

Experimental and Numerical Evaluation of a New Reduced Beam Section Connection without Flange Tapering

Shayesteh Chaghazardi¹, Mehrzad ThamouliRoudsari^{2*}, Mohsen Oghabi³, Mehrdad Movahednia⁴

- 1- Ph.D. Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
- 3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
- 4- Department of Civil Engineering, Eslamabad-E-Gharb Branch, Islamic Azad University, Eslamabad-E-Gharb, Iran.

ABSTRACT

Reduced Beam Sections (RBS) provide ductility for rigid connections in steel moment frames by reducing the load imposed on the panel zone and driving the location of the plastic hinge away from the column. Despite these advantages, RBSs are accompanied by a number of drawbacks, among which are the impracticality of some of the proposed models, early local buckling in the beam's flange/web, and lateral torsional buckling brought on by the transverse reduction in the flange's width. The objective of the present study is proposing a new RBS detail that has the minimum number of these weaknesses, while benefitting from the advantages of reduced sections. In the first step, a number of numerical models were constructed inside the ABAQUS finite element software. After analyzing the models using pushover analyses and interpreting the results, three beam models were selected. One of these models was an AISC-approved RBS model, which was used as the basis of comparison to evaluate the performance of the proposed specimens. In the three models proposed, the reduction was in the form of decreasing the thickness of the beam's flange. In one of the models, thickness reduction in the flange was done by creating shallow grooves. In the remaining sample, a rectangular area on the surface of the flange was shaved off to create the reduced section. The plastic section moduli of the proposed samples are equal to the thinnest section of the RBS specimen. The experimental RBS samples were full-scale, and tested under cyclic loading. The results of all of the samples showed that plastic hinge was created in the expected region. The seismic criteria for the special moment connection were satisfied by all of the proposed samples. The sample with the shaved flange was superior to the RBS specimen in terms of ductility and energy dissipation.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 April 2023
Revise Date: 11 July 2023
Accept Date: 18 July 2023

Keywords:

RBS connection
Grooved flange beam
Shaved flange beam
Lateral torsional buckling
Ductility
Local buckling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.394078.3097>

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari
Email address: tahamouli@iauksh.ac.ir

ارزیابی عددی و آزمایشگاهی نوع جدیدی از اتصال کاهش یافته بدون کاهش عرض بال

تیر

شایسته چقازردی^۱، مهرزاد تحملی رودسری^{۲*}، محسن عقابی^۳، مهرداد موحدنیا^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اسلام آباد غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلام آباد غرب، ایران

چکیده

تیرهای با مقطع کاهش یافته در قاب‌های خمشی فولادی، از طریق کاهش بار وارده به چشمه اتصال و دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون، شکل‌پذیری اتصالات صلب را تامین می‌کنند. این تیرها در کنار مزایای مذکور معایبی نیز دارند از جمله اجرایی نبودن برخی از مدل‌های پیشنهادی، کماتش‌های موضعی زود هنگام در بال و جان تیر و کماتش پیچشی جانبی تیر به دلیل کاهش عرض بال در بخش کاهش یافته. هدف این مقاله ارائه جزئیاتی از تیر کاهش یافته است که افزون بر مزایای کاهش یافتگی، دارای کمترین معایب مورد اشاره باشد. برای شروع کار ابتدا چند مدل عددی با نرم‌افزار آباکوس ساخته شدند. بعد از بارگذاری بارافزون و تحلیل نتایج، سه مدل تیر به عنوان مدل‌های برگزیده در نظر گرفته شدند. یکی از این نمونه‌ها، نمونه تائید شده آیین‌نامه AISC موسوم به RBS بود که به منظور مقایسه با عملکرد نمونه‌های پیشنهادی در نظر گرفته شد. کاهش یافتگی در دو نمونه پیشنهادی به شکل کاهش ضخامت در بال تیر بود. کاهش ضخامت در یک نمونه به صورت ایجاد شیارهای عرضی کم‌عمق در بال‌ها و در نمونه دیگر به صورت ایجاد تراش سطحی مستطیلی شکل در بال‌ها صورت گرفت. اساس مقطع پلاستیک نمونه‌های پیشنهادی معادل با اساس مقطع پلاستیک نمونه RBS در باریک‌ترین مقطع بود. مدل‌ها در مقیاس کامل ساخته شده و در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در همه نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای، مفصل پلاستیک در منطقه کاهش یافته مورد انتظار تشکیل شده و ضوابط طرح لرزه‌ای برای قاب‌های خمشی ویژه برآورده گردید. نمونه دارای تراش مستطیلی در بال، از لحاظ شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی بهتر از نمونه RBS عمل کرد.

کلمات کلیدی: اتصال کاهش یافته، تیر با بال شیاردار، تیر با بال تراش خورده، کماتش پیچشی جانبی، شکل‌پذیری، کماتش موضعی

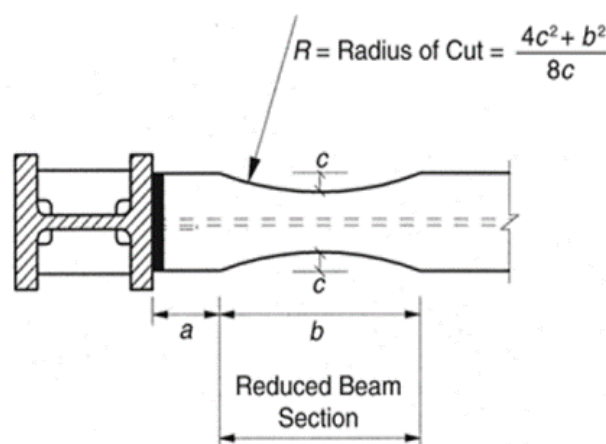
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.394078.3097	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.394078.3097	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۴/۲۷	۱۴۰۲/۰۴/۲۷	۱۴۰۲/۰۴/۲۰	۱۴۰۲/۰۲/۰۹
مهرزاد تحملی رودسری tahamouli@iauksh.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

طرح ساختمان‌هایی با رفتار مناسب در برابر زلزله برای تأمین ایمنی جانی اهمیت زیادی دارد. افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی، دو ویژگی اساسی در بهبود رفتار سازه و بالا بردن ایمنی آن هستند. این ویژگی‌ها در سازه به‌وسیله اتصالات صلب در قاب‌های خمشی ویژه، به خوبی تأمین می‌شوند به شرط آن‌که بتوان شرایط مقاومت کافی و قابلیت دوران مناسب را برای اتصالات صلب در قاب‌های خمشی ویژه فراهم کرده و از شکست ترد در آن‌ها جلوگیری نمود.

در پی وقوع زلزله نورتریج و زلزله کوبه، موارد زیادی از شکست‌های ترد در اتصالات صلب تیر به ستون در قاب‌های خمشی مشاهده شد و پژوهشگران سازه را به تمرکز بر ایده‌ای به نام "تیر با مقطع کاهش‌یافته" یا "RBS" واداشت، بدین‌صورت که با برش قسمتی از بال در فاصله مناسب از بر ستون، تیر را به‌طور عمدی در آن قسمت ضعیف می‌کنند تا در مواجهه با نیروی زلزله، مفصل پلاستیک در ناحیه ضعیف شده و به دور از بر ستون تشکیل شود (شکل ۱). در این شرایط سهم لنگر وارده به چشمه اتصال کمتر شده و اتصال صلب کاهش‌یافته، در مقایسه با حالت متعارف ایمنی بیشتری خواهد داشت.

پژوهشگران زیادی برای ارائه انواع مختلفی از مدل‌های کاهش‌یافتگی در بال و جان تیر تلاش کرده‌اند چرا که با وجود مزایای کاهش‌یافتگی، معایبی نیز در مدل‌های پیشنهادی وجود دارد. تمرکز تنش، وقوع کمانش موضعی در بال و جان در بخش کاهش‌یافته و کمانش جانبی پیچشی در تیر از جمله این معایب می‌باشد. پژوهش برای یافتن مدلی که ضمن دارا بودن مزایای کاهش‌یافتگی، فاقد اغلب مشکلات گفته شده باشد تا به امروز ادامه داشته است.



شکل ۱: ابعاد جزئیات ناحیه کاهش‌یافته بال تیر RBS [۱]

۲- ادبیات پژوهش

مفهوم RBS برای نخستین بار از اروپا سرچشمه گرفت و کاهش‌یافتگی به شکل برش‌های صاف دوزنقه‌ای شکل در بال تیر، به اجرا درآمد [۲]. از زمان ابداع این نوع از اتصال تا به امروز انواع متنوعی از شکل‌های کاهش‌یافتگی اعم از کاهش‌یافتگی در بال تیر و یا کاهش‌یافتگی در جان تیر، توسط پژوهشگران مورد مطالعات عددی و آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند.

در اتصالات RBS^۱ با کاهش‌یافتگی در بال تیر، محققان دریافتند که نمونه‌های با عمق برش کمتر در بال عملکرد بهتری دارند [۳]. کاهش‌یافتگی با ایجاد حفره‌های دایره‌ای متعدد با سایز و تعداد متفاوت در بال تیر نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که ایجاد حفره‌های هم‌سایز یا غیر هم‌سایز قابلیت کمانش موضعی را نسبت به حالت برش شعاعی کاهش می‌دهد و شکل‌پذیری و استهلاک

^۱ Reduced beam section

انرژی در اتصال بیشتر می‌شود [۵]. استفاده از دو بخش کاهش‌یافته به دنبال هم به شکل برش‌های دوبل در بال تیر نشان داد که بخش کاهش‌یافته دوم به عنوان فیوز کمکی باعث تأخیر زمانی در کمانش موضعی تیر می‌شود [۶]. محققان تأثیر تغییر طول برش شعاعی در بال را بر سختی، مقاومت و ظرفیت تحمل بار اتصال، قابل توجه ندانسته ولی افزایش عمق برش را بر کاهش پارامترهای مذکور تأثیرگذار ارزیابی کردند [۷]. تأثیر بارهای محوری در ستون‌های غیر عمیق باعث کمانش موضعی بال ستون و نیز کمانش جانبی بال تیر در بخش کاهش‌یافته می‌شود [۸]. در مطالعات مربوط به کاهش‌یافتگی در جان تیر، پژوهشی در مورد نوعی از کاهش‌یافتگی صورت گرفت که در آن به جای کاهش عرض بال در تیر، از یک ورق آکاردئونی شکل به جای جان مسطح استفاده شد که در سیکل‌های بالا پارگی در امتداد لبه‌های تا خورده و کمانش موضعی بال و جان اتفاق افتاد [۹]. مدل‌سازی نرم‌افزاری مقطع تیر با بال کاهش‌یافته RBS و جان شیاردار نشان داد که برای عملکرد لرزه‌ای مناسب باید طول شیار جان کوتاه بوده و از بر ستون تا ابتدای محل شروع برش مربوط به کاهش‌یافتگی ادامه یابد [۱۰]. استفاده از یک لوله فولادی به جای جان مسطح در منطقه کاهش‌یافته باعث ایجاد سختی مناسب و مقاومت جانبی پیشگی خوب، ولی گسترده‌تر شدن کمانش موضعی در بال‌ها و پارگی و ترک خوردن جوش‌ها در قسمت‌های لوله‌ای جان شد [۱۱]. مدل‌سازی نرم‌افزاری نوعی از تیر با جان کاهش‌یافته به شکل حفره‌های دایره‌ای بزرگی در جان، نشان داد که برای طراحی این نوع از اتصالات باید توجه ویژه‌ای بر فاصله اولین حفره تا بر ستون اعمال شود و در مدل‌های چند حفره‌ای، کمانش پیشگی جانبی و کمانش موضعی بال باعث رفتار هیستریزیس نامناسبی شده است [۱۲]. همچنین تحقیقات بر روی تأثیر پارامترهای طول دهانه تیر و اندازه و موقعیت حفره‌ی جان بر روی رفتار لرزه‌ای اتصالات نشان داد که افزایش ارتفاع حفره و کاهش فاصله حفره تا بر ستون، ظرفیت برشی اتصال را کاهش داده و تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تری را موجب می‌شوند. کاهش سائز حفره نیز باعث کمانش موضعی جان می‌شود. همچنین تمرکز تنش در مجاورت حفره جان ممکن است منجر به ترک‌خوردگی و شکست تیر شود [۱۳]. مدل‌سازی نرم‌افزاری کاهش‌یافتگی به شکل حفره‌های چهارگوشه در جان نشان داد که ارتفاع حفره و نسبت عرض به ارتفاع حفره و مرکز سطح اولین حفره تا بر ستون در شکل‌گیری محل تشکیل مفصل پلاستیک و مقاومت اتصال مهم است [۱۴]. حفره بیضوی در جان، رفتار هیستریزیس مناسب‌تری را از نظر شکل‌پذیری، شاخص پارگی و پایداری در برابر کمانش نسبت به حفره‌های دایره‌ای، از خود نشان داده و رفتار اتصالات با حفره‌های نیم دایره‌ای، نیم بیضوی و مستطیلی به‌طور کلی نامطلوب ارزیابی شد و در لبه‌های زاویه‌دار حفره‌ها، تنش و کرنش پلاستیک زیادی که منجر به بروز انواع کمانش موضعی در بخش کاهش‌یافته می‌گردد مشاهده شد [۱۵]. طراحی ناحیه کاهش‌یافته به شکل کاهش ارتفاع در جان و به‌صورت قطعه‌ای جداگانه و قابل تعویض پس از زلزله نیز نتایج مناسبی به همراه داشت [۱۶].

استفاده از صفحات زاویه‌دار جوش‌خورده (آکاردئونی) در بخش کاهش‌یافته به جای جان صاف هم مورد مطالعه قرار گرفته و طبق نتایج استفاده از جان آکاردئونی در تیرهای IPE کاهش‌یافته مناسب ارزیابی نشد [۱۷]. استفاده از دو پروفیل قوطی به هم متصل در جان به جای جان آکاردئونی باعث ایجاد ترک‌خوردگی در نقاط اتصال صفحات آکاردئونی جان و کمانش جانبی بال و کمانش پیشگی جانبی گردید [۱۸]. اثر دال سقف و نیز مهاربند جانبی بر رفتار لرزه‌ای اتصالات RBS نیز باعث کاهش کمانش جانبی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر و کنترل کمانش پیشگی جانبی تیر و کاهش پیش‌سختی ستون و افزایش پایداری و مقاومت اتصال شد [۱۹]. الحاق یک صفحه اضافی به جان تیر در منطقه کاهش‌یافته برای به تأخیر انداختن و کاهش کمانش موضعی در جان تیر، باعث افزایش چرخش پلاستیک اتصال و کاهش لاغری منطقه کاهش‌یافته شد [۲۰]. رفتار اتصالات RBS هم‌زمان با استفاده از سقف کامپوزیت نیز تا حد قابل‌قبولی بهبود یافت [۲۱]. استفاده از سخت‌کننده‌های مورب قطری جان و نیز سخت‌کننده‌های عمودی و افقی به‌طور هم‌زمان در منطقه کاهش‌یافته، عملکرد لرزه‌ای اتصالات RBS را تقویت و باعث ممانعت از زوال زود هنگام منحنی‌های هیستریزیس خصوصاً در مقاطع بزرگ شد. البته هندسه و ابعاد سخت‌کننده‌ها به گونه‌ای است که نمی‌توان استفاده از آن‌ها را برای انواع مقاطع تیر و انواع برش‌های کاهش‌یافتگی توصیه نمود [۲۲، ۲۳].

قرارگیری سخت‌کننده‌های H شکل بر روی جان تیر، به‌طوری‌که به بال نچسبیده باشند و ارتفاع مؤثر صفحه سخت‌کننده کمتر از ارتفاع تیر باشد، در جلوگیری از کمانش جانبی مؤثر تشخیص داده شد [۲۴]. استفاده از سخت‌کننده‌های جعبه‌ای باعث افزایش مقاومت اتصال نبوده ولی باعث تأخیر در کاهش مقاومت، بهبود شکل‌پذیری و افزایش استهلاک انرژی در مقاطع IPE کاهش‌یافته گردید [۲۵]. استفاده از اتصالات کاهش‌یافته با اعضای تا دو برابر بزرگتر از اندازه‌های مجاز مقررات لرزه‌ای، منجر به کمانش موضعی شده و استفاده از

اعضای سه برابر بزرگتر، منجر به ایجاد شکست‌های ترد در جوش‌ها و انتشار ترک‌ها در ستون گردید [۲۶]. اتصال RBS با برش ۷ شکل که عمق برش در آن کمتر از برش شعاعی معمولی باشد، منجر به کاهش تغییر شکل پیچشی و افزایش چرخش پلاستیک تا حداکثر ۰/۰۴ رادبان شد [۲۷].

ملاحظه می‌شود که در زمینه‌ی اتصالات کاهش‌یافته مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است ولی در مورد هندسه و شکل کاهش‌یافتگی راهکارهای محدودی ارائه شده است. از طرفی با توجه به تحقیقات انجام‌گرفته مشخص شده است که شکل کاهش‌یافتگی تأثیر زیادی بر رفتار اتصالات کاهش‌یافته دارد. در بیشتر مدل‌های ارائه شده، کاهش‌یافتگی مربوط به جان تیر می‌باشد و با توجه به هندسه آن‌ها اغلب نیاز به جوشکاری یا عملیات نورد سرد دارند که باعث ایجاد تنش‌های پسماند در فولاد می‌شود. همچنین بیشتر مدل‌های کاهش‌یافته در جان دارای جزئیات سخت و پیچیده از نظر اجرایی است. به طوری که پژوهشگران فقط به ارائه مدل‌های نرم‌افزاری آن‌ها بسنده کرده و یا ارائه مدل را فقط برای انواع خاصی از مقاطع تیر آهن در نظر گرفته‌اند.

مدل‌های کاهش‌یافتگی در بال نیز تا به امروز مبتنی بر کاهش عرض مؤثر بال تیر در بخش کاهش‌یافته بوده است. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته، کاهش عرض بال عامل مهمی در افزایش احتمال وقوع کمانش جانبی پیچشی تیر و کمانش موضعی جان در این ناحیه از تیر می‌باشد که در بخش‌های بعدی به تفصیل اثرات این مشکل بررسی می‌شود.

به این ترتیب ارائه مدلی از کاهش‌یافتگی با هندسه‌ای که هم به راحتی قابل اجرا بوده و هم فاقد اشکالات مهم ناشی از کاهش عرض بال تیر باشد، در مطالعات قبلی دیده نمی‌شود. هدف این پژوهش ارائه مدلی از کاهش‌یافتگی بدون کاهش عرض بال و بر اساس کاهش ضخامت در بال تیر می‌باشد. قابل ذکر است که کاهش عرض بال تیر در مقاطع بال پهن نیز پتانسیل کمانش جانبی پیچشی را افزایش می‌دهد، هرچند که چنین مشکلی به علت عرض زیاد بال تیر، قابل توجه نیست. در مقابل در مقاطع باریک مانند IPE که در کشور ما در مواردی به عنوان تیر استفاده می‌شوند، کاهش عرض بال تیر در مقاطع RBS خطر بالقوه‌ای برای وقوع کمانش پیچشی جانبی و کمانش جان تیر است. بنابراین به نوعی می‌توان گفت دیتایل‌های جدید ارائه شده در این مقاله بیشتر در حوزه مقاطع باریک کاربرد دارند.

۳- روش تحقیق

در این پژوهش تحقیق به صورت عددی و آزمایشگاهی است. در ابتدا پژوهش عددی با ارائه چند ایده جدید برای کاهش‌یافتگی بر مبنای عدم کاهش عرض بال آغاز شد و طرح‌های اولیه مورد ارزیابی قرار گرفتند. طرح‌های برگزیده با نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و تحت بارگذاری بارافزون قرار گرفتند. با بررسی نتایج تحلیل‌های عددی، سه مدل پیشنهادی کاهش‌یافته و یک مدل استاندارد مورد تأیید آیین‌نامه AISC 358-16 [۱] برای ادامه مطالعات انتخاب گردیدند. در بخش آزمایشگاهی سه نمونه‌ی واقعی و در مقیاس کامل شامل دو مدل پیشنهادی و یک مدل RBS ساخته شدند. نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و در نهایت نتایج آزمایشگاهی با هم مقایسه شدند. در ادامه مراحل انجام و روند پیشبرد این پژوهش شرح داده می‌شود.

۳-۱- تحقیقات عددی

مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس آیین‌نامه AISC 358-16 [۱] طراحی شدند. اتصالات شامل یک ستون با پروفیل معادل IPB 180 و یک تیر با پروفیل IPE 200 بوده که به وسیله اتصال صلب با ورق انتهایی و پیچ و سخت‌کننده^۲ به هم متصل شده‌اند. طراحی بر اساس آیین‌نامه مذکور در مورد اتصالات از پیش تأیید شده و با فرضیات و مشخصات زیر صورت گرفته است:

$$E = 2 \times 10^5 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{MPa}) \quad \bar{\nu} = 0.3 \quad \mu = 0.33 \quad \text{خصوصیات مکانیکی}$$

²- Bolted Stiffened Extended End Plate: BSEEP-4ES

$$St - 37 : F_y = 240 \text{ MPa} \quad F_u = 370 \text{ MPa}$$

خصوصیات فولاد مصرفی مقاطع

$$DIN 12.9 : F_y = 1220 \text{ MPa} \quad , \quad F_u = 105 \text{ MPa}$$

خصوصیات فولاد پیچ و مهره

$$PL 8, 10, 15, 20 : F_y = 240 \text{ (MPa)}$$

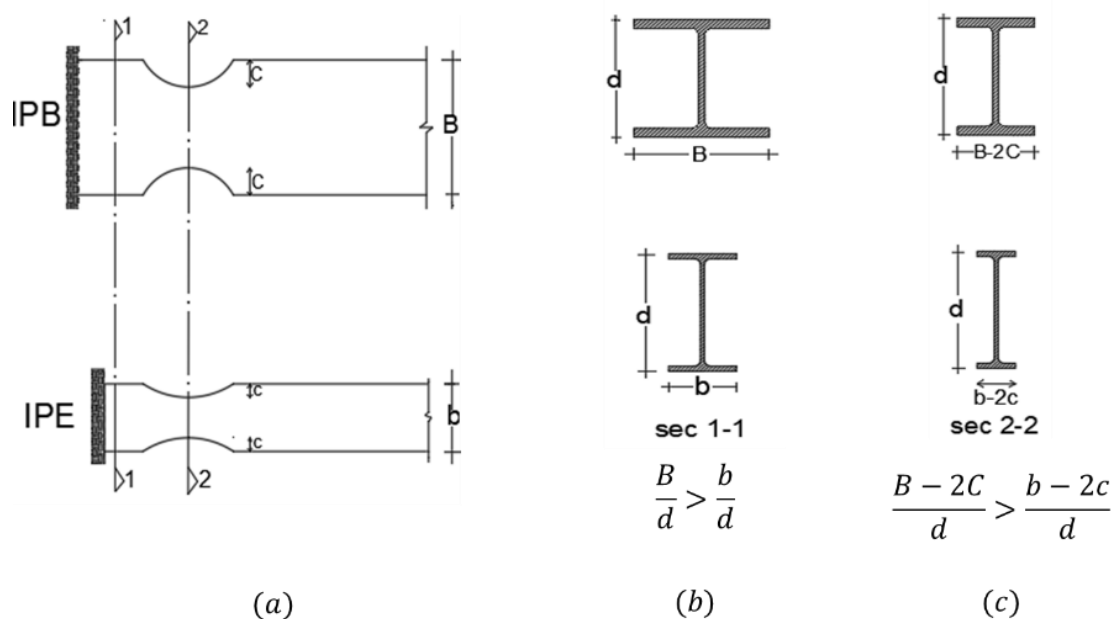
خصوصیات ورق‌های مصرفی :

که در روابط فوق E مدول الاستیسیته، $\bar{\sigma}$ نسبت پواسون، μ ضریب اصطکاک، F_y و F_u به ترتیب تنش تسلیم و تنش نهایی می‌باشند. نیروها و لنگرهای بیشینه‌ی قابل تحمل برای اتصال نیز محاسبه شد و با توجه به این مقادیر سایر اجزای این اتصال هم از قبیل سخت‌کننده‌های تیر (لچکی)، ورق‌های پیوستگی و ورق مضاعف برای تقویت چشمه اتصال ستون، ورق انتهایی برای اتصال تیر به ستون، اندازه قطر پیچ‌های اتصال و طول آن‌ها محاسبه گردید.

۱-۱-۳- مدل‌های اولیه

با توجه به اندازه‌های مورد استفاده در setup تحقیقات قبلی در مورد اتصالات RBS که در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه انجام شده بود؛ در این پژوهش نیز برای ساخت مدل‌های عددی از اندازه‌های تیر به طول ۱۵۰۰ میلی‌متر و ستون به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر استفاده شد [۱۶، ۲۸].

در این پژوهش پس از بررسی و ارزیابی ده‌ها مدل، در نهایت سه مدل اولیه کاهش‌یافته پیشنهادی انتخاب شدند. ویژگی مشترک همه مدل‌های پیشنهادی، اعمال کاهش‌یافتگی در بال تیر، بدون باریک شدن عرض بال بود. اهمیت این ویژگی به این دلیل است که کاهش عرض بال تیر باعث کاهش نسبت عرض بال به ارتفاع b/d شده و این خود موجب افزایش قابلیت کمانش جانبی تیر و کمانش موضعی جان و در نتیجه افت زود هنگام منحنی هیستریزیس می‌شود. در مقاطع IPB در حالت کاهش‌یافتگی نسبت b/d مقدار قابل قبولی از نظر رفتار کمانشی و ایجاد افت در منحنی هیستریزیس دارد. در تحقیقات قبلی هم دیده شده که مقاطع IPB کاهش‌یافته تا دریفتهای بیش از حد انتظار آیین‌نامه AISC نیز رفتار مناسبی دارند [۱۶، ۱۷]. ولی در مقاطع IPE به‌طور معمول نسبت b/d در مقایسه با همین نسبت در مقاطع IPB هم‌سایز کوچک‌تر است و در حالت کاهش‌یافتگی دو مقطع نیز همین وضع برقرار است (شکل ۲).



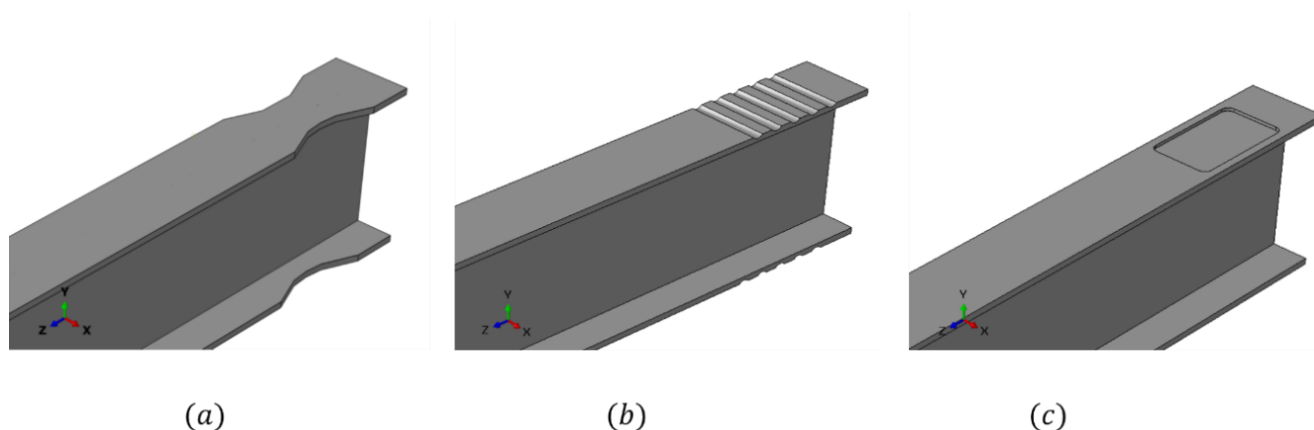
شکل ۲: مقایسه مقاطع IPB و IPE (a) مقاطع IPB و IPE کاهش‌یافته هم‌سایز (b) برش ۱-۱ (c) برش ۲-۲

مشاهده می‌شود که در مقاطع IPB، کاهش‌یافتگی به‌صورت کاهش عرض در بال، تأثیر چشمگیری بر ایجاد کمانش موضعی جان و در نتیجه ایجاد افت زود هنگام در منحنی‌های هیستریزیس ندارد ولی در مورد مقاطع IPE کاهش‌یافته که کاهش عرض بال، نسبت b/d را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد تا به امروز روابط منحصر به فردی برای میزان کاهش بال در آیین‌نامه AISC ارائه نشده است. از طرفی باید توجه داشت که به‌طور معمول با بالا رفتن سائز مقاطع IPE، نسبت b/d روند کاهشی دارد؛ بنابراین در مقاطع کاهش‌یافته ساخته‌شده از مقاطع IPE سائز بالا با کاهش عرض بال، مشکلات مورد اشاره به‌طور معناداری بیشتر می‌شود [۲۲]. چند راهکار برای رفع مشکل کاهش نسبت b/d در مقاطع IPE کاهش‌یافته به نظر می‌رسد:

الف- تقویت جان تیر در منطقه کاهش‌یافته به‌منظور کاهش کمانش موضعی جان و کمانش جانبی پیچشی تیر با روش‌هایی مانند استفاده از سخت‌کننده موضعی جان در اشکال مختلف [۲۲، ۲۳، ۲۵]، اتصال ورق‌های اضافی به جان در ناحیه کاهش‌یافته [۲۰] و کاهش ارتفاع جان [۱۶]. در این روش‌ها با توجه به لزوم انجام جوشکاری یا پیچ و پرچ کردن قطعات اضافی، و یا استفاده از عملیات نورد سرد، مشکلات ایجاد تنش‌های پسماند و تمرکز تنش و افزایش سختی موضعی در ناحیه کاهش‌یافته به میان می‌آید.

ب: پیدا کردن هندسه مناسبی از کاهش‌یافتگی بدون کاهش عرض بال تیر

در این پژوهش مدل‌های کاهش‌یافته پیشنهادی 5GF, SHF بر اساس راهکار ب و با ایجاد کاهش در ضخامت بال تیر معرفی شده‌اند. با در نظر گرفتن یک مدل RBS مورد توصیه آیین‌نامه به‌منظور مبنایی برای مقایسه با عملکرد مدل‌های پیشنهادی، در مجموع سه مدل اولیه برای شروع مطالعات عددی انتخاب شدند (شکل ۳). شرح کامل هر یک از مدل‌ها در بخش‌های بعدی آمده است.



شکل ۳: مدل‌های اولیه (a) مدل استاندارد RBS که بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC طراحی شده است (b) مدل 5GF با پنج شیار عرضی در بال‌های بالایی و پایینی تیر (c) مدل SHF با تراش مستطیلی شکل در بال‌های بالایی و پایینی تیر

۲-۱-۳- مدل‌سازی نرم‌افزاری

برای مدل‌سازی طرح‌های انتخابی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد و برای صحت‌سنجی طرح‌ها از مدل‌های عددی صحت‌سنجی شده توسط گروسی و همکاران استفاده گردید [۲۸]. دلیل این کار انطباق setup (چیدمان) آزمایشگاهی در این پژوهش با مطالعه مذکور بود؛ با این تفاوت که مدل‌ها تحت اثر بارگذاری بار افزون قرار گرفتند.

ستون و تیر و جزئیات چشمه اتصال در همه مدل‌های یکسان بوده تا شرایط یکسانی برای آن‌ها فراهم شود. در مدل‌ها از مدل‌سازی جوش صرف‌نظر شده و اتصال ورق‌ها به‌صورت merge در نظر گرفته شد. در نمونه‌های آزمایشگاهی نیز پس از اتمام بارگذاری هیچ‌گونه شکستی در جوش‌ها مشاهده نشد که درستی مدل‌سازی را در مورد اتصال ورق‌های جوش شده تأیید کرد. هندسه مدل‌سازی قطعات اتصال (شکل ۴) به صورت ذیل می‌باشد:

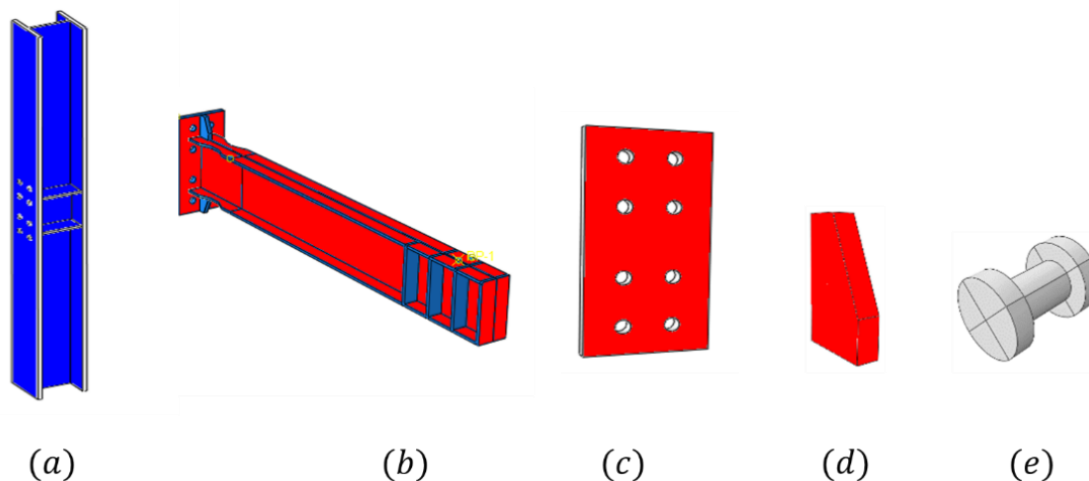
ستون در کلیه مدل‌ها از تیرورق ساخته شده و معادل پروفیل IPB 180 می‌باشد. بال ستون از ورق با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و جان از ورق با ضخامت ۸ میلی‌متر ساخته شده و از دو ورق مضاعف در دو طرف جان به ابعاد $PL\ 180 \times 150 \times 8\ mm$ و چهار ورق پیوستگی به ابعاد $PL\ 150 \times 75 \times 10$ برای تقویت چشمه اتصال و عملکرد بهتر آن استفاده شد که در امتداد بال‌های بالایی و پایینی تیر به صورت عمود بر جان ستون نصب شدند. به منظور اتصال ستون به تیر ۸ سوراخ به قطر ۲۲ میلی‌متر روی بال ستون برای عبور پیچ‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۴-ا).

تیر در تمام مدل‌ها از پروفیل نورد شده IPE 200 به طول ۱۵۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. تیرها از یک سمت به ورق انتهایی با ابعاد $PL\ 180 \times 140 \times 20$ جوش شده و به وسیله دو سخت‌کننده لچکی در وسط بال بالایی و پایینی، اتصال تیر به ورق انتهایی برقرار گردیده است. در انتهای تیر در محل اعمال بار از دوسری ورق سخت‌کننده به ابعاد $PL\ 183 \times 47 \times 10\ mm$ در دو سمت جان تیر استفاده شده است که در فواصل ده سانتی به جان تیر جوش شده‌اند (شکل ۴-ب).

ورق انتهایی برای اتصال تیر به ستون از ورق انتهایی فولادی به ابعاد $PL\ 360 \times 180 \times 20\ mm$ استفاده شده و بر روی آن هشت سوراخ به قطر ۲۲ میلی‌متر برای اتصال پیچی به ستون تعبیه شده است که الگوی قرارگیری سوراخ‌ها دقیقاً منطبق بر سوراخ‌های واقع بر بال ستون می‌باشد. اتصال ورق انتهایی به تیر به وسیله جوش صورت گرفته است (شکل ۴-ج).

لچکی به شکل دو صفحه فولادی به ابعاد $PL\ 50 \times 80 \times 15\ mm$ بوده که اتصال بال‌های پایینی و بالایی تیر با ورق انتهایی را فراهم کرده و به وسیله جوش دوطرفه به تیر متصل گردیده است و بر اساس توصیه آیین‌نامه گوشه‌های تیز ورق‌های لچکی برش خورده‌اند (شکل ۴-د).

برای اتصال ستون به تیر از طریق ورق انتهایی از ۸ پیچ و مهره فولادی پر مقاومت DIN 12.9 به قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. طول بدنه پیچ‌ها در بخش مماس با صفحات، ۳۵ میلی‌متر می‌باشد. در مقطع پیچ‌ها نیروهای پیش‌تندگی نیز طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای به آن‌ها اعمال گردید (شکل ۴-ه).



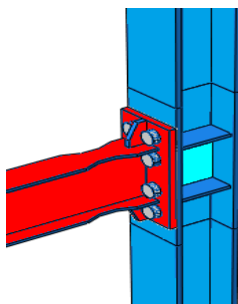
شکل ۴: هندسه مورد استفاده در مدل‌سازی (a) ستون در مدل‌ها (b) تیر در مدل‌ها (c) ورق انتهایی متصل به تیر (d) لچکی تیرها (e) پیچ اتصالات

۳-۱-۳- تشریح مدل‌ها

مدل RBS: نوع اتصال این مدل و مدل‌های پیشنهادی به صورت اتصال صلب کاهش‌یافته با ورق انتهایی از نوع چهار پیچ و سخت‌کننده^۳ می‌باشد. ناحیه کاهش‌یافته در مدل RBS به صورت برش‌های شعاعی بوده که طبق فرمول‌های آیین‌نامه AISC 358-05

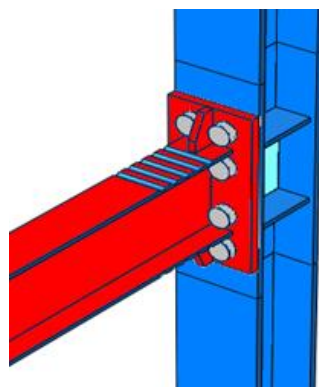
³ - Bolted Stiffened Extended End Plate: BSEEP-4ES

مشخصات هندسی آن طراحی شده است [۱]. این مدل برای مقایسه عملکرد سایر مدل‌های پیشنهادی پروژه طراحی شده و رفتار پیش‌بینی شده مناسبی برای آن مورد انتظار است (شکل ۵).



شکل ۵: مدل RBS

مدل 5GF⁴: در این مدل، کاهش یافتگی به شکل پنج شیار کم عمق عرضی در بال‌های بالایی و پایینی تیر در محدوده کاهش یافته می‌باشد. این مدل به منظور بررسی اثر شیارهای عرضی بر رفتار کاهش یافتگی اتصال طراحی شد. مقطع شیارها هلالی شکل و به عرض ۱۰ میلی‌متر و عمق ۳/۴ میلی‌متر و شعاع انحنا ۱۰/۷۵ میلی‌متر است. ضخامت بال تیر در مقطع کاهش یافته برابر ۵/۱ میلی‌متر یعنی ۶۰ درصد ضخامت اولیه بال تیر است (شکل ۶).

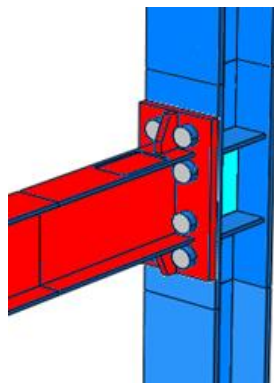


شکل ۶: مدل 5GF

مدل SHF⁵: در این مدل، کاهش یافتگی به صورت ایجاد سطح مکعب مستطیلی تراش خورده در بال‌های بالایی و پایینی تیر و در محدوده کاهش یافتگی می‌باشد به نحوی که در قسمت‌های تراش خورده، ضخامت بال تیر برابر ۳/۴ میلی‌متر است. دیواره‌های سطح تراش خورده با شعاع ۱۰ میلی‌متر پخ شده است. عرض مکعب مستطیل تراش خورده ۸۰ میلی‌متر و عمق آن ۴/۲ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت بال تیر در مقطع کاهش یافته برابر ۴/۳ میلی‌متر یعنی حدود ۵۱ درصد ضخامت اولیه بال تیر است (شکل ۷).

⁴ Grooved flange with five grooves

⁵ Shaved flange



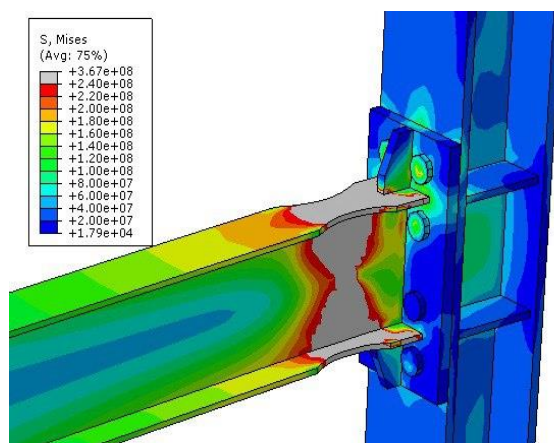
شکل ۷ مدل SHF

ملاحظه می‌شود که تفاوت مدل‌های پیشنهادی در نحوه کاهش یافتگی تیر می‌باشد و در سایر موارد از قبیل ستون، قطعات استفاده شده در چشمه اتصال، سخت‌کننده‌های تیر، لچکی، ورق انتهایی، پیچ و مهره‌ها کاملاً یکسان می‌باشند. عرض بال در تمام طول تیر ثابت می‌باشد. کاهش یافتگی مدل‌ها به صورت کاهش ضخامت در بال‌های بالایی و پایینی تیر بوده و این کار برای مقایسه با عملکرد تیر کاهش یافته استاندارد صورت گرفته که کاهش یافتگی در آن به صورت برش در بال تیر و کاهش عرض بال می‌باشد. کاهش ضخامت بال‌ها در مدل‌های پیشنهادی به نحوی است که مدول پلاستیک همه مدل‌ها در بخش تراش‌خورده معادل مدول پلاستیک باریک‌ترین مقطع مدل RBS می‌باشد.

۴-۱-۳- نتایج آنالیز مدل‌ها

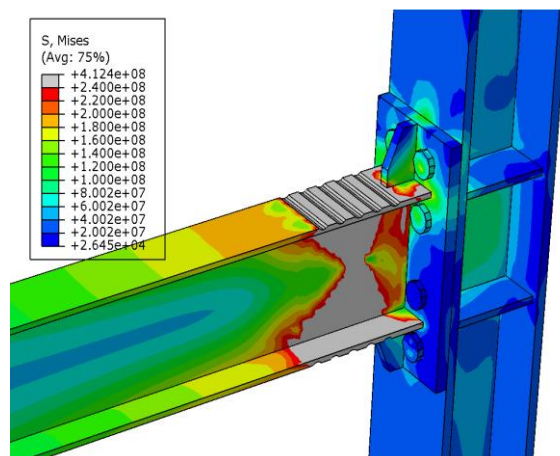
پس از انجام تحلیل پوش آور مدل‌ها نتایج زیر به دست آمد:

۱. مدل RBS: همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود این مدل دارای عملکرد خوبی بوده و مفصل پلاستیک در منطقه کاهش یافته و به دور از چشمه اتصال در تیر شکل گرفت. از حداکثر ظرفیت مقطع برای تحمل تنش‌های وارده استفاده شده است. مناطقی که به رنگ خاکستری نمایش داده شده‌اند، نمایشگر جاری شدن آن ناحیه می‌باشد.



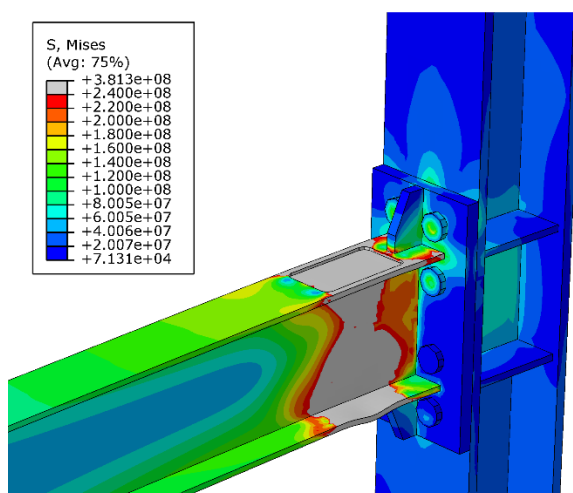
شکل ۸: تنش‌ها در مدل RBS

۲. مدل 5GF: با توجه به شکل ۹ عملکرد این مدل نیز با توجه به جاری شدن بال‌های تیر در محل شیارهای منطقه کاهش یافته و شکل‌گیری مفصل پلاستیک به دور از چشمه اتصال، مطلوب ارزیابی می‌شود. ستون و چشمه اتصال بعد از جاری شدن بال‌های تیر بدون آسیب باقی ماندند.



شکل ۹: تنش‌ها در مدل 5GF

۳. مدل SHF: با توجه به شکل ۱۰ این مدل رفتار بسیار خوبی از لحاظ نحوه شکل‌گیری مناطق پرتنش در محل مفصل پلاستیک از خود نشان داد. بال‌های تیر در منطقه کاهش‌یافتگی جاری شده و ظرفیت بقیه مناطق هنوز باقی مانده است و تا جاری شدن فاصله بسیاری دارند. پیوسته بودن تراش بال در منطقه کاهش‌یافته موجب نظم در شکل و پراکندگی نقاط پرتنش در جان تیر شده است.



شکل ۱۰: تنش‌ها در مدل SHF

به طور کلی ارزیابی رفتار نمونه‌ها بر اساس تحلیل پوش آور نتایج تقریباً یکسانی برای نمونه‌ها نشان می‌دهد. ولی با توجه به استفاده از مقطع IPE در تیرها احتمال دارد تحت بارگذاری چرخه‌ای، اثرات باریک شدن عرض بال را در نمونه RBS بر افت زود هنگام منحنی هیستریزس مشاهده کنیم. با توجه به اینکه در مدل‌های پیشنهادی کاهش عرض بال وجود ندارد، احتمال بروز کمناش جانبی پیچشی و کمناش موضعی جان در آن‌ها کمتر بوده و انتظار رفتار هیستریزس بهتری وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده از روند مطالعات عددی و مناسب بودن رفتار نمونه‌ها، تصمیم بر ساخت هر سه نمونه مورد بررسی گرفته شد تا مطالعه دقیق‌تری بر رفتار و نحوه تسلیم نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای صورت گیرد.

۳-۲- تحقیقات آزمایشگاهی

پس از بررسی نتایج عددی و انتخاب مدل‌های آزمایشگاهی تدارکات مربوط به انجام کار در آزمایشگاه و تهیه مصالح لازم برای ساخت نمونه‌های واقعی فراهم شد که در ادامه به شرح روند پیشبرد آن می‌پردازیم.

۳-۲-۱- ساخت نمونه‌های واقعی

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی طی دو مرحله انجام شد: ابتدا تراش بال‌های تیر در بخش کاهش یافته توسط دستگاه فرز CNC (شکل a-۱۱) در کارخانه مارپیچ باختر کرمانشاه انجام شد و سپس جوشکاری قطعات به صورت جوش تحت حفاظت گاز CO₂ در کارخانه سورنا سوله کرمانشاه صورت گرفت (شکل b-۱۱). تیرها پس از انجام عملیات تراش (شکل c-۱۱). برای مرحله بعدی یعنی انجام سایر کارهای ساخت نمونه‌ها شامل برش و مونتاژ و جوش قطعات و رنگ آمیزی آن‌ها آماده شدند (شکل d-۱۱).



(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱۱: مراحل ساخت نمونه‌ها (a) دستگاه فرز (b) جوشکاری تحت حفاظت گاز (c) تراش تیرها با دستگاه فرز (d) نمونه‌ها بعد از جوشکاری قطعات

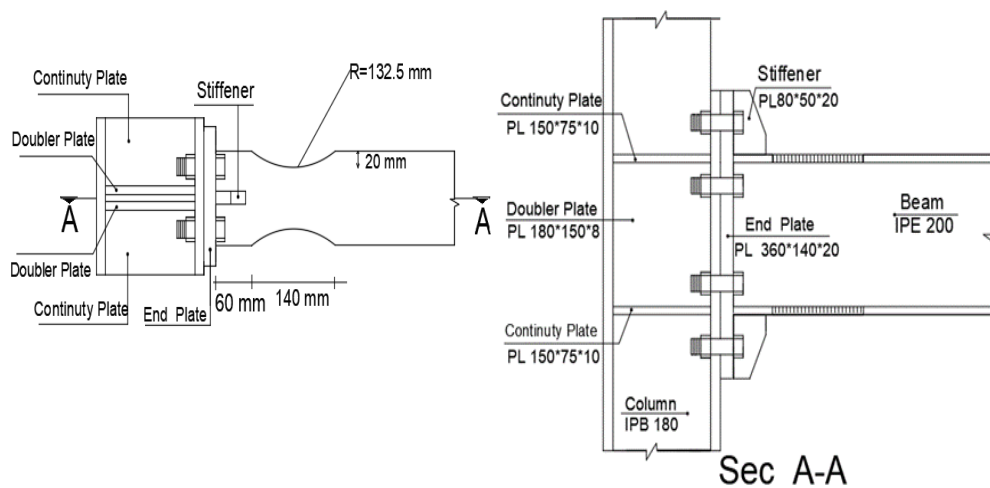
نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس مدل‌های عددی و به صورت اتصالاتی با مقیاس کامل ساخته شده‌اند. در همه نمونه‌های اتصال، تیر از پروفیل IPE و به طول ۱۵۰۰ میلی‌متر ساخته شده و ستون از ورق‌های فولادی با گرید اسمی St-37 و معادل IPB 180 و به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر تولید گردید. اتصال ورق انتهایی به تیرها توسط جوش گوشه و اتصال به ستون توسط هشت پیچ با گرید اسمی 12.9 طبق ISO standard [ISO 2009] به قطر ۲۰ میلی‌متر صورت گرفت. همه اتصالات پیچی از نوع اصطکاکی بوده و توسط آچارهای مخصوص در آزمایشگاه به طور کامل پیش‌تنیده شده‌اند. اطلاعات کامل‌تر از مقاطع تیر و ستون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ابعاد مقاطع تیر و ستون

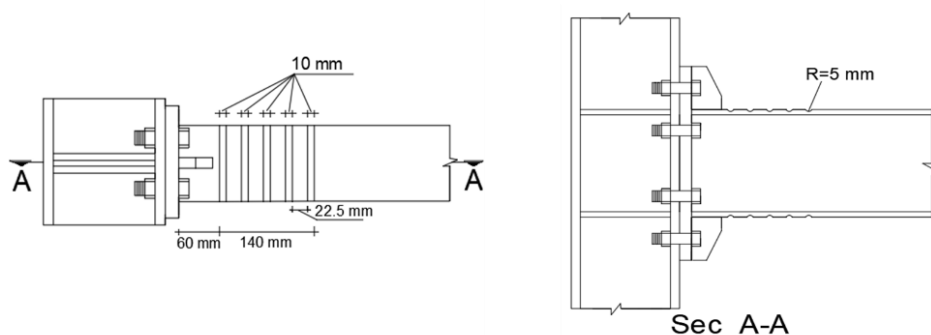
قطعه	ضخامت بال (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت جان (mm)	ارتفاع خالص جان (mm)
ستون (معادل IPB180)	۱۵	۱۸۰	۸	۱۵۰
تیر (پروفیل IPE 200)	۸/۵	۱۰۰	۵/۶	۱۸۳

۳-۲-۲- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

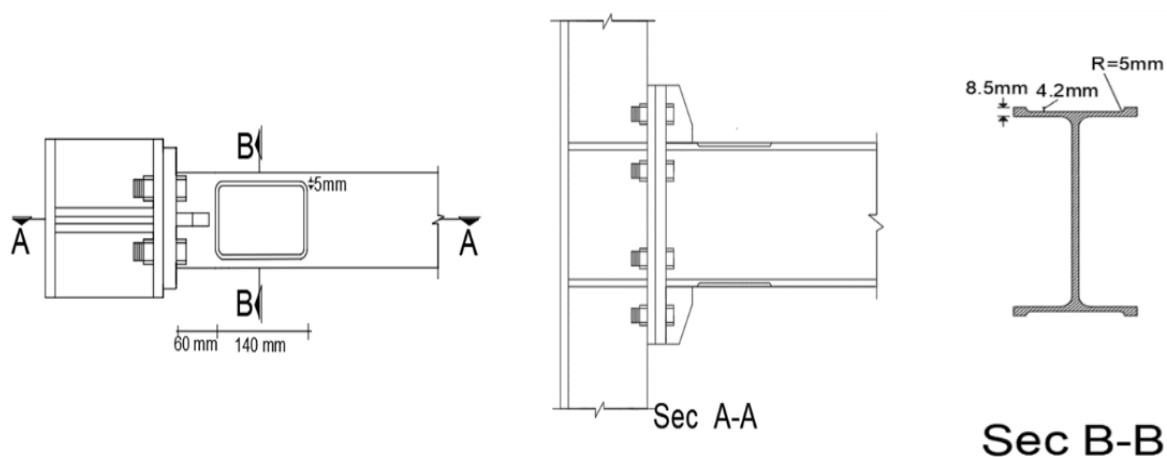
جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. برای پرهیز از شلوعی شکل‌ها، اندازه قطعات اصلی فقط در شکل ۱۲-a نوشته شده و در سایر نمونه‌ها فقط جزییات بخش کاهش یافته درج شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل نمونه RBS و نمونه‌های پیشنهادی SHF و 5GF در چیدمان آزمایش در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



(a)

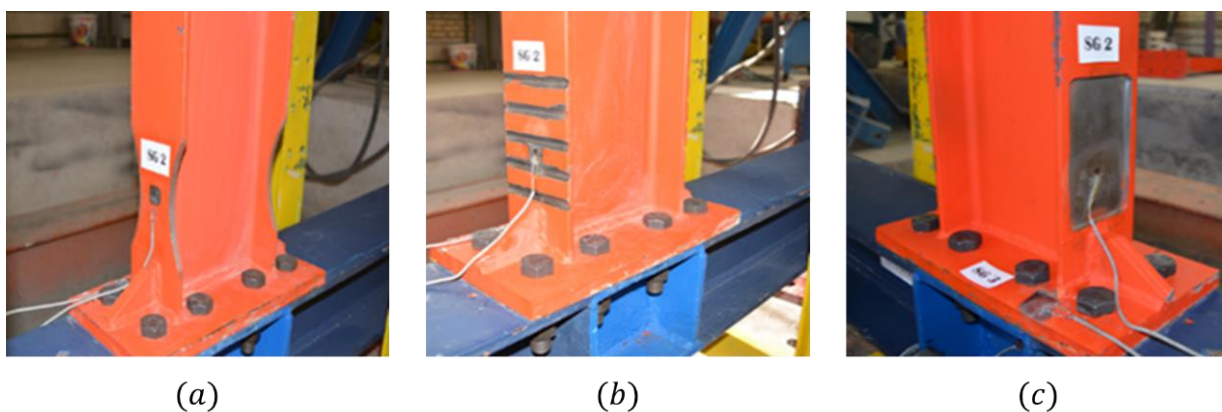


(b)



(c)

شکل ۱۲: جزییات نمونه‌ها (a) RBS (b) 5GF (c) SHF



(a)

(b)

(c)

شکل ۱۳: نمونه‌ها در چیدمان آزمایش (a) RBS (b) 5GF (c) SHF

۳-۲-۳- چیدمان آزمایش

شکل ۱۴ یک نمای کلی از چیدمان آزمایش این پژوهش در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه را نشان می‌دهد. اتصال نمونه با چرخش ۹۰ درجه به صورتی در چیدمان جایگزین شده که ستون به صورت افقی از دو طرف توسط پیچ و مهره و صفحات دو انتهای ستون به دو تکیه‌گاه به ابعاد $۵۰۰ \times ۴۰۰ \times ۴۰۰$ متصل شده و تکیه‌گاه‌ها نیز به شاسی قوی کف متصل شده‌اند. تیر نیز به صورت قائم و با اتصال پیچی و ورق انتهایی به ستون متصل می‌باشد.



شکل ۱۴: نمای کلی چیدمان آزمایش

نمونه‌ها مطابق شکل ۱۵ در چیدمان آزمایش جایگزین شده و از طریق تکیه‌گاه‌های ستون به کف صلب متصل گردیدند. برای جلوگیری از انحراف جانبی تیر در هنگام بارگذاری، از تکیه‌گاه جانبی^۶ در مکان مربوطه استفاده شد. جک هیدرولیکی^۷ با ظرفیت ۱۰۰۰ KN و ظرفیت جابجایی ۳۰۰ میلی‌متر در فشار و کشش، نیز به صورت سری با نیروسنج^۸ قرار گرفته و به انتهای آزاد تیر پین شده و آماده اعمال بارگذاری چرخه‌ای شد. انتهای دیگر جک به صورت صلب به قاب صلب اصلی^۹ متصل می‌باشد. چند^{۱۰} LPT در محل‌های مناسب نصب شده‌اند تا با دقت ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ میلی‌متر، جابجایی‌ها را به دیتالاگر انتقال دهند. فاصله مرکز اثر نیروی جک به انتهای تیر تا تراز بالایی ورق انتهایی چسبیده به بال ستون در همه نمونه‌ها ۱۳۴ میلی‌متر است.

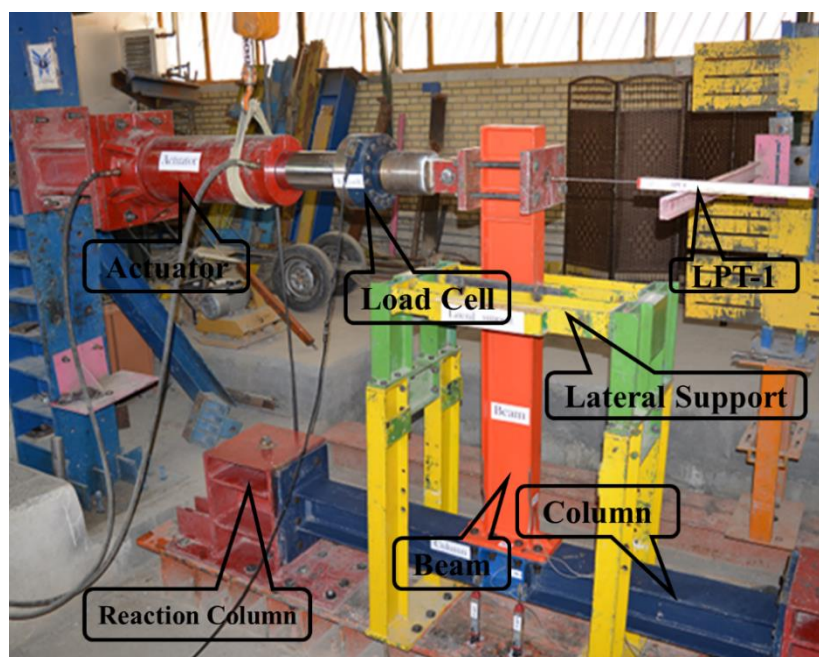
⁶ - Lateral Support

⁷ - Actuator

⁸ - Load cell

⁹ - Reaction Frame

¹⁰ - Linear Potentiometer Transducer



شکل ۱۵: ساختار چیدمان آزمایش نمونه‌ها

محل اتصال نیروسنج که مابین جک و کلاهیک اتصال به تیر بوده و نیز محل قرارگیری LPT-1 که در امتداد مسیر حرکت جک می‌باشد در شکل ۱۶ از نمای نزدیک‌تر دیده می‌شود. نیروسنج مقدار نیروی اعمال‌شده از طرف جک به تیر را در هر لحظه اندازه‌گیری می‌کند و LPT-1 نیز میزان جابجایی انتهای تیر در امتداد مسیر حرکت جک را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۱۶: جای قرارگیری LPT-1

همه اطلاعاتی که LPT-1 به دیتا لاگر می‌فرستد هر ۵ ثانیه یک‌بار توسط دیتالاگر ثبت و ذخیره می‌شود و تا زمان گسیختگی سازه، این روند ادامه دارد.

۴-۲-۳ خصوصیات مصالح

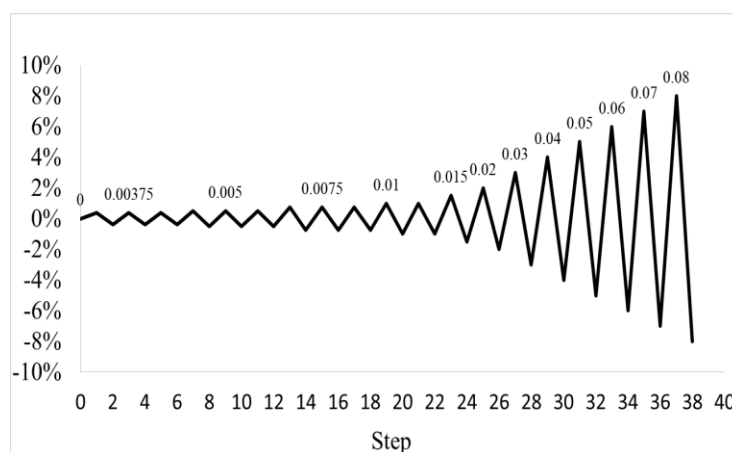
تست کشش بر اساس استاندارد ASTM برای همه ورق‌های فولادی مورد استفاده در قسمت‌های مختلف نمونه‌ها مثل بال و جان ستون، ورق‌های انتهایی، سخت‌کننده‌های تیر و ستون، ورق مضاعف ستون و پیچ‌ها انجام شد (ASTM A370 2002). خصوصیات مصالح بر اساس نتایج تست مذکور در جدول ۲ ارائه می‌شود.

جدول ۲: خصوصیات مصالح مورد استفاده در نمونه‌ها

تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	کرنش شکست (درصد)	مدول الاستیسیته (GPa)	مورد مصرف	نوع مصالح
۳۶۵	۲۸۳	۲۵/۱	۱۹۴/۳	جان ستون، ورق مضاعف	ورق فولادی ۸ میلی‌متر
۳۹۲	۲۶۱	۲۶/۱	۱۸۷/۶	ورق پیوستگی، سخت‌کننده انتهای تیر	ورق فولادی ۱۰ میلی‌متر
۳۸۹	۲۹۰	۱۸/۶	۱۹۵/۱	بال ستون، لچکی تیر	ورق فولادی ۱۵ میلی‌متر
۳۷۱	۲۵۴	۲۵/۷	۱۹۷/۹	ورق انتهایی	ورق فولادی ۲۰ میلی‌متر
۱۲۲۳	۱۰۵۶	۱۱	۲۱۱/۹	اتصالات پیچی	پیچ ۱۲.۹ با قطر ۲۰ میلی‌متر

۵-۲-۳- پروتکل بارگذاری

پروتکل ارائه شده در استاندارد FEMA-350, 2000 [۲۹] در خصوص بارگذاری چرخه‌ای در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. طبق این پروتکل ابتدا دررفت‌های ۰/۰۰۳۷۵ و ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۷۵ هر کدام شش سیکل به انتهای تیر اعمال گردید. پس از آن دررفت ۰/۰۱ در چهار سیکل، دررفت ۰/۰۱۵ در دو سیکل و دررفت ۰/۰۲ نیز در دو سیکل اعمال شدند. از این مرحله به بعد در هر گام بارگذاری که معادل دو سیکل بود، ۰/۰۱ رادیان به دررفت اضافه شده و این روند آنقدر ادامه پیدا کرد تا اثرات افت در نمودار هیستریزس نمایان شده و در نهایت شکست در سازه مشاهده شد. در محاسبات لنگر انتهایی تیر باید ارتفاع مؤثر تیر که همان فاصله مرکز اثر نیروی جک به انتهای تیر تا تراز بالایی ورق انتهایی چسبیده به بال ستون که در این آزمایش ۱۳۴۰ میلی‌متر است در مقدار نیرو ضرب شود (شکل ۱۷).



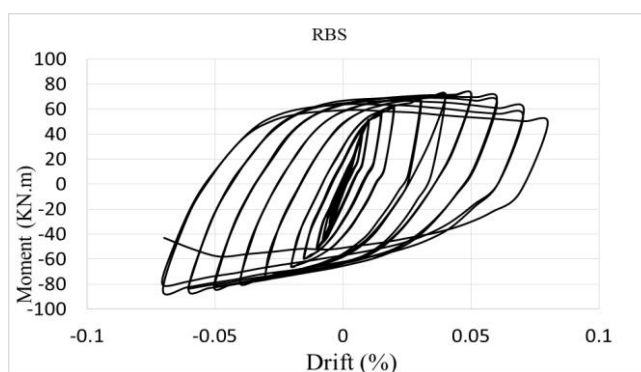
شکل ۱۷: پروتکل بارگذاری بر اساس FEMA [۲۹]

۴- نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

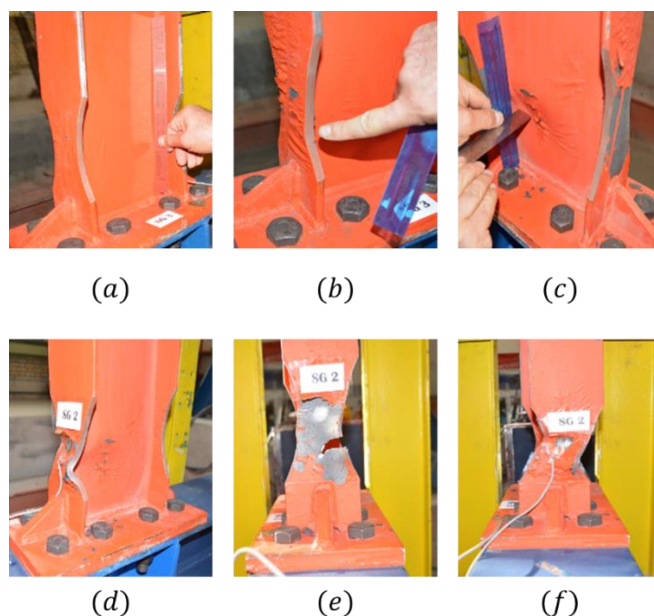
مشاهدات آزمایش نمونه‌ها در این بخش شرح داده شده و بحث و بررسی در مورد این مشاهدات در بخش بعدی ارائه می‌شود.

۱-۴- نمونه RBS

در شکل ۱۸ منحنی هیستریزیس لنگر-دریفت نمونه RBS دیده می‌شود. در این نمونه تا دریفت $0/02$ هیچ‌گونه ضعف یا افتی در نمودار دیده نشد. فقط در قسمت‌هایی از جان تیر چروکیدگی در رنگ مشاهده شد. در سیکل اول دریفت $0/03$ کمناش کوچکی در جان تیر دیده شد (شکل a-۱۹) و در سیکل اول دریفت $0/04$ نیز کمناش در بال به‌طور محسوس مشاهده شد (شکل b-۱۹). نمودار همچنان روند افزایشی داشت و لنگر نهایی با اندازه $71/51$ KN-m در سیکل دوم دریفت $0/04$ اتفاق افتاد. پس از این دریفت روند افزایش کمناش در جان و بال ادامه پیدا کرده و افت نمودار هیستریزیس نیز آغاز شد. در دریفت $0/05$ شدت کمناش بال و جان بیشتر شده و افت حلقه‌های نمودار هیستریزیس بیشتر نمایان شد (شکل c-۱۹) و (شکل d-۱۹). در سیکل اول دریفت $0/07$ نشانه‌های پارگی نیز در بال تیر در محدوده کاهش یافته پیدا شد. در سیکل دوم دریفت $0/07$ با افزایش پارگی، مقداری کمناش جانبی پیشگی هم مشاهده شد (شکل e-۱۹). در سیکل اول دریفت $0/08$ با افزایش کمناش جانبی پیشگی و افت شدید نمودار آزمایش پایان یافت (شکل f-۱۹).



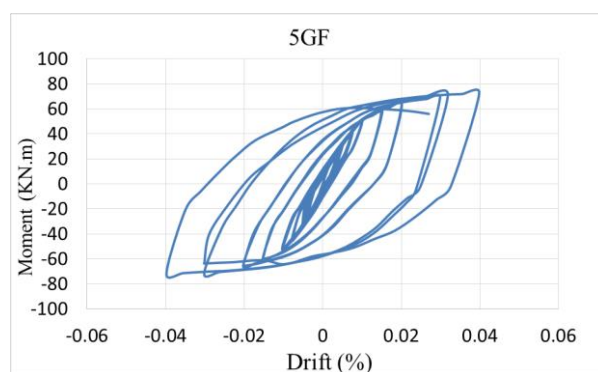
شکل ۱۸: نمودار لنگر-دریفت نمونه RBS



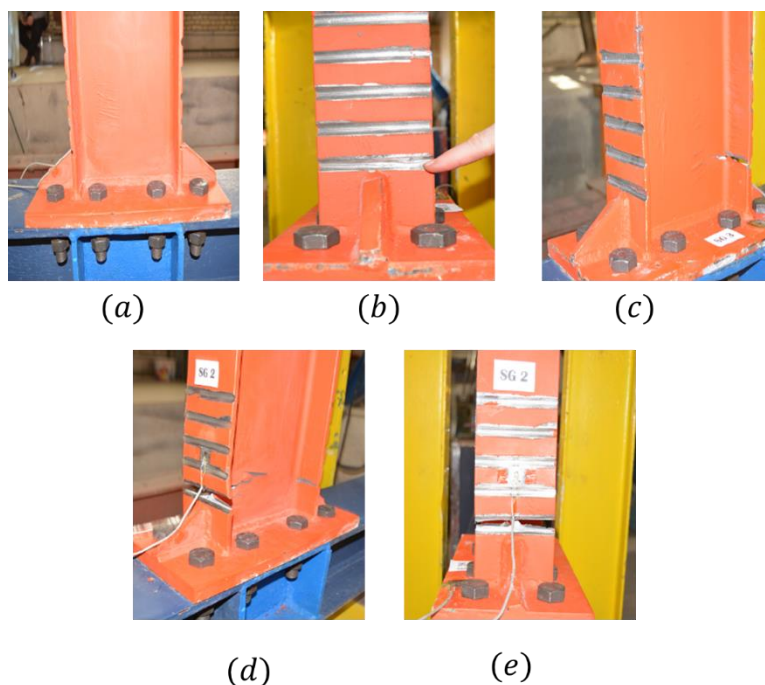
شکل ۱۹: مراحل خرابی در نمونه RBS (a) کمناش اولیه جان در دریفت $0/03$ (b) کمناش اولیه بال در دریفت $0/04$ (c) تشدید کمناش جان در دریفت $0/05$ (d) تشدید کمناش بال در دریفت $0/05$ (e) پارگی بال در دریفت $0/08$ (f) کمناش جانبی پیشگی تیر در دریفت $0/08$

۲-۴- نمونه 5GF

شکل ۲۰ منحنی هیستریزیس لنگر-دریفت برای نمونه 5GF را نمایش می‌دهد. در این نمونه تا دریفت $0/02$ هیچ نشانه‌ای از ضعف در نمونه یا افت نمودار هیستریزیس دیده نشد. در سیکل اول دریفت $0/03$ اولین نشانه‌های کمانش جان به صورت چروکیدگی بسیار جزئی در رنگ مشاهده شد (شکل a-۲۱). در سیکل دوم دریفت $0/03$ ترک بسیار کوچکی در اولین شیار یکی از بال‌ها در محدوده کاهش‌یافته ایجاد شد ولی منحنی هنوز با حفظ حالت تقارن و بدون افت در حال پیشرفت بود (شکل b-۲۱). در سیکل اول دریفت $0/04$ ترک در شیارهای بال کاملاً مشهود شد و گسترش یافت ولی کمانش در جان و بال هنوز هم بسیار جزئی و به صورت چروکیدگی در رنگ بود (شکل c-۲۱). بیشترین لنگر در این سیکل یعنی سیکل اول دریفت $0/04$ به میزان $72/44 \text{ KN}\cdot\text{m}$ ثبت شد. در سیکل دوم دریفت $0/04$ بدون ایجاد کمانش قابل توجه در بال و جان و به دلیل تمرکز کرنش در اولین شیار بال، گسیختگی به صورت ترک سراسری دیده شد و منحنی دچار افت شده و آزمایش پایان یافت (شکل d-۲۱). در انتهای آزمایش نیز کمانش جانبی پیشگی دیده نشد (شکل e-۲۱).



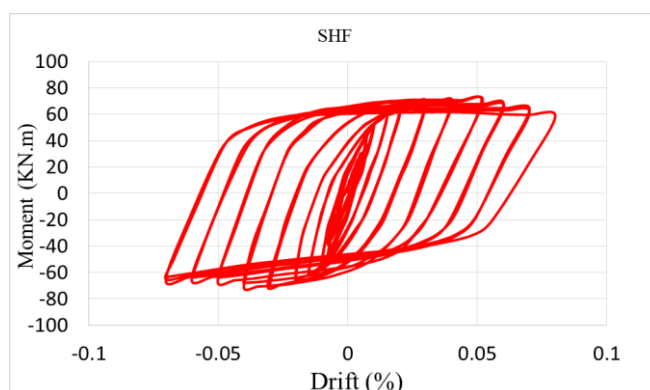
شکل ۲۰: نمودار لنگر-دریفت نمونه 5GF



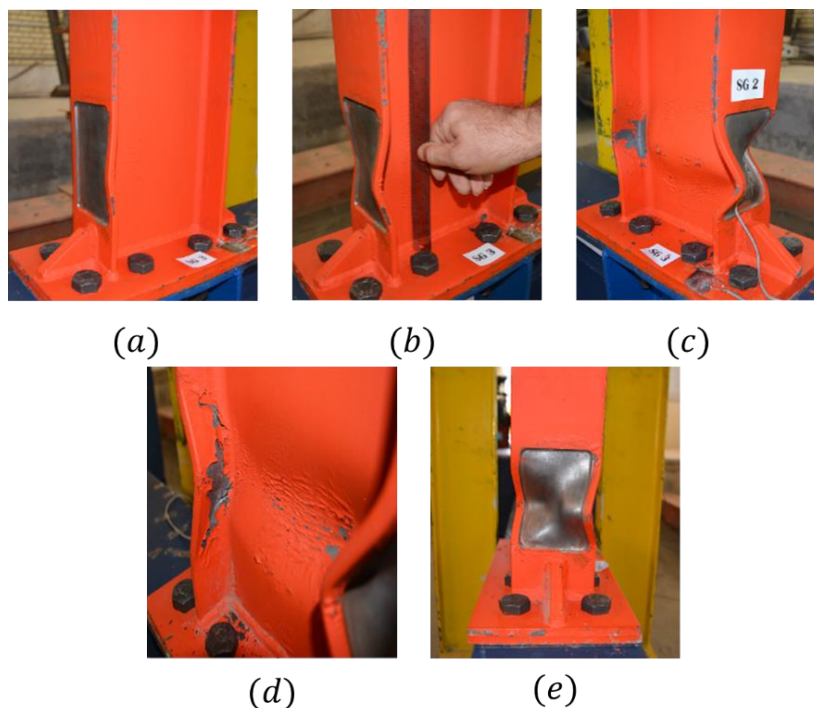
شکل ۲۱: مراحل خرابی در نمونه 5GF: (a) کمانش اولیه جان در سیکل اول دریفت $0/03$ (b) پیدایش ترک در بال در سیکل دوم دریفت $0/03$ (c) گسترش ترک در هر دو بال در سیکل اول دریفت $0/04$ (d) ترک سراسری بال در سیکل دوم دریفت $0/04$ (e) شکست نمونه در سیکل دوم دریفت $0/04$ و عدم ایجاد کمانش جانبی پیشگی

۳-۴- نمونه SHF

شکل ۲۲ نمودار هیستریزیس نمونه SHF را نشان می‌دهد. در این نمونه تا دریفت $0/02$ هیچ نشانه‌ای از کمانش در بال یا جان دیده نشد و فقط چروکیدگی بسیار مختصری در یکی از بال‌ها مشاهده شد. اولین آثار کمانش در بال در سیکل اول دریفت $0/03$ پدیدار شد (شکل a-۲۳). و در همین سیکل چروکیدگی مختصری در جان هم دیده شد (شکل b-۲۳). ولی منحنی تا دریفت $0/04$ سیر صعودی داشت. در دریفت $0/05$ نشانه‌های کمانش در بال و جان تشدید شد و روند نزولی منحنی آغاز شد (شکل c-۲۳). از دریفت $0/05$ تا انتهای دریفت $0/08$ روند تشدید کمانش در بال و جان تقریباً ثابت بود و منحنی با شیب بسیار کندی رو به کاهش داشت. در انتهای سیکل دوم دریفت $0/08$ یک ترک در پشت یکی از بال‌ها در منطقه کاهش‌یافتگی شکل گرفت (شکل d-۲۳). در سیکل اول دریفت $0/09$ آزمایش متوقف شد و در انتهای آزمایش اثری از کمانش جانبی پیچشی و پارگی در لبه‌های بال مشاهده نشد (شکل e-۲۳). بیشترین لنگر ثبت شده در سیکل دوم دریفت $0/04$ و به میزان $70/1 \text{ KN}\cdot\text{m}$ بود.



شکل ۲۲: نمودار لنگر - دریفت نمونه SHF



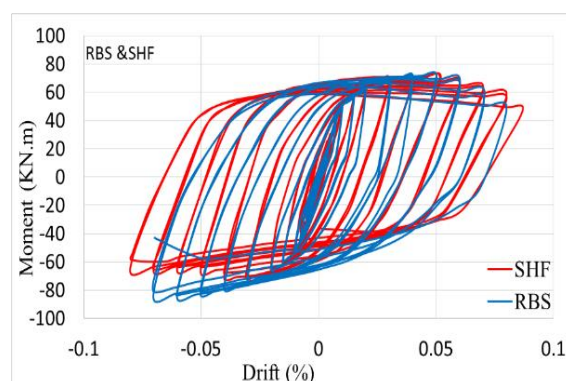
شکل ۲۳: مراحل خرابی در نمونه SHF (a) کمانش اولیه بال در سیکل اول دریفت $0/03$ (b) کمانش اولیه جان در سیکل اول دریفت $0/03$ (c) تشدید کمانش بال و جان در دریفت $0/05$ (d) ایجاد ترک در پشت بال و عدم پارگی بال در انتهای سیکل دوم دریفت $0/08$ (e) پایان آزمایش در سیکل اول دریفت $0/09$ و عدم ایجاد کمانش جانبی در تیر

۵- بحث و بررسی نتایج

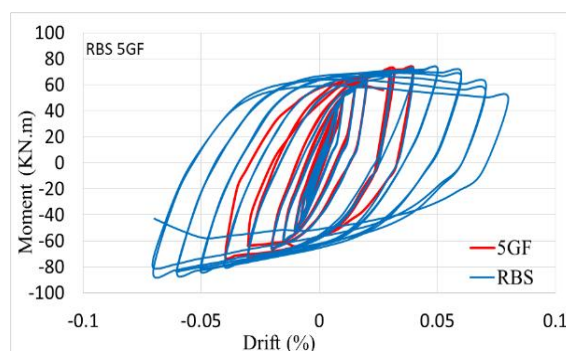
نمودار هیستریزیس هر نمونه بر اساس نتایج آزمایش آن ترسیم شد. پس از آن نمودارهای backbone و نیز نمودارهای دوخطی معادل برای نمونه‌ها به دست آمد. مقدار پارامترهای مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی نیز محاسبه گردید. مقایسه و ارزیابی پارامترهای لرزه‌ای برای نمونه‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

۵-۱- ارزیابی نمودارهای هیستریزیس نمونه‌ها

به طور کلی با مشاهده شکل ظاهری نمودار هیستریزیس نمونه‌ها در شکل ۲۴ و ۲۵ می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد هر سه نمونه از لحاظ پایداری مناسب بود. طبق ضوابط مربوط به قابلیت تحمل دوران در قاب‌های خمشی ویژه در آیین‌نامه AISC اتصالات تیر به ستون می‌بایست حداقل به میزان $0/04$ رادیان قابلیت تحمل دوران داشته باشند و در این دوران، مقاومت خمشی اتصال در بر ستون حداقل برابر با 80% درصد لنگر پلاستیک مقطع تیر باشد. در هر سه نمونه مقادیر حداقل ضوابط برآورده شده است.



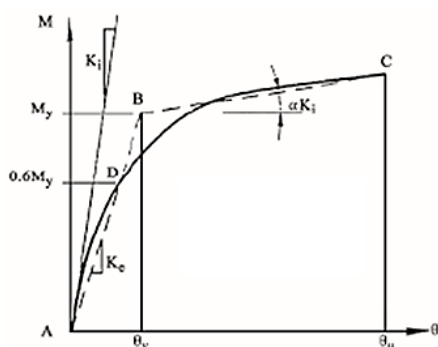
شکل ۲۴: مقایسه نتایج هیستریزیس مدل RBS و SHF



شکل ۲۵: مقایسه نتایج هیستریزیس مدل RBS و 5GF

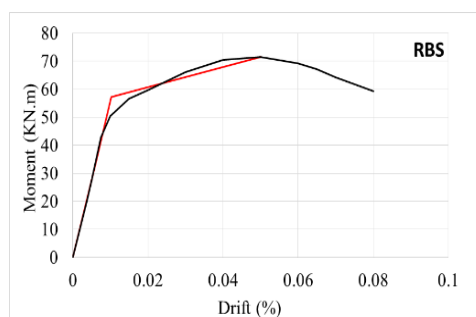
۵-۲- نمودارهای backbone و نمودارهای دوخطی معادل

نمودار backbone بر اساس ناحیه مثبت منحنی هیستریزیس رسم شد و پس از آن نمودار دوخطی معادل بر اساس معیارهای مشخص در [۳۰] FEMA - 440 بر نمودار backbone برازش داده شد که شماتیک آن در شکل ۲۶ نشان داده شده است. برای به دست آوردن نمودار دوخطی از بخش صعودی نمودارهای backbone تا نقطه‌ای معادل نقطه اوج استفاده گردید و از بخش افت کرده منحنی صرف‌نظر شد. طبق روش انرژی معادل، نمودار دوخطی باید به گونه‌ای ترسیم شود که مساحت زیر نمودار backbone با مساحت زیر نمودار دوخطی برابر شود.

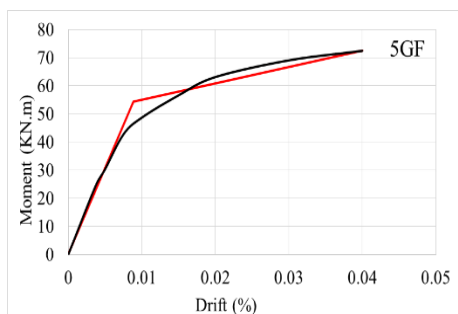


شکل ۲۶: ترسیم نمودار backbone و نمودار دوخطی معادل [۲۷]

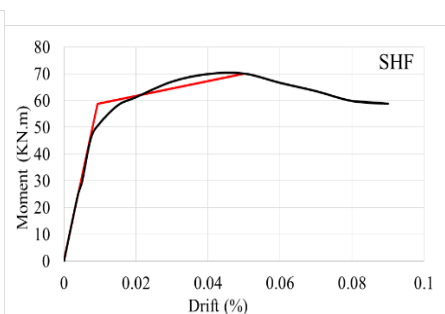
نمودارهای backbone و دوخطی معادل نمونه‌ها در شکل ۲۷ نمایش داده شده‌اند و در شکل ۲۸ نمودار دوخطی آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند.



(a)

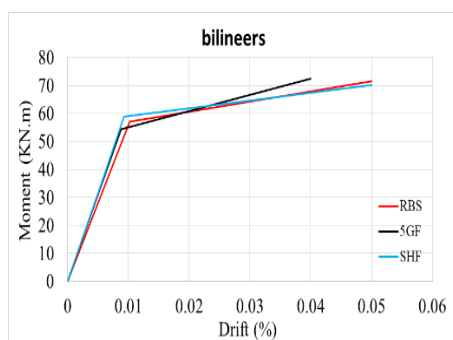


(b)

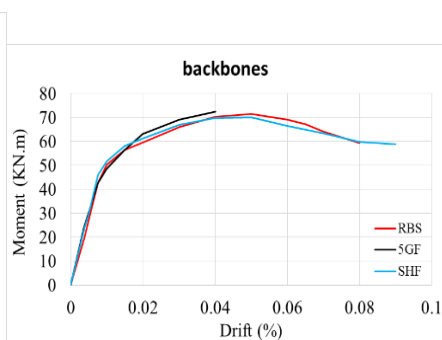


(c)

شکل ۲۷: نمودار backbone و نمودار دوخطی نمونه‌های (a) مدل RBS (b) مدل 5GF (c) مدل SHF



(a)



(b)

شکل ۲۸: مقایسه نمودارهای (a) backbone و (b) دوخطی معادل نمونه‌ها

بعد از ترسیم نمودارهای دوخطی معادل برای همه نمونه‌ها، پارامترهای لرزه‌ای شامل لنگر نهایی (M_u)، لنگر تسلیم (M_y)، دریفت تسلیم (θ_y) دریفت نهایی (θ_u) به دست آمد و سپس با استفاده از روابط (۱) شکل‌پذیری (μ) نیز محاسبه شد.

$$\mu = \theta_u / \theta_y \quad (1)$$

پارامترهای لرزه‌ای هر ۳ نمونه در جدول ۳ نمایش داده شده است و در بخش بعدی مقایسه این پارامترها ارائه می‌شود.

جدول ۳: مشخصات لرزه‌ای نمونه‌ها بر اساس نمودارهای دوخطی معادل

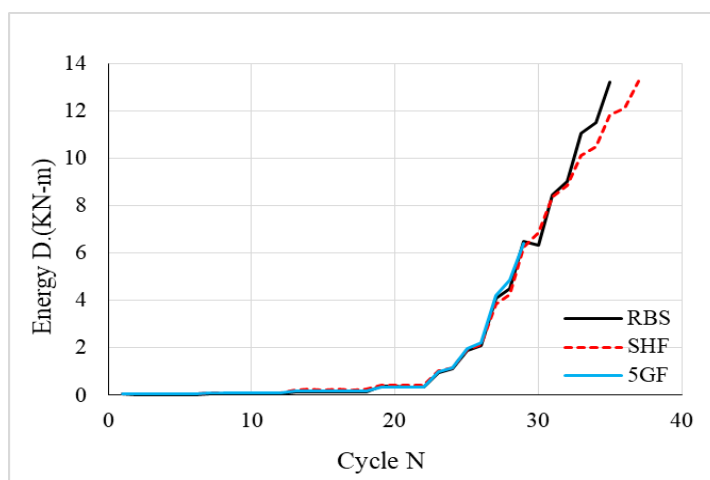
نمونه	M_y (KN.m)	θ_y (Rad)	M_u (KN.m)	θ_u (Rad)	μ
RBS	۵۷/۱۵	۰/۰۱	۷۱/۵	۰/۰۵	۴/۸۸
5GF	۵۴/۴	۰/۰۰۸۸	۷۲/۴	۰/۰۴	۴/۵۳
SHF	۵۸/۸	۰/۰۰۹۲	۷۰/۱	۰/۰۵	۵/۳۸

۳-۵ - ارزیابی شکل‌پذیری نمونه‌ها

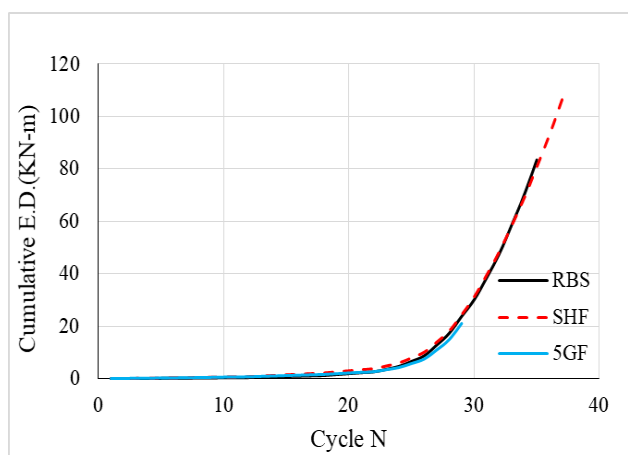
شکل‌پذیری نمونه 5GF از نمونه RBS کمتر است. در نمونه SHF شکل‌پذیری به میزان ۱۰/۳ درصد بیشتر از نمونه استاندارد می‌باشد. شکل‌پذیری بیشتر به معنی تحمل دریفت غیرخطی بیشتر و رفتار بهتر در مواجهه با زلزله‌های شدیدتر می‌باشد. نمونه 5GF در زلزله‌های شدید عملکردی ضعیف‌تر نسبت به نمونه RBS دارد ولی نمونه SHF در زلزله‌های شدید عملکرد بهتری نسبت به نمونه RBS دارد.

۴-۵ - اتلاف انرژی نمونه‌ها

اتلاف انرژی بر اساس محاسبه سطح زیر نمودار هیستریزس به دست می‌آید. با توجه به شکل ۲۹ مشخص است که روند اتلاف انرژی تا سیکل ۲۸ در هر سه نمونه شباهت دارد. از این سیکل به بعد فقط منحنی‌های مربوط به نمونه‌های SHF و RBS با روندی نسبتاً مشابه صعود کرده و در آخر نمونه RBS در هر سیکل اتلاف انرژی بیشتری دارد. علت این رویکرد بالاتر بودن مقاومت نمونه استاندارد در سیکل‌های اولیه است. با این وجود در شکل ۳۰ ملاحظه می‌شود که اتلاف انرژی تجمعی نمونه SHF تقریباً ۲۸ درصد از مدل RBS بیشتر است.



شکل ۲۹: نمودار اتلاف انرژی در هر سیکل برای همه نمونه‌های آزمایشگاهی



شکل ۳: مقایسه نمودارهای اتلاف انرژی تجمعی نمونه‌ها

نمونه SHF به واسطه شکل‌پذیری بالاتر و تعداد سیکل‌های بیشتری که در برابر بارهای وارده مقاومت کرده است، اتلاف انرژی تجمعی بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است. در جدول ۴ مقدار بیشینه اتلاف انرژی و اتلاف انرژی تجمعی برای هر چهار نمونه ارائه شده است.

جدول ۴: پارامترهای شاخص در ارزیابی نمونه‌ها

نمونه ها	اتلاف انرژی	اتلاف انرژی
	سیکلی KN.m	تجمعی KN.m
RBS	۱۳/۲۲	۸۳/۴۱
5GF	۶/۴	۲۴/۹
SHF	۱۳/۳	۱۰۶/۵

۵-۵- ارزیابی نهایی

ارزیابی کلی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه 5GF در یافت تسلیم تقریباً نزدیک به دریافت تسلیم نمونه RBS ولی لنگر نهایی بیشتری دارد. لنگر تسلیم، دریافت نهایی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی این نمونه از نمونه RBS کمتر است. در نمونه SHF لنگر تسلیم کمی بیشتر ولی لنگر نهایی مقداری کمتر از نمونه RBS است. دریافت تسلیم نمونه SHF تفاوت چندانی با نمونه RBS ندارد و دریافت نهایی آن مساوی با نمونه RBS است. شکل‌پذیری نمونه SHF از نمونه RBS بیشتر است. در اتلاف انرژی تجمعی نیز نمونه SHF عملکرد بهتری از نمونه RBS ارائه داده و در برابر بارهای وارده مدت زمان بیشتری مقاومت کرده است. در کل، بیشترین شکل‌پذیری و بیشترین اتلاف انرژی تجمعی در بین سه نمونه در نمونه SHF دیده شد. بنابراین دیتایل ارائه شده برای نمونه SHF دارای عملکرد مناسب و قابل قبول بوده و رفتار لرزه‌ای نسبتاً بهتری از نمونه استاندارد دارد.

با توجه به مشاهدات و نتایج، رفتار نمونه‌ها را می‌توان چنین تحلیل کرد: کرنش‌های کششی و فشاری در بال تیر در نمونه RBS در ناحیه‌ای به عرض ۱۴۰ میلی‌متر توزیع می‌شود در حالی که در نمونه 5GF همین تغییر مکان‌های ایجاد شده در بال تیر در اثر کشش و فشار در اولین شیار از بر ستون در عرض تراش خورده کوچکی به اندازه ۱۰ میلی‌متر توزیع می‌شود. این مساله باعث تمرکز کرنش در نمونه 5GF شده و نیز موجب شده است که پدیده خستگی^{۱۱} در این نمونه سریع‌تر از نمونه RBS رخ دهد و بروز ترک سراسری بعد از دریافت

^{۱۱} - low cycle fatigue

۰/۰۴ باعث افت یکبارہ در نمودار هیستریزیس آن شود. هر نوع تغییر و برش در لبه‌های بیرونی بال باعث ایجاد ریزترک در دررفت‌های پایین و قابلیت انتشار ترک و ایجاد پارگی در دررفت‌های بالا می‌شود. با توجه به هندسه نمونه RBS و نمونه 5GF برش در لبه‌های بال تیر در ناحیه کاهش یافته در هر دو این نمونه‌ها باعث ایجاد اشکالات مورد اشاره شده است. در نمونه SHF هر دو اشکال ناشی از تمرکز کرنش در سطح کوچک و وجود برش و تغییر در لبه بال تیر برطرف شده است. هندسه این نمونه به گونه‌ای است که افزون بر مزیت عدم کاهش عرض بال، تراش خوردگی سطح بال در تمام ناحیه کاهش یافته به عرض ۱۴۰ میلی‌متر گسترده شده و از لبه‌های بال نیز به اندازه ۱۰ میلی‌متر دور شده است. بنابر مشاهدات در نمونه SHF تا دررفت‌های بیش از ۰/۰۵ نیز هیچ ترک و پارگی در لبه‌های بال تیر در ناحیه کاهش یافته دیده نشد. رفتار اتصال SHF به طول و عرض و عمق بخش تراش خورده وابسته است و که ارزیابی دقیق آن نیاز به مدل‌سازی‌های گسترده دارد.

۶- نتیجه گیری

اتصال کاهش یافته یک نوع اتصال رایج در قاب‌های خمشی ویژه است. در این اتصال برای کاهش بار وارده به چشمه اتصال و دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون، مقطع تیر را در فاصله حساب شده‌ای از بر ستون به طور عمدی مقداری ضعیف می‌کنند تا در هنگام مواجهه با نیروی زلزله مفصل پلاستیک در ناحیه ضعیف شده یا اصطلاحاً ناحیه کاهش یافته شکل بگیرد. بر این اساس تا به امروز دیتایل‌های متعددی برای نحوه ایجاد ضعف در ناحیه کاهش یافته ارائه شده است که همگی آن‌ها ضمن دارا بودن مزایای متعدد، معایبی نیز از جمله کماتش زود هنگام در بال و جان تیر در ناحیه کاهش یافته و کماتش جانبی تیر دارند. هدف این مقاله بررسی عددی و آزمایشگاهی دیتایل جدیدی است که ضمن دارا بودن عملکرد لرزه‌ای مناسب و اجرای آسان، معایب مذکور را تا حد امکان کاهش دهد. در این دیتایل‌ها از کاهش عرض بال صرف نظر شده و به جای آن از کاهش در ضخامت بال استفاده گردیده تا یکی از دلایل مهم کماتش جانبی پیشگی در هنگام بارگذاری حذف شود. برای این منظور سه نمونه آزمایشگاهی RBS، 5GF، و SHF در مقیاس کامل ساخته شدند. نمونه استاندارد RBS بر اساس جزئیات آیین نامه AISC آماده شد تا مبنایی برای مقایسه و ارزیابی مدل‌های پیشنهادی 5GF و SHF باشد. بارگذاری به صورت شبه استاتیکی و چرخه‌ای بر اساس پروتکل FEMA-350 [۲۷] به نمونه‌ها اعمال شد. بارگذاری تا مشاهده افت کامل در نمودار هیستریزیس نمونه‌ها ادامه پیدا کرد و نتایج زیر به دست آمد:

۱- در بخش مطالعات عددی سه ایده شامل یک مدل RBS و دو طرح پیشنهادی به منظور مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته شدند. بعد از آنالیز مدل‌ها و تایید نتایج، تصمیم به ساخت همه مدل‌ها شامل نمونه RBS و دو مدل پیشنهادی SHF و 5GF گرفته شد.

۲- عملکرد هر سه نمونه کلیه الزامات ضوابط طرح لرزه‌ای آیین نامه AISC را برآورده کرد. طبق آیین نامه مذکور، در اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه حداقل حد مورد انتظار برای دوران برابر با ۰/۰۴ رادیان می‌باشد. در نمونه‌های مورد آزمایش، حداکثر دوران در نمونه 5GF برابر ۰/۰۴ رادیان بود که برابر با حداقل مقدار قابل قبول آیین نامه است. در نمونه RBS حداکثر دوران برابر با ۰/۰۵ رادیان و در نمونه SHF نیز حداکثر دوران ۰/۰۵ رادیان بود. طبق آیین نامه مذکور برای اتصالات تیر به ستون حداقل مقاومت خمشی اتصال در دوران ۰/۰۴ رادیان در بر ستون نیز می‌بایست برابر با ۰/۸ لنگر پلاستیک مقطع تیر باشد. طبق محاسبات لنگر پلاستیک مقطع تیر برابر با ۸۶ KN-m به دست آمد که مقاومت خمشی هر سه نمونه در دوران ۰/۰۴ بیشتر از ۰/۸ این مقدار یعنی ۶۸/۹ KN-m بود.

۳- نمونه SHF با کماتش پیشگی بسیار کمتر، شکل‌پذیری به میزان ۰/۳ درصد و اتلاف انرژی تجمعی به میزان ۲۸ درصد از مدل RBS بیشتر است. در نمونه 5GF کماتش جانبی پیشگی تقریباً دیده نشد و کماتش موضعی بال و جان بسیار کم بود ولی شکل‌پذیری و اتلاف انرژی این نمونه از نمونه RBS کمتر است. در مجموع در زلزله‌های شدید نمونه 5GF عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه RBS دارد ولی نمونه SHF عملکرد بهتری نسبت به نمونه RBS دارد.

۴- در این پژوهش، هدف کم کردن کمانش جانبی پیچشی و کمانش موضعی بال و جان در ناحیه کاهش یافته تیر و در کل بهبود رفتار لرزه‌ای اتصال کاهش یافته بود و بدین منظور از کاهش عرض بال در ناحیه کاهش یافته صرف نظر شده و بر کاهش ضخامت بال تیر در ناحیه مذکور تمرکز شد. برای ارائه دیتایل مناسب‌تر برای مدل‌های پیشنهادی باید تحلیل‌های گسترده عددی صورت گیرد که توسط نویسندگان این مقاله در دست انجام است.

سپاسگزاری

در انتها نویسندگان مقاله از آزمایشگاه تحقیقات سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، شرکت ماریچ باختر و شرکت سورنا سوله که در پیشبرد این پژوهش همکاری داشته‌اند، نهایت سپاس و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 358-16. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction n.d
- [2] Plumier, A. (1990). New idea for safe structures in seismic zones. In IABSE Symposium-Mixed Structures Including New Materials..
- [3] Pachoumis D, Galoussis E, Kalfas C, Christitsas A. (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation. *Engineering Structures*, 31(1), 216-23.
- [4] Pachoumis D, Galoussis E, Kalfas C, Efthimiou I. (2010). Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections—experimental analysis and finite element model simulation. *Engineering Structures*, 32(9), 2683-92.
- [5] Rahnvard R, Hassanipour A, Siahpolo N. (2015). Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Studies in Structural Engineering*, 3, 33-51.
- [6] Morshedi MA, Dolatshahi KM, Maleki S. (2017). Double reduced beam section connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 283-97.
- [7] Li R, Yu Y, Samali B, Li C. (2019). Parametric analysis on the circular CFST column and RBS steel beam joints. *Materials*, 12(9), 1535.
- [8] Desrochers C, Prinz G, Richards P. (2018). Column axial load effects on the performance of skewed SMF RBS connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 150, 505-13.
- [9] Mirghaderi SR, Torabian S, Imanpour A. (2010). Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(2), 277-88.
- [10] Maleki S, Tabbakhha M. (2012). Numerical study of slotted-web-reduced-flange moment connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 69(1), 1-7.
- [11] Saleh A, Mirghaderi SR, Zahrai SM. (2016). Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, 214-26.
- [12] Tsavdaridis KD, Papadopoulos T. (2016). A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, 92-113.
- [13] Boushehri K, Tsavdaridis KD, Cai G. (2019). Seismic behaviour of RWS moment connections to deep columns with European sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 416-35.
- [14] Momenzadeh S, Kazemi MT, Asl MH. (2017). Seismic performance of reduced web section moment connections. *International journal of steel structures*, 17, 413-25.
- [14] Davarpanah, M., Ronagh, H., Memarzadeh, P., & Behnamfar, F. (2020). Cyclic behaviour of elliptical-shaped reduced web section connection. *Structures*, Vol. 24, pp. 955-973.
- [16] Garoosi AM, TahamouliRoudsari M, Hashemi BH. (2018) Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse. *Structures*. 390-404.
- [17] TahamouliRoudsari, M., Garoosi, A. M., Alipour, A., Torkaman, M., Abrishami, H. M., Rambarzini, M., ... & Bonyadirad, S. (2019). Comparing the seismic performances of shallow beam connections with accordion webs and reduced sections: An experimental study. *Structures*, Vol. 22, pp. 421-434.
- [18] Imanpour A, Torabian S, Mirghaderi SR. (2019). Seismic design of the double-cell accordion-web reduced beam section connection. *Engineering Structures*, 191, 23-38.
- [19] Zhang X, Ricles JM. (2006). Experimental evaluation of reduced beam section connections to deep columns. *Journal of Structural Engineering*, 132(3), 346-57.

- [20] Deylami A, Tabar AM. (2013). Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling. *Thin-Walled Structures*, 73, 112-20.
- [21] Huang Y, Yi W, Zhang R, Xu M. (2014). Behavior and design modification of RBS moment connections with composite beams. *Engineering structures*, 59, 39-48.
- [22] Roudsari MT, Abdollahi F, Salimi H, Azizi S, Khosravi A. (2015). The effect of stiffener on behavior of reduced beam section connections in steel moment-resisting frames. *International Journal of Steel Structures*, 15, 827-34.
- [23] Tahamouli Roudsari M, Jamshidi K H, Zangeneh MM. (2018). Experimental and numerical investigation of IPE reduced beam sections with diagonal web stiffeners. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4), 533-52.
- [24] Kanao I, He T, Yu Z, Morisako K. (2018). Behavior of RBS Beams Reinforced by Stiffeners Subjected to Cyclic Loading. *Journal of Engineering*, 2018, 1-8.
- [25] Roudsari MT, Jamshidi K H, Moradi S. (2018). Experimental and numerical assessment of reduced IPE beam sections connections with box-stiffener. *International Journal of Steel Structures*, 18, 255-63.
- [26] Bompa, D. V., Elghazouli, A. Y., Bogdan, T., Eatherthon, M. R., & Leon, R. T. (2023). Inelastic cyclic response of RBS connections with jumbo sections. *Engineering Structures*, 281, 115758.
- [27] Paul, S., & Deb, S. K. (2022). Experimental study on a new V-cut RBS and CFT connections with bidirectional bolts under cyclic loadings. *Journal of Building Engineering*, 46, 103688.
- [28] Garoosi ARM, Roudsari MT, Hashemi BH. (2020). Experimental and numerical evaluation of rigid connection with reduced depth section. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 34(6), 863-75.
- [29] FEMA 350, (2000). Recommended Seismic Design Criteria for Moment-Resisting Steel Frame Structures, prepared by the SEAOC, ATC, and CUREE Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (FEMA Publication No.350).
- [30] Fema A. (2005). 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *FEMA-440, Redwood City*, 7(9), 11.