

## بررسی رفتار سازه‌ای میراگر شکافدار در اتصال تیر به ستون فولادی

افراسیاب سالم<sup>۲</sup>، امید کهنه پوشی<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه آزاد واحد سنندج، سنندج، ایران

### چکیده

بسیاری از قاب‌های خمشی فولادی، در اثر بارهای لرزه‌ای به علت خراب شدن اتصالات آسیب می‌بینند. استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال در سازه‌ها به منظور عدم آسیب به اجزای اصلی سازه، در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این تحقیق، عملکرد میراگر شکافدار فولادی (SSD) در اتصالات تیر به ستون فولادی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. این میراگر از یک ورق فولادی که بر روی آن تعدادی شکاف با انتهایی دایره‌ای شکل ایجاد شده، ساخته می‌شود. به منظور شناخت رفتار این میراگر، عملکرد آن در یک اتصال تیر به ستون فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر اندازه شعاع شکاف‌ها بر روی اتصال، و اشکال دیگری از این نوع میراگر با شکاف‌های بیضی و لوزی شکل در اتصالات تیر به ستون فولادی بررسی شده است. پس از مدل سازی این دو نوع جدید از میراگر به روش المان محدود، منحنی هیستریزیک مدل‌ها و کرنش‌های پلاستیک با هم مقایسه شده است. بر پایه نتایج، میراگر شکافدار فولادی می‌تواند تعداد زیادی از چرخه بارگذاری را تحمل کند. حداکثر لنگر و نیروی وارد شده به اتصال، تغییر شکل و اعوجاج در میراگر با شکاف‌های مختلف مقایسه شده است. همچنین مقایسه برش پایه وارد شده به قاب فولادی تحت جابجایی جانبی و انرژی جذب شده توسط قاب با میراگر SSD و میراگر بیضی شکل انجام شده است. که نتایجی برای استفاده از اندازه یا اشکال بهینه این میراگرها را به دست می‌دهد.

کلمات کلیدی: المان محدود، کنترل غیرفعال، میراگر شکافدار فولادی، بارگذاری چرخه‌ای، اتصال تیر به ستون

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.112329.1416	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.112329.1416	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۰۱	۱۳۹۶/۰۳/۱۲	۱۳۹۶/۱۰/۰۹
			*نویسنده مسئول:		امید کهنه پوشی
			پست الکترونیکی:		okp@iausdj.ac.ir

# Structural behavior of steel slit damper in steel beam to column connection

Afrasiab Salem<sup>2</sup> , Omid Kohnehpooshi<sup>1\*</sup>

1 -Assistance Professor, Department of Civil Engineering. Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran

2 -Department of Civil Engineering. Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran

## ABSTRACT

Most of the steel moment resisting frames, damage at the beam-to-column connections during seismic loads. Application of passive dampers in order to prevent damages to the main components of structure has been an interesting subject for many researchers recently.

In this present study, performance of the metallic yield damper is slit steel damper (SSD) on the steel beam-to-column connection is carried out using finite element model. Thus, first this damper and its connection is simulated. After validation of results, the effect of various dimensional parameters including radius slot, of damper on the performance of damper and its connection was investigated. Then various forms of this damper simulated and their effect on the performance of damper and the steel beam-to-column connection is studied. Moment- rotation, Hysteresis curves and plastic strains for each size of radius slot and different shapes extracted from the analysis were compared. Furthermore base shear force for steel frames with and without slit dampers in term of energy absorption and deformation are compared together. Findings indicated seismic behavior fitted to such dampers.

The results indicate that the slit damper shows a proper function in absorbing energy. Recommendation for appropriate size and shape of slit steel dampers proposed.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2017

Revise Date: 02 June 2018

Accept Date: 23 July 2018

## Keywords:

Energy dissipation

Passive control

steel slit damper

Finite element

Beam to column Connection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.112329.1416

\*Corresponding author: Omid Kohnehpooshi

Email address: okp@iausdj.ac.ir

## ۱- مقدمه

در طی زلزله مقدار زیادی انرژی به سازه وارد می‌شود، که به دو صورت جنبشی و پتانسیل در سازه پدیدار می‌شود، که بایستی به طریقی جذب یا مستهلک شود. از جمله روش‌ها برای جذب انرژی وارده به سازه استفاده از سیستم‌های کنترل غیر فعال می‌باشد. سیستم‌های کنترل غیرفعال نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند و به وسیله تجهیزات طراحی شده از قبیل میراگرها در سازه عمل می‌کنند [۱]. این سیستم‌ها در بخش‌های خاصی از سازه نصب می‌شوند، و به‌عنوان روشهای اقتصادی و موثر برای کاهش خسارت شناخته می‌شوند و بخش زیادی از انرژی ورودی ناشی از زلزله یا باد را جذب می‌کنند. این سیستم‌ها به منابع کنترل انرژی نیاز نداشته و چنانچه پس از زلزله آسیب بینند در حداقل زمان و با کمترین هزینه می‌توان آن‌ها را تعمیر کرد. از میان سیستم‌های کنترل غیر فعال در جذب انرژی، میراگرهای متالیک از جمله موثرترین و اقتصادی‌ترین تجهیزات برای جذب انرژی ورودی می‌باشند. اساس کار آنها بر پایه تغییر شکل غیرخطی میراگر فلزی استوار است. از جمله این میراگرها می‌توان به ADAS، TADAS اشاره کرد.

نوعی دیگر از میراگرها که در دسته میراگرهای تسلیمی قرار می‌گیرد میراگر شکافدار فولادی (SSD) می‌باشد. از ویژگی‌های این میراگر شکافدار، ساده بودن ساخت و عملکرد مناسب آن در بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. این میراگر از یک صفحه فولادی که بر روی آن تعدادی شکاف ایجاد شده، ساخته شده است. این میراگر در سیستم‌های بادبندی و اتصالات تیر به ستون مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ساخت آن از تکنولوژی خاصی استفاده نمی‌شود و ساخت آن آسان می‌باشد [۲].

از جمله تحقیقات صورت گرفته بر روی این نوع از میراگرها توسط می یانگ لی و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۲ می‌باشد. آن‌ها از میراگر شکافدار فولادی در یک قاب مهاربندی ضربدری استفاده کردند، که میراگر شکافدار در محل اتصال بادبندها قرار گرفته بود. آن‌ها یازده نمونه از این میراگر را تحت نیروهای برشی مورد آزمایش قرار دادند، و بر پایه نتایج، این میراگر تحت نیروهای برشی رفتار مناسبی در جذب انرژی داشته و مانع از کمانش بادبندهای ضربدری می‌شد.

چان و همکاران (۲۰۰۸) مطالعات آزمایشگاهی را روی این میراگرها در اتصال تیر به ستون فولادی انجام دادند، که بر پایه مطالعات آزمایشگاهی روابطی را برای مقاومت‌های برشی و خمشی تسلیم میراگرها ارائه نمودند. [۴]. سانگ هون او و همکاران (۲۰۰۹) به منظور تامین شکل پذیری در اتصالات تیر به ستون فولادی از میراگر شکافدار فولادی SSD استفاده کردند [۲]. آن‌ها سه نمونه اتصال تیر به ستون فولادی شامل دو میراگر و یک اتصال ترکیبی با دال بتنی را مورد آزمایش تحت بارهای چرخه‌ای قرار دادند. بر پایه نتایج بدست آمده، این اتصالات رفتار پایدار مناسبی را تحت جابجایی نسبی از خود نشان دادند. تغییر شکل پلاستیک در میراگر SSD روی داد، در حالیکه در تیرها و ستون‌ها رفتار در محدوده الاستیک قرار داشت. همچنین تحقیق آنها نشان داد، دال بتنی بر روی عملکرد میراگر شکافدار تاثیر گذار می‌باشد و در چرخه‌های مثبت بارگذاری، میراگر مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین مدل سه خطی پیشنهادی توسط آنان برای پیش‌بینی سختی میراگر مطابقت خوبی با نتایج آزمایش داشت.

قبرایی و همکاران (۲۰۱۰) میراگر شکافدار دیگری به نام TSSD را ارائه نمودند. این میراگر در واقع نمونه بهینه میراگر ساخته شده توسط چان بود، که براساس روش BESO (روش بهینه سازی تکاملی) تولید شده است. این روش بر پایه بهبود تکاملی تدریجی المان‌ها می‌باشد، که توانایی حذف و افزودن المان‌هایی موثر را دارد. براساس نتایج، افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه‌های اولیه در حدود ۹۶-۵۸ درصد بود [۵]. همچنین ژو و همکاران (۲۰۱۵) تحقیقاتی را برای انتخاب اشکال بهینه میراگرها انجام دادند [۶].

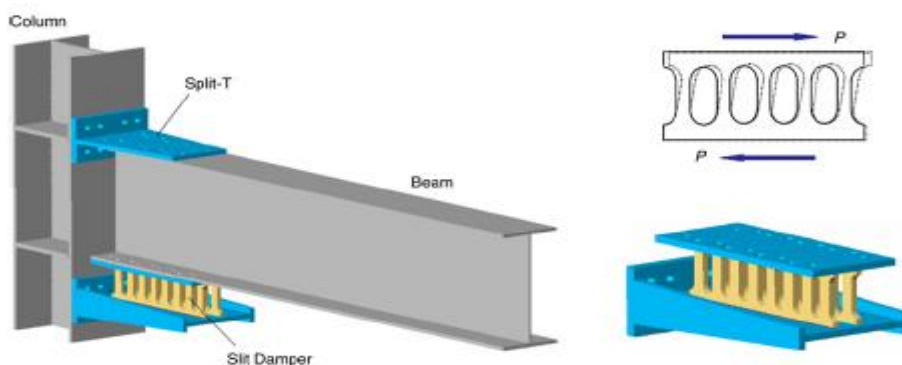
صفری و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه پارامتری به روش المان محدود را روی هندسه این نوع از میراگرها انجام داد، و طرح‌های بهینه‌ای را برای حالت‌های متفاوت مود خرابی در برش و خمش پیشنهاد نمودند. [۷]. کوکن و کروگلو (۲۰۱۵) سه نمونه اتصال مختلف را تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای با مقیاس واقعی قرار دادند [۸]. نمونه اول یک اتصال تیر به ستون معمولی، نمونه دوم اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر لاستیکی، و نمونه سوم مجهز به میراگر شکافدار با میراگر لاستیکی بود. نتایج آزمایش نشان داد که اتصال میراگر شکافدار با میراگر لاستیکی، تغییر شکل پلاستیک را در خود متمرکز کرده و مانع از انتقال آن به اتصال تیر و ستون می‌شود. ژینگ جای و همکاران (۲۰۱۵) نمونه‌ای دیگر از میراگر شکافدار با شکاف‌های غیریکنواخت عمودی ارائه دادند، که در آن تاثیر غیریکنواخت شکاف‌های

میراگر بر روی اتلاف انرژی را بررسی کردند [۹]. اخیراً هم (۲۰۱۷) مطالعاتی در رابطه با ترکیب میراگرها با صفحات اصطکاکی و عملکرد هیبریدی آنها به صورت آزمایشگاهی انجام شده است [۱۰].

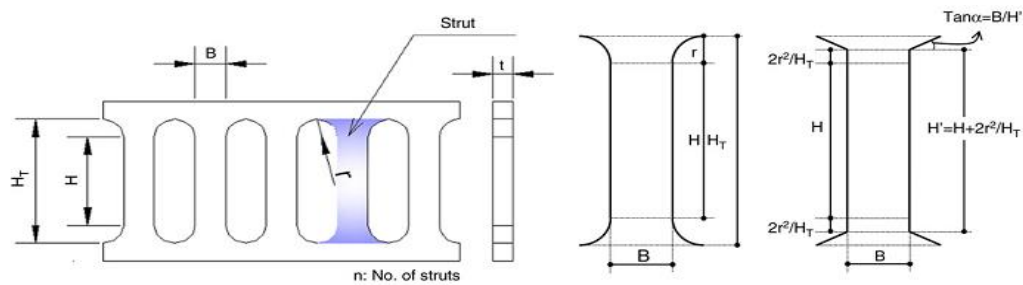
در این تحقیق ابتدا به مدل سازی مدل معرفی شده توسط سانگ هون او [۲] پرداخته می شود، سپس تاثیر اندازه شعاع شکافها بر روی اتصال بررسی گردیده، همچنین اشکال دیگری از این نوع میراگر با شکافهای بیضی و لوزی شکل در اتصالات تیر به ستون فولادی مورد بررسی قرار گرفته است، و در ادامه منحنی هیستریزیک مدلها و کرنشهای پلاستیک با هم مقایسه شده است. بر پایه نتایج، میراگر شکافدار فولادی می تواند تعداد زیادی چرخه بارگذاری را تحمل کند. حداکثر لنگر، نیروی وارده به اتصال، تغییر شکل و اعوجاج در میراگر با شکافهای مختلف مقایسه شده است. همچنین مقایسه برش پایه وارد شده به قاب فولادی تحت جابجایی جانبی و انرژی جذب شده توسط قاب با میراگر SSD و میراگر بیضی شکل انجام شده است. که نتایجی برای استفاده از اندازه یا اشکال بهینه این میراگرها را به دست می دهد.

## ۲- مدل سازی اتصال

شکل (۱) مدل معرفی شده را نشان می دهد. در این اتصال از دو میراگر استفاده شده، و اتصال دهنده T شکل بالایی و پایینی (Split-T) به وسیله پیچ به تیر و ستون متصل شده اند. میراگر SSD به وسیله جوش به صفحه بالایی و اتصال دهنده T شکل پایینی متصل شده است. صفحه فولادی که میراگر به آن جوش شده است، از طریق پیچ به بال تحتانی تیر متصل شده است. ابعاد تیر، ستون و میراگر برای مدل سازی در نرم افزار ABAQUS که از منبع [۲] آورده شده، در شکل (۲) و جدول (۱) نشان داده شده است. نرم افزار آباکوس با طیف وسیعی از المانهای موجود در خود امکان مدل سازی و تحلیل مهندسی را براساس روش اجزای محدود در خود فراهم کرده، و امکان انجام تحلیل های غیرخطی و هندسی را دارا می باشد. در این بخش فرضیات و داده های مورد نیاز برای مدل سازی میراگر شکافدار فولادی نمونه D1 که توسط سانگ هون و همکارانش ساخته شده است، و همچنین اتصال ساخته شده توسط آنها جهت آنالیز با نرم افزار المان محدود آباکوس ABAQUS معرفی خواهد شد. برای مدل سازی تیر، ستون و اتصال دهنده های T شکل بالایی و پایینی از المان SOLID نوع C3D8 استفاده شده است. برای مدل سازی میراگر از المان شش وجهی C3D20 استفاده شده است، این المان دارای گره در نقاط رئوس مکعب و دارای گره در نواحی میانی اضلاع المان است. همچنین برای اتصال میراگرها با صفحات اتصال بالایی و پایینی از قید Tie استفاده شده است. در قسمت تماس بین دو ناحیه ستون و اتصال دهنده T شکل بالایی و پایینی از قید تماسی تعریف می شود.



شکل ۱ - اتصال تیر به ستون با میراگر SSD [۲]



شکل ۲- پارامترهای هندسی میراگر SSD [۲]

جدول ۱- ابعاد میراگر SSD [۲]

t(mm)	L(mm)	HT(mm)	R(mm)	B(mm)	میراگر SSD
ضخامت	طول	ارتفاع شکافها	شعاع شکافها	عرض نوارها	
۱۹	۵۶۰	۱۴۰	۲۰	۳۰	

برای معرفی خواص پلاستیک مقطع از نمودار دو خطی تنش - کرنش استفاده می‌شود. کرنش پلاستیک از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\epsilon_p = \epsilon_{ELO} - \epsilon_y = \epsilon_{ELO} - \frac{\sigma_y}{E} \quad (1)$$

مصالح بکار رفته در مدل‌سازی با نرم افزار، فولاد می‌باشد که نوع آن برای تیرها و میراگرها SS400 و برای ستونها و سخت کننده‌ها (SPLIT-T) از نوع SM490 می‌باشد. ابعاد و مشخصات جدول (۲) برگرفته از مدل سانگ هون و همکاران است [۲]. در جدول (۳) خواص مکانیکی مصالح جهت معرفی به نرم افزار آورده شده است.

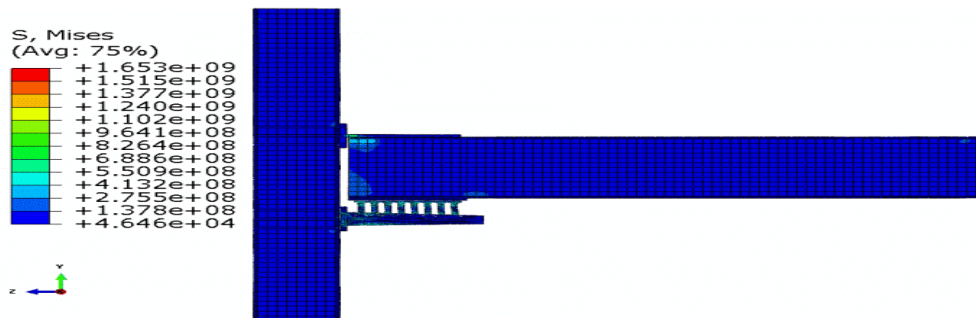
جدول ۲- ابعاد تیر و ستون در مدل‌سازی نرم افزاری

طول (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت بال (mm)	ضخامت جان (mm)	تیر
۳۳۵۰	۳۰۰	۱۷	۱۲	
۳۲۰۰	۴۰۰	۲۱	۲۱	ستون

جدول ۳- معرفی خصوصیات مصالح مکانیکی اجرای اتصال

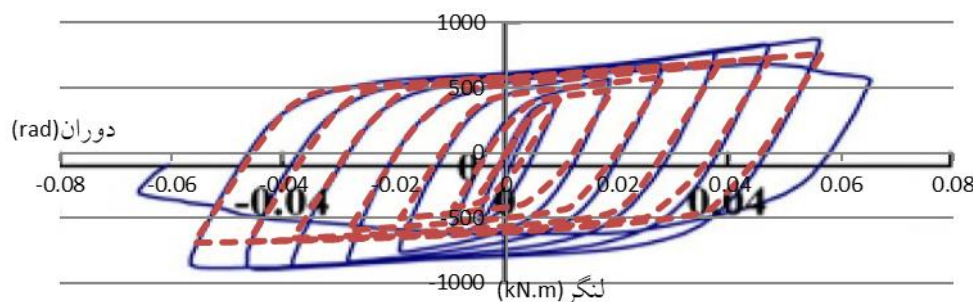
مصلح	$\sigma_y$ (Mpa)	$\sigma_u$ (Mpa)	Elongation (%)	کرنش پلاستیک $\epsilon_p$
جان	۳۳۹	۴۸۸	۲۷	۰,۲۶۸
تیر	۳۱۸	۴۸۰	۳۰	۰,۲۹۸
جان	۳۹۵	۵۵۴	۲۷	۰,۲۶۸
ستون	۳۷۸	۵۵۱	۲۴	۰,۲۳۸
جان	۳۸۸	۵۷۷	۲۵	۰,۲۴۸
Split-t	۳۸۶	۵۷۳	۲۴	۰,۲۳۸
میراگر	۲۸۸	۴۶۴	۳۰	۰,۲۹۸

فلزات زمانی که تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرند، دچار سخت شدگی می‌شوند. سخت شدگی کرنشی نحوه تسلیم را بعد از تسلیم اولیه توصیف، و سطح ثانویه را مشخص می‌کند و در حقیقت معرف تحول سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک می‌باشد. در معرفی سخت شدگی کرنشی اتصال، از سخت شدگی کرنشی ایزوتروپیک استفاده می‌شود، که رفتار سخت شونده ایزوتروپیک در نرم افزار ABAQUS به صورت داده‌های مجزای مربوط به ناحیه پلاستیک ماده قابل تعریف است. در این مرحله هندسه اتصال معرفی شده توسط سانگ-هون و همکارانش توسط نرم افزار ABAQUS براساس توضیحات مدل سازی شده است. شکل (۳) تنش‌های وارده در سیکل آخر بارگذاری برحسب پاسکال، براساس معیار فون میسز را نشان می‌دهد. حداکثر تنش‌ها در میراگر بوجود آمده است.



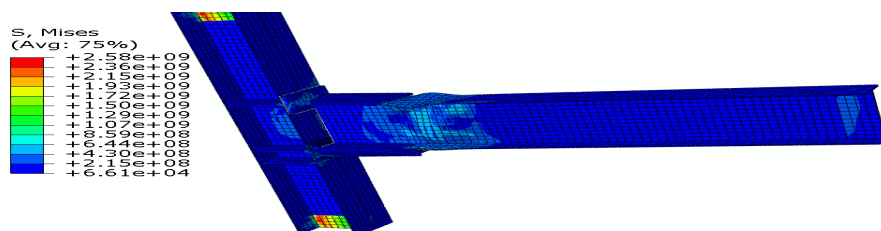
شکل ۳ - مدل سازی اتصال با میراگر SSD

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، همپوشانی بسیار خوبی بین نمودار لنگر- دوران مدل سازی (خط چین) و نمودار لنگر- دوران مدل آزمایشگاهی مرجع وجود دارد.



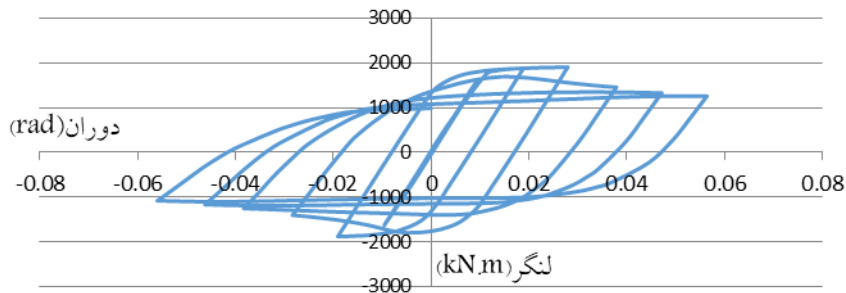
شکل ۴ - مقایسه منحنی هیستریزس لنگر - دوران نمونه مدل سازی با نمونه آزمایشگاهی مرجع SSD-D1.

به منظور درک بهتر از عملکرد میراگر، اتصال معرفی شده در این تحقیق بدون میراگر شکافدار فولادی مورد بارگذاری قرار می‌گیرد، که نتایج حاصل از بارگذاری در شکل (۵) دیده می‌شود.



شکل (۵) تغییر شکل نهایی در اتصال بدون میراگر SSD

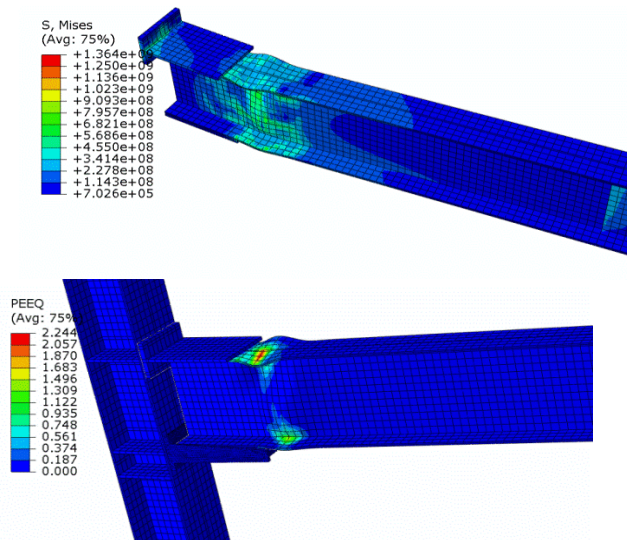
بر پایه نتایج، حداکثر تنش در پایان سیکل بارگذاری  $2580 \text{ MPa}$  به دست آمده است. در این حالت بال و جان تیر بطور کلی دچار تغییر شکل شده است. نمودار لنگر - دوران در این حالت بصورت شکل (۶) می باشد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، رفتار هیستریزس اتصال در این حالت نامنظم است و عدم تقارن نمودار نشانه‌ی عدم شکل پذیری مناسب اتصال است. در نمودار لنگر- دوران رسم شده، حداکثر لنگر وارده بر اتصال  $1911/74$  کیلونیوتن - متر است. با توجه به اینکه ظرفیت لنگر پلاستیک تیر  $1250$  کیلونیوتن-متر است، این مقدار در حدود  $53$  درصد بیشتر از ظرفیت پلاستیک تیر است.



شکل (۶) منحنی لنگر - دوران در اتصال بدون میراگر SSD

با توجه به شکل (۶) در چرخه‌های اولیه بارگذاری لنگرهای زیادی به اتصال وارد شده است که بیشتر از ظرفیت پلاستیک تیر است.

شکل (۷-الف) کانتور کرنش پلاستیک معادل، و شکل (۷-ب) تنش‌های وارده به تیر در اتصال بدون میراگر SSD را نشان می دهد، که مفاصل پلاستیک در تیر ایجاد شده، و خرابی کمانش موضعی در بال تیر و لهیدگی جان تیر در اتصال بدون میراگر شکافدار فولادی اتفاق افتاده است.



(ب)

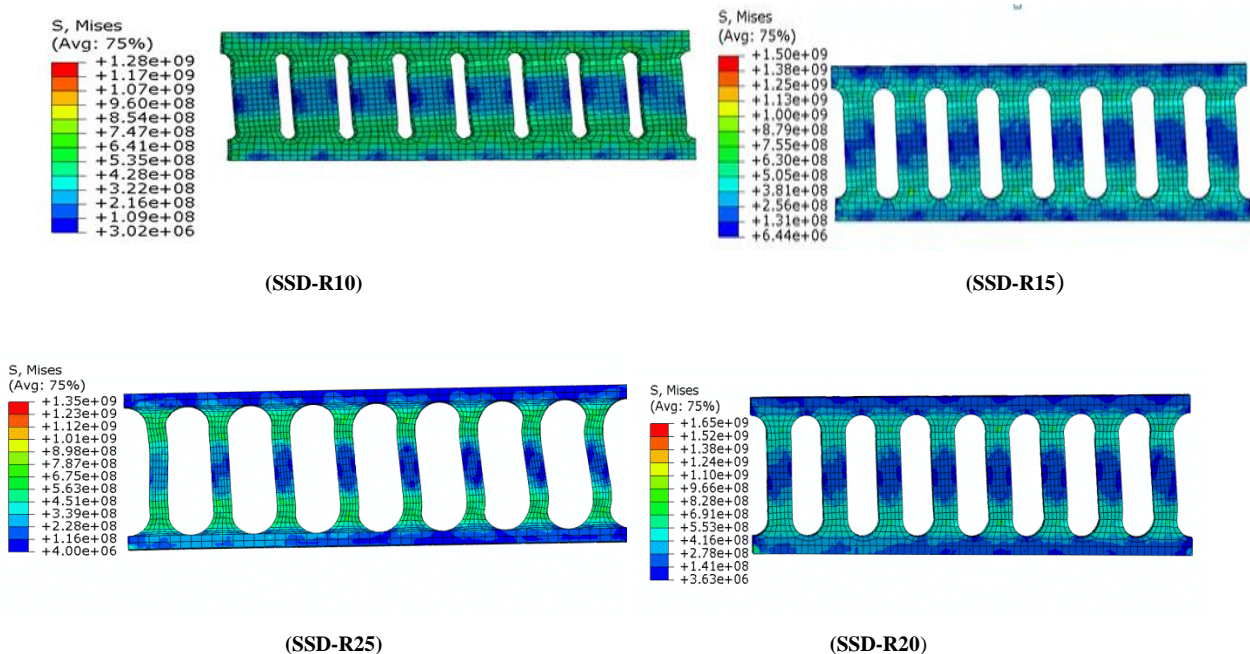
(الف)

شکل (۷-الف) کانتور کرنش پلاستیک معادل شکل (۷-ب) کانتور تنش وارد شده به تیر در اتصال بدون میراگر SSD



### ۳- بررسی پارامتری تاثیر شعاع شکافها بر روی اتصال (SSD-R)

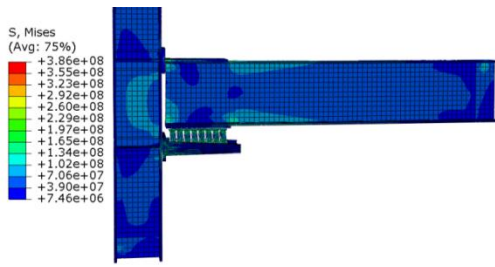
جهت بررسی تاثیر شعاع ناحیه گرد شده انتهایی شکافها بر روی میراگر شکافدار فولادی و همچنین اتصال معرفی شده، چهار نمونه از این میراگر با شعاعهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتری در نظر گرفته شده است. جهت اختصار در معرفی میراگر، اندازه شعاع در کنار حرف انگلیسی R نوشته می شود. ابعاد سایر قسمت های اتصال شامل تیر، ستون و اتصال دهنده های T شکل در هر چهار نمونه مشابه است. در شکل (۸) کانتور تنشها در میراگرها بر اساس معیار فون میسز مشاهده می شود. با مقایسه کانتور تنشها، در نمونهی دارای شکاف ۱۰ میلیمتری (SSD-R10) قسمت های بیشتری از سطح میراگر در اطراف نواحی انتهایی شکافها دچار تنش بحرانی شده، و تقریباً تمام سطح انتهایی میراگر دچار تنش بیشتری شده است. در میراگر با شعاع ۲۵ میلیمتری (SSD-R25) به علت کم شدن عرض نوارها، با وجود کاهش نیروها به چشمه اتصال، تنش زیادی به میراگر وارد شده است. با افزایش شعاع شکاف میراگرها، به علت کمتر شدن عرض نوارهای میراگر تغییر شکل بیشتر در آنها دیده می شود.



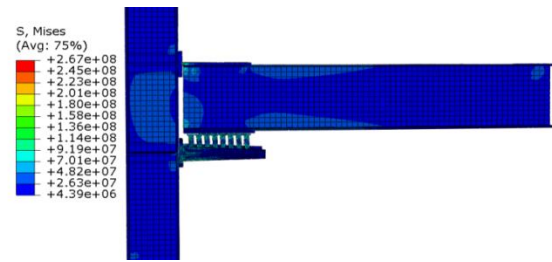
شکل (۸) مقایسه کانتورهای تنش در میراگر با شکاف دارای شعاع متفاوت

در شکل (۹) کانتورهای تنش بر اساس معیار فون میسز مربوط به اتصال تیر به ستون در پایان بارگذاری مشاهده می شود. در نمونه اتصال با میراگر SSD که دارای شعاع شکاف ۱۰ و ۱۵ میلیمتری می باشد، لنگرها و نیروهای بیشتری به اتصال وارد، و تنش های بیشتری به چشمه اتصال وارد می شود. در اتصال با میراگر (SSD-R10) حداکثر تنش های به وجود آمده در چشمه اتصال ستون ۲۲۹ MPa الی ۲۶۰ MPa است. در اتصال با میراگر (SSD-R15) حداکثر تنشها در ناحیه چشمه اتصال ستون ۱۵۸ MPa الی ۱۸۰ MPa است. لذا با افزایش شعاع از تنش در میراگر کاسته شده است. در اتصال با میراگر (SSD-R20) مشاهده می شود که حداکثر تنش در پایان سیکل بارگذاری بر اساس معیار میسز ۱۶۵۰ MPa است، که در میراگر ایجاد شده است. در این مدل از میراگر، حداکثر تنش در چشمه اتصال ۳۷ MPa الی ۷۴ MPa به دست آمده است. حداکثر تنش در چشمه اتصال ستون با میراگر (SSD-R25) ۳۴ MPa است. لذا با افزایش شعاع میراگر تنش های انتقال یافته به چشمه اتصال ستون کاهش یافته است.

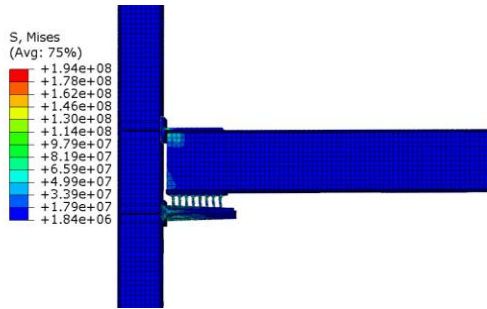




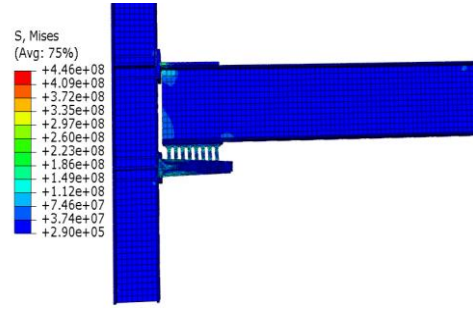
الف: میراگر (SSD-R10)



ب: میراگر (SSD-R15)



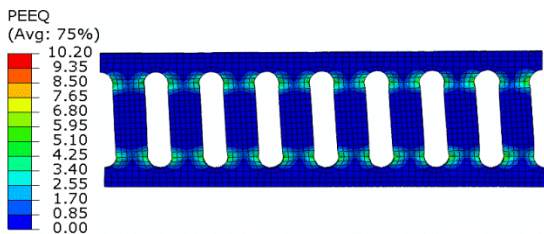
ج: میراگر (SSD-R20)



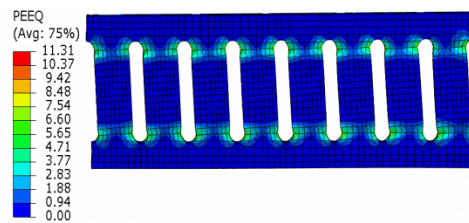
د: میراگر (SSD-R25)

شکل (۹) کانتورهای تنش بر اساس معیار فون میسز مربوط به اتصال تیر به ستون در پایان بارگذاری

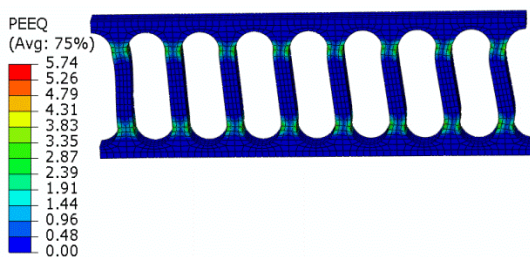
همانطور که در اشکال (۱۰-الف) تا (۱۰-د) دیده می‌شود، در نمونه با شعاع ۲۵ میلیمتری که دارای بیشترین مقدار شعاع شکاف است، کمترین کرنش پلاستیک معادل برابر با ۵/۷۴ به دست آمده است. لذا با افزایش شعاع، کرنش‌های پلاستیک کاهش پیدا کرده، و بیشترین کرنش پلاستیک معادل در شعاع ۱۰ میلیمتری برابر با ۱۱/۳۱ به دست آمده است. همچنین نواحی انتهایی نوارهای میراگر محل تمرکز کرنش‌های پلاستیک می‌باشند.



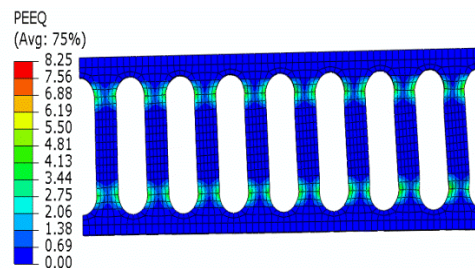
ب: (SSD-R15)



الف: (SSD-R10)



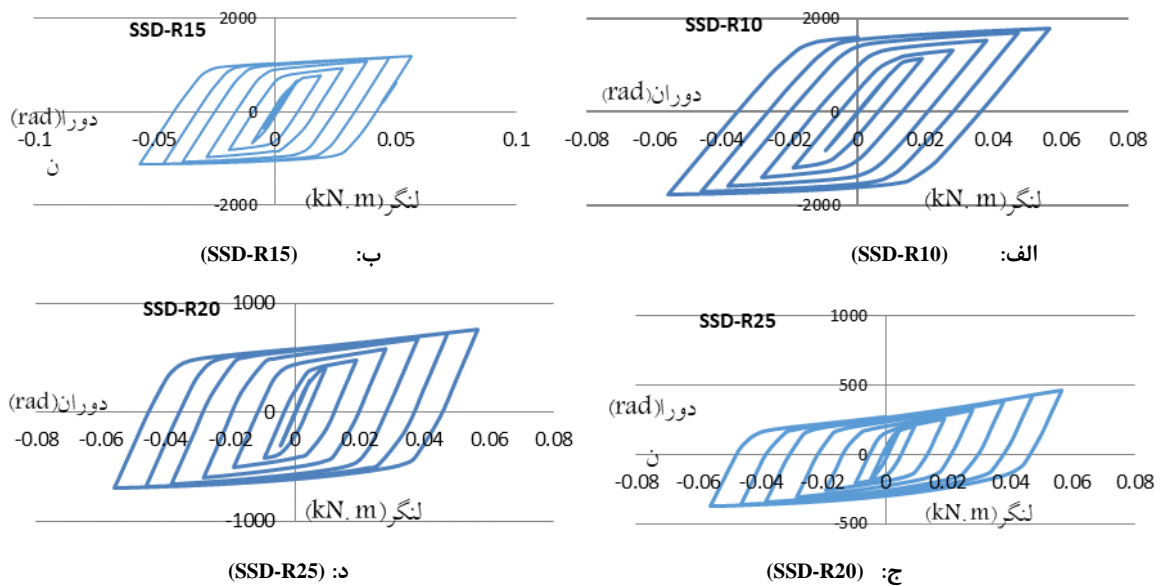
د: (SSD-R25)



ج: (SSD-R20)

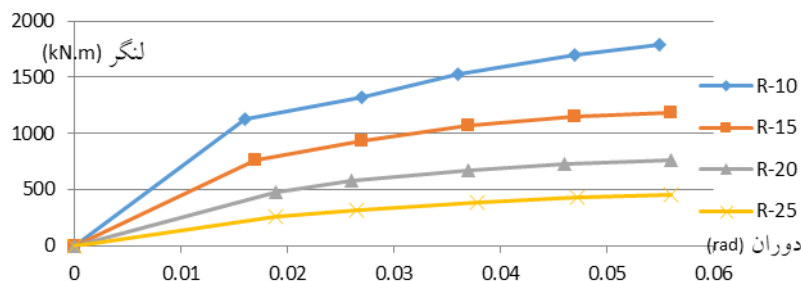
شکل (۱۰) کانتور کرنش پلاستیک معادل در میراگرها

با توجه به منحنی‌های رسم شده در اشکال (۱۱-الف) تا (۱۱-د)، هر چهار نمونه‌ی اتصال منحنی‌های هیستریزیس منظمی دارند. منحنی هیستریزیس مربوط به شعاع ۱۰ میلیمتری (SSD-R10) نسبت به دو نمونه دیگر لاغرتر می‌باشد، و این به معنای سطح جذب انرژی کمتر است. بزرگی لنگرها در اتصال با نمونه‌ی مربوط به شعاع ۱۰ میلیمتر بیشتر، و حداکثر لنگر به دست آمده ۰/۲ / ۱۷۹۲ کیلو نیوتن - متر می‌باشد، که بیشتر از ظرفیت پلاستیک تیر (۱۲۵۰ کیلو نیوتن - متر) است. در اتصال با نمونه میراگر (SSD-R15) این مقدار، ۱۱۸۶/۰۸ کیلو نیوتن - متر است، که حدود ۵/۲ درصد کمتر از ظرفیت پلاستیک تیر است. در نمونه‌ی با شعاع ۲۰ میلیمتری، حداکثر لنگر برابر با ۷۵۹/۶ کیلو نیوتن - متر می‌باشد. در نمونه‌ی با شعاع ۲۵ میلیمتری، حداکثر لنگر وارده به اتصال برابر با ۴۵۴/۶ کیلو نیوتن - متر می‌باشد، که نشان دهنده‌ی سختی کم این نمونه نسبت به سه نمونه دیگر است. با افزایش شعاع شکاف‌های میراگر، لنگرهای انتقال یافته به اتصال کاهش پیدا می‌کند، بنابراین نمونه‌های دارای شعاع ۲۰ و ۱۵ میلیمتری دارای رفتار شکل‌پذیر بهتری نسبت به دو نمونه دیگر است.



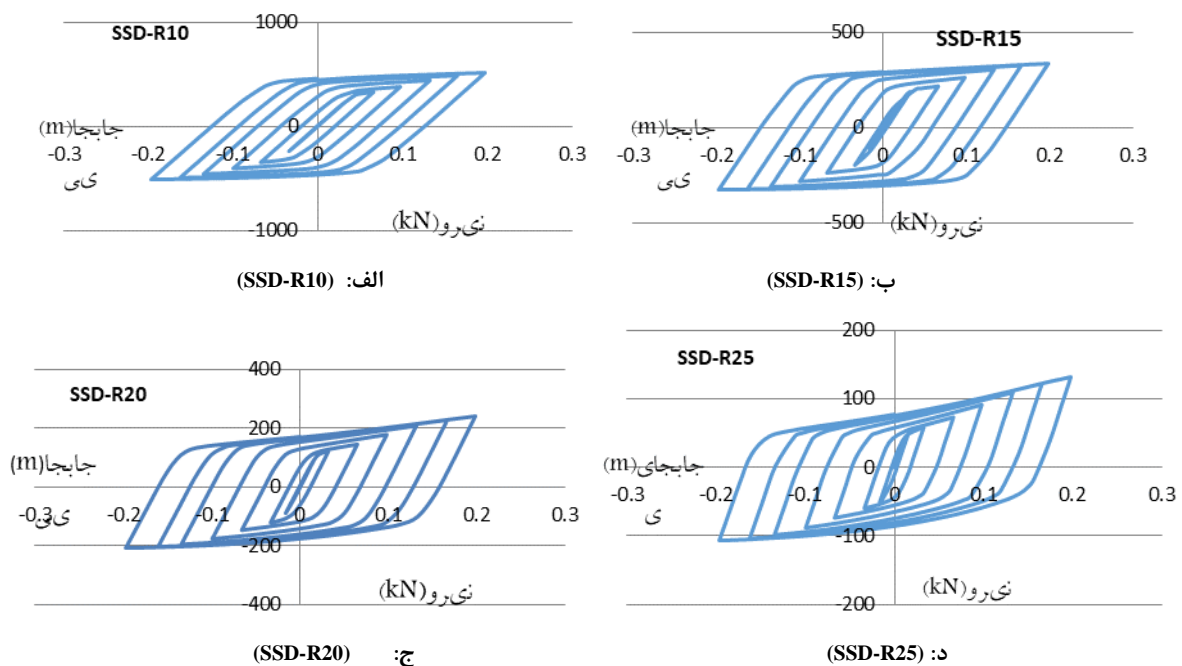
شکل (۱۱) منحنی هیستریزیس لنگر- دوران در میراگرها

در شکل (۱۲) نمودارهای لنگر دوران در نواحی مثبت بارگذاری با هم مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که هر چهار نمونه حداکثر دوران‌های مشابه را تحمل کرده‌اند. اما در نمونه میراگر SSD-R15 حداکثر لنگر انتقال یافته به اتصال در حدود ۵ درصد کمتر از ظرفیت پلاستیک تیر است. بنابراین با مقایسه هر چهار نمونه، با توجه به سختی بیش از حد میراگر SSD-R10 و عدم مقاومت در نمونه SSD-R25، میراگر SSD-R20 عملکرد بهتری دارد.



شکل (۱۲) مقایسه نمودار لنگر- دوران اتصال با چهار نمونه میراگر

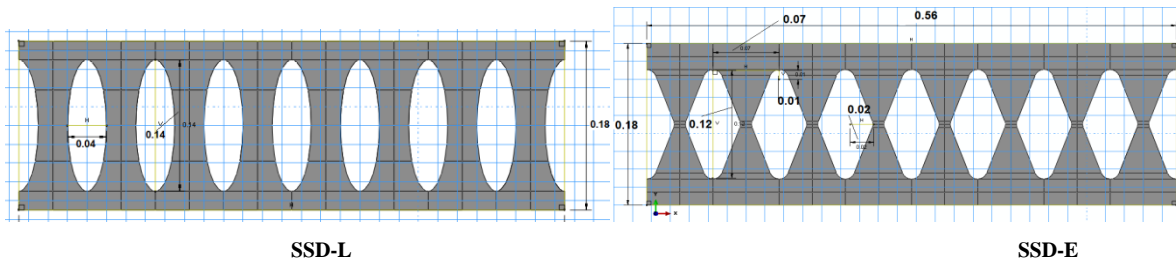
با دقت در اشکال (الف-۱۳) تا (د-۱۳) مربوط به منحنی‌های نیرو-جابجایی اتصال با میراگرهای ذکر شده به این نتیجه می‌رسیم، که نمودار نیرو - جابجایی مربوط به نمونه دارای شعاع ۱۰ میلیمتری (SSD-R10) دارای حداکثر نیروی ۵۱۲/۱۵ کیلو نیوتن وارد بر اتصال می‌باشد. با افزایش شعاع شکاف‌ها این مقدار کمتر شده، بطوریکه در نمونه ۱۵ میلیمتری این مقدار ۳۳۸/۱۵ کیلو نیوتن و در نمونه میراگر شکافدار با شعاع ۲۰ میلیمتری این مقدار برابر با ۲۱۶/۹ کیلو نیوتن و در نمونه ۲۵ میلیمتری ۱۲۹/۹۰ کیلو نیوتن می‌باشد. در نمونه (SSD-R25) شاهد عدم تقارن منحنی در نواحی مثبت و منفی بارگذاری هستیم، که نشان‌دهنده این است که شاهد رفتار یکنواختی در بارهای رفت و برگشتی از این مدل میراگر نیستیم. با افزایش شعاع میراگر، سختی آن کاهش می‌یابد و در واقع نمونه دارای کمترین شعاع بیشترین سختی و انتقال نیرو را از خود نشان داده است.



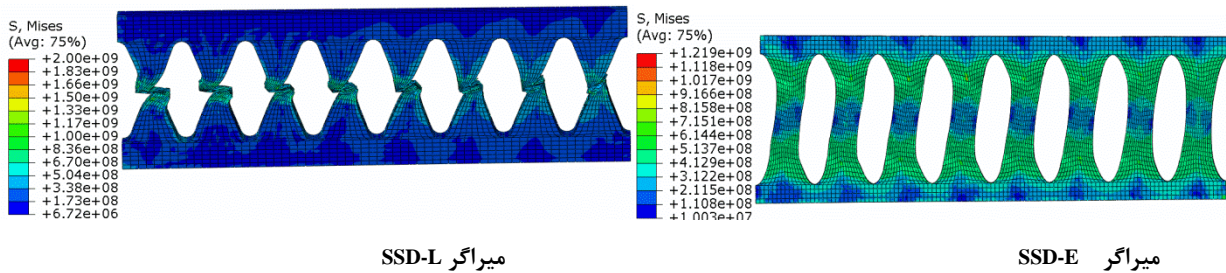
شکل (۱۳) منحنی هیستریزیس نیرو - جابجایی

#### ۴- میراگر با شکاف‌های بیضی شکل (SSD-E) و لوزی شکل (SSD-L)

در ادامه تحقیق دو نوع جدید از این میراگر با شکاف‌های بیضی شکل SSD-E و لوزی شکل SSD-L مدل‌سازی می‌شود. ابعاد این دو مدل در شکل (۱۴) نشان داده شده است. تعداد شکافها، ضخامت، طول و ارتفاع کل شکاف‌ها مشابه میراگر مرجع (SSD) است. در شکل (۱۵) توزیع تنش پس از بارگذاری در اتصال دیده می‌شود. در نمونه SSD-L توزیع تنش حداکثر در نواحی میانی میراگر است، اما در نمونه SSD-E تنش‌ها در طول نوارهای میراگر توزیع شده‌اند.

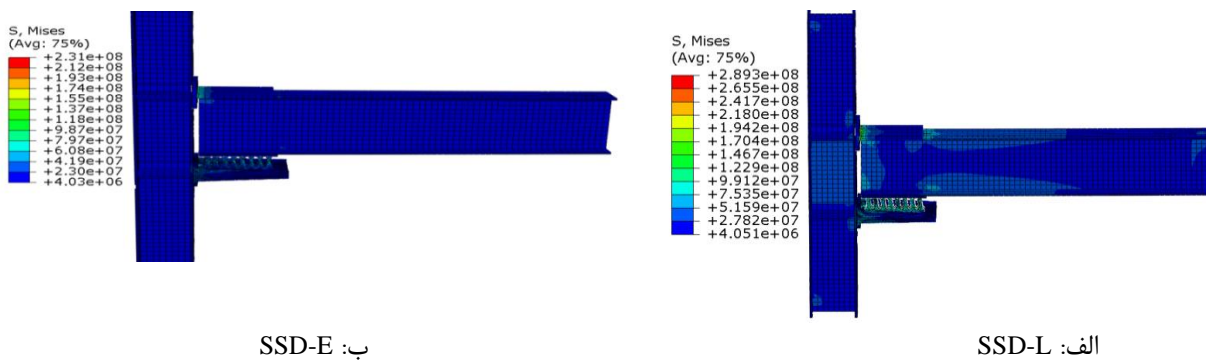


شکل ۱۴- ابعاد میراگر با شکاف بیضی شکل SSD-E و لوزی شکل SSD-L



شکل ۱۵- توزیع تنش فون مایسز در میراگرهای SSD-E و SSD-E

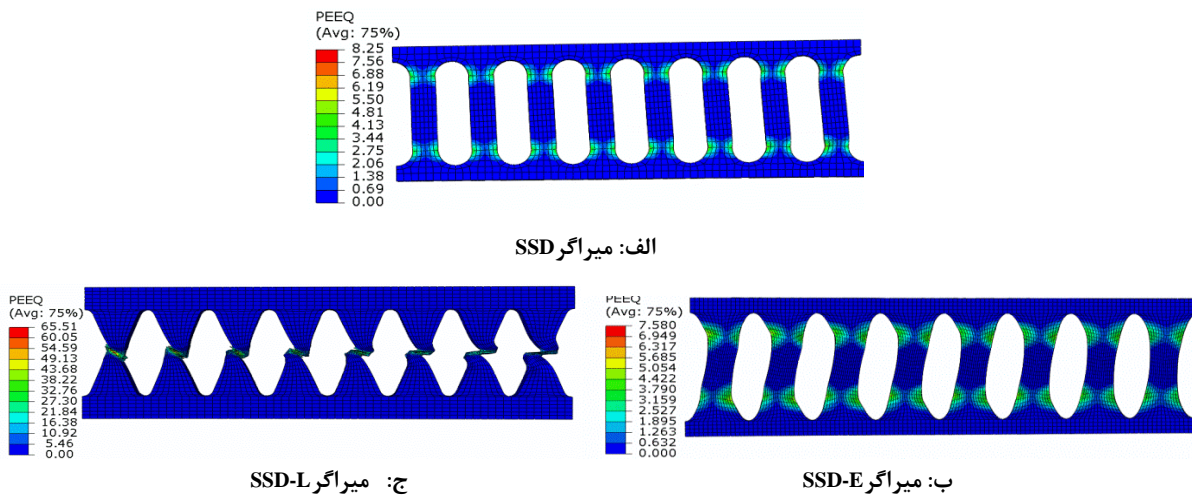
اشکال (۱۶-الف) و (۱۶-ب) توزیع تنش بر حسب پاسکال در چشمه اتصال در پایان چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، به اتصال با میراگر بیضی شکل تنش‌های بیشتری وارد شده است. محل تشکیل تنش‌های حداکثر در هر دو نمونه دور از ستون بوده، و در میراگر تشکیل شده است. تمرکز تنش در میراگر باعث ایجاد مفاصل پلاستیک در آن می‌شود. چنین رویکردی باعث می‌گردد که تیر و ستون در اتصال در ناحیه‌ی الاستیک باقی بمانند.



شکل ۱۶- کانتور تنش با میراگر الف: SSD-L و ب: SSD-E

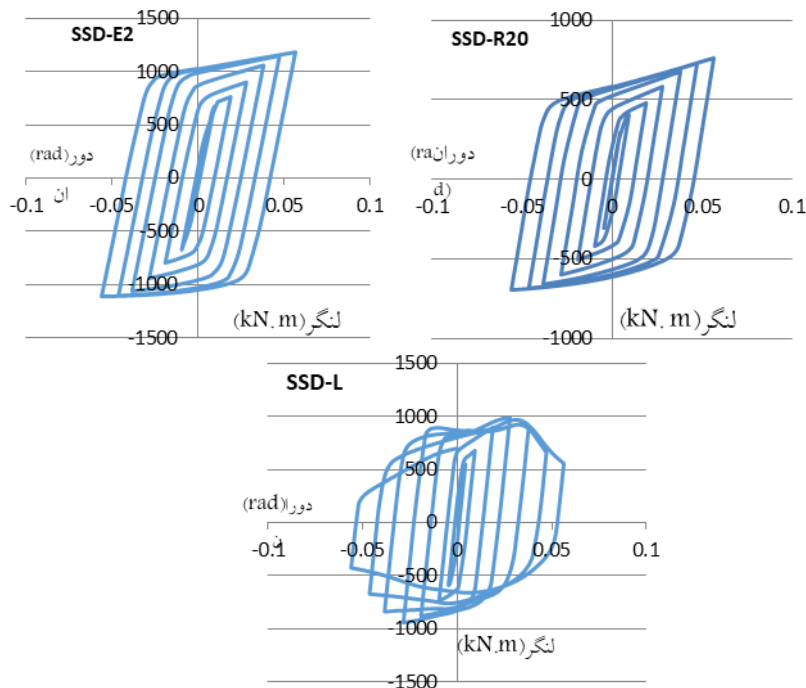
نتایج حاصل از کرنش‌های پلاستیک معادل (PEEQ) در اشکال (۱۷-الف) تا (۱۷-ج) نشان داده شده است. این شاخص مقیاسی برای اندازه‌گیری تقاضای کرنش غیر الاستیک موضعی است. افزایش این شاخص بیانگر افزایش کرنش‌ها و تغییر شکل بیشتر در میراگر است. شکل زیر نشان می‌دهد، که کرنش‌های پلاستیک در نمونه با شکاف‌های لوزی شکل بسیار بیشتر از نمونه مرجع و نمونه با شکاف‌های بیضی شکل است. بیشترین اعوجاج در نمونه با شکاف‌های لوزی شکل بدست آمده است. این مقدار  $8/64$  برابر بیشتر از نمونه‌ی با شکاف‌های بیضی شکل (SSD-E) و  $7/94$  برابر بیشتر از نمونه‌ی با شکاف‌های دایره‌ای (SSD) می‌باشد.





شکل ۱۷ - کرنش پلاستیک معادل در میراگرها

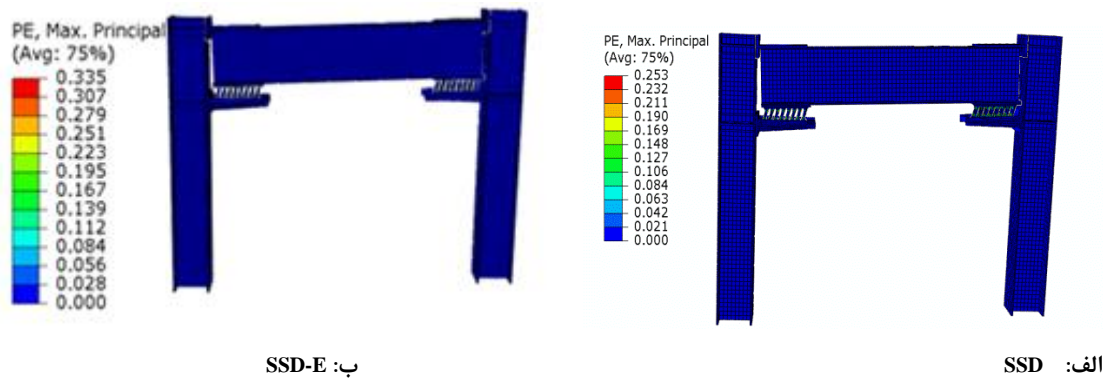
در شکل (۱۸) منحنی هیستریزیس لنگر - دوران سه مدل اتصال با میراگرهای ذکر شده رسم شده است. همانگونه که دیده می-شود در نمونه SSD-L نمودار هیستریزیس لنگر - دوران، نامنظم است و در نمونه‌ی با میراگر SSD-E منحنی هیستریزیس منظم بوده، هر چند به دلیل سختی بیشتر میراگر، لنگرهای بیشتری به اتصال وارد شده است. حداکثر لنگر در این منحنی ۱۱۷۹/۱۵ کیلو نیوتن-متر می‌باشد، که این مقدار ۶ درصد کمتر از ظرفیت پلاستیک تیر (۱۲۵۰ کیلونیوتن-متر) است.



شکل ۱۸ - منحنی هیستریزیس لنگر - دوران سه مدل اتصال با میراگرها

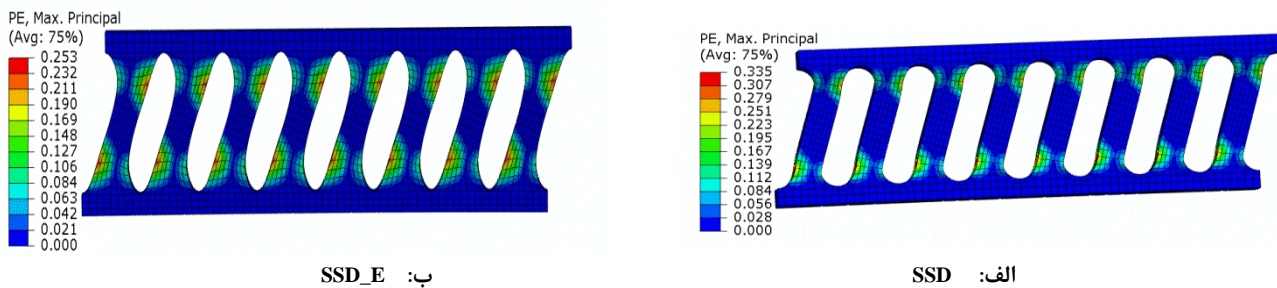
#### مقایسه نمودار برش پایه در قاب فولادی با میراگر SSD و قاب فولادی با میراگر SSD-E

با توجه به عملکرد مناسب میراگرهای SSD و SSD-E در میان موارد بررسی شده، عملکرد این دو میراگر در یک قاب فولادی تحت جابجایی جانبی (۱۰ سانتیمتر) در بالای قاب و در راستای سخت کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابعاد تیر، ستون و میراگر در جدول (۱) و (۲) آمده است. نتایج کرنش پلاستیک بدست آمده در شکل‌های (۱۹-الف و ب) نشان داده شده است.



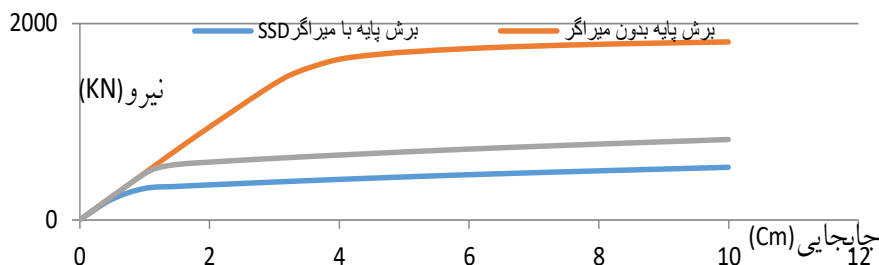
شکل ۱۹- کانتور کرنش پلاستیک در قاب فولادی تحت جابجایی جانبی. الف: قاب با میراگر SSD ب: قاب با میراگر SSD-E

بر پایه نتایج تغییر شکل پلاستیک در هر دو قاب در میراگرها اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر کرنش پلاستیک در اتصال قاب فولادی با میراگر SSD-E برابر با ۰/۲۵۳ بدست آمده است، که کمتر از حداکثر کرنش پلاستیک میراگر (۰/۲۹۸) بر پایه نتایج آزمایشگاهی است. همانطور که در شکل (۲۰-الف و ب) دیده می‌شود توزیع کرنش اصلی در تعداد المان‌های بیشتری در میراگر SSD-E دیده می‌شود، که این مسئله موجب کاهش نهایی کرنش پلاستیک در این میراگر شده است.



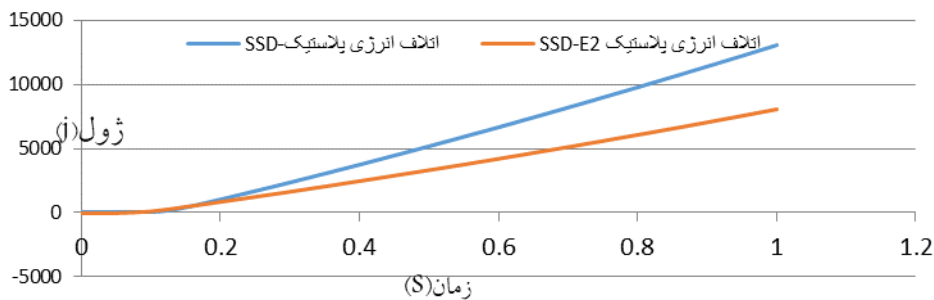
شکل ۲۰- کانتور کرنش پلاستیک در میراگر الف: SSD و ب: SSD-E

در شکل (۲۱) نمودار برش پایه در قاب فولادی با میراگرهای SSD، SSD-E و قاب بدون میراگر نشان داده شده است. برش پایه در قاب بدون میراگر ۱۸۱۰ کیلو نیوتن، حداکثر برش در قاب با میراگر بیضی شکل ۸۱۵/۵۱ کیلو نیوتن و حداکثر مقدار بدست آمده در قاب با میراگر SSD برابر ۵۳۴/۸۳ کیلو نیوتن است. همچنین در شکل (۲۲) اتلاف انرژی پلاستیک در دو میراگر در هر دو قاب با هم مقایسه شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد در میراگر SSD اتلاف انرژی پلاستیک بیشتر بوده است.



شکل ۲۱- مقایسه نمودارهای برش پایه با میراگر SSD و میراگر SSD-E





شکل ۲۲- نمودارهای اتلاف انرژی پلاستیک در میراگر SSD و SSD-E

## ۵- نتیجه گیری

بر پایه نتایج مطالعات، میراگر شکافدار فولادی می‌تواند تعداد زیادی از چرخه بارگذاری را تحمل کند. در بررسی تاثیر پارامتر شعاع شکاف میراگر، در میان چهار نمونه‌ی مدل سازی شده با نرم‌افزار، بیشترین سختی مربوط به نمونه‌ی با کوچکترین شعاع (SSD-R10) است، طوری که حداکثر لنگر تحمل شده در این حالت برابر بیشتر از نمونه‌ی دارای بیشترین شعاع (SSD-R25) است. بیشترین میرایی موثر در نمونه‌ی با شعاع (SSD-R15) برابر ۰/۴۲ به دست آمده، و کمترین مقدار در نمونه با شعاع (SSD-R25) برابر ۰/۳۲ به دست آمده است.

بیشترین لنگر وارده به اتصال در نمونه‌ی ساخته شده با میراگر با شکاف‌های بیضی شکل به دست آمده است. حداکثر لنگر در این نمودار ۱۱۷۹/۱۵ کیلو نیوتن - متر می‌باشد، که این مقدار کمتر از حد پلاستیک تیر است. در مقایسه بین سه نوع از این میراگرها، نمونه‌ی با شکافهای لوزی شکل (SSD-L) دارای بیشترین اعوجاج و کرنش پلاستیک می‌باشد. به گونه‌ای که کرنش پلاستیک معادل این میراگر ۸/۶۴ برابر بیشتر از نمونه‌ی با شکافهای بیضی شکل (SSD-E) و ۷/۹۴ برابر بیشتر از نمونه با شکافهای دایره‌ای می‌باشد، که استفاده از این شکل میراگر را نامطلوب می‌نمایاند. در مقایسه‌ی نمودار برش پایه در قاب فولادی با میراگر SSD و قاب با میراگر SSD-E نتایج نشان می‌دهد، که به قاب با میراگر SSD برش پایه کمتری وارد شده و انرژی بیشتری در میراگر SSD جذب شده است.

## منابع

- [1] T.T. Soong, B.F. Spencer Jr. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of -the-art and state-of-the-practice. *Journal of Engineering Structures*, 24, 243-259.
- [2] Sang-Hoon Oh, Young-Ju Kim, Hong-Sik Ry. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Journal of Engineering Structures*, 31, 1997-2008.
- [3] Myung-Ho lee, sang-Hoon Oh, Choong Huh, Young -Suk Oh, Myung-Hoyoon, Tae-Sup Moon. (2002). Ultimate energy absorption capacity of steel plate slit Dampers subjected to shear force. *Journal of steel Structures*, 2, 71-79.
- [4] Chan RWK, Albermani F. (2008) Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Journal of Engineering Structures*. 30, 1058-66.
- [5] Kazem Ghabraie, Ricky Chan, Xiaodong Huang, Yi Min Xie. (2010). Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Journal of Engineering Structures*, 32, 2258-2267.
- [6] Y. H. Xu et al. (2011). Shape Optimization Study of Mild Steel Slit Dampers. *Advanced Materials Research*, Vols. 168-170, pp. 2434-2438.
- [7] H. Saffari, A.A. Hedayat, M. Poorsadeghi Nejad. (2013). Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. *Journal of construction steel research*, 80, 138-152.
- [8] Ali. Köken, Mehmet Alpaslan köroğlu. (2015). Experimental Study on Beam-to-Column Connections of Steel Frame Structures with Steel Slit Dampers. *Journal of Performance of constructed Facilities*, 29(2),
- [9] Zheng Jie, Li Aiqun, and Guo Tong. (2015). Analytical and experimental study on mild steel dampers with non-uniform vertical slits. *journal of Earthq Eng & Eng Vib*, 14, 111-123.
- [10] Jinkoo kim, Hyungjun shin. (2017). Seismic loss assessment of a structure retrofitted with slit-friction hybrid dampers. *Engineering Structures*, 130(1), 336-350.