

بهبود عملکرد اتصالات فولادی تیر به ستون جعبه‌ای با استفاده از میراگر شکاف‌دار

بابک دیزنگیان^{۱*}، راضیه دادگر^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

*سیستان و بلوچستان، صندوق پستی ۹۹۱۱۱۳۱۳۱۱، b.dizangian@velayat.ac.ir

چکیده

با توجه به ضرورت کاهش خسارات ناشی از زلزله در سازه‌های فولادی، بهره‌گیری از میراگرهای غیرفعال، به‌ویژه میراگرهای شکاف‌دار، به‌عنوان رویکردی کارآمد در استهلاک انرژی لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف ارتقای عملکرد اتصالات جوشی تیر به ستون جعبه‌ای، به بررسی تأثیر به‌کارگیری میراگرهای شکاف‌دار اشکل پرداخته است. بدین منظور، ۱۱ مدل اتصال شامل نمونه‌های فاقد میراگر و مجهز به میراگر، با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس و تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شدند. یافته‌ها نشان داد تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک در ناحیه میراگر، موجب کاهش قابل‌ملاحظه تنش و کرنش پلاستیک در اعضای اصلی سازه و جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر می‌شود. بررسی مشخصه‌های هندسی میراگر حاکی از آن است که شکل شکاف و طول میراگر، نقش کلیدی در رفتار اتصال دارند؛ به‌طوری‌که مدل دارای شکاف‌های لوزی بیش‌ترین ظرفیت خمشی و سختی اولیه را ارائه داد. همچنین، افزایش طول میراگر ضمن بهبود عملکرد خمشی، سبب انتقال تنش‌های بیش‌تر به ستون و در نتیجه افزایش احتمال آسیب‌پذیری آن شد. در مجموع، میراگرهای شکاف‌دار اشکل می‌توانند به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر، اقتصادی و قابل‌تعویض برای بهبود عملکرد اتصالات سازه‌های فولادی معرفی شوند.

واژگان کلیدی

اتصالات جوشی تیر به ستون جعبه‌ای، سازه‌های فولادی، میراگر شکاف‌دار، روش اجزای محدود، آباکوس

Improvement of Steel Beam-to-Box Column Connections Performance Using Slit Damper

B. Dizangian, R. Dadgar

Abstract

Given the necessity of reducing earthquake-induced damages in steel structures, the use of passive dampers, particularly slit dampers, has been recognized as an effective approach for seismic energy dissipation. The present study aims to enhance the performance of welded beam-to-box column connections by investigating the effect of employing I-shaped slit dampers. For this purpose, 11 connection models, including both bare and damper-equipped specimens, were analyzed under cyclic loading using the finite element method in ABAQUS software. The results indicated that concentrating inelastic deformations in the damper region significantly reduced stress and plastic strain in the main structural components and prevented the formation of plastic hinges in the beam. Examination of the damper's geometric characteristics revealed that slit shape and damper length play a crucial role in connection behavior; in particular, the diamond-shaped slit model exhibited the highest flexural capacity and initial stiffness. Moreover, increasing the damper length improved flexural performance but transferred higher stresses to the column, thereby raising its vulnerability. Overall, I-shaped slit dampers can be introduced as an effective, economical, and replaceable option for improving the performance of steel structure connections.

Keywords

Welded Beam-to-Box Column Connections, Steel Structures, Slit Damper, Finite Element Method, ABAQUS

۱- مقدمه

زلزله مخرب نورثریج^۱ در سال ۱۹۹۴ آسیب‌پذیری قابل‌توجهی را در اتصالات خمشی جوشی تیر به ستون آشکار ساخت. شکست‌های ترد مشاهده‌شده در این اتصالات موجب کاهش ظرفیت باربری، افزایش تغییرشکل‌های غیرالاستیک و در برخی موارد فروریزش موضعی یا کلی سازه شد. در پی این رخدادها، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی مورد بازنگری قرار گرفت و رویکردهای نوینی با هدف ارتقای شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی در ناحیه اتصال معرفی شد [۱].

انگلهارت^۲ و سابول^۳ (۱۹۹۸)، تقویت اتصالات با ورق‌های پوششی را به‌عنوان روشی برای بهبود عملکرد چرخه‌ای پیشنهاد کردند [۲]. همچنین، انگلهارت و همکاران (۱۹۹۸)، اتصال با مقطع کاهش‌یافته تیر^۴ (RBS) را ارائه کردند تا ناحیه تسلیم به فاصله‌ای دورتر از وجه ستون منتقل شده و عملکرد لرزه‌ای اتصال بهبود یابد [۳]. در ادامه، میرقادی و همکاران (۲۰۱۰)، اتصال تیر با جان موج‌دار^۵ (AW-RBS) را معرفی کردند که علاوه بر ارائه عملکرد لرزه‌ای رضایت‌بخش، موجب کاهش تمرکز تنش در اتصالات RBS معمولی می‌شود [۴].

در ادامه توسعه سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله، ستون‌های جعبه‌ای فولادی جوش‌شده با مقاطع مستطیلی یا مربعی به دلیل مقاومت خمشی دومحوره بالا، به‌طور گسترده در سازه‌های بلندمرتبه و ساختمان‌های واقع در مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد به‌کار گرفته شده‌اند. با این حال، مطالعات تجربی درباره رفتار اتصالات تیر به این نوع ستون‌ها همچنان محدود است. در این اتصالات ضعف در انتقال لنگر و تمرکز کرنش در نواحی جوش می‌تواند منجر به شکست ترد شود [۵]. به‌منظور کاهش این آسیب‌پذیری، چو و وو^۶ (۲۰۰۷)، اتصال جدیدی با ورق‌های بال کاهش‌یافته معرفی کردند که با کاهش نیاز به جوشکاری مستقیم در نواحی بحرانی و جلوگیری از کماتش موضعی تیر، عملکرد لرزه‌ای مناسبی ارائه می‌دهد [۶].

با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای اتصالات، کنترل محل تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک همچنان یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سازه‌ها محسوب می‌شود. هدف اصلی تمامی راهکارهای ارائه‌شده، کاهش کرنش در ناحیه بحرانی جوش و هدایت تغییرشکل‌های پلاستیک به مناطقی دورتر

از وجه ستون است؛ مناطقی که معمولاً شامل بخش‌هایی کنترل‌شده از تیر یا اجزای ثانویه مانند ورق‌های بال کاهش‌یافته می‌شوند. با این حال، در بسیاری از طرح‌ها نظیر اتصالات با مقطع کاهش‌یافته یا انواع تقویت‌شده، تمرکز تغییرشکل‌ها به تیر منتقل می‌شود که می‌تواند منجر به آسیب‌هایی نظیر کماتش موضعی، تغییرشکل‌های ماندگار یا تخریب اجزایی مانند دال‌های کف شود. این آسیب‌ها نه تنها عملکرد لرزه‌ای سازه را کاهش می‌دهند، بلکه هزینه و پیچیدگی تعمیرات پس از زلزله را نیز افزایش می‌دهند [۷].

در سالیان اخیر، استفاده از سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال به‌عنوان راهکاری مکمل یا جایگزین در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم‌ها با افزودن تجهیزات میراگر به سازه، بخشی از انرژی زلزله را مستهلک کرده و پاسخ لرزه‌ای سازه را کاهش می‌دهند. در میان انواع سیستم‌های اتلاف انرژی، میراگرهای شکاف‌دار به دلیل عملکرد مناسب، حلقه‌های هیستریزیس^۸ پایدار و ظرفیت جذب انرژی بالا، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر شناخته می‌شوند [۸].

با توجه به کاربرد گسترده ستون‌های جعبه‌ای در قاب‌های خمشی و چالش‌هایی نظیر خطر شکست ترد در اتصال تیر به این ستون‌ها، بهره‌گیری از سامانه‌های اتلاف انرژی می‌تواند رویکردی مؤثر برای ارتقای عملکرد این اتصالات باشد.

نوآوری‌های پژوهش حاضر شامل استفاده از میراگرهای شکاف‌دار [شکل ۹] در اتصالات خمشی جوشی تیر به ستون جعبه‌ای، بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی میراگر مانند شکل شکاف‌ها و طول میراگر و ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی از طریق مقایسه با دو نوع متداول از اتصالات خمشی جوشی فاقد میراگر است که تاکنون در اتصالات به ستون‌های جعبه‌ای به این شکل بررسی نشده بود. در مقایسه با مطالعات پیشین که عمدتاً بر اتصالات تیر به ستون‌های H شکل تمرکز داشته‌اند، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تعبیه میراگرهای شکاف‌دار در ناحیه اتصال تیر به ستون‌های جعبه‌ای، می‌تواند با کاهش تمرکز کرنش عملکرد این نوع اتصال را ارتقا دهد. جهت بررسی عملکرد این نوع سیستم میراگر در اتصال یادشده، از مدل‌سازی اجزای محدود^{۱۰} در محیط نرم‌افزار آباکوس^{۱۱} استفاده شد.

⁷ Wu

⁸ Hysteresis

⁹ I-Shaped Slit Damper

¹⁰ Finite Element Method

¹¹ Abaqus

¹ Northridge

² Engelhardt

³ Sabol

⁴ Reduced Beam Section

⁵ Accordion-Web RBS

⁶ Chou

۲- مشخصات مدل‌ها و روش تحلیل

۲-۱- مبانی و عملکرد لرزه‌ای میراگر شکاف‌دار

در هنگام وقوع زمین‌لرزه، بخش عمده‌ای از انرژی ورودی سازه با ایجاد تخریب‌های موضعی و مفاصل پلاستیک در اعضای باربر جانبی مستهلک می‌شود. در صورت عدم کنترل این فرآیند، تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک می‌تواند به افت ظرفیت اجزای اصلی و حتی فروریزش سازه منجر شود. برای کنترل این پدیده، سامانه‌های اتلاف انرژی غیرفعال به‌کار می‌روند که با افزایش میرایی مؤثر و در برخی موارد ارتقای سختی، جابه‌جایی نسبی طبقات را کاهش داده و تغییرشکل‌های پلاستیک را به اعضای ثانویه قابل تعویض هدایت می‌کنند.

یکی از مکانیزم‌های مؤثر در استهلاک انرژی زلزله، استفاده از تغییرشکل غیرالاستیک فلزات است که مبانی عملکرد میراگرهای جاری‌شونده فلزی محسوب می‌شود. این میراگرها به دلیل سادگی ساخت، هزینه پایین، قابلیت جایگزینی و پایداری حلقه‌های هیستریزس گزینه‌ای کارآمد هستند [۸]. **روستا و همکاران** (۲۰۲۳)، با مقایسه عملکرد چرخه‌ای انواع میراگرهای جاری‌شونده فلزی، نشان دادند که میراگرهای شکاف‌دار بیش‌ترین ظرفیت خمشی و پایداری‌ترین میرایی مؤثر را ارائه می‌دهند [۹].

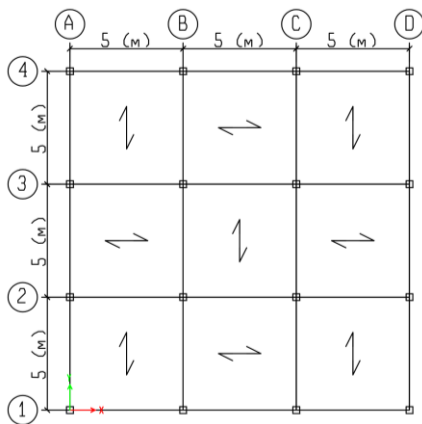
در این میراگرها، تمرکز تنش در اطراف شکاف‌ها موجب تسلیم کنترل‌شده فلز و استهلاک انرژی در ناحیه‌ای محدود می‌شود. عملکرد موفق میراگرهای شکاف‌دار در کاهش ارتعاشات و کنترل آسیب‌های سازه‌ای در مطالعه **اوه^۱ و همکاران** (۲۰۰۹)، به‌خوبی نشان داده شد. نتایج این پژوهش بیانگر تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک در ناحیه میراگر و بهبود رفتار چرخه‌ای اتصال همراه با ظرفیت بالای جذب انرژی بود. همچنین طراحی مناسب میراگرها می‌تواند از بروز رفتار غیرالاستیک در تیر و ستون جلوگیری کند [۱۰]. در همین راستا، **اکبری‌لو و همکاران** (۲۰۱۸)، اتصال مجهز به میراگر شکاف‌دار با مقطع اشکل ارائه کردند که عملکرد خمشی آن نسبت به نمونه‌های رایج بهبود یافته است [۱۱]. در میراگرهای شکاف‌دار، مشخصه‌های هندسی نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار لرزه‌ای میراگر ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که در صورت رعایت محدودیت‌های مشخص هندسی، این میراگرها قادر خواهند بود به عملکرد مطلوب، به‌ویژه شکل‌پذیری مناسب و سختی کافی دست یابند [۱۲ و ۱۳].

در سال‌های اخیر، تلاش‌های متعددی برای ارتقای عملکرد این میراگرها صورت گرفته و گونه‌های متنوعی برای سازه‌های

فولادی معرفی شده‌اند. **پارک^۲** و **اوه** (۲۰۲۰)، اتصال مجهز به میراگر افقی T شکل را توسعه دادند که نتایج آزمایش‌های چرخه‌ای، تمرکز کامل تغییرشکل‌ها در میراگر و بهبود رفتار چرخه‌ای اتصال را نشان داد [۱۴]. **کمال و همکاران** نیز (۲۰۲۳)، گزارش کردند که میراگر شکاف‌دار جانبی می‌تواند استحکام و شکل‌پذیری اتصال را نسبت به مدل افقی T شکل افزایش دهد [۱۵]. بر این اساس، در پژوهش حاضر از میراگرهای شکاف‌دار اشکل برای ایجاد اتصال غیرمستقیم تیر به ستون جعبه‌ای استفاده شده است تا محل تسلیم به ناحیه‌ای کنترل‌شده منتقل و نیازهای کرنشی در اعضای اصلی سازه محدود شود.

۲-۲- مشخصات اتصالات

به‌منظور مدل‌سازی اتصالات، ابتدا یک قاب خمشی فولادی ویژه مطابق با الزامات AISC 360-22، AISC 341-22 و استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) طراحی شد [۱۶-۱۸]. در این سازه تیرها با مقطع اشکل و ستون‌ها با مقطع جعبه‌ای، هر دو از ورق‌های فولادی ساخته شدند. در فرآیند طراحی، کلیه ضوابط قاب‌های خمشی ویژه شامل کنترل فشردگی لرزه‌ای مقاطع، ستون قوی-تیر ضعیف، مقاومت چشمه اتصال، تأمین ورق‌های پیوستگی و مهارهای جانبی-پیچشی رعایت شد. نمای پلان طبقات این سازه در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- پلان طبقات در سازه طراحی شده

پس از طراحی قاب، یک اتصال تیر به ستون گوشه از طبقه دوم به‌عنوان مدل مرجع انتخاب شد. موقعیت مدل مرجع در نمای جانبی قاب و جزئیات مقاطع تیر و ستون در اتصال مورد نظر در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نمایش داده شده است. تمامی مدل‌های این پژوهش شامل نمونه‌های مجهز به میراگر شکاف‌دار

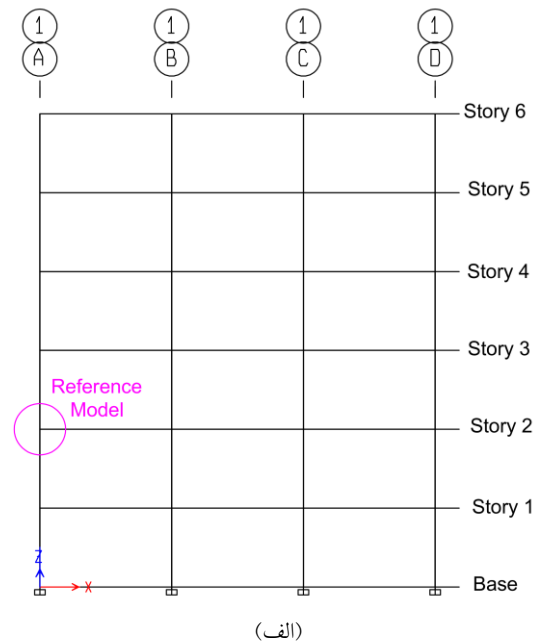
¹ Oh

² Park

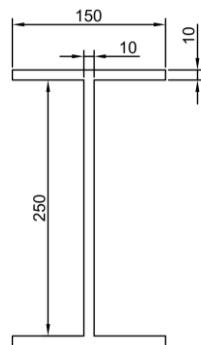
و نمونه‌های مرسوم فاقد میراگر، بر اساس این مدل مرجع توسعه یافته‌اند تا شرایط یکسان تیر و ستون در تمامی مدل‌ها حفظ شود.

جدول ۱- مشخصات کلی مدل‌های مورد بررسی

نام مدل	موقعیت شکاف‌ها	شکل شکاف‌ها	طول میراگر (cm)
WUF-W	-	-	-
RBS	-	-	-
ISD-W	جان	مستطیل افقی	۴۰
ISD-F	بال	مستطیل افقی	۴۰
ISD-W-VRect	جان	مستطیل عمودی	۴۰
ISD-W-Elps	جان	بیضی عمودی	۴۰
ISD-W-Cir	جان	دایره‌ای	۴۰
ISD-W-Dmnd	جان	لوزی	۴۰
ISD-W-L25	جان	مستطیل افقی	۲۵
ISD-W-L55	جان	مستطیل افقی	۵۵
ISD-W-L70	جان	مستطیل افقی	۷۰



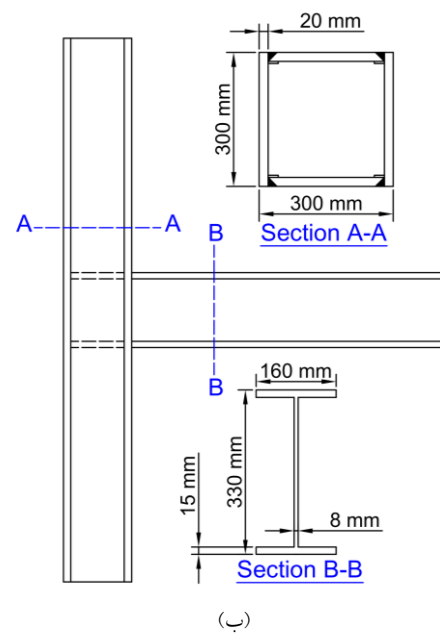
در تمامی مدل‌ها، علاوه بر مقاطع تیر و ستون، ورق‌های پیوستگی (با ضخامت ۱۵ میلی‌متر) نیز یکسان در نظر گرفته شدند و تمام اجزا با اتصالات جوشی مدل‌سازی شدند. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌های دارای میراگر، مقطع عرضی میراگر مطابق شکل (۳) ثابت و یکسان در نظر گرفته شد. در این شکل مقادیر بر حسب میلی‌متر ارائه شده‌اند.



شکل ۳- مقطع عرضی میراگرهای اشکل

مدل‌ها در دو گروه اصلی طراحی شدند. گروه نخست شامل دو مدل فاقد میراگر است که به ترتیب بیانگر اتصالات خمشی تقویت‌نشده جوشی^۱ (WUF-W) و تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS) بوده و به منظور مقایسه عملکرد اتصالات متداول با اتصالات مجهز به میراگر در تحلیل‌ها لحاظ شدند. جزئیات هندسی این مدل‌ها در شکل (۴) ارائه شده و مقادیر بر حسب میلی‌متر هستند.

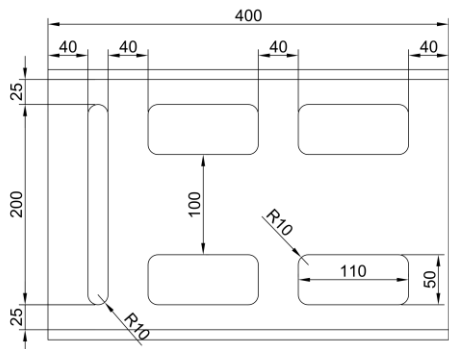
^۱ Welded Unreinforced Flange-Welded web



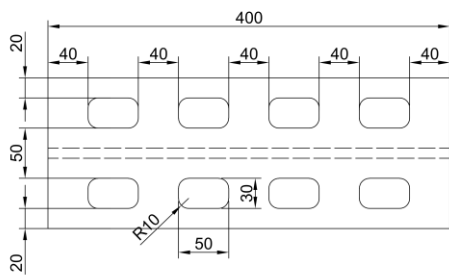
شکل ۲- جزئیات مدل مرجع، الف) موقعیت اتصال در نمای جانبی قاب، ب) ابعاد مقاطع تیر و ستون در اتصال

به منظور ارزیابی اثر میراگرهای شکاف‌دار بر عملکرد خمشی و لرزه‌ای اتصالات جوشی تیر به ستون‌های جعبه‌ای، مجموعه‌ای شامل ۱۱ مدل عددی توسعه یافت. مشخصات کلی این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

بعدي پژوهش ارائه خواهند شد، حاكي از عملکرد بهتر موقعيت شكاف در جان مقطع مي‌راگر است؛ بنا بر اين اين پيكربندي به عنوان پايه طراحی مراحل بعد انتخاب شد.



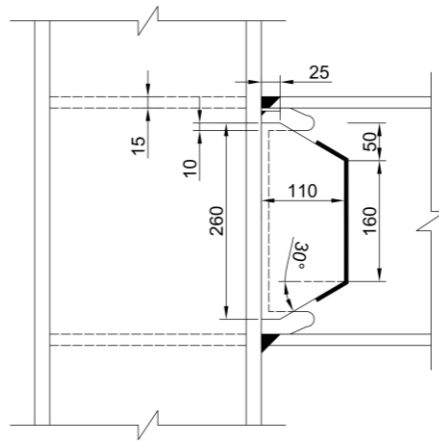
Model Name : ISD-W



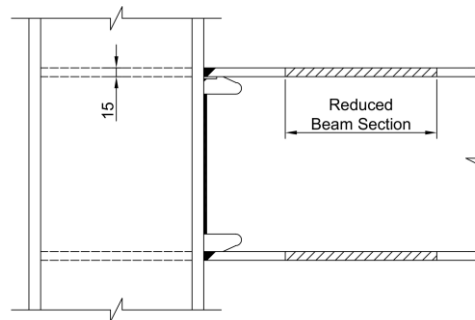
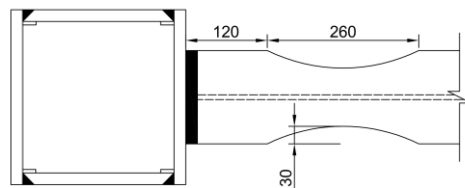
Model Name : ISD-F

شکل ۵- جزئیات هندسی می‌راگر در مدل‌های با موقعیت متفاوت شكاف‌ها

در گام دوم، چهار مدل با اشکال مختلف شكاف شامل مستطیلی عمودی، دایره‌ای، بیضوی و لوزی به منظور بررسی اثر شکل شكاف بر عملکرد خمشی و لرزه‌ای اتصال طراحی شدند. در گام سوم نیز سه مدل با طول‌های مختلف می‌راگر (۲۵، ۵۵ و ۷۰ سانتی‌متر) برای مطالعه اثر طول می‌راگر بر پاسخ اتصال مورد تحلیل قرار گرفتند. شکل (۶) جزئیات هندسی می‌راگرها با شکل‌های متفاوت شكاف و طول‌های مختلف می‌راگر را نشان می‌دهد؛ تمام اندازه‌ها در شکل بر حسب میلی‌متر بیان شده‌اند. موقعیت قرارگیری و جزئیات جوشکاری می‌راگر به تیر و ستون برای دو نمونه منتخب در شکل (۷) ارائه شده است.



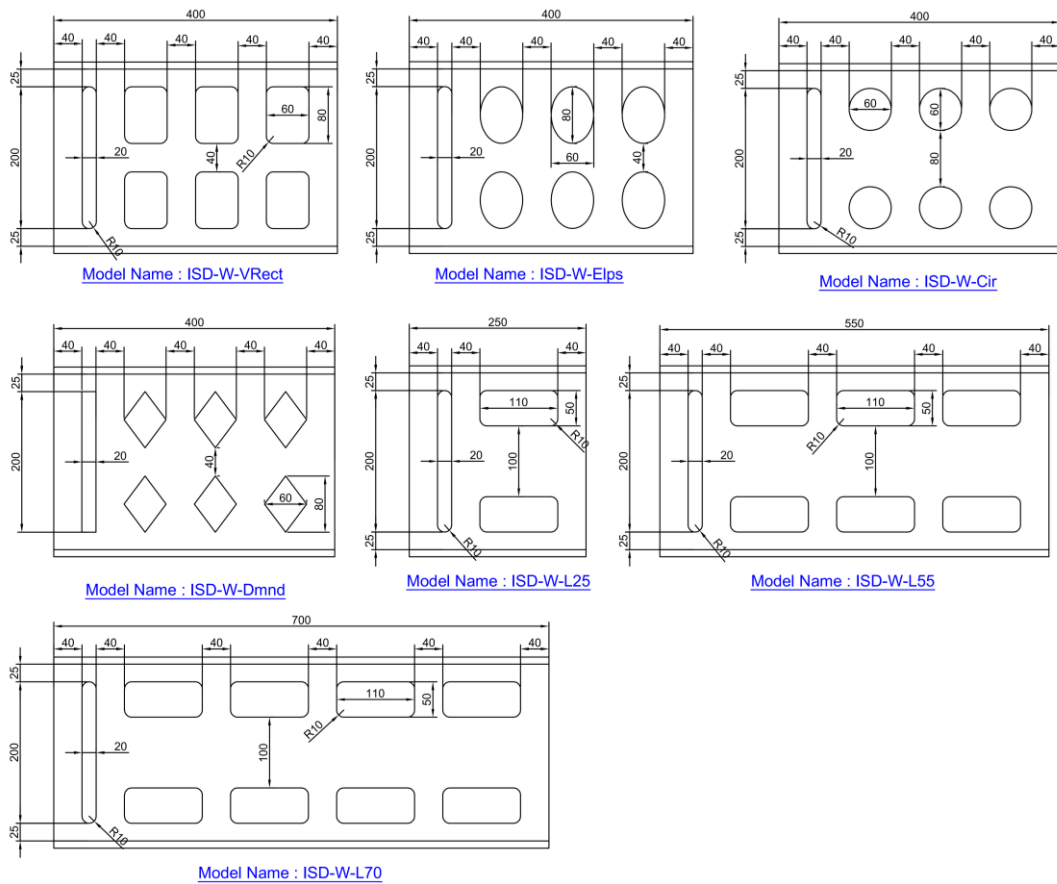
(الف)



(ب)

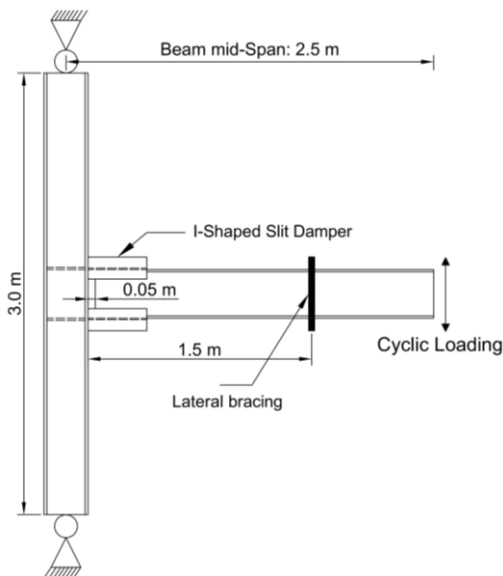
شکل ۴- جزئیات هندسی اتصالات فاقد می‌راگر، الف) WUF-W ب) RBS

گروه دوم شامل مدل‌های مجهز به می‌راگر شكاف‌دار اشکال است که اتصال غیرمستقیم تیر به ستون را فراهم می‌کنند. توسعه این مدل‌ها در سه گام متوالی انجام شد؛ ابتدا دو مدل با شكاف در جان یا بال مقطع می‌راگر طراحی و مقایسه شدند. جزئیات هندسی این دو مدل در شکل (۵) ارائه شده است؛ تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر نمایش داده شده‌اند. نتایجی که در بخش‌های

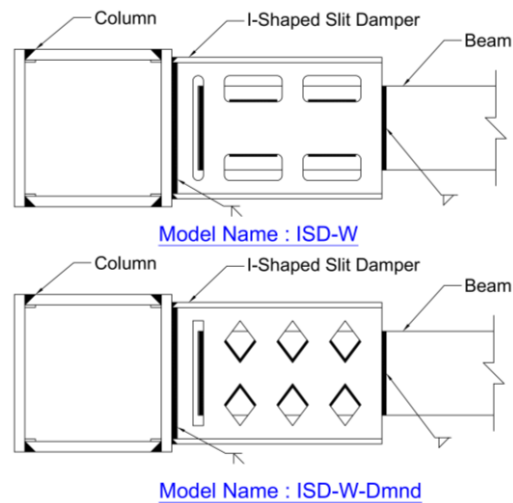


شکل ۶- جزئیات هندسی میراگر در مدل‌های با شکل متفاوت شکاف و طول‌های مختلف میراگر

جزئیات شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری برای اتصالات مجهز به میراگر در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- شرایط مرزی اتصالات مجهز به میراگر



شکل ۷- جزئیات نحوه جوشکاری میراگر به اعضای اصلی

در تمامی مدل‌ها، دو انتهای ستون به صورت مفصلی مدل‌سازی شده و بارگذاری به صورت اعمال تغییر مکان‌های تناوبی به وسط دهانه تیر انجام گرفته است. این روش بارگذاری امکان ارزیابی دقیق رفتار چرخه‌ای اتصال را فراهم می‌سازد.

برای اتصالات فاقد میراگر نیز شرایط مرزی مشابه اتصالات دارای میراگر در نظر گرفته شد؛ با این تفاوت که مطابق الزامات آیین‌نامه AISC، به‌منظور جلوگیری از کمانش جانبی-پیچشی تیرها، علاوه بر مهار جانبی در فاصله ۱/۵ متری از وجه ستون، یک مهار جانبی اضافی در فاصله‌های ۰/۴۵ متر و ۰/۵ متری از وجه ستون به‌ترتیب برای مدل‌های WUF-W و RBS پیش‌بینی شد [۱۹]. این مهارهای اضافی با هدف کنترل تغییرشکل‌های موضعی و جلوگیری از ناپایداری تیر در ناحیه مفصل پلاستیک تعبیه شدند.

۲-۳- مدل‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی اجزای محدود، از نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مصالح استفاده شد. رویکردی که پیش‌تر نیز توسط فر-فونن‌مایور^۱ و ویلالبا مورالس^۲ در مطالعه میراگرهای شکاف‌دار به‌کار گرفته شده بود [۲۰]. تمامی تحلیل‌ها به‌صورت دینامیکی غیرخطی انجام گرفت تا امکان بررسی پدیده‌هایی نظیر کمانش، رفتار پلاستیک، و ناپایداری موضعی تحت بارگذاری چرخه‌ای فراهم شود. در تمام مدل‌ها از المان‌های پوسته خطی چهار گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته (S4R) استفاده شد. این نوع المان‌ها به‌دلیل توانایی بالای آن‌ها در مدل‌سازی رفتار خمشی و کاهش زمان تحلیل انتخاب شدند.

فولاد مورد استفاده در تمامی مدل‌ها از نوع ST37 بوده و خواص مکانیکی آن مطابق داده‌های صناعی‌نیا و همکاران در مدل‌سازی اعمال شده است. وزن مخصوص فولاد برابر ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته برابر با ۲۰۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۲۱]. مشخصات کامل مصالح در جدول (۲) ارائه شده است.

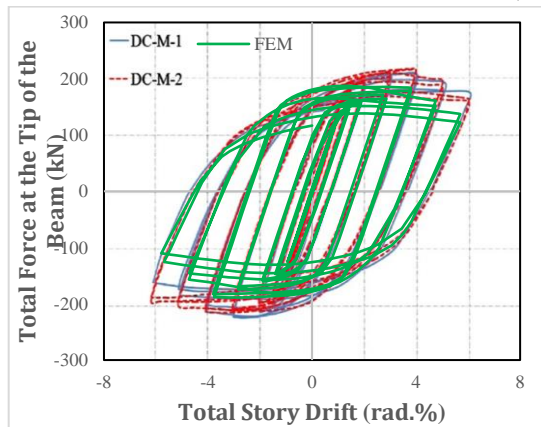
جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح فولادی [۲۱]

عضو	ضخامت ورق (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش کششی نهایی (MPa)	کرنش شکست (%)
بال تیر	۱۵	۲۵۲	۳۹۹/۶	۳۰/۸
جان تیر و ورق برشی	۸	۳۵۱	۴۸۲/۵	۲۷/۵
ورق‌های ستون	۲۰	۲۵۲/۹	۳۶۴/۳	۳۵
ورق‌های پیوستگی	۱۵	۲۵۲/۵	۳۱۲/۶	۳۲/۳
ورق‌های میراگر	۱۰	۲۵۲	۳۹۹/۶	۳۰/۸

در مدل‌سازی اجزای محدود، رفتار مصالح فولادی به‌صورت الاستو-پلاستیک با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک تعریف شدند. در سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، سطح جاری‌شدن، بدون تغییرشکل در تمام جهات گسترده یا جمع شده و تغییری در شکل و مرکز آن به‌وجود نمی‌آید. به طوری که تنش تسلیم در تمام جهات تنش با وقوع کرنش پلاستیک افزایش (یا کاهش) می‌یابد [۲۲].

در مدل عددی، جوش‌های تیر به ستون جعبه‌ای به‌صورت المان‌های جداگانه مدل‌سازی نشده و تنها از طریق قید قوی (tie) معرفی شدند تا انتقال نیرو بین تیر و ستون به‌شبه‌ای مناسب در تحلیل اجزای محدود صورت پذیرد. این قید، دو سطح مجزا را به‌گونه‌ای به هم متصل می‌کند که هیچ حرکت نسبی میان آن‌ها وجود نداشته باشد [۲۲]. در محل جوش‌های میراگر به بال‌های تیر و ستون جعبه‌ای نیز از قید قوی (tie) استفاده شده است تا پیوستگی کامل بین سطوح تماس برقرار شود.

به‌منظور صحت‌سنجی روش مدل‌سازی، اتصال WUF-W به ستون جعبه‌ای تحت شرایط هندسی و بارگذاری آزمایش نمونه DC-M-1 از مطالعه صناعی‌نیا و همکاران شبیه‌سازی شد [۲۱]. مقایسه منحنی نیرو-دوران تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی این نمونه، مطابق شکل (۹) همپوشانی مناسبی را نشان داد و تأیید کرد که استفاده از المان‌های S4R در کنار تحلیل دینامیکی غیرخطی، دقت مناسبی در پیش‌بینی پاسخ واقعی اتصال فراهم کرده و در عین حال موجب بهینه‌سازی زمان تحلیل می‌شود.

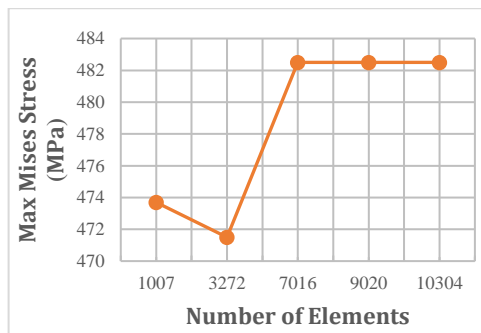


شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو-دوران مدل اجزای محدود با نمودار آزمایشگاهی نمونه DC-M-1 [۲۱]

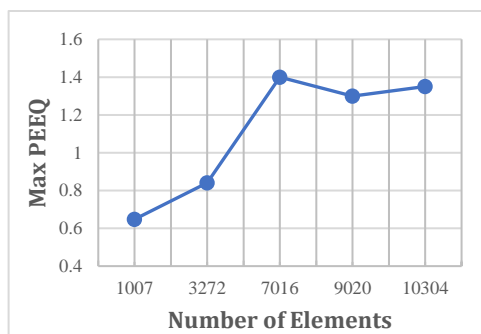
پس از اطمینان از صحت روش اجزای محدود، شبیه‌سازی‌ها بر روی مجموعه‌ای از ۱۱ مدل اتصال انجام گرفت. برای ارزیابی عملکرد چرخه‌ای مدل‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای، از تاریخچه

¹ Ferrer-Fuenmayor

² Villalba Morales



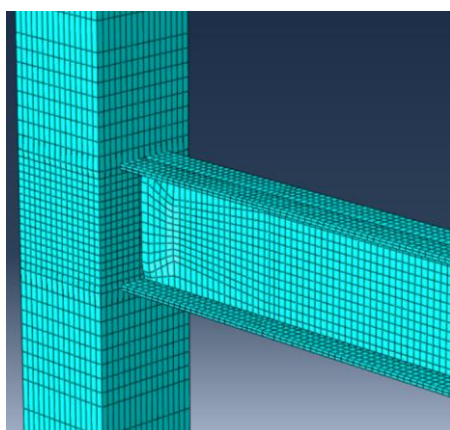
(الف)



(ب)

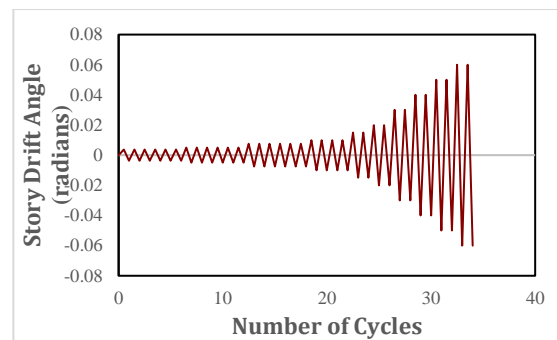
شکل ۱۱- نمودارهای همگرایی مش بندی اتصال WUF-W بر حسب تعداد المان‌ها، الف) تنش فون میسز ب) کرنش پلاستیک معادل

مش بندی اتصال WUF-W با تعداد ۷۰۱۶ المان S4R در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در نهایت، الگوی مش بندی مشابهی برای سایر مدل‌ها طبق شکل (۱۳) استفاده شده است. شایان ذکر است که در نرم‌افزار آباکوس برای این نوع المان‌ها ضخامت مشخصی تعریف شده است؛ ضخامت المان‌های پوسته در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به صورت حجمی قابل مشاهده است.



شکل ۱۲- مش بندی اتصال WUF-W

بارگذاری چرخه‌ای مطابق با FEMA-350 استفاده شد [۷]. تاریخچه بارگذاری به صورت کنترل شده و بر اساس جابه‌جایی در نقطه میانی دهانه تیر اعمال شد. نمودار تاریخچه بارگذاری در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای [۷]

مطابق آیین‌نامه FEMA-350، اتصالات در قاب‌های خمشی ویژه باید قادر باشند حداقل دوران ۰/۰۴ رادیان (زاویه دوران کاهش مقاومت) را بدون افت قابل توجه مقاومت تحمل نمایند. همچنین، حداکثر دوران مجاز برای ارزیابی عملکرد این اتصالات ۰/۰۶ رادیان (زاویه دوران نهایی) در نظر گرفته می‌شود. زاویه دوران کاهش مقاومت به زاویه‌ای اطلاق می‌شود که در آن مقاومت اتصال به کم‌تر از ظرفیت پلاستیکی اسمی کاهش می‌یابد یا شکست اتصال رخ می‌دهد (هرکدام که زودتر اتفاق بیفتد)، درحالی‌که زاویه دوران نهایی، نشان‌دهنده حدی است که در آن آسیب اتصال به قدری شدید است که پایداری تحت بارهای ثقلی نامشخص است [۷].

همچنین بر اساس آیین‌نامه AISC 341، برای اطمینان از رفتار چرخه‌ای مناسب اتصال، لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان باید حداقل به میزان ۸۰٪ لنگر پلاستیک تیر (0.8Mp) باشد [۱۷]. مقدار Mp با توجه به مقطع یکسان تیرها، از رابطه (۱) محاسبه شده است.

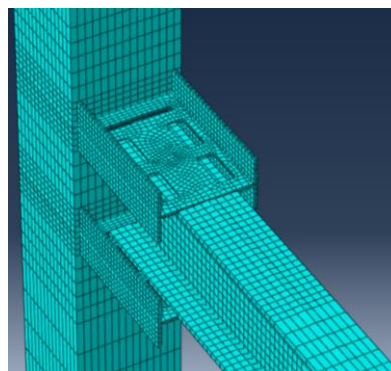
$$M_p = ZF_y = 224.64 \text{ kN.m} \quad (1)$$

به منظور تعیین اندازه مناسب مش بندی، تحلیل همگرایی مش بندی برای اتصال WUF-W به عنوان نمونه‌ای از مدل‌های این تحقیق انجام گرفت. پاسخ‌های کلیدی مانند تنش فون میسز^۱ و کرنش پلاستیک معادل^۲ بر حسب تعداد المان‌ها مقایسه شدند و نمودار نتایج در شکل (۱۱) ارائه شده است. نتایج نشان داد با افزایش تعداد المان‌ها دقت مدل بهبود می‌یابد و پس از حدود ۷۰۱۶ المان، تغییرات نتایج ناچیز بوده و این تعداد به عنوان مش بهینه انتخاب شد.

¹ Von-Mises Strees

² Equivalent Plastic Strain

به منظور ارزیابی عملکرد اتصالات و شناسایی نواحی بحرانی، توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) پس از پایان بارگذاری در دوران ۰/۰۶ مطابق شکل‌های (۱۶) الی (۱۹) مورد بررسی قرار گرفت. تنش فون میسز که مقادیر آن در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) بر حسب نیوتن بر مترمربع نشان داده شده است، الگوی انتقال نیرو و نقاط تمرکز تنش در ناحیه اتصال را نشان می‌دهد؛ در حالی که کرنش پلاستیک معادل معیاری مؤثر برای تعیین نواحی محتمل تشکیل مفصل پلاستیک و گستره ورود اعضا به ناحیه غیرالاستیک است. نتایج نشان می‌دهند که در مدل ISD-W، تقاضاهای غیرالاستیک به‌طور مؤثر به ناحیه میراگر هدایت شده و منجر به کماتش موضعی در میراگر شده است. این رفتار موجب کاهش محسوس تنش‌ها و کرنش‌ها در تیر و ستون و بهبود پایداری کلی اتصال شده است.

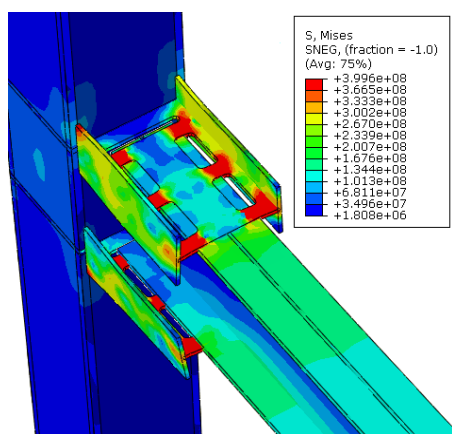


شکل ۱۳- مش بندی اتصال ISD-W

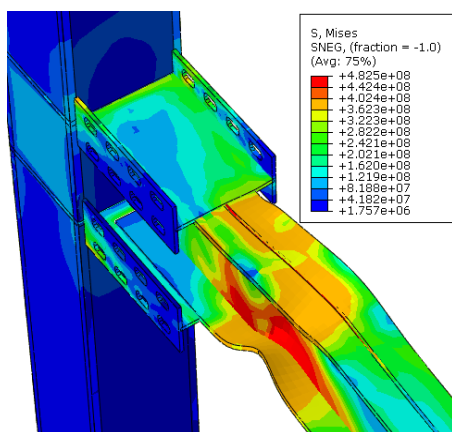
۳- نتایج تحلیل

۳-۱- اثر میراگر شکاف‌دار بر عملکرد اتصال

به منظور انتخاب اتصال پایه مجهز به میراگر، اثر محل شکاف در دو مدل ISD-F (شکاف در بال میراگر) و ISD-W (شکاف در جان میراگر) بررسی شد. نتایج نمودارهای لنگر-دوران مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داد هر دو مدل از آستانه ۰.۸Mp عبور کرده‌اند، اما مدل ISD-F با وجود ظرفیت خمشی بالاتر، در چرخش ۰/۰۶ رادیان نسبت به ۰/۰۵ رادیان افت مقاومت ۳۷٪ را تجربه کرده است. در مقابل، مدل ISD-W رفتار پایدارتری داشته و کاهش محسوسی در ظرفیت آن مشاهده نشده است.

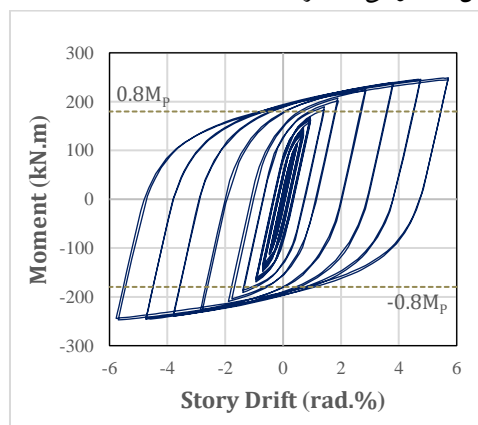


شکل ۱۶- توزیع تنش فون میسز در اتصال ISD-W

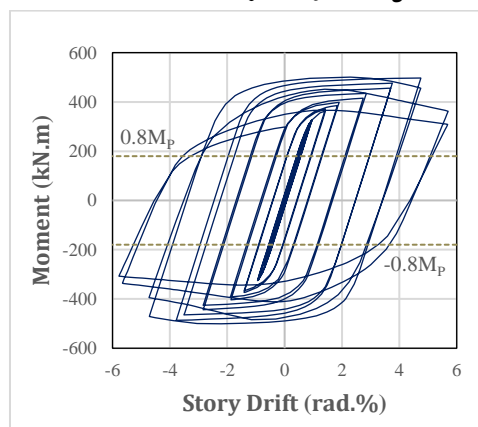


شکل ۱۷- توزیع تنش فون میسز در اتصال ISD-F

در مقابل، در مدل ISD-F بخش عمده تقاضاها به تیر منتقل شده و تشکیل مفصل پلاستیک همراه با کماتش موضعی در تیر را به دنبال داشته است. بنابراین، میراگر در مدل ISD-F عملکرد

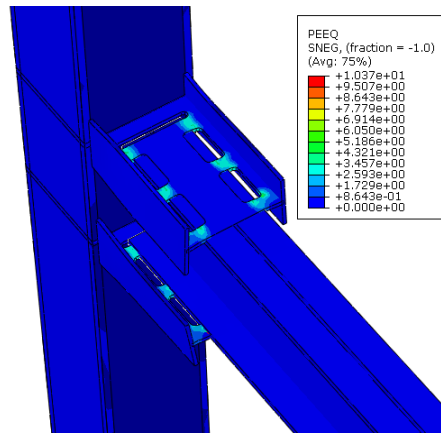


شکل ۱۴- نمودار لنگر-دوران اتصال ISD-W

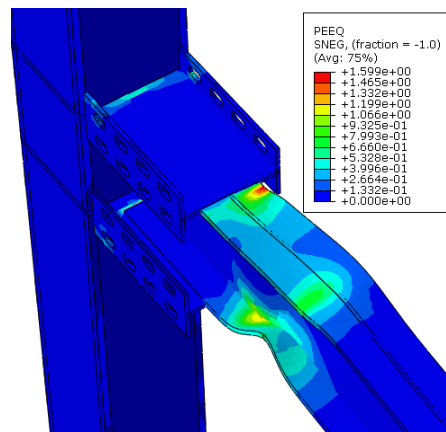


شکل ۱۵- نمودار لنگر-دوران اتصال ISD-F

مناسبتی در کاهش آسیب اعضای اصلی و ارتقای رفتار لرزه‌ای اتصال نداشته است. بر این اساس، مدل ISD-W به عنوان اتصال پایه برای مقایسه با اتصالات بدون میراگر و بررسی اثر شکل شکاف‌ها و طول میراگر انتخاب شد.



شکل ۱۸- توزیع کرنش پلاستیک معادل در اتصال ISD-W



شکل ۱۹- توزیع کرنش پلاستیک معادل در اتصال ISD-F

به منظور ارزیابی اثر میراگر شکاف‌دار بر رفتار لرزه‌ای اتصال، مدل پایه ISD-W با دو اتصال فاقد میراگر شامل WUF-W و RBS مقایسه شد. این دو اتصال به دلیل کاربرد گسترده در قاب‌های

خمشی ویژه، معیار مناسبی برای مقایسه عملکردی فراهم می‌کنند. شاخص‌هایی مانند سختی اولیه، نسبت بیشینه ظرفیت خمشی اتصال به لنگر پلاستیک تیر (M/M_p)، بیشینه تنش فون میسز در تیر و ستون و همچنین بیشینه کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) تیر، ستون و میراگر در پایان بارگذاری در جدول (۳) ارائه شده‌اند. سختی اولیه اتصال (K_1) از شیب خطی منحنی اسکلتون^۱ در بازه دوران صفر تا دوران تسلیم محاسبه شده و برای ارزیابی مقاومت اولیه اتصال در برابر تغییر شکل‌های کوچک در مرحله الاستیک به کار می‌رود [۱۰].

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که در هر دو اتصال فاقد میراگر، نسبت بیشینه ظرفیت خمشی اتصال به لنگر پلاستیک تیر (M/M_p)، از ۰/۸ فراتر رفته و بدین ترتیب، الزامات آیین‌نامه‌ای لازم برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه را برآورده می‌سازند. شایان ذکر است که بیشینه ظرفیت خمشی اتصال در مدل WUF-W در دوران ۰/۰۶ رادیان و در مدل RBS در دوران ۰/۰۵ رادیان حاصل شده است.

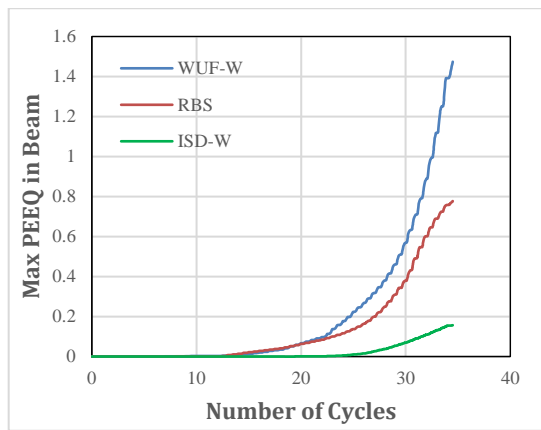
در مقایسه دو اتصال فاقد میراگر، نتایج نشان می‌دهد که اتصال WUF-W، با وجود سختی اولیه و مقاومت خمشی بالاتر، تمرکز قابل توجهی از تنش و کرنش پلاستیک را در ناحیه اتصال و بدنه ستون تجربه کرده و احتمال شکست ترد را افزایش می‌دهد. در مقابل، در اتصال RBS به دلیل وجود ناحیه کاهش یافته در تیر، مفصل پلاستیک از ستون فاصله گرفته و در بخش ضعیف‌تر تیر متمرکز شده است. به همین دلیل، کرنش پلاستیک تیر در اتصال RBS نسبت به WUF-W افزایش یافته، در حالی که کرنش پلاستیک ستون به طور چشم‌گیری (حدود ۷۴٪) کاهش یافته و تنش ستون حدود ۸/۴٪ کم‌تر از اتصال WUF-W است. این نتایج بیانگر آن است که اتصال RBS با انتقال محل مفصل پلاستیک به دور از ستون، رفتار بهتری در کاهش آسیب ستون و بهبود عملکرد لرزه‌ای ارائه می‌دهد؛ هر چند کرنش‌های پلاستیک نسبتاً بالایی همچنان در ناحیه کاهش یافته تیر مشاهده می‌شود.

جدول ۳- شاخص‌های کلیدی در اتصالات فاقد میراگر و اتصال پایه

نام مدل	تنش فون میسز (MPa)		کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)		
	تیر	ستون	میراگر	ستون	تیر
WUF-W	۴۸۲/۵	۳۲۲	-	۰/۷۷	۱/۴۷۴
RBS	۴۸۲/۵	۲۹۵	-	۰/۲	۲/۲۵۴
ISD-W	۳۱۱/۴	۱۱۴/۵	۱۰/۳۷	۰	۰/۱۵۶

¹ Initial stiffness

² Skeleton



شکل ۲۲- نمودار کرنش پلاستیک معادل در اتصالات فاقد میراگر و اتصال پایه

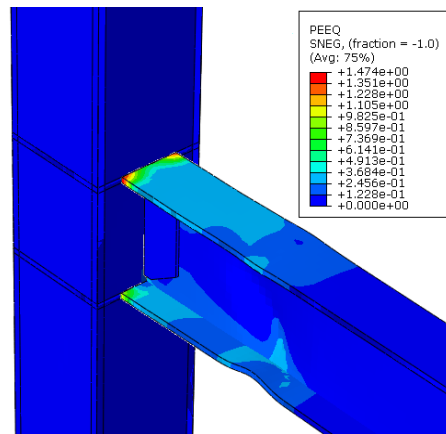
در اتصال RBS، کرنش پلاستیک انتهای تیر در محل اتصال به ستون حدود ۰.۴۷٪ کم‌تر از WUF-W است که نشان‌دهنده کاهش تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک تیر در محل اتصال به ستون می‌باشد. در مدل ISD-W، کرنش پلاستیک تیر تقریباً ۸۰٪ نسبت به انتهای تیر RBS کاهش یافته و تغییرشکل‌های غیرالاستیک تیر به‌طور مؤثری کنترل شده‌اند؛ در این مدل، اتصال تیر به ستون به‌صورت غیرمستقیم و از طریق میراگرها انجام شده و بیشینه کرنش پلاستیک تیر در محل اتصال به میراگرها متمرکز شده است.

۳-۲- بررسی اثر مشخصه‌های هندسی میراگر

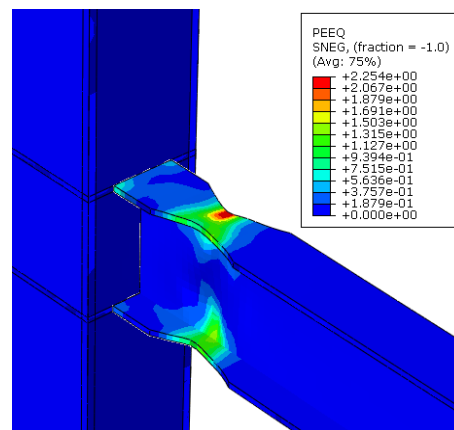
به‌منظور بررسی اثر مشخصه‌های هندسی میراگر، شامل شکل شکاف و طول میراگر، مجموعه‌ای از اتصالات بر اساس مدل ISD-W توسعه داده شدند و در هر مرحله، تنها یک پارامتر تغییر داده شد تا اثر آن به‌صورت مجزا ارزیابی شود. مقادیر سختی اولیه، نسبت بیشینه ظرفیت خمشی اتصال به لنگر پلاستیک تیر (M/M_p)، بیشینه تنش فون میسز در تیر و ستون و همچنین بیشینه کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) تیر، ستون و میراگر در پایان بارگذاری برای مدل‌های مختلف در جدول (۴) ارائه شده‌اند. در بررسی اثر شکل شکاف‌ها، علاوه بر مدل ISD-W با شکاف‌های مستطیلی افقی که نتایج آن پیش‌تر در جدول (۳) ارائه شده است، چهار مدل دیگر شامل شکاف‌های مستطیلی عمودی (ISD-W-VRect)، بیضی (ISD-W-Elps)، دایره‌ای (ISD-W-Cir) و لوزی‌شکل (ISD-W-Dmnd) نیز مورد تحلیل قرار گرفتند.

طبق نتایج ارائه‌شده در جدول (۴)، مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در میراگرها با توجه به هندسه و جهت‌گیری شکاف‌ها متفاوت است. در مدل ISD-W، محور طولی شکاف‌های میراگر موازی با مسیر اصلی انتقال نیرو (محور طولی تیر) است؛ از این‌رو، میراگر کرنش پلاستیک بیش‌تری را تجربه

الگوی توزیع کرنش پلاستیک معادل در این دو اتصال، مطابق شکل‌های (۲۰) و (۲۱)، این رفتار را نشان می‌دهد؛ داده‌ها مربوط به پایان بارگذاری در دوران ۰/۰۶ رادیان هستند. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، بیشینه کرنش پلاستیک در اتصال WUF-W در انتهای تیر و در اتصال RBS در ناحیه کاهش‌یافته تیر متمرکز شده است.



شکل ۲۰- توزیع کرنش پلاستیک در اتصال فاقد میراگر WUF-W



شکل ۲۱- توزیع کرنش پلاستیک در اتصال فاقد میراگر RBS

طبق داده‌های ارائه‌شده در جدول (۳)، در اتصال مجهز به میراگر شکاف‌دار، بیشینه کرنش پلاستیک در ناحیه میراگر متمرکز شده است. وجود شکاف‌ها سبب کاهش سختی موضعی و تمرکز تغییرشکل پلاستیک در این عضو شده و در نتیجه مفصل پلاستیک در میراگر شکل گرفته است؛ در این شرایط، تنش تیر حدود ۳۵٪ و تنش ستون تا حدود ۶۱٪ نسبت به اتصال RBS کاهش یافته و ستون در ناحیه الاستیک باقی مانده، که نشان‌دهنده نقش مؤثر میراگر در محافظت از اعضای اصلی اتصال است.

بررسی کرنش پلاستیک معادل انتهای تیر در طول تاریخچه بارگذاری مطابق شکل (۲۲) تفاوت قابل‌توجهی میان مدل‌ها را نشان می‌دهد.

تنش ستون‌ها در بازه‌ی ۱۱۴ تا ۲۱۸ مگاپاسکال قرار گرفته است، به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار مربوط به مدل ISD-W و بیش‌ترین مقدار مربوط به مدل ISD-W-Dmnd است. این تفاوت می‌تواند ناشی از نحوه‌ی توزیع سختی و مسیر انتقال نیرو در میراگرها باشد؛ در مدل ISD-W (با شکاف‌های مستطیلی افقی)، تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک در ناحیه‌ی میراگر موجب کاهش درگیری ستون شده است، در حالی‌که در مدل ISD-W-Dmnd (با شکاف‌های لوزی‌شکل)، تنش ستون تا حدودی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در همه‌ی مدل‌ها، ستون در محدوده‌ی الاستیک باقی مانده و تنش‌ها کم‌تر از مقدار تنش تسلیم مصالح (F_y) هستند. در بررسی مقاومت خمشی و سختی اتصال، مشاهده می‌شود که شکل شکاف‌های میراگر تأثیر قابل‌توجهی دارد. در مدل ISD-W که محور طولی شکاف‌ها موازی با مسیر اصلی انتقال نیرو است؛ نواحی میراگر زودتر درگیر تغییرشکل‌های موضعی می‌شوند و مقاومت خمشی و سختی اتصال نسبتاً کم‌تر است.

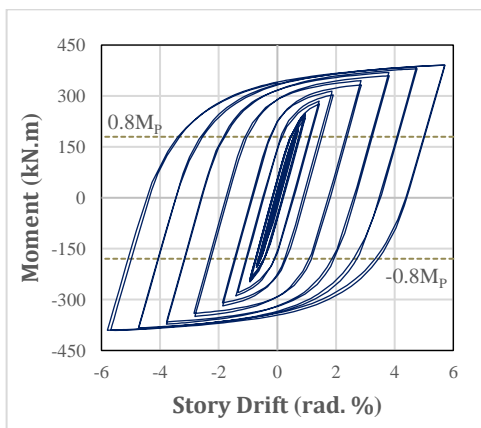
می‌کند. در مقابل، میراگرهایی که محور طولی شکاف‌های آن‌ها عمود بر مسیر انتقال نیرو قرار دارد، از جمله مدل‌های ISD-W-VRect، ISD-W-Elps و ISD-W-Dmnd، کرنش پلاستیک کم‌تری نشان می‌دهند. این تفاوت در میزان کرنش پلاستیک را می‌توان به تفاوت در سختی میراگر در جهت انتقال نیرو نسبت داد.

در بررسی رفتار تیر و ستون، مشاهده می‌شود که میزان کرنش پلاستیک تیر و تنش ستون‌ها نیز تا حدی تحت تأثیر شکل شکاف‌های میراگر قرار دارد. در مدل ISD-W-Cir با شکاف‌های دایره‌ای، به دلیل توزیع نسبتاً یکنواخت سختی در میراگر، بخشی از نیرو به تیر منتقل شده و کرنش پلاستیک تیر اندکی افزایش یافته است. در مقابل، در مدل ISD-W-VRect با شکاف‌های مستطیلی عمودی، میراگر تا حدودی از انتقال تغییرشکل‌ها به تیر جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه، کرنش پلاستیک تیر کم‌تر است. باین‌حال، در هیچ یک از مدل‌ها تنش تیر از مقاومت کششی نهایی مصالح (F_u) فراتر نرفته است.

جدول ۴- شاخص‌های کلیدی در اتصالات مجهز به میراگر

نام مدل	تنش فون میسر (MPa)		کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)		$K_1 \left(\frac{\text{kN.m}}{\text{rad}} \times 10^2 \right)$	$\frac{M}{M_p}$
	تیر	ستون	تیر	ستون		
ISD-W-VRect	۳۰۱/۹	۱۴۴/۸	۰/۱	۵/۳۳۶	۲۰۸/۴	۱/۴۶۲
ISD-W-Elps	۳۳۱	۱۷۰/۸	۰/۱۶۴	۷/۷۴	۲۲۴/۵	۱/۶۱۵
ISD-W-Cir	۳۷۸/۴	۱۷۹/۲	۰/۲۶۲	۸/۶۶	۲۴۲/۵۷	۱/۶۴۲
ISD-W-Dmnd	۳۵۸/۹	۲۱۸	۰/۲۴	۷/۶۷	۲۵۶/۹۷	۱/۷۳۷
ISD-W-L55	۳۱۰	۱۴۰/۲	۰/۱۵	۱۰/۲۴	۲۱۰	۱/۴۱۶
ISD-W-L70	۳۰۱/۲	۲۲۷	۰/۱۷۴	۶/۷۳۳	۲۴۸/۲۷	۱/۶۵۵

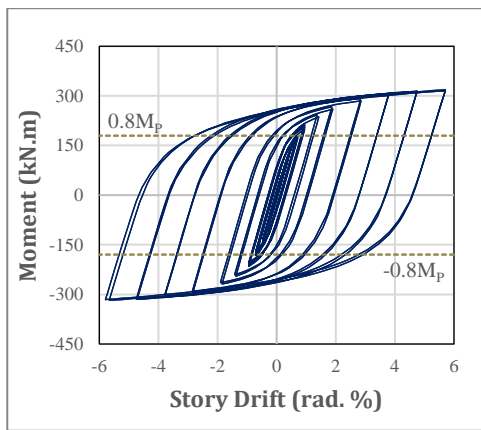
و نتایج نشان داده شده مربوط به پایان بارگذاری در دوران ۰/۰۶ هستند.



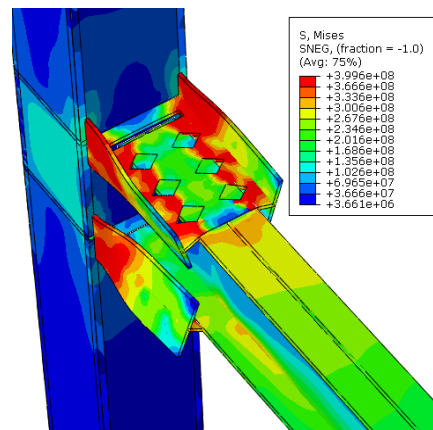
شکل ۲۳- نمودار لنگر-دوران اتصال ISD-W-Dmnd

در مدل ISD-W-VRect با شکاف‌های مستطیلی عمودی، مسیر انتقال نیرو و سختی به شکل مؤثرتری حفظ شده و مقاومت خمشی و سختی اتصال افزایش یافته است. نهایتاً در مدل ISD-W-Dmnd با شکاف‌های لوزی، توزیع نیرو و تغییرشکل‌ها به‌گونه‌ای است که بیش‌ترین مقاومت خمشی و سختی اتصال حاصل شده است. شایان‌ذکر است، در تمامی مدل‌های مجهز به میراگر با شکل‌های مختلف شکاف، بیشینه مقاومت خمشی اتصال از $0.8M_p$ فراتر رفته است و این بیشینه مقاومت در همه‌ی مدل‌ها در دوران ۰/۰۶ رادیان رخ داده است.

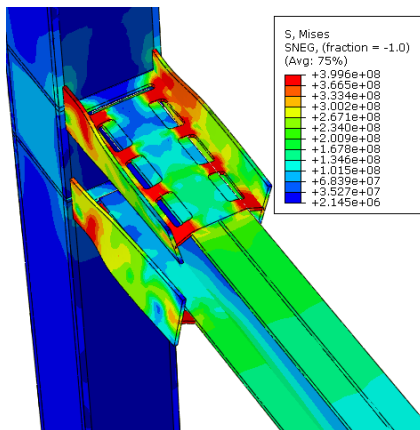
به‌عنوان نمونه‌ای از اتصالات با شکل متفاوت شکاف‌ها، نمودار لنگر-دوران و الگوی توزیع تنش فون میسر مدل ISD-W-Dmnd در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) ارائه شده است؛ مقادیر تنش‌ها در شکل (۲۳) بر حسب نیوتن بر مترمربع هستند



شکل ۲۵- نمودار لنگر-دوران اتصال ISD-W-L55



شکل ۲۴- توزیع تنش فونمیسز در اتصال ISD-W-Dmnd



شکل ۲۶- توزیع تنش فونمیسز در اتصال ISD-W-L55

شایان ذکر است که مدل ISD-W-L25، به دلیل عدم دستیابی به ظرفیت خمشی کافی ($M/M_p < 0.8$)، از تحلیل‌های تنش کنار گذاشته شد. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش بیش از حد طول میراگر منجر به افت ظرفیت خمشی و تضعیف عملکرد لرزه‌ای اتصال می‌شود.

نمودارهای کرنش پلاستیک معادل تیر در طول تاریخچه بارگذاری در شکل (۲۷)، تأثیر شکل شکاف و طول میراگر را بر عملکرد اتصال به وضوح نشان می‌دهند. مدل ISD-W-VRect کم‌ترین کرنش پلاستیک تیر را تجربه کرده و مدل ISD-W-Cir بیش‌ترین مقدار را داشته است. با این حال، میزان کرنش پلاستیک در تمامی مدل‌های دارای میراگر به طرز قابل توجهی کم‌تر از مقادیر ثبت شده در اتصالات فاقد میراگر بوده است، که بیانگر کارایی میراگر در کاهش تقاضاهای غیرالاستیک تیر است.

در مرحله بعد، اثر طول میراگر بر عملکرد اتصالات مورد بررسی قرار گرفت سه مدل شامل ISD-W-L25، ISD-W-L55 و ISD-W-L70 با طول‌های متفاوت مورد تحلیل قرار گرفتند و با مدل پایه ISD-W (۴۰ سانتی‌متر) مقایسه شدند. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۴)، با افزایش طول میراگر در مدل‌هایی که محور طولی شکاف موازی مسیر اصلی انتقال نیرو است، بیشینه کرنش پلاستیک در ناحیه میراگر کاهش یافته و تغییرشکل‌ها یکنواخت‌تر در طول میراگر توزیع می‌شوند. همچنین نتایج نشان داد افزایش طول میراگر منجر به افزایش ظرفیت خمشی و سختی اولیه اتصال می‌گردد. بیشینه مقاومت خمشی اتصال در مدل ISD-W-L55 در دوران ۰/۰۶ و در مدل ISD-W-L70 در دوران ۰/۰۵ حاصل شده است. با این حال، افزایش طول میراگر بخشی از نیروی منتقل شده به ستون را افزایش داده و تنش ستون بالاتر می‌رود؛ به طوری که در مدل‌های ISD-W-L55 و ISD-W-L70 به ترتیب حدود ۲۲٪ و ۹۸٪ بیش از مدل ISD-W بود، هرچند این مقادیر همچنان پایین‌تر از حد تسلیم مصالح باقی مانده‌اند. در تمامی مدل‌ها با طول‌های مختلف میراگر، تمرکز تنش‌ها همچنان در ناحیه میراگر حفظ شده است.

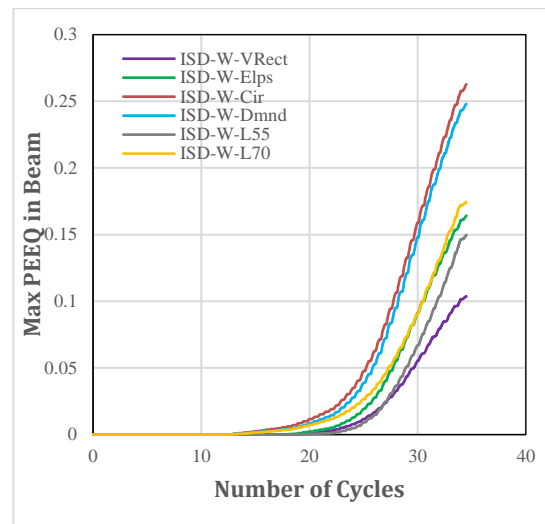
به عنوان نمونه، نمودار لنگر-دوران و الگوی توزیع تنش برای مدل ISD-W-L55 در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) ارائه شده است. در شکل (۲۵) مقادیر تنش‌ها بر حسب نیوتن بر مترمربع بیان شده‌اند و مقادیر ارائه شده مربوط به پایان بارگذاری در دوران ۰/۰۶ هستند.

۳- به کارگیری میراگرهای شکافدار اشکل در اتصالات جوشی تیر به ستون جعبه‌ای منجر به کاهش قابل توجه تمرکز تنش و کرنش در اجزای اصلی اتصال شد. در مدل ISD-W، کاهش ۳۵٪ تنش در تیر، ۶۱٪ در ستون و ۸۰٪ در کرنش پلاستیک تیر نسبت به اتصالات فاقد میراگر مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که میراگر با تسلیم زود هنگام، ناحیه‌ای مشخص برای تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک ایجاد کرده و با جلوگیری از انتقال این تقاضاها به تیر و ستون، از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر جلوگیری می‌کند.

۴- تحلیل مدل‌های مختلف دارای میراگر نشان داد که شکل شکاف‌ها نقش مهمی در عملکرد اتصال ایفا می‌کند. مدل با شکاف‌های لوزی شکل (ISD-W-Dmnd)، بیش‌ترین ظرفیت خمشی ($M/M_p = 1.737$) و سختی اولیه را ارائه داد و در عین حال تنش‌ها را کنترل کرده و آسیب به اجزای اصلی را کاهش داد. در مقابل، مدل با شکاف‌های مستطیل شکل عمودی (ISD-W-VRect) با تمرکز مؤثر تغییر شکل‌ها در ناحیه میراگر، کرنش پلاستیک تیر را به حداقل رسانده و از بروز آسیب‌های غیرالاستیک در تیر جلوگیری کرد.

۵- نتایج تحلیل نشان داد که افزایش طول میراگر موجب ارتقای ظرفیت خمشی و سختی اولیه اتصال می‌شود. با این حال، این افزایش با رشد قابل توجه تنش‌های ستون همراه بود؛ به گونه‌ای که در مدل ISD-W-L70 (۷۰ سانتی‌متر)، تنش ستون تا ۹۸٪ نسبت به مدل پایه (ISD-W) افزایش یافت. اگرچه این مقدار همچنان کم‌تر از حد تسلیم مصالح باقی مانده است، ادامه این روند در طول‌های بیش‌تر می‌تواند آسیب‌پذیری ستون را افزایش داده و نیازمند ملاحظات ویژه طراحی باشد.

۶- میراگرهای شکافدار اشکل، با در نظر گرفتن تغییرات در شکل شکاف و طول میراگر، می‌توانند ضمن افزایش ظرفیت خمشی و سختی اتصالات تیر به ستون جعبه‌ای، با تمرکز تغییر شکل‌ها در ناحیه‌ای کنترل شده، موجب بهبود عملکرد خمشی و لرزه‌ای اتصال و کاهش آسیب در اجزای اصلی سازه شوند. علاوه بر این، این میراگرها به دلیل نقش غیر اصلی و قابلیت تعویض آسان، گزینه‌ای مقرون به صرفه برای کاهش خسارات ناشی از زلزله محسوب می‌شوند و امکان جایگزینی سریع آن‌ها بدون توقف بهره‌برداری از سازه، مزیتی کلیدی در ارتقای پایداری و مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی فراهم می‌کند.



شکل ۲۷- نمودار کرنش پلاستیک معادل در اتصالات مجهز به میراگر

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر میراگر شکافدار اشکل بر رفتار خمشی و لرزه‌ای اتصالات جوشی تیر به ستون جعبه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها به روش اجزای محدود انجام شد و نقش مشخصه‌های هندسی میراگر، شامل شکل شکاف و طول میراگر، بر عملکرد اتصالات بررسی و مقایسه شد. یافته‌های اصلی تحقیق به صورت زیر جمع‌بندی می‌شوند:

۱- در پژوهش حاضر، مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از المان‌های پوسته S4R و تحلیل دینامیکی انجام شده و مصالح فولادی به صورت الاستو-پلاستیک با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، جوش‌ها به صورت صریح مدل نشده و از طریق قید قوی (tie) شبیه‌سازی شده‌اند. این فرضیات موجب پایداری تحلیل و کاهش زمان محاسبات شده و امکان شبیه‌سازی رفتار کلی اتصال و نحوه توزیع کرنش و تنش در شرایط بارگذاری چرخه‌ای را فراهم می‌آورد.

۲- اتصال WUF-W با وجود سختی اولیه و ظرفیت خمشی بالا، به دلیل تمرکز شدید تنش و کرنش در ناحیه اتصال، مستعد شکست ترد است؛ چراکه افزایش مقاومت و سختی بدون کنترل محل تمرکز تقاضاهای غیرالاستیک، الزاماً به عملکرد لرزه‌ای مطلوب نمی‌انجامد. اتصال RBS با کاهش تنش ستون و انتقال محل مفصل پلاستیک به دور از ستون، عملکرد بهتری داشت؛ اما همچنان موجب آسیب موضعی در تیر شد. به طور کلی، در هر دو اتصال تیر به ستون جعبه‌ای فاقد میراگر، انرژی زلزله مستقیماً به اعضای اصلی منتقل و باعث آسیب قابل توجه آن‌ها شد.

- connection with a lateral steel slit damper", In Structures, 69, p. 107433.
- [16] ANSI/AISC 360-22, (2022), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [17] ANSI/AISC 341-22, (2022), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [۱۸] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۴)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش چهارم)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [19] ANSI/AISC 358-22, (2022), Prequalified Connection for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction.
- [20] Ferrer-Fuenmayor, S. and Villalba Morales, J.D. (2023), "Shape Optimization of Slotted Steel Plate Dampers using the Simulated Annealing Algorithm", Journal of Applied and Computational Mechanics, 9(3), pp.870-883.
- [21] Nia, Z.S., Ghassemieh, M., and Mazroi, A. (2013), "WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading", Journal of Constructional Steel Research, 88, pp.90-108.
- [22] ABAQUS Documentation, Version 6.14.
- [1] FEMA-355D, (2000), State of the Art Report on Connection Performance, SAC Joint Venture.
- [2] Engelhardt, M.D., and Sabol, T.A. (1998), "Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations", Engineering Structures, 20(4-6), pp.510-520.
- [3] Engelhardt, M.D., Winneberger, T., Zekany, A.J., and Potyraj, T.J. (1998), "Experimental investigation of dogbone moment connections", Engineering Journal, 35(4), pp.128-139.
- [4] Mirghaderi, S.R., Torabian, S., and Imanpour, A. (2010), "Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection", Journal of Constructional Steel Research, 66(2), pp.277-288.
- [5] Kim, Y.J., and Oh, S.H. (2007), "Effect of the moment transfer efficiency of a beam web on deformation capacity at box column-to-H beam connections", Journal of Constructional Steel Research, 63(1), pp.24-36.
- [6] Chou, C.C., and Wu, C.C. (2007), "Performance evaluation of steel reduced flange plate moment connections", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(14), pp.2083-2097.
- [7] FEMA-350, (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, SAC Joint Venture.
- [۸] ضابطه ۷۶۶، (۱۳۹۷)، دستور العمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [9] Rousta, A.M., Shoja, S., and Amin Safaei Ardakani, M. (2023), "Investigating cyclic and pushover performance of different metallic yielding dampers", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 11(3), pp.122-143.
- [10] Oh, S.H., Kim, Y.J., and Ryu, H.S. (2009), "Seismic performance of steel structures with slit dampers", Engineering Structures, 31(9), pp.1997-2008.
- [11] Lor, H.A., Izadinia, M., and Memarzadeh, P. (2018), "Experimental and numerical study of I-shape slit dampers in connections", Latin American Journal of Solids and Structures, 15(11), p.e131.
- [12] Köroğlu, M.A., Köken, A., and Dere, Y. (2018), "Use of different shaped steel slit dampers in beam to column connections of steel frames under cycling loading", Advanced Steel Construction, 14(2), pp.251-273.
- [13] Mianji, A., Garivani, S., Askariani, S.S., and Aliakbari, F. (2024), "Modeling parameters and numerical acceptance criteria for steel slit dampers", In Structures, 69, p.107408.
- [14] Park, H.Y., and Oh, S.H. (2020), "Structural performance of beam system with T-stub type slit damper", Engineering Structures, 205, p.109858.
- [15] Kmal, M.K., Zareei, S.A., Jaber, F.K., and Birzhandi, M.S. (2024), "Experimental and numerical investigation on cyclic behavior of beam-to-column