعات مختلف توسط قید tie تعریف شده است.



شکل ۱- اتصال D2 ارائه شده توسط Oh و همکاران (۲۰۰۹)

گرفته است. در نهایت با توجه به تحلیل‌های انجام شده، رابطه پیشنهادی بین حداکثر لنگر اتصال و نسبت عرض نوار به شعاع شکاف برای اتصالات مجهز به میراگرهای شکافدار بیضوی ارائه شده است.

۲- میراگر شکافدار فولادی

میراگر شکافدار فولادی یک ورق یا یک پروفیل استاندارد فولادی با تعدادی شکاف بریده شده در جان آن است. تحت تغییر شکل‌های نسبی کوچک بین دو بال تکیه گاهی، نوارهای میراگر شکافدار فولادی مانند یک سری از تیرهای با انتهای نسبتاً ثابت عمل کرده و به صورت دو قوسی تغییر شکل می‌دهند (Chan و Albermani, ۲۰۰۸). در میراگر شکافدار فولادی نوارهایی که بین شکاف‌ها قرار دارند، تغییر شکل‌های غیرالاستیک را جذب کرده و مفاصل پلاستیک در آن‌ها ایجاد می‌شود که موجب استهلاک انرژی زلزله می‌شود (Oh و همکاران، ۲۰۰۹). در ساخت این میراگرها از تکنیک ویژه‌ای استفاده نشده است؛ در نتیجه این میراگرها به سهولت قابل ساخت خواهند بود (Chan و Albermani, ۲۰۰۸).

با توجه به این که میراگر شکافدار فولادی ارائه شده توسط Oh و همکاران (۲۰۰۹)، 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. رفتار هیستریزس عالی، دسترسی آسان، سهولت جایگزینی پس از زلزله و هزینه مناسب میراگرهای شکافدار از دلایلی است که آن‌ها را به عنوان یک گزینه مناسب مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی معرفی کرده است.

به منظور پیش‌بینی مقاومت تسلیم و جابجایی تسلیم میراگر شکافدار فولادی، نوارهای میراگر شکافدار ایده‌آل‌سازی شده است و گوشه‌های منحنی آن‌ها با خطوط مورب معادل‌سازی شده و ارتفاع معادل نوارها محاسبه شده است:

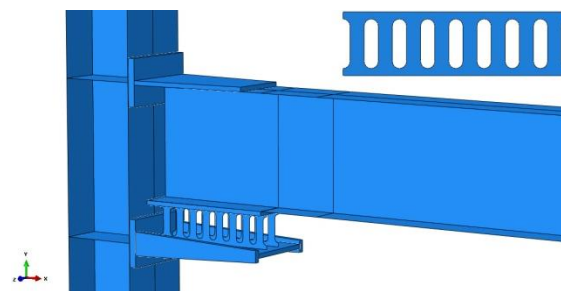
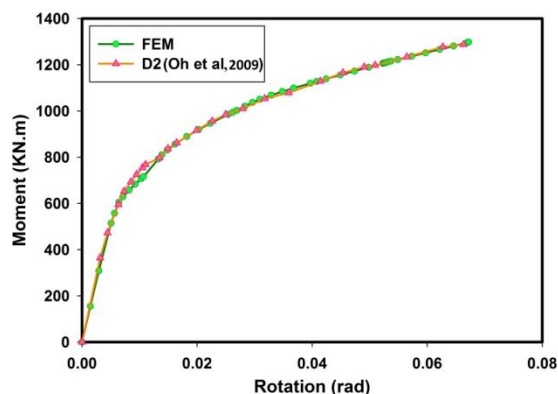
$$H' = H + \frac{2r^2}{H_T} \quad (1)$$

که در آن H ارتفاع قسمت صاف نوار، H_T ارتفاع کل نوار، r شعاع انحنای بالا و پایین نوار و H' ارتفاع معادل نوار است. با ساده‌سازی‌های صورت گرفته، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میراگر شکافدار به صورت تئوری محاسبه شده است:

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

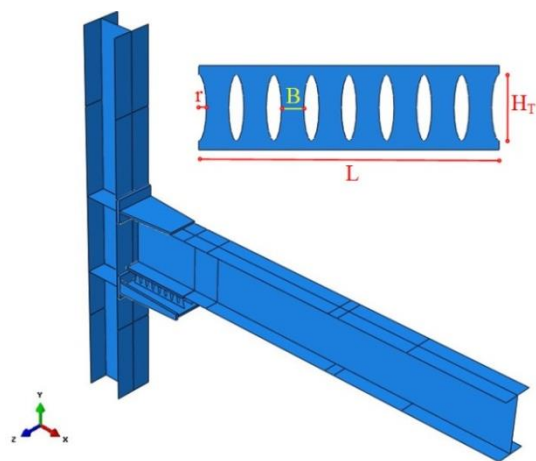
$$P_u = \min \left\{ n \frac{\sigma_u t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_u t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (3)$$

که در روابط (۲) و (۳)، P_y مقاومت تسلیم میراگر شکافدار، P_u مقاومت نهایی میراگر شکافدار، σ_y تنش تسلیم میراگر



شکل ۲- مدل سازی اتصال D2 در نرم افزار ABAQUS

شکل ۳- صحت سنجی منحنی اسکلتون حاصل از روش المان محدود با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۴- اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکاف دار بیضوی

جدول ۲- مشخصات هندسی میراگرهای شکاف دار بیضوی با عرض نوارهای مختلف

نام اتصال	B (mm)	r (mm)	H _T (mm)	L (mm)	t (mm)
ESSD1	۴۸	۱۶	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD2	۴۴	۱۸	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD3	۴۰	۲۰	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD4	۳۶	۲۲	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD5	۳۲	۲۴	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD6	۲۸	۲۶	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD7	۲۴	۲۸	۱۴۰	۶۴۰	۱۹
ESSD8	۲۰	۳۰	۱۴۰	۶۴۰	۱۹

۵- بررسی و تفسیر نتایج

کانتورهای تنش فون میسر اتصالات مجهز به میراگر شکاف دار بیضوی با عرض نوارهای مختلف، قبل از وقوع شکست در شکل (۵) آورده شده است. در کانتورهای تنش فون میسر اتصالات ESSD1 تا ESSD3 که دارای نوارهای

جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولاد مقاطع مختلف (Oh, ۱۹۹۸)

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

مدول الاستیسیته برای ورق میراگر ۱۹۳ GPa و برای سایر فولادها ۲۱۴ GPa در نظر گرفته شده است. چگالی و نسبت پواسون فولادها به ترتیب 7850 Kg/m^3 و 0.3 فرض شده است. رفتار فولادهای استفاده شده در حالت الاستیک و پلاستیک به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. به منظور انجام تحلیل غیرخطی، برای هر یک از اعضای سازه‌ای خصوصیات فولاد طبق جدول (۱) تعریف شده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی با بارگذاری تناوبی روی اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر استفاده شده است.

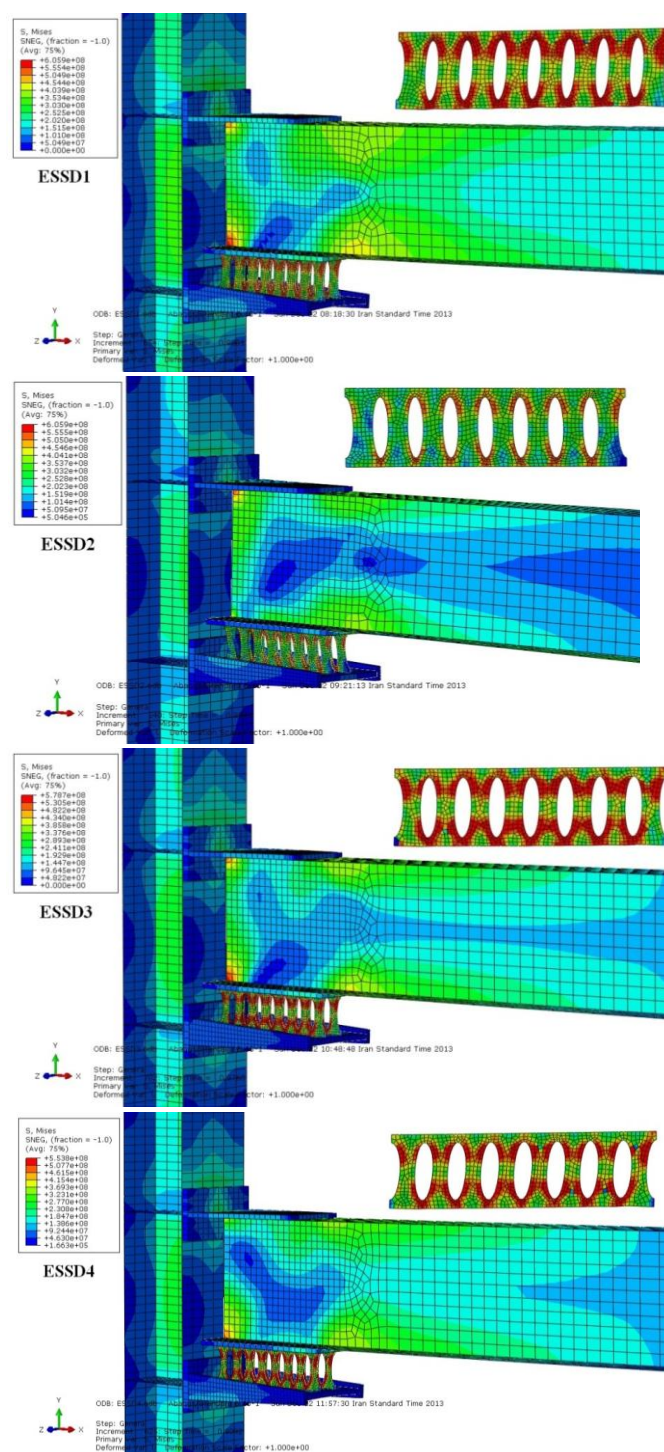
به منظور شبیه سازی رفتار اتصالات خمشی، ستون در دو انتها به صورت مفصلی مهار شده و شرایط مرزی اتصال مفصلی در دو انتهای ستون اعمال شده است. مش بندی هر یک از قطعات به صورت جداگانه انجام شده و از مش استاندارد خطی برای آن‌ها استفاده شده است. برای المان‌های shell مش S4R و برای المان‌های solid مش C3D8R استفاده شده است. در شکل (۳) منحنی اسکلتون نمونه مدل سازی شده توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS و نمونه آزمایشگاهی Oh و همکاران (۲۰۰۹) مقایسه شده که مطابقت بسیار خوبی حاصل شده است.

۴- مشخصات هندسی نمونه‌های مدل سازی شده

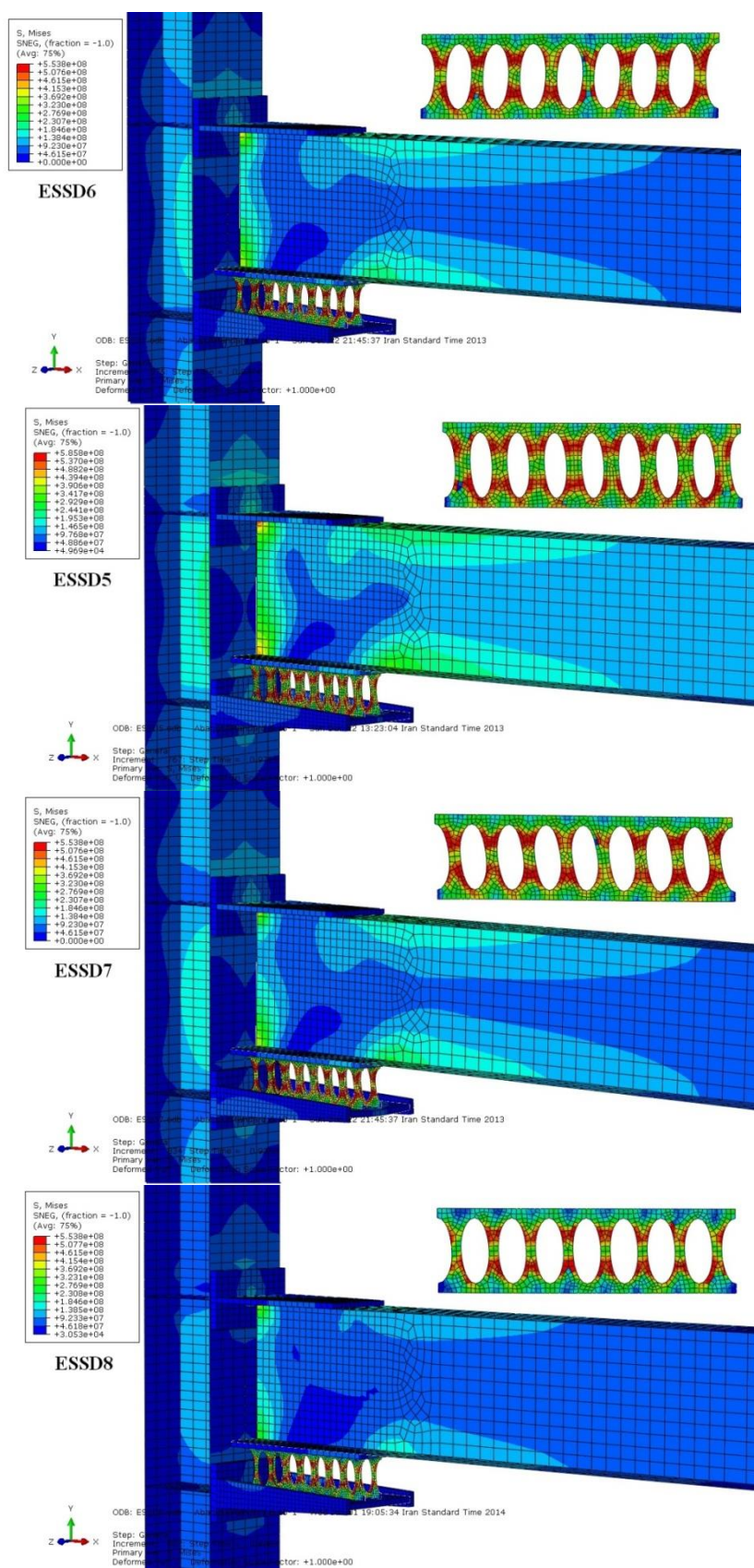
به منظور بررسی تأثیر عرض نوارهای میراگر شکاف دار در عملکرد اتصال، میراگرهای شکاف دار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی، به صورت شکل (۴) در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. نام و مشخصات هندسی میراگرهای شکاف دار بیضوی، در جدول (۲) ذکر شده است.

انتهایی نوارهای میراگر به قسمت‌های میانی منتقل شده است. در نمونه‌های ESSD1 تا ESSD4 ابتدا تیر به تنش نهایی رسیده و دچار خرابی شده است. در نمونه‌های ESSD5 تا ESSD8 میراگرهای شکافدار تنش‌های بیشتری را متحمل شده‌اند و از وقوع خرابی در تیر جلوگیری شده است.

عریض‌تری هستند، تیر و ستون متحمل تنش‌های بزرگی شده‌اند که با اصل عدم آسیب به اعضای سازه‌ای اصلی مغایرت دارد. به تدریج با کاهش عرض نوارهای میراگر، مقدار تنش در اعضای سازه‌ای اصلی کاهش یافته و تمرکز تنش در میراگرهای شکافدار افزایش یافته است. با کاهش عرض نوارهای میراگر، توزیع تنش از قسمت‌های



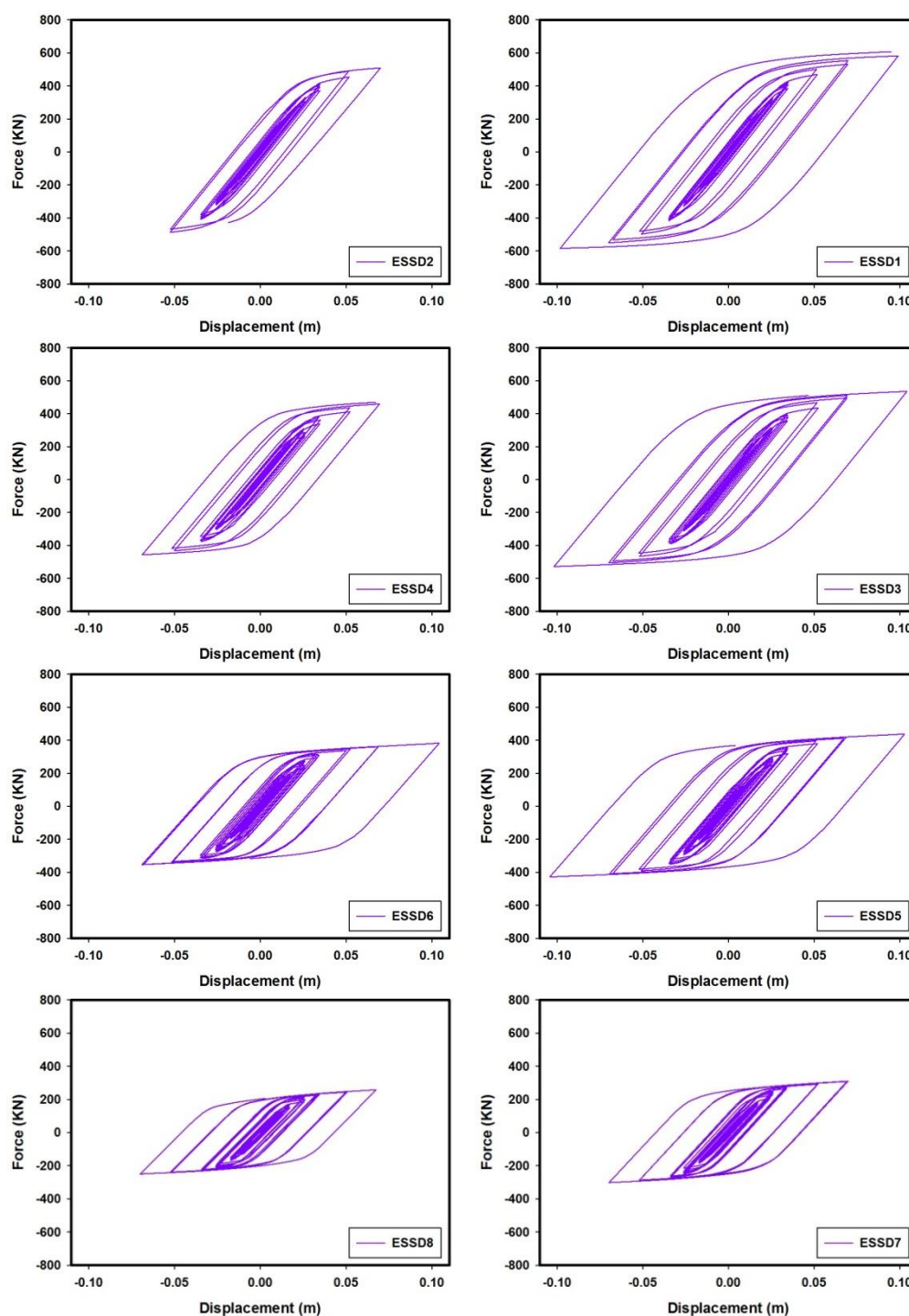
شکل ۵- کانتور تنش فون میسز اتصالات مجهز به میراگر شکافدار بیضوی با عرض مختلف نوارها (ادامه دارد)



ادامه‌ی شکل ۵- کانتور تنش فون میسز اتصالات مجهز به میراگر شکاف‌دار بیضوی با عرض مختلف نوارها

همه نمونه‌ها محاسبه شده و در جدول (۳) ذکر شده است. لازم به ذکر است که اگرچه میراگرهای شکافدار بیضوی با نوارهای عریض‌تر، بعضاً انرژی بیشتری را مستهلک کرده‌اند، اما با توجه به وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی، مطلوب نمی‌باشند. با در نظر گرفتن عدم وقوع شکست در اعضای سازه‌ای اصلی، نمونه ESSD5 با تحمل ۱۰۳ کیلوژول، بیشترین مقدار انرژی را مستهلک کرده است.

با توجه به منحنی هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی اتصالات مختلف در شکل (۶)، مشخص است که با کاهش عرض نوارهای میراگر شکافدار با شکافهای بیضی، حداکثر نیروی تحمل شده توسط اتصال کاهش یافته است. بیشترین مقدار جابه‌جایی‌ها توسط اتصالات ESSD5 و ESSD6 رقم خورده است. با توجه به این که مساحت داخل منحنی هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی نشان دهنده انرژی مستهلک شده توسط اتصال است، این مساحت برای



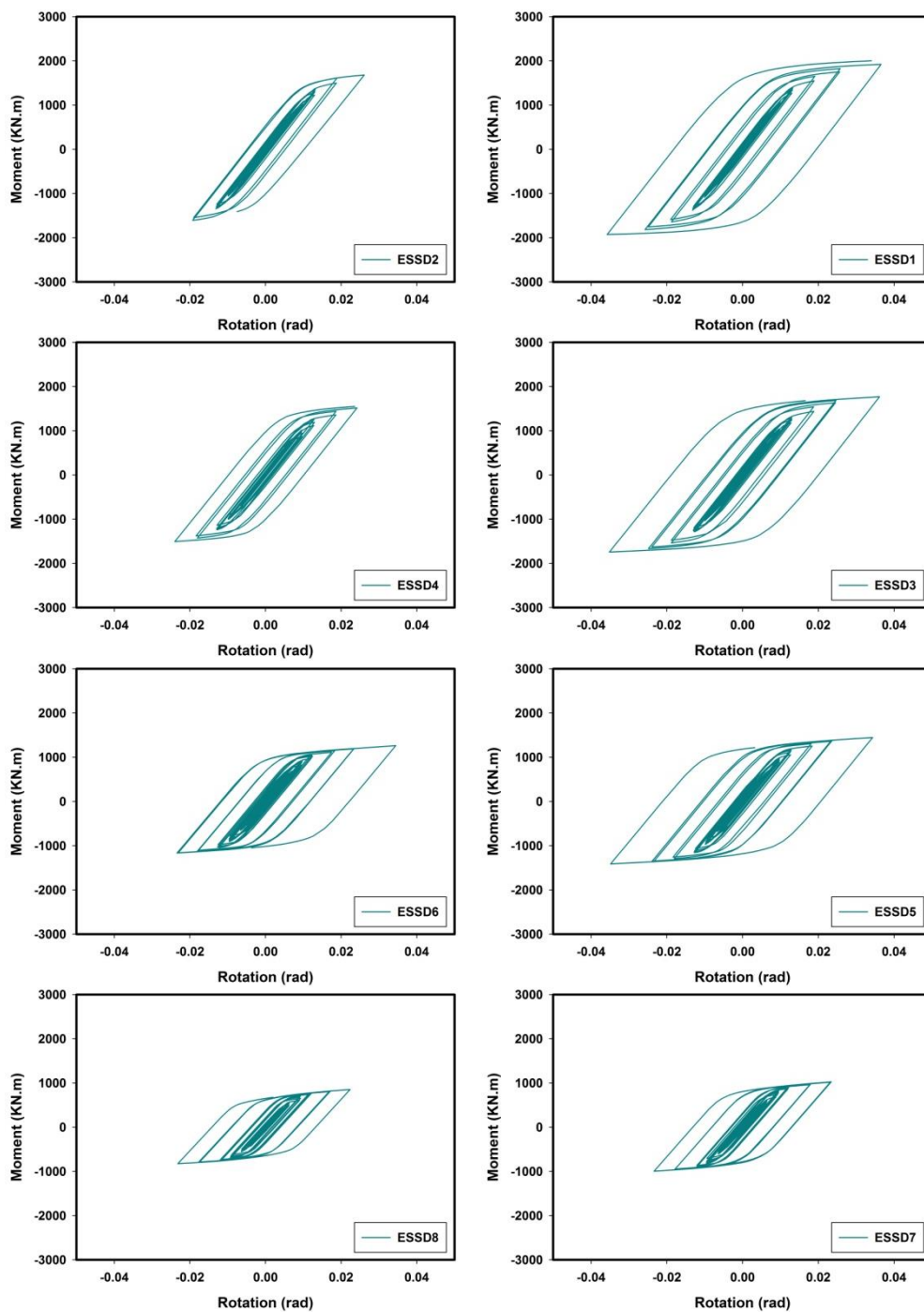
شکل ۶- منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با عرض مختلف نوارهای میراگر شکافدار بیضوی

جدول ۳- مقایسه انرژی مستهلک شده توسط اتصالات مجهز به میراگرهای شکافدار بیضوی

اتصال	ESSD1	ESSD2	ESSD3	ESSD4	ESSD5	ESSD6	ESSD7	ESSD8
انرژی مستهلک شده (Kj)	۱۱۶/۹۳۵	۳۸/۶۴۳	۱۱۴/۹۶۲	۵۴/۸۰۷	۱۰۳/۰۰۹	۷۱/۳۹۳	۴۴/۹۷۴	۳۸/۲۲۷

طبق شکل (۷)، مقایسه منحنی لنگر-دوران اتصالات مختلف نشان می‌دهد که کاهش عرض نوارهای میراگر شکافدار بیضوی، موجب کاهش حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال شده است. نمونه‌های ESSD1 تا ESSD4 لنگری فراتر از لنگر پلاستیک تیر

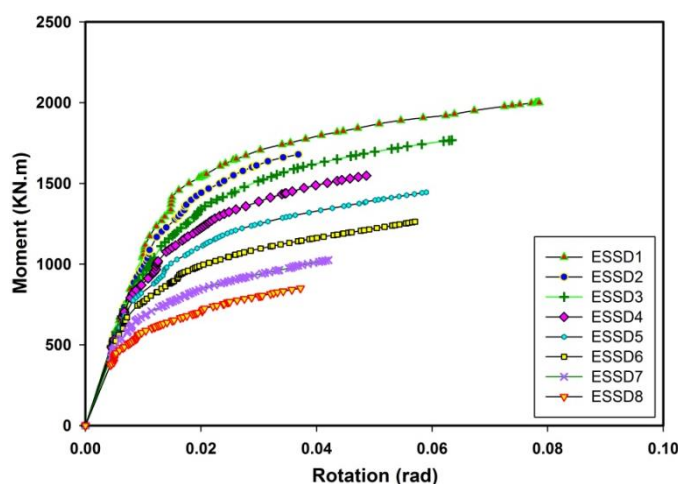
(۱۲۶۰ کیلو نیوتن متر) متحمل شده‌اند که موجب وقوع خرابی در تیر شده است. در سایر نمونه‌ها، با کاهش عرض نوار میراگر شکافدار بیضوی، حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال کاهش یافته و محل شکست از تیر به میراگر منتقل شده است.



شکل ۷- منحنی لنگر- دوران اتصالات با عرض مختلف نوارهای میراگر شکافدار بیضوی

مقاومت نهایی اتصال با کاهش عرض نوارها کاهش یافته است، به گونه‌ای که با توجه به عدم وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی، به ازای کاهش ۱۲ میلی‌متری عرض نوارهای میراگر، مقاومت و حداکثر دوران پلاستیک اتصال ESSD8 نسبت به اتصال ESSD5، به ترتیب ۴۱/۱ و ۳۶/۹ درصد کاهش یافته است.

منحنی‌های اسکلتون برای بررسی رفتار هیستریزیس و ظرفیت شکل‌پذیری عضوهای فولادی، تحت بارهای تناوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. منحنی اسکلتون هر اتصال، از کنار هم قرار دادن قسمت‌های افزایشی منحنی لنگر-دوران به دست آمده است (Oh و همکاران، ۲۰۰۹). مقایسه منحنی اسکلتون اتصالات مجهز به میراگر شکاف‌دار بیضوی، در شکل (۸) نشان می‌دهد که

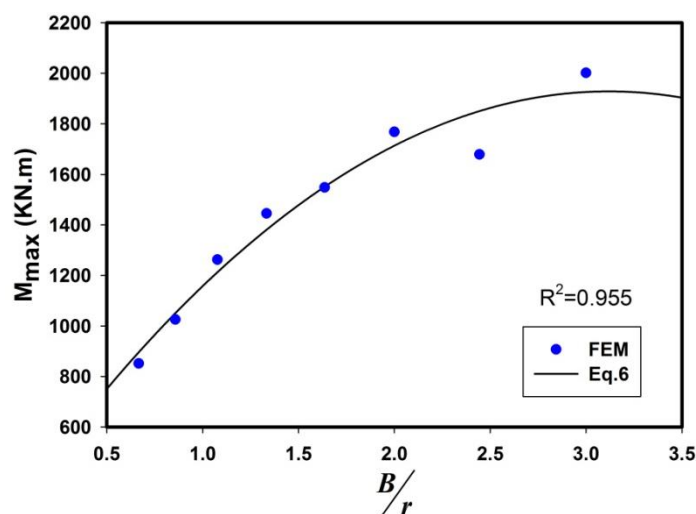


شکل ۸- منحنی اسکلتون اتصالات مجهز به میراگر شکاف‌دار بیضوی با عرض مختلف نوارها

در اتصالات تیر به ستون با توجه ابعاد تیر، لنگر پلاستیک آن مشخص است. می‌توان با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مورد نظر، حداکثر لنگر اتصال را مشخص کرد و با استفاده از رابطه (۶)، نسبت عرض نوار به شعاع سوراخ را در میراگر شکاف‌دار بیضوی تعیین نمود. با در نظر گرفتن نسبت حاصل شده و محدودیت‌های اجرایی می‌توان مقادیر مناسبی را برای عرض نوارها و شعاع شکاف‌های میراگر شکاف‌دار بیضوی پیشنهاد کرد.

در شکل (۹) به کمک نتایج به دست آمده از روش المان محدود، ارتباط بین حداکثر لنگر اتصال (M_{max}) و نسبت عرض نوار به شعاع شکاف (B/r) در میراگر شکاف‌دار بیضوی نشان داده شده است و با استفاده از روش رگرسیون، رابطه (۶) با ضریب همبستگی ۰/۹۵۵ به دست آمده است:

$$M_{max} = -171.776 \left(\frac{B}{r} \right)^2 + 1071.413 \left(\frac{B}{r} \right) + 258.045 \quad (6)$$



شکل ۹- رابطه بین حداکثر لنگر اتصال و نسبت عرض نوار به شعاع شکاف در میراگر شکاف‌دار بیضوی

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش المان محدود، عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ستون فولادی مجهز به میراگرهای شکافدار مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی پیشنهاد شده و تأثیر عرض نوارهای آن در عملکرد لرزه‌ای اتصال بررسی شده است. می‌توان نتایج کلی حاصل شده را به صورت زیر خلاصه کرد:

۱) در میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی، توزیع تنش‌ها در طول نوارهای میراگر بهبود یافته و نسبت به نمونه‌های قبلی، تمرکز تنش در قسمت‌های انتهایی نوارها کاهش و توزیع تنش در قسمت‌های میانی افزایش یافته است.

۲) کاهش عرض نوارهای میراگر شکافدار با شکاف‌های بیضی، موجب کاهش مقادیر تنش‌های فون میسز در اعضای اصلی سازه‌ای مثل تیر و ستون و افزایش آن در میراگرها شده است.

۳) با کاهش عرض نوارهای میراگر شکافدار بیضی، سهم استهلاک انرژی در قسمت‌های میانی نوارهای میراگر افزایش یافته است.

۴) مقایسه منحنی‌های اسکلتون نشان داده است که در اتصالات مجهز به میراگر شکافدار با شکاف بیضی، با توجه به عدم وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی، در اثر کاهش ۱۲ میلی‌متری عرض نوارها از نمونه ESSD5 تا ESSD8، مقاومت نهایی ۴۱/۱ درصد کاهش و حداکثر دوران پلاستیک اتصال ۳۶/۹ درصد کاهش داشته است. نمونه اتصال ESSD5 از نظر میزان جذب انرژی و عدم وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی بهترین عملکرد را داشته است.

۵) در منحنی‌های هیستریزیس حداکثر مقدار نیرو و لنگر تحمل شده توسط اتصال، با کاهش عرض نوارهای میراگر شکافدار بیضی کاهش یافته است.

۶) هرچند میراگرهای شکافدار بیضی با نوارهای عریض‌تر بعضاً انرژی بیشتری را مستهلک نموده‌اند، اما معیار اصلی انتخاب عرض نوار میراگر شکافدار، عدم وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای اصلی است.

۷) با توجه به نتایج به دست آمده از روش المان محدود، یک رابطه برای حداکثر لنگر اتصال (M_{max}) و نسبت عرض نوار به شعاع شکاف (B/r) در میراگر شکافدار بیضی پیشنهاد شده است. در اتصالات تیر به ستون با توجه ابعاد مقطع، لنگر پلاستیک تیر قابل محاسبه است که می‌توان با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مورد نظر، حداکثر لنگر اتصال را مشخص کرد و

با استفاده از رابطه پیشنهادی، نسبت عرض نوار به شعاع شکاف را در میراگر شکافدار بیضی تعیین نمود.

۷- مراجع

- ABAQUS, Version 9.10, Dassault Systemes, USA, 2010.
- 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.
- Chan R, Albermani F, "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", Engineering Structures, 2008, 30, 1058-1066.
- FEMA 350, "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings", SAC Joint Venture, 2000.
- Ghabraie K, Chan R, Huang X, Xie YM, "Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy", Engineering Structures, 2010, 32, 2258-2267.
- Karavasilis TL, Krawala 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, 2012, 70, 358-367.
- Koken A, Koroglu MA, "Waste rubber damper using on steel beam to column connection", International Journal of Arts & Sciences, 2012, 5, 217-222.
- Lee MH, Oh SH, Huh C, Oh YS, Yoon MH, Moon TS, "Ultimate energy absorption capacity of steel plate slit dampers subjected to shear force", Steel Structures, 2002, 2, 71-79.
- Oh SH, "Seismic design of energy dissipating multi-story frame with flexible-stiff mixed type connection", PhD Thesis, Tokyo University, 1998.
- Oh SH, Kim YJ, Ryu HS, "Seismic performance of steel structures with slit dampers", Engineering Structures, 2009, 31, 1997-2008.
- Saffari H, Hedayat AA, Poorsadeghi Nejad M, "Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility", Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80, 138-152.
- Wada A, Huang YH, Yamada T, Ono Y, Sugiyama S, Baba M, Miyabara T, "Actual size and real time speed tests for hysteretic steel damper", Proceedings of Stessa, 1997, 97, 778-785.
- توحیدی مقدم و، سعیدمنیر ح، "بررسی عملکرد میراگر شکاف-دار لوله‌ای تحت بارگذاری لرزه‌ای"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، ۱۳۹۱.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Strips Width of Elliptic Slit Damper on the Seismic Performance of Beam-to-Column Connection

Saeed Farahi Shahri, Seyed Roohollah Mousavi*

Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 20 April 2016; Accepted: 25 January 2017

Keywords:

Earthquake, Beam-to-column connection, Steel slit damper, Elliptic slits, Strips width

1. Introduction

The rigid steel connections were suffered severe damage because of low rotational capacity during earthquakes. Therefore, 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 are used in the beam-to-column connections (Oh et al., 2009). 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. The objective of this paper is to study the effect of strips width of elliptic slit damper on the seismic performance of beam-to-column connection.

2. Methodology

2.1. FE modeling

In order to investigate the effect of strips width of elliptic slit damper, the nonlinear static analysis under cyclic loads is carried out on the connections using ABAQUS software (Fig. 1). As presented in Table 1, eight models of elliptic slit damper with different strips width is used in the beam-to-column connection. The effects of geometrical and material nonlinearities are considered in the analyses. Plasticity behavior of steel materials is based on the Von Mises yielding criteria. Cyclic loading protocol presented by Oh et al. (2009) and FEMA-350 (2000) are used for the verification and other models, respectively. 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.

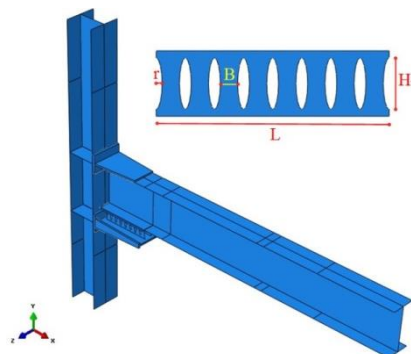


Fig. 1. Finite element model of the connection equipped with the elliptic slit damper

* Corresponding Author

E-mail addresses: saeed_farahi@pgs.usb.ac.ir (Saeed Farahi Shahri), s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir (Seyed Roohollah Mousavi).

Table 1. Geometrical properties of elliptic slit dampers

Model	B(mm)	r (mm)	H _r (mm)	L (mm)	t (mm)
ESSD1	48	16	140	640	19
ESSD2	44	18	140	640	19
ESSD3	40	20	140	640	19
ESSD4	36	22	140	640	19
ESSD5	32	24	140	640	19
ESSD6	28	26	140	640	19
ESSD7	24	28	140	640	19
ESSD8	20	30	140	640	19

The interaction between elements is defined by tie constraints. To simulate the behavior of steel rigid connections, pin boundary conditions are assigned to both ends of the column. Isotropic hardening is assumed for the elastic and plastic state of steels. The standard linear mesh is used for all parts of connection.

2.2. Material properties

The density and the Poisson ratio of steels were assumed 7850 kg/m³ and 0.3, respectively. Other mechanical properties of steel materials present in Table 2. The modulus of elasticity of steels for the damper and other sections are considered 193 GPa and 214 GPa, respectively.

Table 2. Mechanical properties of steel materials (Oh, 1998)

Section	F_y (MPa)	F_u (MPa)	Elongation (%)
Beam web	332.66	478.50	26.63
Beam flange	312.09	471.21	29.60
damper	287.07	454.69	29.80
Column flange	309.60	450.77	30.73
Column web	335.17	461.46	25.91

3. Results and discussion

The accuracy of finite element modeling with ABAQUS software, is evaluated using an experimental specimen tested by Oh et al (Oh et al., 2009). The analytical results have a good agreement with experimental ones. The results show that a decrease of strips width in the elliptic slit dampers leads to decrease of Von Mises stresses in the main structural members, increase of the energy dissipation contribution in the mid parts of strips width and decrease of the maximum values of force and moment. The ultimate strength of connections in the skeleton curves decreases with a decrease in the strips width, as shown in Fig. 2. Considering taking no damage in the main structural members, 12mm decreasing of strips width from ESSD5 to ESSD8 model, leads to 41.1% and 36.9% decreasing of the ultimate strength and the maximum plastic rotation of connection, respectively.

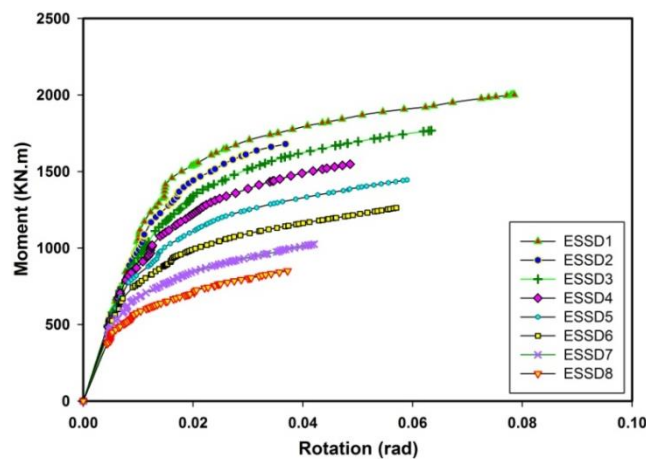
**Fig. 2.** Skeleton curves of connections equipped with various elliptic slit dampers

Fig. 3 shows the relationship of the maximum moment of connection (M_{max}) and the ratio of strip width to the slit radius (B/r) of the elliptic slit dampers. This relationship (Eq. 1) is proposed using regression method with correlation factor of 0.955, as follows:

$$M_{max} = -171.776 \left(\frac{B}{r} \right)^2 + 1071.413 \left(\frac{B}{r} \right) + 258.045 \quad (1)$$

In the beam-to-column connections with respect to section dimensions, beam plastic moment can be calculated. Hence, considering desirable safety factor, the maximum moment of connection is determined. Therefore, the ratio of strip width to the slit radius of the elliptic slit damper can be calculated using proposed equation.

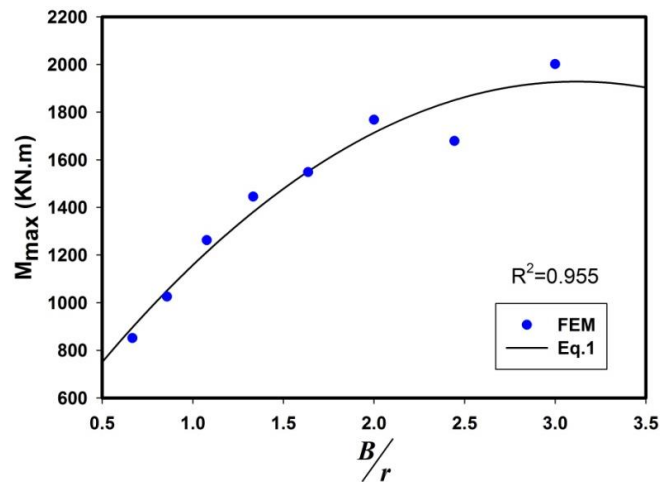


Fig. 3. Relationships of the maximum moment of connection versus the ratio of strip width to the slit radius for elliptic slit dampers

4. Conclusions

Based on the results of analyses, the main following conclusions can be drawn:

- 1) In the proposed slit damper with elliptic slits, stress distribution is improved along the strips width. In addition, stress concentration is decreased in the end parts of strips.
- 2) Decrease of strips width of slit damper, leads to decrease of Von Mises stresses in the main structural members.
- 3) The energy dissipation contribution in the mid parts of strips width increases with a decrease in the strips width of the elliptic slit damper.
- 4) In the hysteresis curves, the maximum value of force and moment sustained by the connection decreases with a decrease in the strips width of the elliptic slit damper.
- 5) Comparison of skeleton curves shows that with respect to taking no damage in the main structural members, a decrease in the strips width is resulted in 41.1% and 36.9% decreasing of the ultimate strength and the maximum plastic rotation of connection, respectively.
- 6) According to the results obtained by finite element models of elliptic slit dampers, an equation is proposed between the maximum moment of connection and the ratio of strip width to the slit radius. Considering section dimensions of the beam-to-column connection, the ratio of strip width to the slit radius of the elliptic slit dampers can be calculated using proposed equation.

5. References

- FEMA 350, "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings", SAC Joint Venture, 2000.
- Oh SH, "Seismic design of energy dissipating multi-story frame with flexible-stiff mixed type connection", PhD Thesis, Tokyo University, 1998.
- Oh SH, Kim YJ, Ryu HS, "Seismic performance of steel structures with slit dampers", Engineering Structures, 2009, 31, 1997-2008.