

Proposing a New Detailing Scheme for Rigid Connection with Endplate without the Need for Welding in Column

Arash Solhmirzaei¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2*} and Behrokh Hosseini Hashemi³

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- Associate Professor, Structural Eng. Research Center, The International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

ABSTRACT

Connections are among the most important elements in the behavior of a structure. Numerous detailing schemes have been proposed for steel connections, many of which involve welding. In many rigid connections, using continuity and double plates enhances the behavior of the panel zone. Although this leads to an improvement in the behavior of the connection, welding procedure associated with it offers some disadvantages. The aim of this study is to present a numerical and experimental assessment of a new detailing scheme for rigid connections endplates. In this detail, the welding on the column of the structure and the panel zone has been completely removed. A stiffened channel carries out the responsibilities of continuity and double plates. This stiffened channel is fixed to the column using bolts and nuts. First, multiple numerical models were constructed in ABAQUS and after pushover and hysteretic analyses, the best model was identified. Then, based on the results of the numerical models, two full-scale experimental models were built and subjected to hysteretic loading until the hysteretic curves experienced degradation. The first sample was the principal and standard model which was built based on the specifications of the BSEEP-4ES and AISC 358-16 guidelines for pre-qualified connections so that it can serve as a basis of comparison for the other sample. The second sample was the preferred model selected based on the numerical results, which was made by attaching a channel profile to two stiffeners and was meant to be a replacement for the standard model. Assessment of the obtained results showed that under loading, both models satisfied the seismic criteria for the special moment resisting connection. The proposed detailing exhibited a better behavior in terms of seismic parameters compared to the standard sample and was also easier to implement.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 January 2021

Revise Date: 12 June 2021

Accept Date: 04 August 2021

Keywords:

Special moment resisting frame,
Rigid connection with endplate,
Panel zone,
Continuity plate,
Double plate,
Stiffened channel.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.269887.2346>

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari.

Email address: tahamouli@iauksh.ac.ir

ارائه دیتایل اتصال صلب با ورق انتهایی بدون استفاده از جوشکاری در ستون

آرش صلح میرزایی^۱، مهرزاد تحمیلی رودسری^{۲*} و بهرخ حسینی هاشمی^۳

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

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

۳- دانشیار، عضو هیأت علمی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و موسسه زلزله، تهران، ایران

چکیده

اتصالات یکی از ارکان مهم در رفتار سازه‌ها می‌باشند. برای اتصالات سازه‌های فولادی دیتایل‌های متعددی ارائه شده است که بیشتر آنها جوشی هستند. استفاده از ورق‌های پیوستگی و مضاعف در بسیاری از اتصالات صلب جهت بهتر شدن رفتار چشمه اتصال الزامی است. هر چند این اقدام باعث بهبود رفتار اتصال می‌شود ولی بخاطر عملیات جوشکاری معایبی نیز دارد. هدف این مقاله بررسی عددی و آزمایشگاهی دیتایل جدید برای اتصال صلب با ورق انتهایی می‌باشد. در این دیتایل جوشکاری بر روی ستون در چشمه اتصال بطور کامل حذف شده است. وظایف ورق‌های پیوستگی و مضاعف توسط یک ناودانی سخت‌شده انجام می‌گیرد. ناودانی سخت‌شده با پیچ و مهره به ستون وصل می‌شود. در ابتدا چندین مدل پیشنهادی، با نرم‌افزار ABAQUS تحلیل عددی شدند. پس از ارزیابی نتایج تحلیل بارافزون، عملکرد و رفتار آنها مقایسه و گزینه‌های مناسب از بین مدل‌های اولیه شناسایی شدند. با توجه به نتایج مطالعات عددی دو نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل ساخته شد و تحت بارگذاری هیستریزس قرار گرفتند و تا مرحله افت نمودار هیستریزس بارگذاری ادامه داشت. نمونه اول مدل اصلی و استاندارد می‌باشد که بر اساس جزییات اتصال از پیش تایید شده BSEEP-4ES آیین‌نامه AISC 358 ساخته شد تا مبنایی برای مقایسه و ارزیابی نمونه دیگر باشد. نمونه دوم همان مدل برگزیده در مطالعات عددی بود که با استفاده از یک قطعه اتصال ناودانی شکل با دو سخت‌کننده ساخته شد تا جایگزینی برای مدل استاندارد باشد. پس از دریافت نتایج ارزیابی دقیق آنان مشخص گردید هر دو نمونه تحت اثر بارگذاری، ضوابط طرح لرزه‌ای برای اتصال خمشی ویژه را برآورده می‌کنند. دیتایل جدید در عملکرد خصوصیات لرزه‌ای رفتار بهتری نسبت به مدل استاندارد داشت و از نظر اجرایی نیز استفاده از آن ساده‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: قاب خمشی ویژه، اتصال صلب با ورق انتهایی، چشمه اتصال، ورق پیوستگی، ورق مضاعف، ناودانی سخت‌شده.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.269887.2346	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.269887.2346	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۵/۱۳	۱۴۰۰/۰۵/۱۳	۱۴۰۰/۰۳/۲۲	۱۳۹۹/۱۱/۰۴
مهرزاد تحمیلی رودسری tahamouli@iauksh.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

قاب‌های خمشی یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌ای می‌باشند. با توجه به اینکه نمودار هیستریزیس مناسبی دارند و اتلاف انرژی در آنها بالاست در آئین‌نامه‌ها ضریب رفتار و شکل‌پذیری قاب‌های خمشی ویژه را، نسبت به بسیاری از سازه‌ها مانند قاب‌های ساختمانی مهاربندی، بالاتر در نظر می‌گیرند که حاکی از عملکرد سازه‌ای بهتر آنهاست. قاب‌های خمشی باربری جانبی را با تحمل لنگر خمشی در اتصالات تامین می‌کنند. جذب و استهلاک انرژی با تشکیل مفصل پلاستیک و ورود به فاز پلاستیک انجام می‌شود. از نظر معماری هم به علت امکان اجرای بازشو در تمام پنل‌ها، قاب‌های خمشی مورد استقبال قرار می‌گیرند.

استفاده از قاب‌های خمشی ویژه در مناطق لرزه‌خیز بسیار با اهمیت است و همواره توسط آئین‌نامه‌های معتبر نظیر AISC توصیه شده است. در زلزله نورتریچ قاب‌های خمشی فلزی در محل اتصال تیر به ستون خسارات زیادی متحمل شدند. تا قبل از زلزله نورتریچ تصور می‌شد که اتصالات صلب با جوش نفوذی کامل، تغییرشکل پلاستیک بالایی را تحمل می‌کنند. ترک‌ها و شکست‌های ترد ایجاد شده در اتصالات، بیانگر این است که ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری واقعی اتصالات مورد نظر کمتر از مقادیر محاسباتی بر اساس آئین‌نامه‌های طراحی می‌باشد [1]. از زمان وقوع زلزله در نورتریچ اهمیت استفاده از اتصالات پیچ شده در قاب خمشی در مناطق لرزه‌ای بیشتر مورد توجه قرار گرفت.

یکی از راهکارهای مناسب برای اجرای این نوع اتصالات در سازه‌های فلزی ساخت اجزا سازه نظیر ستون‌ها، تیرها و... در کارخانه و مونتاژ آن در کارگاه می‌باشد. این کار با بهره‌گیری از طرح اتصالات از پیش تایید شده (prequalified rigid connections) و ساخت ستون‌های درختی و ورق انتهایی مربوطه برای اتصال پیچی به تیرها و دیگر اجزا انجام می‌شود (شکل ۱). آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های فولادی نیز به این مهم توجه ویژه‌ای داشته‌اند و دیتایل‌های متعددی ارائه نموده‌اند. جوشکاری در اجزای این اتصال از اهمیت خاصی برخوردار است و همواره در الزامات طرح اتصال صلب بر کیفیت جوشکاری بطور ویژه تاکید شده است.

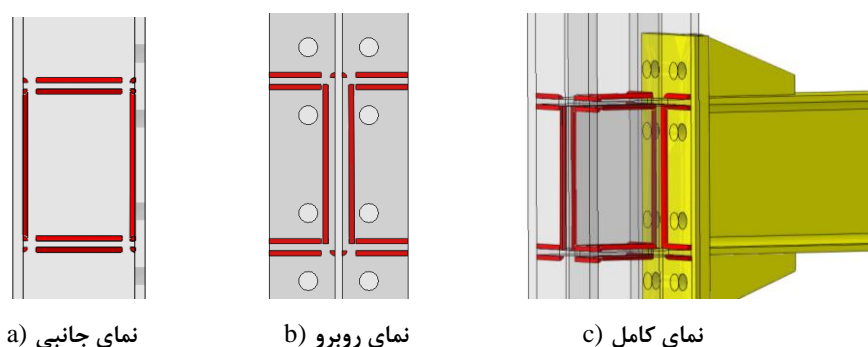


شکل ۱: سازه فلزی با ستون درختی.

هر چند که شرایط جوشکاری کارخانه خوب و قابل قبول است اما بعلاوه ماهیت فرآیند جوشکاری شامل اعوجاج، تنش‌های پسماند، ایجاد گرمای بسیار زیاد و سرد شدن مجدد آن در ساختار مولکولی فلز پایه تغییر ایجاد می‌کنند که خطر رفتار شکننده را در منطقه اتصال افزایش می‌دهد. از طرفی فلز جوش در مقایسه با فولاد ستون دارای مقاومت و مشخصات متفاوتی می‌باشد. این تفاوت‌ها باعث ایجاد نقاط ناهمگن، اختلال در توزیع و تمرکز تنش‌ها می‌شود و در نهایت باعث تضعیف چشمه اتصال در شرایط بحرانی ستون خواهد شد. گزارش‌های متعددی نیز مبنی بر شکست و گسیختگی جوش‌ها در زلزله‌های نورتریچ ارائه شده است [1].

از نکات بسیار مهم در ایجاد این ضعف می‌توان به مسیر جوشکاری و نزدیکی خطوط جوش اشاره کرد که برای اتصال ورق‌های پیوستگی و ورق مضاعف بناچار باید کل مقطع عرضی ستون جوشکاری شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود حجم زیادی از جوشکاری در محدوده‌ی چشمه اتصال وجود دارد. این مسیر جوشکاری از بالا و پایین ورق‌های پیوستگی در امتداد بال‌های تیر عبور

می کنند و چهار خط جوش در مقطع ستون اجرا می شود. همچنین برای اتصال ورق مضاعف نیز چهار خط جوش در امتداد جان ستون انجام می شود.



شکل ۲: جوشکاری ستون در اتصال صلب از پیش تایید شده.

در سالیان اخیر جهت تقویت و بهبود چشمه اتصال در اتصالات صلب با ورق انتهایی و سخت کننده مطالعات متعددی انجام شده است. وجه مشترک همه ی آنها استفاده از خطوط جوش متعدد بر روی ستون در محل چشمه اتصال می باشد. نزدیکی خطوط جوش به یکدیگر احتمال آسیب های سهوی را در چشمه اتصال افزایش می دهد. هدف این پژوهش ارائه دیتایل جدیدی برای چشمه اتصال، در اتصال صلب تیر به ستون با ورق انتهایی براساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی می باشد. نوآوری این پژوهش این است که در دیتایل جدید هر گونه جوشکاری بر روی ستون در محل چشمه اتصال بطور کامل حذف شده است. بجای ورق پیوستگی و مضاعف، از ناودانی سخت شده استفاده می شود و برای اتصال ناودانی سخت شده به ستون، از سوراخ های موجود در بال ستون در محل چشمه اتصال استفاده می گردد و سوراخ جدیدی در ستون ایجاد نمی شود.

۲- ادبیات پژوهش

محققین در خصوص جزئیات ورق های پیوستگی و اثرات آن بر پارامترهای لرزه ای اتصالات صلب تحقیقات زیادی انجام داده اند و دریافتند که در صورت استفاده از ورق پیوستگی، شکل پذیری اتصال افزایش می یابد ولی افزایش بیش از حد ضخامت ورق های پیوستگی باعث کاهش شکل پذیری می شود [2]. ورق های پیوستگی قائم که در دو طرف پروفیل های ستون جوش می شوند نقش مهمی برای ایجاد سازگاری در تغییر شکل ها دارد ولی افزایش ضخامت آن، سختی چشمه اتصال را افزایش خواهد داد [3]. ورق پیوستگی اهمیت زیادی در رفتار شکل پذیر چشمه اتصال دارد. در مواردی که تیرها نامساوی هستند و اختلاف ارتفاع آنها بیش از ۵۰٪ است، استفاده از ورق پیوستگی مایل موثرتر از ورق پیوستگی مستقیم است [4]. ارزیابی ضوابط لرزه ای مورد نیاز جهت اتصالات صلب با تیرهای نامساوی نشان داد که ورق پیوستگی مایل نتایج رضایت بخشی دارند و می تواند از شکست ترد نیز جلوگیری نماید [5]. اگر ورق پیوستگی به بال ستون متصل نشود، مقاومت و شکل پذیری کلی اتصال کاهش می یابد. جان ستون هایی که با ورق مضاعف تقویت شده اند، عملکرد بهتری دارند [6]. در اتصالاتی که ورق های پیوستگی دارند، تمرکز تنش بین تیر و بال ستون کاهش می یابد. ضخامت بال های ستون نیز در این مورد بسیار موثر است [7]. پژوهش های انجام شده در رابطه با جزئیات رفتار لرزه ای چشمه اتصال در قاب های خمشی ویژه نشان داد که چشمه اتصال تحت اثر بار لرزه ای، نیروهای بزرگی را تحمل می کند و تقویت آنها الزامی است و نمی بایست صرفاً به افزایش ضخامت بال ستون اکتفا کرد [8]. در بارگذاری لرزه ای، ورق های پیوستگی مستقیم، استحکام و سختی اولیه بیشتری نسبت به ورق های پیوستگی مایل برای چشمه اتصال و تیرها فراهم می کنند [9]. برای سازه هایی با قاب خمشی، استفاده از ورق انتهایی موجب پایداری اتصال و بهبود رفتار لرزه ای آن می شود [1].

تحقیقات گسترده ای در خصوص شکل پذیری اتصالات خمشی و عوامل موثر بر آن انجام گرفت و مشخص شد که قابلیت شکل پذیری چشمه اتصال به طور قابل توجهی بر حالت شکست تیرها تاثیر می گذارد و این موضوع شامل اتصالات گیردار با مقطع کاهش

یافته نیز می‌شود [10]. تغییر شکل چشمه اتصال ممکن است بر شکل‌پذیری کلی اتصال تاثیر معکوس داشته باشد و باید با طراحی چشمه اتصال قوی، مفصل پلاستیک را از گره دور کرد و به تیر انتقال داد [11]. در قاب‌های خمشی فولادی که در معرض زلزله هستند انرژی با تسلیم شدن انتهای تیر مستهلک می‌شود و چشمه اتصال ستون‌ها می‌تواند در استهلاک انرژی مشارکت داشته باشند [12].

مطالعات متعددی در مورد اثرات جوش و روش‌های جوشکاری بر اتصالات صلب قاب‌های خمشی ویژه انجام شد و محققین دریافتند که تغییر شکل بزرگ چشمه اتصال در نمونه‌های پیچی کایسر با سخت‌کننده (KBB) با تسلیم قابل توجهی در تمام نمونه‌ها همراه بود [13]. این تغییر شکل موجب شکستگی جوش در محل اتصال بال تیر به بال ستون می‌شود. برای استفاده از ظرفیت کامل ورق در ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC، در ورق‌های پیوستگی به جوش نفوذی کامل با شیارهای عمیق نیاز است. ترکیبی از الزامات ضخامت ورق پیوستگی، فرآیند جوشکاری و بازرسی جوش اغلب منجر به جزئیات پرهزینه می‌شود. این اقدامات محافظه کارانه است و می‌تواند محدوده جوش را مستعد شکست‌های ترد در بارهای لرزه‌ای کند [14]. جوش‌ها به علت جنس ماده جوش که چقرمگی کمی در شکست دارند، هندسه اتصال که باعث جوش‌های نفوذی عمیق می‌شود و همچنین روش‌های جوشکاری که منجر به خواص متناقض جوش می‌شوند، نسبت به شرایط تنش و کرنش بالا، بیشتر مستعد آسیب‌پذیری هستند [7].

پژوهشگران در خصوص عملکرد ورق انتهایی در اتصالات صلب قاب‌های خمشی ویژه تحقیق نمودند و دریافتند که تسلیم خمشی ورق‌های انتهایی یک مکانیزم تسلیم شکل‌پذیر است [15]. ضخامت ورق انتهایی باید به گونه‌ای باشد تا با اندازه پیچ‌ها سازگار بوده، مقاومت‌های موجود مربوط به تسلیم شدن ورق انتهایی و گسیختگی پیچ قابل‌مقایسه باشند. در اتصالات با ورق انتهایی که ظرفیت بالایی نیاز دارد، ضخامت سخت‌کننده‌ها می‌توانند به اندازه ضخامت سخت‌کننده برشی چشمه اتصال باشد [16]. برای رسیدن به ظرفیت دورانی بالاتر در اتصال، لازم است اتصال ورق انتهایی و چشمه اتصال متناسب باشند تا شکل‌پذیری خوبی بدست آید. در بررسی‌ها مشخص شد ورق‌های انتهایی پهن‌تر، دارای عملکرد بهتری هستند. زیرا بارهای کششی در پیچ‌ها و تنش ایجاد شده در ورق انتهایی توزیع همگن و یکنواختی دارند [17]. اتصال صلب با ورق انتهایی و تیر با مقطع کاهش یافته مورد بررسی قرار گرفت. در تیر از یک فیوز قابل تعویض استفاده شد و مشخص گردید در مناطق زلزله خیز هنگام ایجاد خسارت، این فیوزها قابل تعویض هستند و نیازی به تعویض کامل تیر نمی‌باشد و همچنین باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال نظیر شکل‌پذیری و اتلاف انرژی می‌شوند [18 و 19].

تحقیقاتی زیادی در مورد دوران چشمه اتصال در قاب‌های خمشی ویژه انجام گرفت و محققین نشان دادند با قوی‌تر شدن ستون، مشارکت دوران پلاستیک در تحمل لنگر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [20]. دوران چشمه اتصال با کاهش ضخامت ورق انتهایی و ضخامت بال T-stub افزایش می‌یابد و این حالت، سختی دورانی الاستیک و اتلاف انرژی کلی را کاهش می‌دهد [21].

ضخامت ورق‌های چشمه اتصال مستقیماً تحت تاثیر مقدار کرنش مورد نیاز است. استاندارد FEMA355D تقاضای برشی چشمه اتصال را در مقایسه با مقررات AISC360 و EURO III پایین در نظر می‌گیرد که تفاوت‌ها ناشی از اختلاف ظرفیت لنگرها می‌باشد [12]. تحقیقات صورت گرفته در خصوص مقاومت و ظرفیت برشی چشمه اتصال بیانگر آنست که با توجه به فلسفه "چشمه اتصال قوی- تیر ضعیف"، برای ارزیابی مقاومت برشی چشمه اتصال نباید وجود ورق‌های پیوستگی در نظر گرفته شود [22].

با توجه به اینکه در ستون‌های فولادی پر شده با بتن به راحتی نمی‌توان ورق‌های پیوستگی و مضاعف را اجرا کرد، پژوهشگران دیتایل جدیدی را برای اتصال صلب تیر I-شکل به ستون لوله ای ارائه نمودند. آنها با استفاده از یک قطعه ناودانی سخت شده علاوه بر رفع مشکل فوق، باعث افزایش اتلاف انرژی و شکل‌پذیری اتصال شدند [23]. در ستون‌های باکس فولادی، اجرای ورق‌های پیوستگی و بازرسی جوش در اتصالات صلب، همواره دشوار و زمان‌بر است. محققین در یک مطالعات عددی و آزمایشگاهی راهکاری برای حذف ورق پیوستگی در این اتصالات در قابهای خمشی متوسط و ویژه ارائه کردند [24]. آنها با اتصال چهار ورق در اطراف ستون باکس به عنوان یک سخت‌کننده خارجی، باعث توزیع مناسب تنش‌ها و بهبود عملکرد اتصال بدون استفاده از ورق پیوستگی شدند.

در تحقیقی دیگر، اتصال صلب از پیش تایید شده با ورق انتهایی، در قابهای صنعتی با استفاده از تحلیل‌های عددی ارزیابی شد [25]. مدل‌سازی روی یک سازه‌ی دو طبقه با قاب خمشی در یک جهت و قاب مهاربندی شده در جهت دیگر، انجام شد. نتایج نشان داد که

آیین نامه AISC 358 در اتصالات قاب صلب با ورق انتهایی و سخت کننده با هشت پیچ، برای سازه‌های کوچک بسیار محافظ کارانه عمل میکند و بهتر است مورد بازبینی قرار گیرد. در اتصالات صلب با ورق انتهایی در ستون‌های باکس، برای بستن پیچ و مهره‌ها بعلت عدم دسترسی، همواره مشکلاتی وجود داشته است. پژوهشگران تلاش کردند با طراحی یک تیر کوتاه بطول ۱۵۰ میلیمتر بین ستون و ورق انتهایی این مشکل را حل نمایند [26]. تیر کوتاه با جوش نفوذی کامل به ستون متصل می‌شود و ورق انتهایی به راحتی به این قطعه رابط با پیچ و مهره وصل می‌گردد. این دتایل پیشنهادی ضمن حذف ورق پیوستگی، امکان اجرای اتصال صلب را بطور همزمان در هر چهار وجه ستون دارد.

مطالعاتی در مورد بررسی الگوی خطوط تسلیم در اتصال صلب با ورق انتهایی در ستونهای جعبه ای، تحت اثر کشش انجام شد [27]. تاثیر قطر پیچ و ضخامت دیواره ستون فولادی بر رفتار اتصال بررسی شد. نتایج آنالیز اجزا محدود نشان داد که با افزایش قطر پیچ و ضخامت دیواره‌ی ستون، مقاومت تسلیم اتصال افزایش می‌یابد. چنانچه نسبت قطر پیچ به ضخامت دیواره ستون در محدوده ۱،۴۳ تا ۱،۶۷ باشد از شکست ترد اتصال جلوگیری می‌شود. مطالعات عددی جامعی بر روی پارامترهای اتصال صلب تیر به ستون با ورق انتهایی انجام شد [28]. تاثیر قطر پیچ و ضخامت ورق انتهایی بر روی ظرفیت و مود شکست اتصال بررسی و نتایج با Euro Code مقایسه گردید. ارزیابی‌ها نشان داد که اگر ضخامت ورق انتهایی متوسط یا زیاد باشد، دقت آیین‌نامه اروپا بیشتر است.

اشاره شد که فرآیند جوشکاری در چشمه اتصال بسیار حساس است و باید با دقت بالایی اجرا شود. نزدیکی خطوط جوش به یکدیگر احتمال آسیب سهوی را در چشمه اتصال افزایش می‌دهد. هدف این پژوهش ارائه دیتایل اتصال صلب با ورق انتهایی بدون استفاده از جوشکاری در ستون و بررسی آزمایشگاهی آن می‌باشد. در دیتایل جدید، عملیات جوشکاری بر روی ستون در چشمه اتصال بطور کامل حذف شده و بجای ورق پیوستگی و مضاعف، از ناودانی سخت شده استفاده می‌شود. از سوراخ‌های موجود در بال ستون در محل چشمه اتصال، برای اتصال ناودانی سخت شده به ستون استفاده شد و سوراخ جدیدی در ستون ایجاد نشد. دو نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل ساخته شدند و تحت بارگذاری هیستریزس قرار گرفتند. نمونه اول مدل استاندارد است و مطابق BSEEP-4ES آیین‌نامه AISC 358-16 طراحی شده و نمونه دوم، اتصال پیشنهادی با ناودانی سخت شده می‌باشد. نتایج نشان داد که دیتایل جدید نه تنها عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به مدل استاندارد دارد بلکه از نظر اجرایی نیز ساده‌تر است.

۳- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش عددی و آزمایشگاهی است. در بخش عددی ابتدا ایده‌های متعددی ارایه شد و طرح‌های اولیه انتخاب شدند. طرح‌های برگزیده توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند و تحت بارگذاری بارافزون قرار گرفتند. با ارزیابی نتایج تحلیل عددی، مدلی که عملکرد بهتری داشت مشخص گردید. سپس در بخش آزمایشگاهی نمونه‌های واقعی و تمام مقیاس مدل منتخب و همچنین مدل استاندارد ساخته شدند. در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و نتایج آنها با هم مقایسه شد. در ادامه مراحل و روند انجام پژوهش تشریح می‌گردد.

۳-۱- تحقیقات عددی

۳-۱-۱- طراحی مدل استاندارد

برای ستون پروفیل معادل IPB 160 و برای تیر پروفیل IPE 200 در نظر گرفته شد و طراحی اتصال بر اساس آیین‌نامه AISC 358-16 انجام شد. طراحی اتصال صلب با ورق انتهایی با چهار پیچ و سخت کننده (Bolted Stiffened Extended End Plate: BSEEP-4ES) مطابق بخش ششم آیین‌نامه که مربوط به اتصالات از پیش تایید شده می‌باشد، انجام گرفت. فرضیات و مشخصات آنها به شرح زیر است:

خصوصیات مکانیکی: مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و ضریب اصطکاک $E=2e5 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$, $\nu = 0.3$, $\mu = 0.33$

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

فولاد مصرفی مقاطع: تنش تسلیم و تنش نهایی

DIN 10.9 : $F_y = 950 \text{ MPa}$, $F_u = 1050 \text{ MPa}$

فولاد پیچ و مهره: تنش تسلیم و تنش نهایی پیچ پرمقاومت

PL 8, 10, 12, 20 : $F_y = 240 \text{ MPa}$

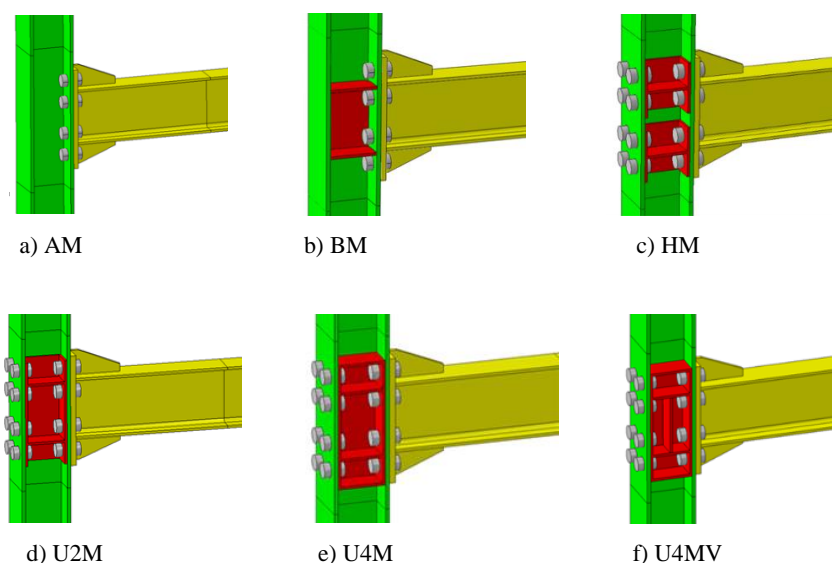
ورق‌های مصرفی: تنش تسلیم ورق‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر

نیروها و لنگرهای بیشینه‌ی قابل تحمل برای این اتصال بدست آمد و بر اساس آنها محاسبات برای طراحی سایر اجزای اتصال انجام گرفت و در نهایت جزییاتی نظیر سخت‌کننده‌ها، لچکی تیر، ورق‌های پیوستگی، ورق مضاعف، ورق انتهایی، قطر و طول پیچ‌ها و ... مشخص شدند.

طول تیر ۱۵۰۰ میلی‌متر و طول ستون ۲۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد که با اندازه‌های متداول Setup ها در تحقیقات قبلی هماهنگ باشد [18, 19, 23]. همچنین انتخاب پروفیل‌ها و سایر موارد به گونه‌ای بود که امکان طراحی و ساخت مدل‌های نرم‌افزاری و حقیقی بصورت تمام مقیاس وجود داشته باشد و محدودیت‌های آزمایشگاه سازه نیز تامین شود.

۳-۱-۲- مدل‌های اولیه

این طرح‌ها شامل مدل اصلی (BM) و پنج مورد دیگر (AM - HM - U2M - U4M - U4MV) بودند. برای کلیه طرح‌های منتخب نقشه‌های کارگاهی با جزییات کامل تهیه گردید که جهت ساخت مدل‌های نرم‌افزاری و مدل‌های واقعی استفاده شوند. همه‌ی طرح‌های پیشنهادی در یک ویژگی مشترک هستند و آن حذف کامل جوشکاری در ستون سازه بود (شکل ۳). جهت انتخاب ایده‌های مناسب‌تر از بین طرح‌های منتخب لازم بود با روش‌های عددی و نرم‌افزاری آنها را مورد ارزیابی قرار داد.



شکل ۳: مدل‌های اولیه.

۳-۱-۳- مدل‌سازی نرم‌افزاری

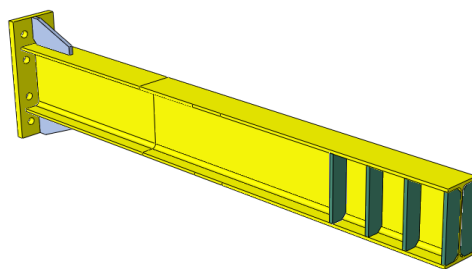
جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد و کلیه مدل‌ها تحت اثر بارگذاری بارافزون قرار گرفتند. مشخصات ستون، تیر و چشمه اتصال به شرح زیر انتخاب شدند:

- ستون: ستون کلیه مدل‌ها از پروفیل معادل IPB 160 و به طول ۲۰۰۰ میلی متر که بال‌های آن از ورق ۱۲ میلی متر و جان آن از ورق ۸ میلی متر ساخته شده‌اند. در چشمه اتصال برای مدل BM از چهار ورق پیوستگی به ابعاد $PL\ 136*76*8$ و همچنین دو ورق مضاعف به ابعاد $PL\ 164*136*8$ از استفاده شد. طراحی ورق مضاعف و پیوستگی براساس فصل ۶ آیین نامه AISC 358-16 انجام شد. برای سایر مدل‌ها نیز متناسب با طرح ارایه شده قطعه اتصال یا ناودانی سخت‌شده طراحی و ساخته شد (شکل ۴). روی هر بال ستون هشت سوراخ $D=20\ mm$ تعبیه شده است تا امکان اتصال تیر به ستون با پیچ و مهره‌های فولادی پرمقاومت DIN 10.9 به قطر $\varnothing = 18\ mm$ فراهم گردد. البته در تست آزمایشگاهی جهت افزایش اطمینان از پیچ و مهره‌های فولادی پرمقاومت DIN 12.9 استفاده شد.



شکل ۴: ستون مدل‌ها.

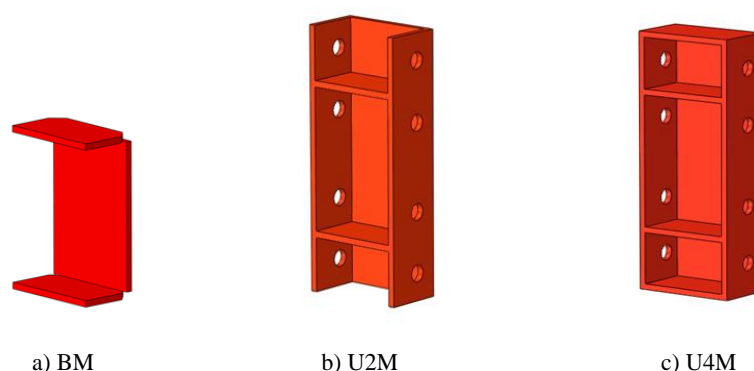
- تیر: تیر مورد نظر برای کلیه مدل‌ها یکسان می‌باشد و از پروفیل IPE 200 بطول ۱۵۰۰ میلی متر تشکیل شده است. انتهای تیر صرفاً در جهت قائم آزادی حرکت دارد. انتهای آزاد آن با هشت ورق سخت کننده عمود بر سطح جان به ابعاد $PL\ 183*47.2*10$ با فواصل ده سانتیمتر تقویت گردید. در سمت دیگر تیر یک ورق انتهایی (End Plate) به ابعاد $PL\ 360*140*20$ به تیر متصل شده است و روی آن نیز هشت سوراخ $D=20\ mm$ دقیقاً منطبق بر سوراخ‌های ستون ایجاد شده تا هنگام مونتاژ از آنها استفاده شود (شکل ۵).



شکل ۵: تیر مدل‌ها.

دو لچکی به ابعاد $PL\ 160*80*12$ در امتداد صفحه جان تیر، بال‌های تیر را به ورق انتهایی با جوش دو طرفه متصل نموده- اند که البته گوشه‌های این لچکی‌ها بر اساس توصیه آیین‌نامه برش خورده است.

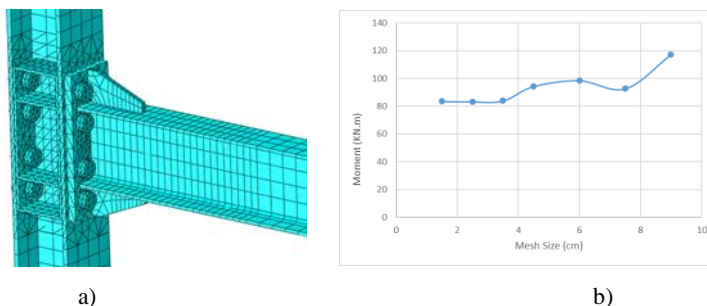
• قطعات اتصال: در این تحقیق به مجموعه‌ای که در چشمه اتصال نصب می‌شود قطعه اتصال می‌گوییم که وظیفه آن ایجاد خصوصیتی است که عملکرد صلب اتصال و سایر ویژگی‌های مورد نیاز را به نحو قابل قبولی تضمین نماید (شکل ۶). این قطعات در دو طرف ستون بال پهن قرار می‌گیرند و داخل جان ستون نصب می‌شوند و با توجه به نوع مدل یکپارچه و یا مجزا هستند و اصولاً تفاوت اصلی مدل‌های به شکل و عملکرد همین قطعه مربوط می‌شود. جهت مقایسه بهتر، سایر اعضا یکسان ساخته شده‌اند و حتی ضخامت قطعات اتصال نیز در تمام مدل‌ها برابر در نظر گرفته شده تا شکل و رفتار سازه‌ای آنها مبنای تمایز و برتری باشد. البته انتخاب ضخامت ناودانی سخت‌شده نیز کاملاً هماهنگ با مدل اصلی (BM) می‌باشد. بنابراین ضخامت جان ناودانی سخت شده برابر با ضخامت ورق‌های مضاعف در مدل اصلی (BM) انتخاب شد. به همین ترتیب ضخامت بال ناودانی و سخت کننده‌های آن، برابر با ضخامت ورق‌های پیوستگی در مدل اصلی (BM) در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی‌های اولیه در نرم افزار آباکوس نشان دادند که این فرضیات منطقی هستند و جوابگوی بارهای وارده می‌باشند.



شکل ۶: قطعات اتصال مدل‌های BM، U2M و U4M.

کلیه اجزای تشکیل دهنده مدل با پیچ و مهره‌های طراحی شده، در نرم افزار ABAQUS بهم متصل شدند. البته جهت جلوگیری از تمرکز تنش و عدم تسلیم شدن پیچ‌ها و همچنین سادگی کار سر پیچ‌ها قدری بزرگتر از اندازه واقعی ساخته شد تا در عمل نقش واشر را نیز ایفا کند. همچنین در مقطع پیچ‌ها نیروهای پیش‌تنیدگی نیز طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای به آنها اعمال گردید.

با توجه به اینکه چیدمان آزمایش و اندازه تیر و ستون این پژوهش با تحقیقات گروسی و همکاران [19] یکسان بود، مش‌بندی مدل‌ها نیز مشابه همان مطالعات انتخاب گردید. برای شکل مش‌ها در المان‌های فاقد سطوح منحنی از Hex-dominated و برای اجزایی که سطوح منحنی دارند از Tet استفاده شد (شکل 7-a). تیرها و ستون‌ها متناسب با اهمیت و شدت تنش‌های وارده به چند بخش تقسیم شدند و مش‌بندی هر بخش جداگانه انجام گرفت. به عبارتی در محل چشمه اتصال و نواحی اطراف آن، از مش‌بندی ریزتری استفاده شد. برای انتخاب ابعاد مش، تحلیل حساسیت مش‌بندی انجام شد و مش‌ها در کل مدل به یک نسبت بزرگ یا کوچک شدند. شکل 7-b نتایج بدست آمده برای لنگر در محل اتصال را برای مدل U4M نسبت به اندازه مش‌بندی ناودانی سخت‌شده، در محل چشمه اتصال نشان می‌دهد. واضح است که اگر اندازه مش از 3 cm کوچکتر انتخاب گردد، نتایج تغییر نمی‌کنند. جهت اطمینان ابعاد مش در ناودانی سخت‌شده برابر 1.5 cm انتخاب شد.



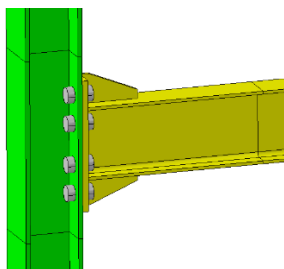
شکل ۷: الف-مش بندی المان‌های اتصال ب- تحلیل حساسیت مش.

شرایط تکیه گاهی مدل‌های عددی مشابه تحقیق گروسی و همکاران [19] فرض شد و از تحلیل استاتیکی بارافزون استفاده شد. با فرض اینکه در مراحل بارگذاری تا مشاهده افت در نمونه‌ها، شکستی در جوش مشاهده نگردد، از مدلسازی جوش صرف نظر شد. بنابراین برای اتصال نمونه‌های یکپارچه مانند تیر و ورق انتهایی و سخت کننده‌های آن یا برای اتصال ناودانی و سخت کننده‌های آن از دستور merge یا Tie استفاده شد. برای اتصال قطعات در محل تماس، مانند ورق انتهایی و بال ستون، یا ناودانی سخت شده و بال و جان ستون، یا پیچ و بدنه سوراخ از ماژول اندرکنش در آباکوس استفاده شد. اندرکنش سطوح در جهت عمودی بصورت hard contact و در جهت مماسی بصورت penalty فرض شد.

۳-۱-۴- تشریح مدل‌ها

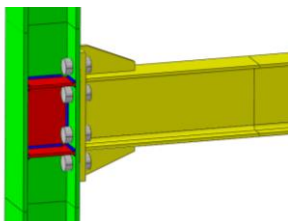
همانگونه که پیشتر بیان شد تفاوت اصلی مدل‌ها مربوط به قطعات طراحی شده در چشمه اتصال می‌باشد. سایر المان‌ها شامل تیر، ستون، سخت کننده‌ها، پیچ و مهره‌ها، ورق انتهایی و لچکی‌ها کاملاً یکسان هستند. ضخامت تمام اجزای قطعات اتصال 8 mm انتخاب شده تا با ورق‌های پیوستگی و مضاعف در مدل اصلی هماهنگ و قابل مقایسه باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود در ستون سازه‌ی مدل‌های پیشنهادی از جوش استفاده نشده است. در ادامه قطعات اتصال هر مدل تشریح می‌گردد:

۱. مدل AM: این مدل فاقد هر گونه قطعه اتصال در محدوده چشمه اتصال می‌باشد (شکل ۸) و طبیعی است که عملکرد مناسبی از آن نمی‌توان انتظار داشت و جهت اثبات لزوم و اهمیت قطعات اتصال ارائه شده است.



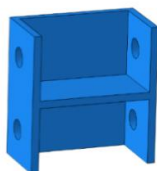
شکل ۸: مدل AM.

۲. مدل BM: این مدل دقیقاً بر اساس نتایج محاسباتی آیین‌نامه AISC 358-16 ساخته شده است که قطعات اتصال آن از چهار ورق پیوستگی در امتداد بال‌های بالا و پایین تیر و دو ورق مضاعف به موازات جان ستون تشکیل شده و سطوح تماس آنها نیز جوش پیوسته در نظر گرفته شده است (شکل ۹). مدل BM بعنوان مدل اصلی و مبنا برای مقایسه با سایر ایده‌ها ساخته شده است.

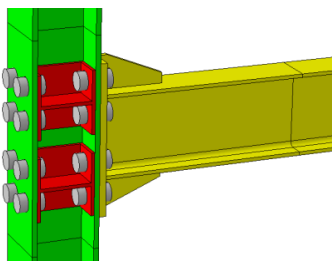


شکل ۹: مدل BM.

۳. مدل HM: در این مدل برای ایجاد پیوستگی بین دو بال ستون بال پهن در چشمه اتصال از چهار قطعه H شکل استفاده گردید و با یک صفحه زیرین تقویت شد (شکل ۱۰). این قطعات بصورت یکپارچه جوش شده‌اند (merge) و هر قطعه دارای چهار سوراخ می‌باشد که با پیچ و مهره به ستون بال پهن متصل شده و بجای ورق پیوستگی و ورق مضاعف بکار می‌روند. برای هر اتصال چهار عدد از این قطعات استفاده می‌شود (شکل ۱۱). از مزایای خوب این مدل قابلیت سری کاری می‌باشد زیرا در صورت تغییر سایز و ارتفاع تیر، اجزای اتصال بدون تغییر قابل استفاده خواهند بود، هر چند ممکن است ضخامت آنها تغییر کند.



شکل ۱۰: قطعه اتصال در مدل HM.

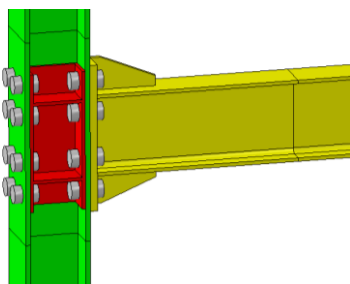


شکل ۱۱: مدل HM.

۴. مدل U2M: در این مدل سعی شده است با اصلاحاتی ضعف مدل HM برطرف گردد. برای این منظور دو قطعه H شکل بهم متصل شده و مدل جدید U2M ساخته شد (شکل ۱۲). با ایجاد پیوستگی کامل بین قطعات اتصال انتظار می‌رود که عملکرد آن بهبود یابد. بین دو بال ستون بال پهن در چشمه اتصال از دو قطعه ناودانی سخت شده با دو سخت کننده استفاده گردید (شکل ۱۳). این قطعات بصورت یکپارچه جوش شده‌اند و هر قطعه دارای چهار سوراخ از هر طرف می‌باشد که با پیچ و مهره به ستون بال پهن متصل شده و بجای ورق پیوستگی و ورق مضاعف بکار می‌روند.

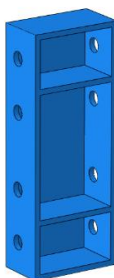


شکل ۱۲: قطعه اتصال U2M.

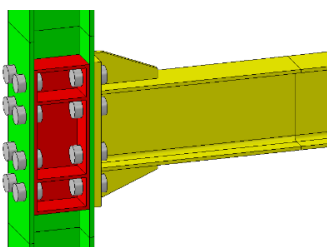


شکل ۱۳: مدل U2M.

۵. مدل U4M: این مدل مشابه مدل U2M می باشد ولی جهت بالا بردن کارایی، دو سخت کننده افقی دیگر به انتهای هر کدام از قطعات اتصال اضافه شده است (شکل ۱۴). در این اتصال بین دو بال ستون بال پهن در چشمه اتصال از دو ناودانی سخت شده با چهار سخت کننده استفاده گردید (شکل ۱۵). این قطعات بصورت یکپارچه جوش شده اند و هر قطعه دارای چهار سوراخ از هر طرف می باشد که با پیچ و مهره به ستون بال پهن متصل شده و بجای ورق پیوستگی و ورق مضاعف بکار می روند.



شکل ۱۴: قطعه اتصال U4M.

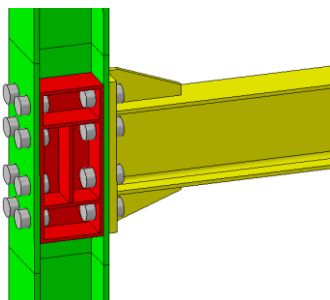


شکل ۱۵: مدل U4M.

۶. مدل U4MV: این مدل همانند مدل U4M می باشد با این تفاوت که یک ورق سخت کننده قائم به وسط سخت کننده های افقی اضافه شده است (شکل های ۱۶ و ۱۷).



شکل ۱۶: قطعه اتصال U4MV.

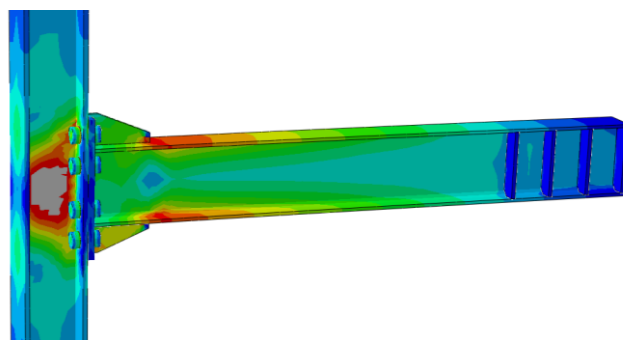


شکل ۱۷: مدل U4MV.

۳-۱-۵- نتایج آنالیز مدل‌ها

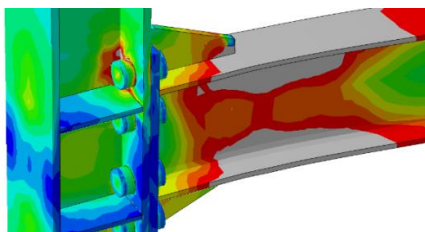
بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی نمودار لنگر-دوران برای کلیه مدل‌ها ترسیم شد. غیر از مدل AM برای بقیه مدل‌ها، این نمودارها اختلاف قابل توجهی نداشتند. بنابراین برای مقایسه عملکرد مدل‌ها، تنش و کرنش پلاستیک در محل چشمه اتصال و نحوه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر با هم مقایسه شدند.

۱. مدل AM: در این مدل که فاقد هر گونه قطعه اتصال در محدوده چشمه اتصال می‌باشد هنگام بارگذاری قبل از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر با توجه به عدم وجود قطعات اتصال، جان ستون تسلیم شد و قابلیت خود را از دست داد (شکل ۱۹). رنگ خاکستری در شکل نشان دهنده جاری شدن آن ناحیه از مدل است.



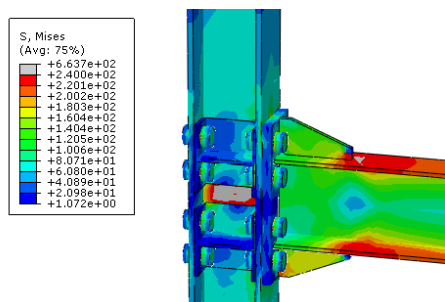
شکل ۱۹: تسلیم جان ستون در مدل AM.

۲. مدل BM: این مدل همانطور که انتظار می‌رفت عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد و از حداکثر ظرفیت خود برای تحمل تنش‌های وارده بهره گرفته است. پس از جاری شدن تیر و تشکیل مفصل پلاستیک، چشمه اتصال و ستون رفتار بسیار خوبی نشان دادند و هیچ‌گونه وضعی در آنها مشاهده نشد (شکل ۲۰).



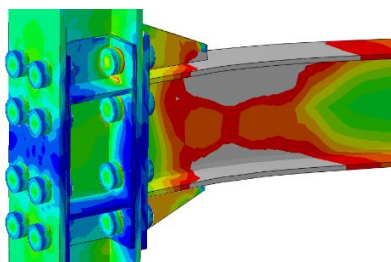
شکل ۲۰: تنش‌ها در مدل BM.

۳. مدل HM: عملکرد این مدل نسبتاً ضعیف بود و به دلیل عدم پوشش کامل جان ستون توسط ورق‌های زیرین قطعه‌ی اتصال، تنش‌های زیادی به جان ستون در محدوده‌ی دو قطعه وارد شد. عدم انسجام کامل قطعه اتصال باعث شد که اتصال از کارآیی خوبی برخوردار نباشد. همانگونه که مشاهده می‌شود قبل از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، جان ستون تسلیم شد و به همین دلیل عملکرد آن مناسب نیست (شکل ۲۱).



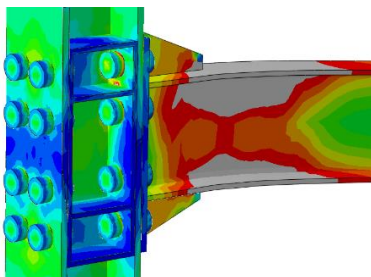
شکل ۲۱: تسلیم جان ستون قبل از تیر در مدل HM.

۴. مدل U2M: این مدل عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد. همانگونه که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود پس از جاری شدن تیر و تشکیل مفصل پلاستیک، ستون و قطعات اتصال در شرایط مطلوبی قرار دارند. بخشی از ظرفیت آنها همچنان موجود است و تا جاری شدن فاصله‌ی زیادی دارد و قابلیت تحمل تنش‌های بیشتر را هم دارد.

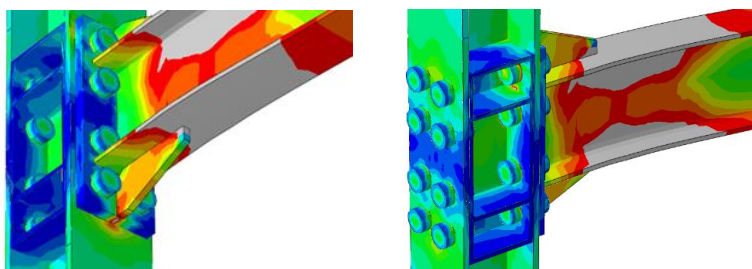


شکل ۲۲: عملکرد مطلوب اتصال در مدل U2M.

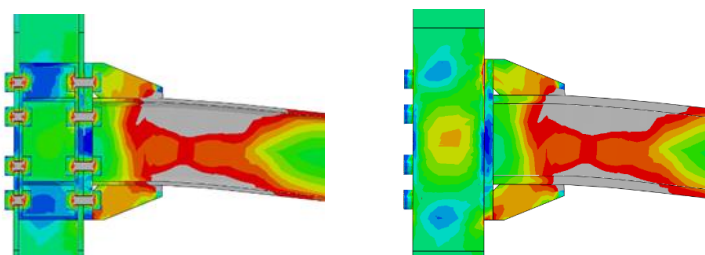
۵. مدل U4M: این مدل نیز عملکرد بسیار مطلوبی داشت و پس از جاری شدن تیر و تشکیل مفصل پلاستیک، ستون و قطعات اتصال همچنان قابلیت خود را حفظ نموده‌اند و قادرند تنش‌های بیشتری را نیز تحمل کنند (شکل ۲۳). افزودن ورق‌های پیوستگی به قطعه اتصال در مدل U4M باعث کاهش تنش در برخی نقاط شد که در شکل‌های ۲۴ تا ۲۶ از زوایای مختلف قابل مشاهده است. اما با توجه به تشابه کلی نتایج مدل U2M با مدل U4M شاید استفاده از ورق‌های پیوستگی اضافی در بالا و پایین ناودانی سخت‌شده خیلی ضروری نباشد و همان دو ورق پیوستگی برای اتصال کافی باشد.



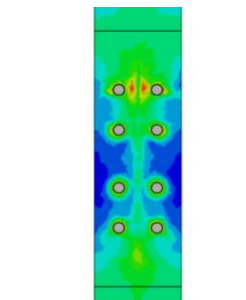
شکل ۲۳: عملکرد مطلوب اتصال در مدل U4M.



شکل ۲۴: تنش‌ها در مدل U4M.

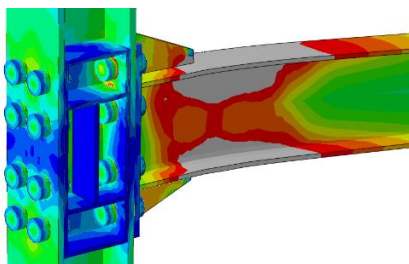


شکل ۲۵: تنش‌های درمقاطع پیچ‌ها و جان ستون در مدل U4M.



شکل ۲۶: تنش‌های بر ستون در مدل U4M.

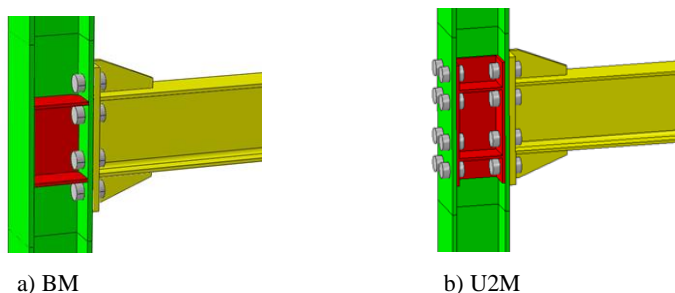
۶. مدل U4MV: این مدل نیز عملکرد بسیار مطلوبی داشت و نتایج همانند مدل U4M بود. بنابراین ورق اضافه شده تاثیری قابل توجهی در بهبود عملکرد اتصال نداشت. همانگونه که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود ورق قائم در چشمه اتصال مشارکتی در تحمل نیروهای وارده نداشته است بنابراین اجرای ورق قائم ضروری نیست و بهتر است بجای مدل U4MV از همان مدل U4M استفاده شود.



شکل ۲۷: تنش‌های مدل U4MV و عدم مشارکت ورق قائم.

۳-۱-۶- انتخاب مدل‌های برتر

بر اساس نتایج بخش قبل دو گزینه شامل U2M - BM برای ساخت نمونه‌های واقعی با مقیاس کامل انتخاب شدند (شکل ۲۸). زیرا مدل U2M در مجموع شرایط قابل قبولی داشت و می‌توان آنرا بعنوان مدل آزمایشگاهی انتخاب کرد و همچنین مدل BM نیز بعنوان شاخص و مدل اصلی جهت مقایسه می‌بایست ساخته شود. ساخت نمونه این مدل‌ها به کارخانه سورنا سوله کرمانشاه سپرده شد.



a) BM

b) U2M

شکل ۲۸: مدل‌های برگزیده.

۳-۲- تحقیقات آزمایشگاهی

پس از تکمیل شدن نتایج عددی مقدمات انجام کار در آزمایشگاه فراهم شد که در ادامه مراحل آن تشریح می‌گردد.

۳-۲-۱- ساخت نمونه‌های واقعی

ناودانی سخت‌شده در مدل U2M با نورد سرد تهیه شد (شکل a-۲۹). برای اتصال تیر به ورق انتهایی از جوش نفوذی کامل با الکتروود E70 و برای بقیه موارد مانند اتصال بال به جان ستون، اتصال سخت‌کننده‌ها به تیر، اتصال ورق‌های مضاعف و پیوستگی به ستون از جوش گوشه استفاده شد (شکل b-۲۹). جوشکاری با روش الکتروود دستی (SMAW process) انجام گرفت و کیفیت جوش‌ها توسط تست غیرمخرب کنترل شد.



b. ساخت تیرهای اتصال



a. ناودانی سخت‌شده با نورد سرد

شکل ۲۹: مراحل ساخت نمونه‌ها.

۳-۲-۲- برنامه‌ریزی آزمایش

هر دو نمونه تمام مقیاس ساخته شدند. در نمونه‌ها مطابق مدل‌های عددی، طول ستون ۲۰۰۰ میلی‌متر و طول تیر ۱۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تیرها با پروفیل IPE200 و ستون‌ها با مقطع معادل IPB160 از ورق‌های فولادی با گرید اسمی ST37 تولید شدند. برای اتصال ورق انتهایی تیر به ستون از هشت پیچ با قطر ۱۸ میلی‌متر و گرید اسمی 12.9 طبق [ISO, 2009] استفاده شد. تمامی اتصالات از نوع اصطکاکی بوده، پیچ‌ها به طور کامل با آچار مخصوص پیش‌تنیده شدند. ابعاد تیر و ستون در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: جزئیات ابعاد مقاطع ستون و تیر به میلی‌متر.

	عرض بال	ضخامت بال	ارتفاع خالص جان	ضخامت جان
تیر IPE200	۱۰۰	۸٫۵	۱۸۳	۵٫۶
ستون IPB160	۱۶۰	۱۲	۱۳۶	۸

رفتار اتصال تابعی از مشخصات تیر، ستون و چشمه اتصال است. در این آزمایشات مشخصات تیر و ستون در نمونه‌ها یکسان بود و تفاوت آنها صرفاً در جزئیات و مشخصات چشمه اتصال می‌باشد. در شکل ۳۰ جزئیات چشمه اتصال در نمونه‌های آزمایشگاهی قابل مشاهده است.



a) BM



b) U2M

شکل ۳۰: چشمه اتصال در نمونه‌های آزمایشگاهی.

۳-۲-۳- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

همانطور که در شکل (a-۳۱) مشاهده می‌شود، نمونه اول (BM) اتصال صلب با ورق انتهایی با چهار پیچ و سخت‌کننده (Bolted Stiffened Extended End Plate: BSEEP-4ES) است. نمونه دوم (U2M) نیز با همان مشخصات مدل استاندارد ساخته شد ولی در چشمه‌ی اتصال بجای ورق‌های مضاعف و پیوستگی از یک ناودانی و دو سخت‌کننده عرضی استفاده شده است (شکل (b-۳۱)). ضخامت ناودانی برابر ضخامت ورق مضاعف و ضخامت سخت‌کننده‌های آن برابر ضخامت ورق پیوستگی در نظر گرفته شد. این ناودانی‌های سخت شده با پیچ و مهره به ستون، در محل چشمه اتصال متصل شدند.



a) BM

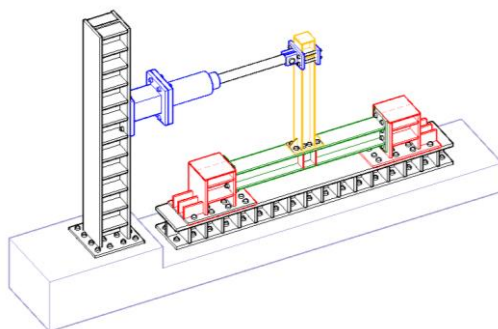


b) U2M

شکل ۳۱: نمونه‌های آزمایشگاهی.

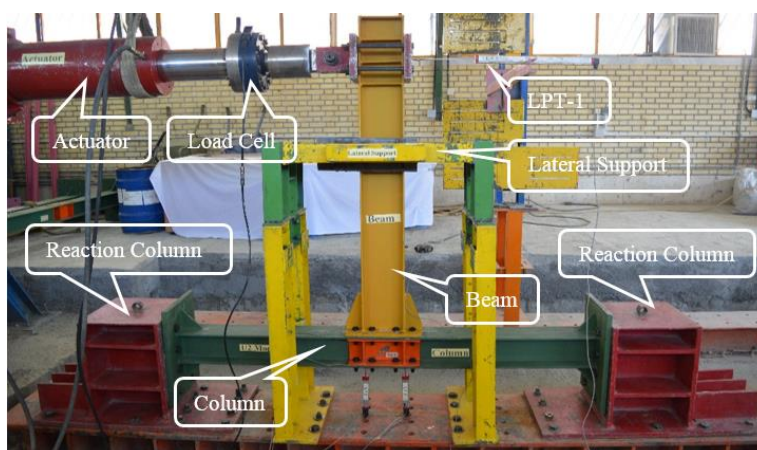
۳-۲-۴- چیدمان آزمایش

شکل ۳۲ نمای کلی از چیدمان آزمایش (Test Setup) را برای هر دو نمونه نشان می‌دهد. برای اتصال ستون‌ها به شاسی کف قوی آزمایشگاه از دو تکیه‌گاه به ابعاد $۵۰۰*۴۰۰*۴۰۰$ میلی‌متر استفاده گردید. اتصال تکیه‌گاه، شاسی و ورق انتهایی بوسیله پیچ و مهره انجام شد. در چیدمان تست‌ها، ستون بصورت افقی وصل شده است و ورق انتهایی دو سر آن به تکیه‌گاه‌ها پیچ شدند. همچنین تیر بصورت قائم و توسط ورق انتهایی به ستون متصل شد.



شکل ۳۲: چیدمان آزمایش.

مطابق شکل ۳۳ هر دو نمونه BM و U2M به تکیه‌گاه مخصوص و کف صلب متصل شدند. تکیه‌گاه جانبی (Lateral Support) در محل مربوطه وصل شد تا از انحراف جانبی نمونه آزمایش جلوگیری نماید. جک هیدرولیکی (Actuator) دارای ظرفیت 1000 KN و ظرفیت جابجایی ۳۰۰ میلی متر در فشار و کشش به انتهای آزاد تیر متصل گردید. ابزارهای سنجش بعد از آماده‌سازی محل، در نقاط تعیین شده قرار گرفتند. این ابزارها شامل یک نیروسنج (Load Cell) و چند (Linear Potentiometer Transducer (LPT)) با دقت ۰,۰۱ تا ۰,۰۴ میلی متر بودند. بارگذاری چرخه‌ای توسط دستگاه دیتالاگر بصورت اتوماتیک مطابق پروتکل بارگذاری اعمال می‌شد. برای اعمال بارگذاری شبه استاتیکی چرخه‌ای، یک انتهای جک به بالای تیر پین شد و سمت دیگر آن به صورت صلب به قاب صلب (Reaction Frame) متصل شد. ارتفاع اتصال جک به تیر از روی بال بالایی ستون در هر دو نمونه ۱۳۳۰ میلی متر بود.



شکل ۳۳: ساختار آزمایش نمونه‌ها.

همانطور که در شکل ۳۳ مشاهده می‌شود محل قرارگیری نیروسنج بین جک و کلاهک اتصال به تیر می‌باشد که مقدار نیروی اعمال شده را در هر لحظه اندازه‌گیری کند. مطابق شکل ۳۴ برای اندازه‌گیری جابجایی انتهای تیر از LPT-1 با کورس ۴۵۰ میلی متر در امتداد مسیر حرکت جک استفاده شد.



شکل ۳۴: محل قرارگیری LPT-1.

در مراحل بارگذاری هر پنج ثانیه یکبار اطلاعات توسط دستگاه دیتالاگر ثبت و ضبط می‌گردید و این روند تا زمان گسیختگی سازه ادامه داشت.

۳-۲-۵- خصوصیات مصالح

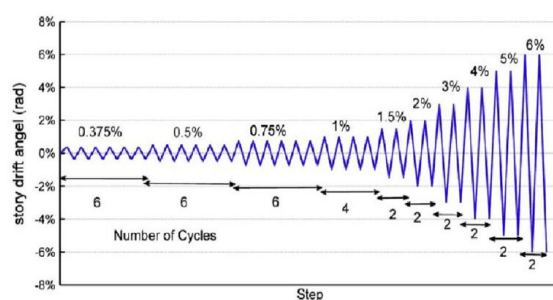
برای کلیه ورق‌های استفاده شده در تیر، ستون، ورق‌های انتهایی، سخت‌کننده‌ها و همچنین پیچ‌ها، براساس ASTM A370 standard [ASTM, 2002] تست کشش انجام شد. مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش شکست مصالح بدست آمدند. نتایج در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی نمونه‌ها.

نوع مصالح	ضخامت (میلی متر)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش شکست (درصد)	تنش تسلیم F_y (MPa)	تنش نهایی F_u (MPa)
۱	۸,۵	۱۸۹,۴	۲۴,۲	۳۵۲	۴۴۲
۲	۵,۶	۱۹۱,۷	۲۹,۸	۳۴۶	۴۲۷
۳	۸	۱۹۴,۵	۲۴,۶	۲۸۶	۳۶۱
۴	۱۰	۱۸۸,۶	۲۶,۱	۲۶۸	۳۹۱
۵	۱۲	۱۹۸,۶	۱۹,۸	۲۷۰	۳۸۸
۶	۲۰	۱۹۷,۲	۲۵,۸	۲۵۴	۳۷۷
۷	۲۵	۱۹۳,۵	۲۰,۴	۲۴۷	۳۶۷
۸	$\emptyset = 18$	۲۲۱,۱	۱۱	۱۰۵۶	۱۲۲۷

۳-۲-۶- پروتکل بارگذاری

برای بارگذاری سیکلی از پروتکل ارائه شده در FEMA-350 استفاده شد [29]. به این ترتیب که ابتدا دررفت‌های ۰,۰۰۳۷۵، ۰,۰۰۵ و ۰,۰۰۷۵ هر کدام، شش سیکل به تیر اعمال شدند. سپس چهار سیکل دررفت ۰,۰۱، دو سیکل دررفت ۰,۰۱۵ و دو سیکل دررفت ۰,۰۲ به انتهای تیر وارد شد. پس از آن در هر گام بارگذاری که معادل دو سیکل بود، ۰,۰۱ رادیان به دررفت اضافه شد و بارگذاری آنقدر ادامه پیدا کرد تا افت در نمودار هیستریزس بطور کامل مشاهده شود. پروتکل بارگذاری در شکل ۳۵ ارائه شده است. مقادیر دررفت در ارتفاع موثر تیر (فاصله محل اعمال بار تا پشت ورق انتهایی تیر که به ستون وصل می‌شود) یعنی طول ۱۳۳۰ میلی متر ضرب شدند.



شکل ۳۵: پروتکل بارگذاری [29] FEMA-350.

۴- نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

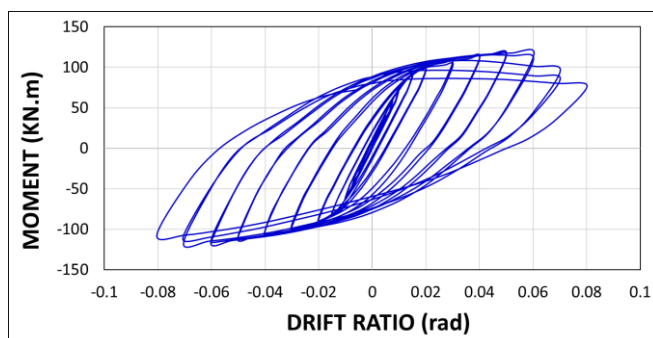
همه نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و نمودار هیستریزس لنگر-دررفت برای آنها بدست آمد. هر دو نمونه بخوبی شرایط دررفت مورد نیاز را مطابق با مقررات [2006] AISC برای قاب‌های خمشی ویژه برآورده کردند. با توجه به کیفیت خوب جوشکاری

در طول آزمایش هیچ موردی از ترک خوردگی یا شکست جوش‌ها و یا شکست پیچ‌های پرمقاومت دیده نشد. در ادامه، مشاهدات آزمایشگاهی شامل مراحل شکل‌گیری کمانش در بال، کمانش در جان و شکست برای هر یک از نمونه‌ها به طور مفصل تشریح می‌گردد.

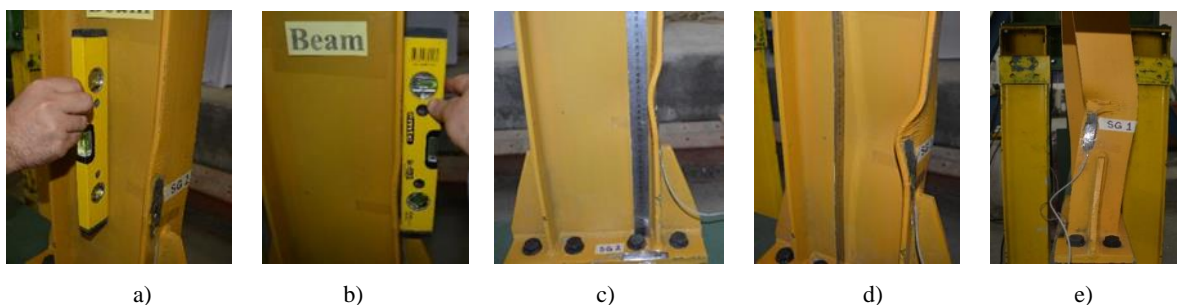
۴-۱- نمونه BM

منحنی هیستریزیس لنگر - دریفت نمونه BM در شکل ۳۶ مشاهده می‌شود. تا دریفت ۰,۰۴ هیچ نشانه‌ای از ضعف نمونه یا افت در نمودار مشاهده نشد. صرفاً در رنگ آمیزی برخی نقاط ترک بسیار جزئی ایجاد شد که قابل توجه نبود. در دریفت ۰,۰۵ کمانش‌های موضعی و کوچکی در جان (شکل ۳۷-a) و بخشی از بال تیر (شکل ۳۷-b) تشکیل شد. نمودار هیستریزیس همچنان روند افزایشی داشت و هیچ افتی در آن ایجاد نشد. لنگر نهایی به مقدار ۱۱۶,۴۱ KN-m در سیکل اول دریفت ۰,۰۵ ثبت شد. پس از آن با گسترش محدوده‌ی کمانش، نمودار هیستریزیس نیز افت کرد و روند کاهشی آغاز شد. در دریفت ۰,۰۵ کمانش در جان تیر شروع شد و در هر سیکل شدت آن بیشتر می‌شد. این جریان تا پایان بارگذاری ادامه داشت. در دریفت ۰,۰۸ با توجه به افزایش کمانش بال تیر (شکل ۳۷-c) و جان تیر (شکل ۳۷-d) در محدوده مفصل پلاستیک و همچنین کمانش جانبی تیر (شکل ۳۷-e)، آزمایش خاتمه یافت.

بررسی نمودارها و مقادیر لنگر و دریفت نهایی، همگی عملکرد مطلوب اتصال از پیش تایید شده‌ی نمونه BM را نشان می‌دهند. در شکل ۳۷ مراحل مختلف شکست نمونه BM ارائه شده است.



شکل ۳۶: نمودار لنگر-دریفت نمونه BM.



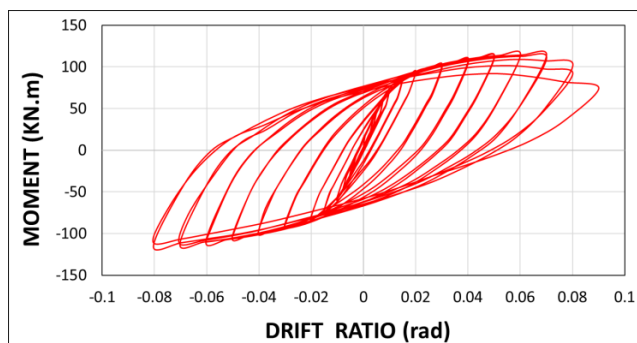
شکل ۳۷: (a) کمانش اولیه جان، (b) کمانش اولیه بال، (c) تشدید کمانش بال، (d) تشدید کمانش جان، (e) کمانش جانبی تیر.

۴-۲- نمونه U2M

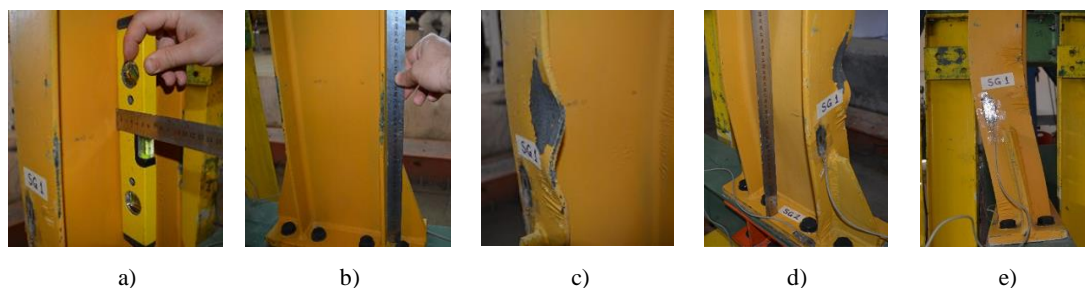
شکل ۳۸ منحنی هیستریزیس لنگر - دریفت نمونه U2M را نشان می‌دهد. تا دریفت ۰,۰۴ هیچ نشانه‌ای از ضعف نمونه یا افت در نمودار ملاحظه نشد. اولین نشانه‌های قابل رویت در دریفت ۰,۰۵ رخ داد که کمانش‌های موضعی و کوچک در جان (شکل ۳۹-a) و بال

(شکل b-۳۹) تیر بودند. نمودار هیستریزیس همچنان در حال افزایش بود و نشانه‌ای از ضعف در آن مشاهده نشد. لنگر نهایی در اتصال مقدار $115,15 \text{ KN}\cdot\text{m}$ بود که در سیکل اول دررفت $0,06$ حاصل شد. از آن به بعد محدوده‌ی کمانش توسعه پیدا کرد و نمودار هیستریزیس دچار افت شد و روند کاهشی در پیش گرفت. در سیکل‌های بعدی کمانش تیر بیشتر شد و این موضوع تا اتمام آزمایش ادامه داشت. در دررفت $0,09$ با توجه به افزایش کمانش بال‌ها (شکل c-۳۹) و جان تیر (شکل d-۳۹) در محدوده مفصل پلاستیک، کمانش جانبی تیر (شکل e-۳۹) و همچنین کمانش بال تیر در محل اتصال به ورق انتهایی (شکل ۴۰)، آزمایش متوقف شد.

بررسی نمودار هیستریزیس و مقادیر لنگر و دررفت نهایی، نشان می‌دهد عملکرد نمونه U2M خوب است. در شکل ۳۹ مراحل مختلف گسیختگی نمونه U2M مشاهده می‌شود.



شکل ۳۸: نمودار لنگر-دررفت نمونه U2M.



شکل ۳۹: (a) کمانش اولیه جان، (b) کمانش اولیه بال، (c) تشدید کمانش بال، (d) تشدید کمانش جان، (e) کمانش جانبی تیر.



شکل ۴۰: کمانش بال تیر در اتصال به ورق انتهایی.

گرچه مشخصات لرزه‌ای نمونه‌ها در بخش بعد با هم مقایسه خواهند شد ولی باید اشاره کرد که عملکرد هر دو اتصال از نظر شکل ظاهری نمودار هیستریزیس و پایداری آن خوب بود. در قاب‌های خمشی ویژه می‌بایست قابلیت تحمل دوران در اتصالات تیر به ستون به میزان حداقل $0,04$ رادیان باشد و مقاومت خمشی اتصال در دوران $0,04$ رادیان در بر ستون حداقل برابر با 80% لنگر پلاستیک مقطع تیر

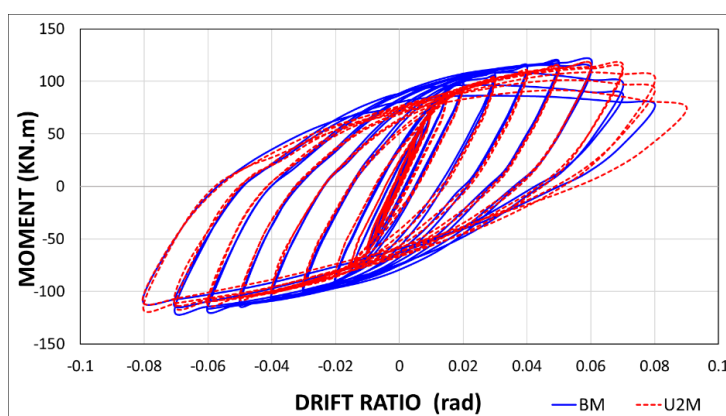
باشد [30]. هر دو نمونه مورد آزمایش این ضوابط را برآورده می کنند. بیشینه لنگر قابل تحمل در هر دو نمونه در دریافت شش درصد رخ داد که بیانگر شکل پذیری بالا در نمونه هاست.

۵- بحث و بررسی

بر اساس نتایج هر آزمایش نمودار هیستریزس آن بدست آمد. سپس نمودار backbone و دوخطی معادل ترسیم و مقادیر مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، سختی موثر، شکل پذیری و اتلاف انرژی محاسبه شدند. در ادامه پارامترهای لرزه ای نمونه های مختلف ارزیابی و مقایسه خواهد شد.

۵-۱- ارزیابی نمودار هیستریزس

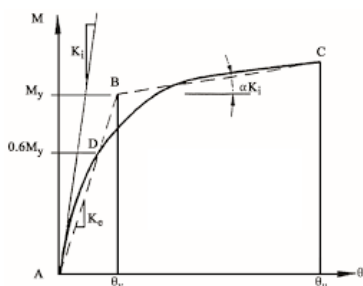
نمودار هیستریزس در نمونه ها بسیار منظم بوده و افزایش یا کاهش مقادیر نقاط بیشینه و کمینه آنها دارای یک هارمونی مرتب است. در هیچ نقطه ای جهش ناگهانی یا افت نامتعارف دیده نمی شود که بیانگر عملکرد خوب و رفتار مناسب همه ی نمونه هاست. در شکل ۴۱ نمودار هیستریزس هر دو نمونه بر هم منطبق شده اند. مشاهده می شود که نمونه ها دارای نمودار هیستریزس پایدار هستند و اثر پینچینگ در نمونه ی U2M نسبت به نمونه استاندارد BM کمی بیشتر است. مقاومت نهایی نمونه ها تفاوت معناداری با هم ندارند ولی دریافت نهایی در نمونه ی پیشنهادی بیشتر است و افت نمودار دیرتر اتفاق افتاده است که می تواند باعث بهبود عملکرد لرزه ای آن شود.



شکل ۴۱: مقایسه نمودارهای هیستریزس.

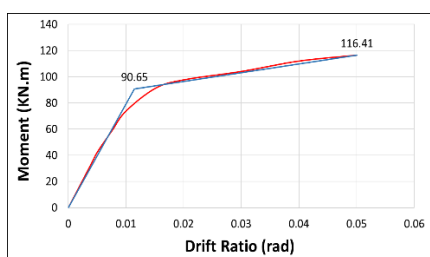
۵-۲- نمودارهای backbone و دوخطی معادل

در ناحیه ی مثبت منحنی های هیستریزس لنگر- دریافت دیاگرام backbone ترسیم گردید و در ادامه منحنی دوخطی معادل بر اساس معیارهای مطرح شده در FEMA - 440 [FEMA, 2005] مطابق روش انرژی معادل برازش داده شد. برای بدست آوردن نمودار دوخطی معادل از بخش صعودی نمودارهای backbone تا نقطه ی اوج استفاده گردید و از بخش افت کرده ی منحنی صرف نظر شد. بر اساس روش انرژی معادل ترسیم نمودار دوخطی معادل می بایست به گونه ای انجام گیرد که مساحت زیر نمودار backbone با نمودار دوخطی برابر شوند (شکل ۴۲).

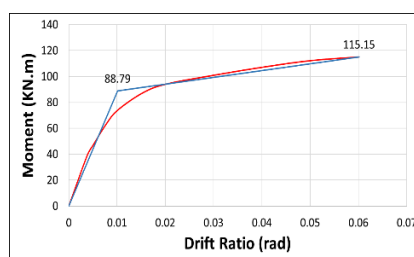


شکل ۴۲: ترسیم نمودار backbone و دوخطی معادل.

در شکل ۴۳ نمودارهای backbone و دوخطی معادل، برای نمونه‌ها ترسیم شده است و در شکل ۴۴ نیز با هم مقایسه شده‌اند.

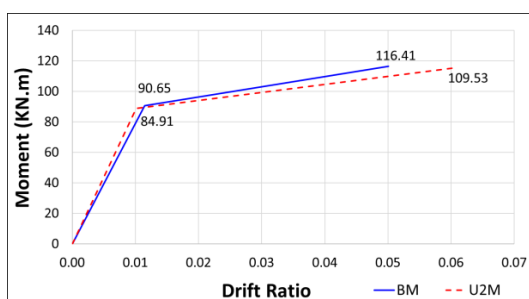


a) BM

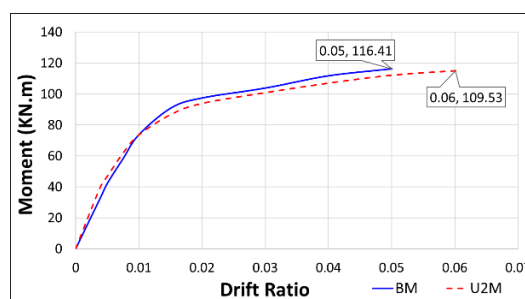


b) U2M

شکل ۴۳: نمودار backbone و دوخطی نمونه‌ها.



a) Backbone



b) Bilinear

شکل ۴۴: مقایسه نمودارهای backbone و دوخطی معادل.

با ترسیم نمودار دوخطی معادل در نمونه‌ها، مشخصات لرزه‌ای شامل لنگر تسلیم (M_y) ، لنگر نهایی (M_u) ، دررفت تسلیم (θ_y) ، دررفت نهایی (θ_u) ، سختی موثر (K_e) و شکل‌پذیری (μ) حاصل شد. پارامترهای شکل‌پذیری و سختی موثر با توجه به روابط (1) و (2) بدست آمده‌اند.

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

$$K_e = M_y / \theta_y \quad (2)$$

خصوصیات لرزه‌ای هر دو نمونه در جدول ۳ ارائه شده است. در بخش بعدی خصوصیات لرزه‌ای نمونه‌ها با هم مقایسه خواهند شد.

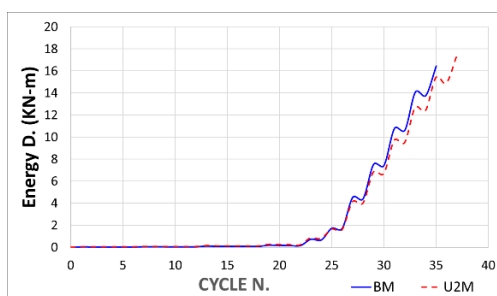
جدول ۳: مشخصات لرزه ای نمونه‌ها بر اساس نمودار دو خطی معادل.

نمونه‌ها	M_y (KN.M)	θ_y (Rad)	M_u (KN.M)	θ_u (Rad)	K_e (KN/Rad)	μ
BM	۹۰,۶۵	۰,۰۱۱۵	۱۱۶,۴۱	۰,۰۵۰۱	۷۸۹۲,۳	۴,۳۶
U2M	۸۸,۷۹	۰,۰۱۰۱	۱۱۵,۱۵	۰,۰۶۰۱	۸۷۷۴,۹	۵,۹۴

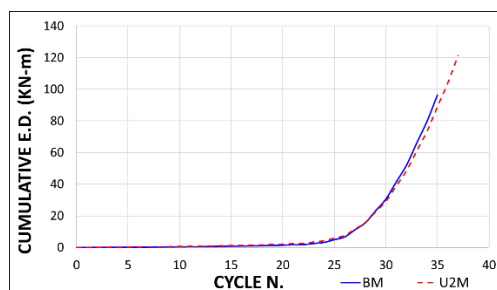
۵-۳- ارزیابی شکل پذیری، سختی و اتلاف انرژی

در ستون آخر جدول ۳ شکل پذیری مطابق رابطه ۱ برای هر دو نمونه محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف شکل پذیری در نمونه‌ی U2M با نمونه‌ی استاندارد BM معنادار و قابل توجه است. شکل پذیری در نمونه U2M مقدار ۳۶٪ بیشتر از نمونه BM می‌باشد. مقادیر بیشتر شکل پذیری در این اتصالات بیانگر این است که آنها می‌توانند دررفت غیرخطی بیشتری را تحمل کنند و در نتیجه عملکرد بهتری در زلزله‌های قوی خواهند داشت. در ستون پنجم جدول ۳ سختی موثر مطابق با رابطه ۲ برای هر دو نمونه محاسبه شده است. سختی موثر نمونه U2M بیش از نمونه BM است که حاکی از عملکرد بهتر آن در زلزله‌های خفیف می‌باشد.

اتلاف انرژی بر اساس سطح زیر نمودار هیستریزس بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۴۵ مشاهده می‌گردد اتلاف انرژی در هر دو نمونه روندی مشابه دارند. نمونه BM در هر سیکل اتلاف انرژی بیشتری را دارد که به علت بالاتر بودن مقاومت آن در سیکل‌های ابتدایی است. هر چند که شکل ۴۶ نشان می‌دهد که اتلاف انرژی تجمعی نمونه‌ی U2M بیش از ۲۵٪ از مدل استاندارد BM بیشتر می‌باشد.



شکل ۴۵: اتلاف انرژی در هر سیکل در نمونه‌های آزمایشگاهی.



شکل ۴۶: مقایسه نمودارهای تجمعی اتلاف انرژی.

نمونه‌ی U2M به واسطه شکل‌پذیری بالاتری که دارد تعداد سیکل‌های بیشتری در مقابل بارهای وارده دوام آورده و اتلاف انرژی جمعی بیشتری نسبت به نمونه BM داشته است. مقادیر بیشینه‌ی اتلاف انرژی و اتلاف انرژی جمعی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: پارامترهای شاخص در ارزیابی نمونه‌ها.

نمونه‌ها	اتلاف انرژی (kN.m)	اتلاف انرژی جمعی (kN.m)
BM	۱۶,۴۴	۹۶,۲۷
U2M	۱۷,۴۰	۱۲۱,۲۶

۵-۴- ارزیابی نهایی

ارزیابی کلی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مشخصات لرزه‌ای نمونه‌ها از قبیل لنگر تسلیم، دریافت تسلیم و لنگر نهایی تفاوت چندانی با هم ندارند. دریافت نهایی نمونه‌ی U2M بیشتر است و به همین دلیل باعث افزایش شکل‌پذیری آنها شده است. در اتلاف انرژی جمعی نیز عملکرد نمونه‌ی U2M بهتر از مدل استاندارد BM می‌باشد و این نمونه در مقابل بارهای وارده مدت زمان بیشتری دوام آورده است. بنابراین دیتایل ارائه شده عملکرد مناسب و قابل قبولی دارد و رفتار لرزه‌ای آن حتی از نمونه استاندارد BM نیز بهتر است.

۶- نتیجه گیری

یک نوع اتصال رایج بین تیر و ستون فولادی در قاب‌های خمشی ویژه اتصال صلب با ورق انتهایی است. در این اتصال برای تقویت چشمه اتصال از ورق‌های پیوستگی و مضاعف استفاده می‌شود و برای اتصال آنها به ستون از جوش استفاده می‌گردد. جوشکاری در هر نقطه‌ای باعث تغییر خصوصیات مواد می‌شود و تردشکنی را افزایش می‌دهد. اهمیت تضعیف این جوشکاری‌ها زمانی بیشتر می‌شود که عملیات در محدوده‌ی چشمه اتصال ستون انجام گیرد. این ناحیه اهمیت بسیار زیادی برای تامین انسجام، پایداری و مقاومت سازه دارد هرگونه ضعف و در آن تاثیر فراوانی در رفتار کل سازه خواهد داشت. هدف این مقاله بررسی عددی و آزمایشگاهی دیتایل جدید برای اتصال صلب با ورق انتهایی می‌باشد و تلاش شده با حذف کامل عملیات جوشکاری بر روی ستون سازه کیفیت اتصال افزایش یابد. در این دیتایل بجای استفاده از ورق پیوستگی و مضاعف برای تقویت ستون از ناودانی سخت‌شده استفاده گردید و برای اتصال آن به ستون از همان سوراخ‌های موجود در بال ستون استفاده شد. بدین منظور دو نمونه آزمایشگاهی BM و U2M بصورت تمام مقیاس ساخته شدند. نمونه استاندارد BM بر اساس جزئیات آیین‌نامه AISC آماده شد تا مبنایی برای مقایسه و ارزیابی مدل پیشنهادی U2M باشد. بارگذاری بصورت شبه استاتیکی و چرخه‌ای بر اساس پروتکل FEMA-350 اعمال شد. بارگذاری تا جایی ادامه داشت که افت در نمودار هیسترزیس نمونه‌ها بطور کامل مشاهده شود. نتایج زیر بدست آمد:

- در بخش مطالعات عددی اولیه ۶ ایده شامل یک مدل استاندارد و پنج طرح پیشنهادی برای مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS برگزیده شدند. پس از آنالیز مدل‌ها و بررسی نتایج آنها مدل استاندارد BM و مدل پیشنهادی U2M برای ساخت نمونه واقعی انتخاب شدند.
- عملکرد هر دو نمونه کلیه الزامات ضوابط طرح لرزه‌ای آیین‌نامه‌ها را تامین کرد. حد مورد انتظار دوران در اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه حداقل ۰.۰۴ رادیان می‌باشد. رفتار نمونه‌های مورد آزمایش فراتر از محدوده‌ی تعیین شده بود و دریافت نهایی در نمونه BM بیش از پنج درصد و در نمونه‌های U2M بیش از شش درصد بود.

- بر اساس نمودارهای هیستریزس و backbone برای هر دو نمونه مقادیر سختی موثر، شکل پذیری، مقاومت تسلیم و نهایی و اتلاف انرژی محاسبه شدند. نتایج نشان داد لنگر نهایی نمونه‌ها در یک حدود هستند. شکل پذیری در نمونه U2M مقدار ۳۶٪ بیشتر از نمونه BM بود. همچنین اتلاف انرژی تجمعی در نمونه‌ی U2M بیش از ۲۵٪ از مدل استاندارد BM بیشتر می‌باشد.
- در مجموع نمونه‌ی U2M عملکردی بهتری نسبت به نمونه استاندارد BM داشت.

در این پژوهش، هدف حذف کامل عملیات جوشکاری به روی ستون در محل اتصال بود و برای تقویت چشمه اتصال از ناودانی سخت شده استفاده شد. برای ارائه دستورالعملی برای طراحی دقیق این ناودانی سخت شده و اثرات آن بر ورق انتهایی تیر به تحقیقات بیشتری نیاز است. ضمناً باید به اثرات بار محوری ستون بر عملکرد اتصال نیز توجه شود که توسط نویسندگان مقاله در دست بررسی است.

سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان مقاله از آزمایشگاه تحقیقاتی سازه دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه و شرکت سورنا سوله که در این پژوهش همکاری نموده‌اند نهایت تشکر و سپاس خود را اعلان می‌دارند.

مراجع

- [1] Meng, R. L., and T. M. Murray. "Seismic performance of bolted end-plate moment connections." *Proceedings of the National Steel Construction Conference*. Chicago, IL: AISC, 1997.
- [2] Hashemi, B. Hosseini, and R. Ahmady Jazany. "The Continuity Plate Effect on Panel Zone Ductility with Unequal Beams Height on Both Sides of Column in SMRF." *Proc. 14th World Conference Earthquake Engineering*. 2008.
- [3] Sazmand, E., and A. A. Aghakouchak. "Modeling the panel zone in steel MR frames composed of built-up columns." *Journal of Constructional Steel Research* 77 (2012): 54-68.
- [4] Hashemi, B. Hosseini, and R. Ahmady Jazany. "The Continuity Plate Effect on Panel Zone Ductility with Unequal Beams Height on Both Sides of Column in SMRF." *Proc. 14th World Conference Earthquake Engineering*. 2008.
- [5] Jazany, R. Ahmady, and M. S. Ghobadi. "Design methodology for inclined continuity plate of panel zone." *Thin-Walled Structures* 113 (2017): 69-82.
- [6] Saffari, H., A. A. Hedayat, and GOHARRIZI N. SOLTANI. "NEW ALTERNATIVES FOR CONTINUITY PLATES IN I-BEAM TO BOX COLUMNS CONNECTIONS." (2015): 219-233.
- [7] Hajjar, J. F., Dexter, R. J., Ojard, S. D., Ye, Y., & S. C. Cotton. "Continuity plate detailing for steel moment-resisting connections." *ENGINEERING JOURNAL-AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION* 40.4 (2003): 189-212.
- [8] Fukumoto, Toshiyuki, and Koji Morita. "Elastoplastic behavior of panel zone in steel beam-to-concrete filled steel tube column moment connections." *Journal of structural engineering* 131.12 (2005): 1841-1853.
- [9] Jazany, Roohollah Ahmady, and Behrokh Hosseini Hashemi. "Effects of detailing on panel zone seismic behavior in special moment resisting frames with unequal beam depths." *Canadian journal of civil engineering* 39.4 (2012): 388-401.
- [10] Tabar, A. Moslehi, and A. Deylami. "Instability of beams with reduced beam section moment connections emphasizing the effect of column panel zone ductility." *Journal of Constructional Steel Research* 61.11 (2005): 1475-1491.
- [11] Mansouri, Imam, and Harmed Safari. "A new steel panel zone model including axial force for thin to thick column flanges." *Steel and Composite Structures* 16.4 (2014): 417-436.
- [12] Tuna, Mehmet, and Cem Topkaya. "Panel zone deformation demands in steel moment resisting frames." *Journal of Constructional Steel Research* 110 (2015): 65-75.
- [13] Kim, Dung-Won, Colin Blaney, and Chia-Ming Uang. "Panel zone deformation capacity as affected by weld fracture at column kinking location." *Eng. J.* 53.1 (2015): 27-46.
- [14] Tran, ANDY T., Patrick M. Hassett, and CHIA-MING Uang. "A flexibility-based formulation for the design of continuity plates in steel special moment frames." *Eng J AISC* 50.3 (2013): 181-200.
- [15] MOHAMMADI, SHOREH MR, and M. Mofid. "Basic issues in the analytical simulation of unstiffened extended end plate connection." (2004): 302-311.
- [16] Shi, Gang, Xuesen Chen, and Dongyang Wang. "Experimental study of ultra-large capacity end-plate joints." *Journal of Constructional Steel Research* 128 (2017): 354-361.

- [17] Chen, Xuesen, and Gang Shi. "Finite element analysis and moment resistance of ultra-large capacity end-plate joints." *Journal of Constructional Steel Research* 126 (2016): 153-162.
- [18] Garoosi, AllahReza Moradi, TahamouliRoudsari, Mehrzad and Behrokh Hosseini Hashemi. "Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse." *Structures*. Vol. 16. Elsevier, 2018
- [19] Garoosi, Allah Reza Moradi, Tahamouli Roudsari, Mehrzad and Behrokh Hosseini Hashemi. "Experimental and numerical evaluation of rigid connection with reduced depth section." *Steel and Composite Structures* 34.6 (2020): 863-875.
- [20] Saneei Nia, Z., M. Ghassemieh, and A. Mazroi. "Panel zone evaluation of direct connection to box column subjected to bidirectional loading." *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 23.11 (2014): 833-853.
- [21] Saberi, Vahid, Mohsen Gerami, and Ali Kheyroddin. "Comparison of bolted end plate and T-stub connection sensitivity to component thickness." *Journal of Constructional Steel Research* 98 (2014): 134-145.
- [22] Brandonisio, Giuseppe, Antonio De Luca, and Elena Mele. "Shear strength of panel zone in beam-to-column connections." *Journal of Constructional Steel Research* 71 (2012): 129-142.
- [23] Roudsari, M. T., Sohaei, S., Torkaman, M., Safaei, S. A., Tahmasebi, S., Mohammadi, S., & M. M. Ghiasvand. "Presenting a new detail for the rigid connection between I-shaped beam and concrete-filled steel tube column with stiffened channel link." *International Journal of Steel Structures* (2020): 1-13.
- [24] Rezaeian, Alireza, Ebrahim Jahanbakhti, and Nader Fanaie. "Numerical study of panel zone in a moment connection without continuity plates." *Journal of Earthquake Engineering* (2020): 1-19.
- [25] Ambiado, Eduardo, Alvaro Lopez, and Juan C. Vielma. "Numerical evaluation of prequalified end-plate connections used in a framed steel industrial structure." *Metals* 11.2 (2021): 243.
- [26] Behrooz, Sasan Mahjoob, and Saeed Erfani. "Parametric study of Stub-Beam Bolted Extended End-Plate connection to box-columns." *Journal of Constructional Steel Research* 171 (2020): 106155.
- [27] Zhang, Y., Wang, P., Liu, M., Liu, Y., Zhang, B., Zhou, S., & J. Chen. "Numerical studies on yield line patterns of thread-fixed one-side bolted endplate connection to square hollow section column under tension." *Journal of Constructional Steel Research* 173 (2020): 106262.
- [28] Özkılıç, Yasin Onuralp. "Investigation of the effects of bolt diameter and end-plate thickness on the capacity and failure modes of end-plated beam-to-column connections." (2021).
- [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] ANSI/AISC 358-16 (2016), *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*, American Institute of Steel Construction; Chicago, Illinois, USA.