

Numerical Investigation of Removing Horizontal Continuity plate in beam to column connection in the box columns in Moment Resisting Frame Systems (MRFs)

S.A.Razavi.Tabatabaei^{1*}, M.R.Rajaiee²

1. Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.
2. Master graduate, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

Abstract

This paper presents a series of innovative connection configurations developed to overcome the persistent challenges associated with installing horizontal continuity plates inside box-shaped steel columns. These challenges frequently arise due to restricted access within the column, geometric limitations imposed by the closed box-section, and the inherent difficulty of meeting seismic design provisions under such conditions. In many practical applications, the placement and welding of horizontal continuity plates inside box columns can be highly demanding, leading to construction inefficiencies and, in some cases, inadequate seismic performance if the detailing cannot be executed properly. To address these issues, the present study introduces alternative strategies based on detailed numerical analyses aimed at improving both constructability and structural behavior.

A primary objective of the proposed designs is to ensure a reliable and continuous load-transfer mechanism from the beam to the column within the panel zone, while also simplifying the assembly and erection of moment-resisting frame components. The first proposed solution involves substituting conventional horizontal continuity plates with an internal vertical stiffener. This modification not only facilitates the establishing of a more direct and efficient load path but also eliminates the need for complex internal welding operations inside the box column. When combined with the widening of the beam flanges, this configuration further enhances the rotational capacity of the connection and contributes to a more stable panel zone response.

In addition to these internal modifications, alternative connection types incorporating external vertical stiffeners attached to the beam flanges were also examined. These stiffeners were used together with the internal vertical stiffener replacing the horizontal continuity plates. The intention behind this combined approach is to reinforce the beam-column interface externally while maintaining simplified detailing inside the column. A third category of connections—those simultaneously employing widened beam flanges, external vertical stiffeners, and the internal vertical stiffener—was analyzed to understand the cumulative and interactive effects of these enhancements.

The numerical analysis results confirm that all proposed connections exhibit adequate and reliable performance when compared to conventional moment connections commonly used in steel moment-resisting frames. Specifically, the configurations with widened beam flanges demonstrated an 18% increase in energy absorption capacity relative to standard moment connections, maintaining their strength effectively up to drift levels of 6% radians without experiencing significant degradation. Connections featuring external vertical stiffeners alone achieved a 14% increase in energy dissipation, while the hybrid configuration combining both strategies—widened flanges and external stiffeners—yielded an impressive 28% improvement.

Beyond improved energy dissipation, the proposed designs also influence the development of the plastic hinge. The combined use of widened flanges and external vertical stiffeners effectively shifts the plastic hinge formation away from the column face, thereby reducing the demand on the column panel zone and minimizing the likelihood of brittle fracture in the beam-column welds. Evaluation of the weld rupture index further confirms that the probability of fracture is substantially lower in the proposed connections compared to conventional moment-resisting connections. Overall, the study demonstrates that the new connection configurations offer both superior structural performance and enhanced constructability, making them promising alternatives for seismic-resistant steel frame construction.

Review History

Received: Nov 12, 2024

Revised: Jun 15, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Horizontal continuity plate
internal vertical stiffener
external vertical stiffener
box column, steel moment
frame

Rupture index of weld

* Corresponding Author Email: arazavi@usc.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8061-6213



بررسی عددی حذف ورق پیوستگی افقی در اتصال تیر به ستون در ستون‌های جعبه‌ای در سیستم‌های قاب خمشی فولادی

سید علی رضوی طباطبائی^{۱*}، محمدرضا رجایی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

۲. کارشناس ارشد زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این مقاله به منظور رفع چالش‌های تعبیه و نصب ورق‌های پیوستگی افقی در داخل ستون‌های جعبه‌ای که در مواردی به دلیل صعوبت دسترسی و هندسه و چیدمان خاص آن‌ها، ارضای صحیح و مناسب ضوابط طراحی لرزه‌ای را با چالش‌های بسیاری روبرو می‌کند؛ اقدام به پیشنهاد اتصال‌اتی جدید و راهبردی با استفاده از تحلیل عددی شده‌است. به منظور دستیابی به یک مسیر انتقال بار مناسب از تیر به ستون در ناحیه چشمه اتصال و همچنین سهولت مونتاژ و

کلمات کلیدی

اجرای المان‌های قاب خمشی در ناحیه چشمه اتصال می‌توان استفاده از سخت‌کننده داخلی به جای ورق‌های پیوستگی افقی رایج و تعریض بال‌های تیر را به عنوان یک راهکار مناسب پیشنهاد کرد. علاوه بر آن اتصال‌اتی با استفاده از سخت‌کننده‌های قائم خارجی بر روی بال تیر در ناحیه اتصال تیر به ستون به همراه به کارگیری سخت‌کننده قائم داخلی به جای ورق پیوستگی افقی در ناحیه چشمه اتصال پیشنهاد شده‌است. از طرفی تأثیر استفاده همزمان از تعریض بال‌های تیر، حضور سخت‌کننده‌های قائم خارجی بر روی بال تیر و جایگزین کردن سخت‌کننده قائم داخلی به جای ورق پیوستگی افقی در ناحیه چشمه اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاصل شده از تحلیل عددی اتصال‌ات پیشنهادی نمایانگر کفایت لازم و کافی اتصال‌ات در قیاس با اتصال‌ات رایج خمشی می‌باشد. اتصال‌اتی که با استفاده از تعریض بال‌های تیر ساخته شده‌اند؛ دارای ظرفیت جذب انرژی ۱۸٪ بالاتر از اتصال رایج خمشی تا حداکثر جابه‌جایی ۶٪ رادایان بوده‌اند بدون آن که افت مقاومت شدیدی از خود نشان دهند. این درصد در اتصال‌ات با به کارگیری سخت‌کننده قائم خارجی بر روی بال تیر و اتصال‌اتی که با استفاده از حضور همزمان تعریض بال‌های تیر و سخت‌کننده قائم خارجی بر روی بال‌های تیر ساخته شده‌اند؛ به ترتیب ۱۴٪ و ۲۸٪ بالاتر از نمونه رایج خمشی گزارش شده‌است. نتایج نهایی نشانگر آن است که استفاده همزمان از تعریض بال‌های تیر و سخت‌کننده‌های قائم خارجی بر روی بال تیر در راستای جان تیر منجر به ایجاد یک مسیر انتقال بار مناسب از تیر به ستون در ناحیه چشمه اتصال می‌گردد. همچنین مکانیزم دور شدن مفصل پلاستیک از بر ستون بسیار مناسب است و امکان بروز شکست‌های ترد جوش نفوذی در محل اتصال تیر به ستون بسیار ناچیز است و در بررسی شاخص شکست جوش این معیار در قیاس با اتصال مشابه خمشی بسیار ناچیز گزارش شده‌است.

* رایانامه نویسنده مسئول: arazavi@usc.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8061-6213

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این



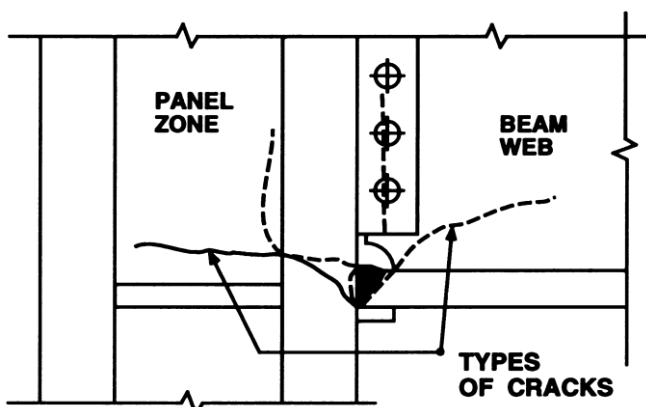
مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱- مقدمه

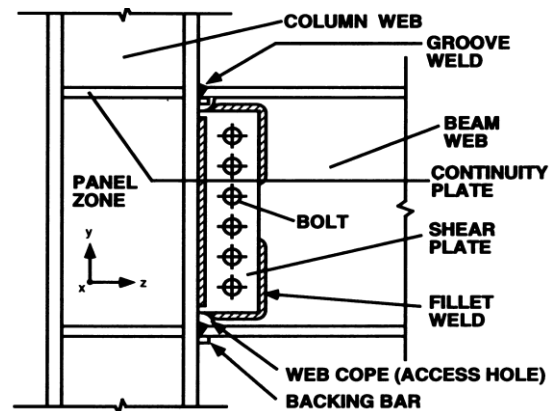
اتصال تیر به ستون و چقرمگی ناکافی فلز جوش را می‌توان از جمله عوامل بروز خرابی‌ها در زلزله نورثریج ۱۹۹۴ به حساب آورد. در شکل (۱) نمونه اتصال متعارف پیش از زلزله ۱۹۹۴ نورثریج آمریکا قابل مشاهده می‌باشد [1, 2]. پس از وقوع زلزله نورثریج سال ۱۹۹۴، در بیشتر اتصالات پیش‌تأیید صلاحیت شده پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌ها برای ایجاد یک مسیر انتقال نیروی مناسب از تیر به ستون، به استفاده از ورق‌های پیوستگی افقی در داخل ستون‌ها نیاز است. اساساً هندسه بسته ستون‌های جعبه‌ای و دسترسی سخت به منظور مونتاژ و جوشکاری ورق‌های پیوستگی افقی در داخل آن‌ها موجب دشوار بودن و هزینه‌بر بودن عملیات ساخت این نوع از ستون‌ها شده‌است.

به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی از تعبیه ورق‌های پیوستگی افقی در سیستم‌های قاب خمشی فولادی مانند سختی دستیابی به جوش نفوذی کامل، عدم امکان بازرسی کامل جوش در ورق‌های پیوستگی افقی در صورت استفاده از تکنیک الکترواسلگ [3]، دشوار بودن عملیات ترمیم و اصلاح جوش ورق‌های پیوستگی افقی در صورت بروز عیوب جوش و ایجاد اعوجاج در بدنه ستون به دلیل عدم امکان جوشکاری هم‌زمان وجوه مقابل ورق‌های پیوستگی [4]، تا کنون تحقیقات متعددی که منجر به حذف یا اصلاح رفتار ورق‌های پیوستگی افقی صورت گرفته است. صفاری و همکاران [5, 6] به منظور جایگزینی ورق پیوستگی افقی در داخل ستون‌های جعبه‌ای به صورت کلی سه

قاب‌های خمشی فولادی به عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله مدت زیادی است که در اقصی نقاط جهان در انواع سازه‌های کوتاه تا بلند مرتبه مورد استفاده قرار می‌گیرند. انعطاف پذیری بسیار زیاد این سیستم از نقطه نظر معماری و کاربری فضا، سرعت اجرای بالا، وزن پایین و شکل پذیری بالا همگی موجب محبوبیت آن شده‌اند. از طرفی از ایمنی لازم و مورد نظر کدهای طراحی لرزه‌ای و عدم قابلیت بازسازی مناسب این سیستم پس از وقوع زمین لرزه‌های شدید نیز نباید غافل شد. به طور کلی تغییر شکل‌های بسیار زیادی که در هنگام وقوع زلزله در این نوع از سیستم رخ می‌دهد، لزوم طراحی دقیق و اصولی اتصالات این قاب‌ها را یادآور می‌شود. در زلزله سال ۱۹۹۴ نورثریج آمریکا، با وجود رعایت مقررات و ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های رایج در آن زمان، بسیاری از ساختمان‌های نوساز خرابی زیادی در ناحیه اتصال تیر به ستون متحمل شدند. وقوع این زمین‌لرزه و رخدادها و خسارت‌های سازه‌ای آن جامعه مؤلفین، مهندسين و طراحان را به شوک فرو برد؛ زیرا پیش از آن با توجه به پژوهش‌های متعدد و آزمایش‌هایی که در اوایل دهه ۹۰ میلادی در مورد این سیستم صورت گرفته بود، نشان دهنده کارایی لازم و قابل قبول اتصالات قاب‌های خمشی فولادی بوده‌است. کیفیت پایین ساخت و عدم بازرسی مناسب جوشکاری‌های صورت‌گرفته، عدم پیش‌بینی تمرکز تنش و درخواست نیروی لرزه‌ای بالا در محل



Some failure modes of the welded beam-to-column connection



A typical welded beam-to-column connection

شکل ۱. اتصال رایج خمشی و محل بروز شکست جوش پیش از زلزله نورثریج ۱۹۹۴ [۱]

Fig. 1 Common flexural joint and location of weld failure before the 1994 Northridge earthquake [1]

باعث افزایش ۱ درصدی در سختی و در نتیجه ۴۶،۰۹ درصد در مقاومت می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از بتن پرکننده در ستون باعث بهبود رفتار لرزه‌ای اتصال شده است. میرقادری و احمدی [10] در سال ۲۰۱۹ اتصال صلب تیر فولادی به ستون CFT با سخت‌کننده T شکل بررسی کردند. به منظور کاهش تمرکز تنش و افزایش شکل‌پذیری، از روش سوراخ‌کاری بال تیر استفاده شد که نسبت به RBS ساده‌تر و برای ساختمان‌های موجود مناسب‌تر است. نتایج این تحلیل نشان داد این روش باعث کاهش تنش، جلوگیری از شکست ترد، و بهبود شکل‌پذیری اتصال می‌شود. این نوع اتصال قابلیت استفاده در قاب‌های خمشی متوسط و ویژه را دارد. نجف قلی‌پور و همکاران [11] در سال ۲۰۲۰ ورق پیوستگی افقی را از ناحیه چشمه اتصال حذف کردند و به جای آن از یک سخت‌کننده قائم داخلی استفاده کردند. علاوه بر آن با تعبیه مقطع تیر کاهش یافته و تضعیف قسمتی از تیر تقریباً در تمامی نمونه‌های مورد بررسی مفصل پلاستیک در ناحیه میانی تشکیل شد. نتیجه آن که نمونه‌های پیشنهادی قابلیت تحمل حداقل جابه‌جایی نسبی ۰/۰۴ رادیان بدون زوال مقاومت و شکست ترد در ناحیه جوش را دارا می‌باشند. صلح‌میرزایی و همکاران [12] در سال ۲۰۲۱ به بررسی عددی و تجربی جزئیات جدیدی برای ناحیه چشمه اتصال در اتصالات صفحه انتهایی تیر به ستون پرداختند. در جزئیات پیشنهادی، نیاز به جوشکاری در ستون در ناحیه پنل به طور کامل حذف شده است و یک ناودانی سخت‌شده نقش صفحات پیوستگی و مضاعف را ایفا می‌کند. این ناودانی با استفاده از مهره و پیچ به ستون متصل می‌شود. بر اساس نتایج عددی، سه نمونه ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای در یک آزمایش تجربی در اندازه کامل تا زمانی که کاهش مقاومت در نمودارهای هیستریزس مشاهده شد، مورد بررسی قرار گرفتند. پس از ارزیابی نتایج، مشخص شد که تحت بارگذاری اعمال شده، هر سه نمونه معیارهای لرزه‌ای اتصال مقاوم ویژه را برآورده کردند. علاوه بر این، جزئیات جدید نه تنها رفتار لرزه‌ای بهتری داشتند، بلکه اجرای آنها نیز راحت‌تر بود. جمالی و همکاران [13] در سال ۲۰۲۲ با حذف ورق پیوستگی در ستون باکس و با عبور تیر از میان ستون باکس و همچنین استفاده از دو

طرح را مورد بررسی قرار دادند. استفاده از دو ورق مثلثی در داخل ستون در بالا و پایین منتهی به بال‌های تیر، استفاده از دو ورق مستطیلی مانند رویه طرح قبل و استفاده از یک جان اضافه در داخل ستون همراه با بهره‌گیری از دو طرح قبل، در مورد اتصال با ورق مثلثی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه رایج اتصال یعنی به کار بردن ورق پیوستگی افقی در داخل ستون گزارش شده است. علاوه بر آن اتصال با ورق مستطیلی عملکردی تقریباً مشابه اتصال رایج را دارد. در نهایت طرح با افزودن یک ورق جان در داخل ستون به همراه بهره‌گیری از ورق‌های مستطیلی و مثلثی در داخل آن بیشترین و بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. این طرح دارای ۱۱/۵٪ مقاومت و ۵۴/۲٪ شکل‌پذیری بیشتر نسبت به نمونه رایج اتصال خمشی در داخل ستون بوده است. با این حال با توجه به قضاوت نهایی صورت گرفته در این تحقیق، این طرح موجب افزایش بسیار چشمگیر شکل‌پذیری و تأمین کمترین شکل‌پذیری در مورد یک اتصال متناسب با آیین‌نامه‌های طراحی نشده است و پیشنهاد می‌شود به منظور رسیدن به این مهم از این طرح به همراه ایجاد تغییراتی در مقطع تیر مانند (RBS) استفاده شود. فنائی و همکاران [7, 8] در مطالعه‌ای دیگر اقدام به مطالعه ناحیه چشمه اتصال بدون ورق پیوستگی کردند. در اتصال پیشنهادی، آن‌ها ضخامت بال ستون را در محل اتصال تیر به ستون افزایش دادند و از یک ورق پشت بند برای جوش دادن بال تحتانی تیر به بال ستون استفاده کردند. نتایج نشان داد که با تعبیه ورق پشت بند، شکست ترد در ناحیه اتصال تیر به ستون کمتر از حالتی است که تنها از جوش نفوذی کامل استفاده شود و پیش‌نیازهای طراحی لرزه‌ای در قاب‌های خمشی فولادی را برآورده می‌سازد. رضایی فر و یونسسی [9] در سال ۲۰۱۷ رفتار اتصالات تیر-ستون باکس با/بدون صفحات پیوستگی، با سخت‌کننده خارجی در دو حالت با/بدون بتن (CFT/HSS) داخل ستون و در نهایت اتصال تقویت‌شده با شبکه‌های میلگرد افقی در ستون CFT (لوله پر شده با بتن) با مدل‌سازی المان محدود و تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری‌های یکنواخت و چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سخت‌کننده خارجی به جای صفحات پیوستگی

همزمان آن‌ها در عملکرد اتصال مورد بررسی قرار گرفته‌است. دلیل این امر آن است که اتصالات پیشنهادی مقتضیات اقتصادی و کاربری در پروژه‌های گوناگون را برآورده سازند.

۲-۱- چگونگی ساخت اتصالات پیشنهادی

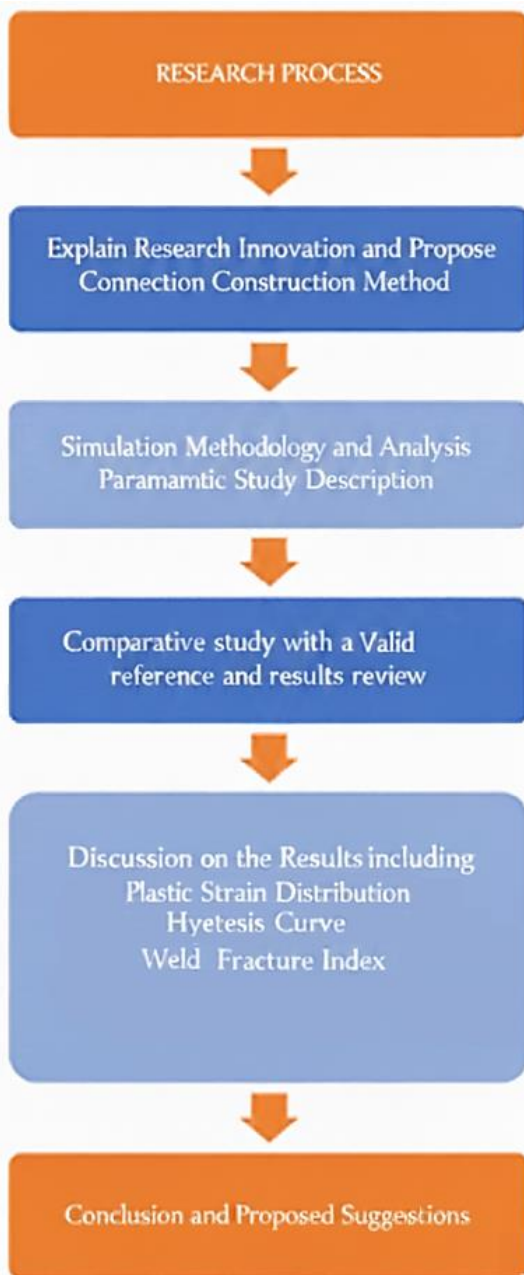
اتصالات پیشنهادی اگر چه از نقطه نظر اقتصادی تا حدودی میزان آلیاژ مصرفی در پروژه را افزایش می‌دهند اما چالش‌ها و

صفحه دوزنقه‌ای شکل تقویتی به بررسی رفتار لرزه‌ای این اتصال به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهند که نمودارهای هیستریزیس رسم‌شده برای هر سه نمونه دارای حلقه‌های پایدار هستند. علاوه بر این، براساس نتایج، استراتژی‌های پیشنهادشده برای بهبود عملکرد نمونه اصلی، مؤثر و مناسب ارزیابی شده‌اند.

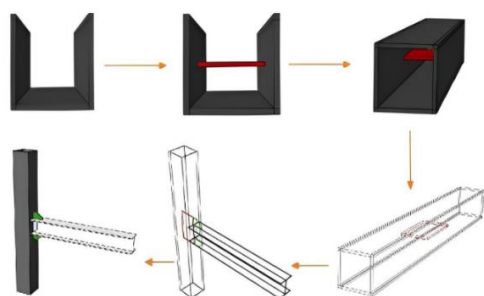
در این تحقیق ابتدا مشکلات موجود در استفاده از ورق‌های پیوستگی افقی در اتصالات تیر به ستون شناسایی می‌شود. این مشکلات شامل جوشکاری ناقص و نفوذ جوش در گوشه‌ها و دشواری‌های نصب بودند که منجر به کاهش کارایی و ایمنی سازه می‌شوند. برای رفع این چالش‌ها، پیشنهاد می‌شود که به جای ورق‌های پیوستگی افقی از سخت‌کننده‌های عمودی داخلی استفاده شود و عرض بال تیر افزایش یابد. سپس با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی برای ارزیابی عملکرد این اتصالات پیشنهادی انجام می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که اتصالات پیشنهادی نسبت به اتصالات سنتی عملکرد بهتری دارند، به ویژه در جذب انرژی و کاهش شکست در جوش‌ها. در نهایت، نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از این اتصالات جدید می‌تواند بهبود چشمگیری در عملکرد سازه‌های فولادی ایجاد کرده و ایمنی و کارایی آن‌ها را افزایش دهد. روند انجام پژوهش را در شکل (۲) مشاهده می‌کنید.

۲- نوآوری پژوهش

در این تحقیق به منظور رفع چالش‌ها و عیوب اجرایی و عملیاتی مربوط به اتصالات رایج خمشی متشکل از ورق‌های پیوستگی افقی، اقدام به ارائه یک روش کاربردی و جدید شده‌است. اتصال ارائه شده از یک ورق پیوستگی قائم به جای دو ورق پیوستگی قائم در ناحیه چشمه اتصال بهره می‌برد. در محل اتصال تیر به ستون نیز از دو رویکرد تعریض بال‌های تیر و به کار بردن سخت‌کننده‌های قائم خارجی در راستای جان‌های تیر و روی بال‌های تیر استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که چگونگی اتصال تیر به ستون به صورت جداگانه و همچنین اثر



شکل ۲. روند انجام پژوهش
Fig. 2. Research process



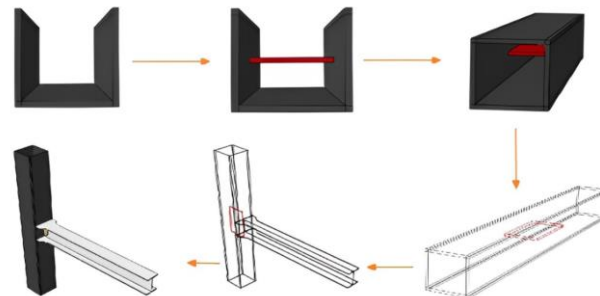
شکل ۴. مراحل ساخت اتصال با استفاده از سخت کننده‌های قائم خارجی در ناحیه اتصال تیر به ستون و سخت کننده قائم داخلی

Fig. 4. The steps of making the connection by using external vertical stiffeners at the beam-to-column area and internal vertical stiffener

شده است، از نوع General/Static می‌باشد. کلیه مش‌بندی‌هایی که در مدل‌های ساخته شده به کار برده شده است، المان‌های هشت گره‌ای مکعبی C3D8R است و در مدل‌سازی کلیه اجزای مدل‌ها شامل تیرها، ستون‌ها، ورق‌ها و ... از المان‌های توپر استفاده شده است.

۳-۱- بارگذاری و مشخصات مصالح

به منظور بارگذاری کلیه مدل‌های موجود در این تحقیق از پروتکل بارگذاری مربوط به قاب‌های خمشی ویژه و متوسط که در آیین‌نامه فولاد آمریکا (AISC-341-22) ارائه شده است، استفاده می‌شود. این بارگذاری به صورت بار چرخه‌ای بوده است و به شیوه جابه‌جایی - کنترل به انتهای آزاد تیر وارد می‌شود شکل (۵). با فرض ارتفاع ستون برابر ۳٫۳ متر و دریافت ۱ درصد معادل ۳٫۳ سانتی‌متر که جابه‌جایی در انتهای ستون می‌باشد، همین میزان از تغییر در آباکوس لحاظ شده است. به منظور تعریف رفتار غیر خطی فولاد از نمودار تنش- کرنش فولاد نرمه تیپ st-37 استفاده شده است. در این راستا تمامی مشخصات مربوط به ناحیه الاستیک مصالح فولادی برابر با مدول الاستیسیته $E = 210\text{GPa}$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ در نظر گرفته شده است. تغییرات تنش- کرنش ناحیه پلاستیک به صورت خطی و با شیب $0.003E$ لحاظ شده است. نمودار تنش-کرنش مفروض با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی کینماتیکی مصالح موجود و متناظر با تنش-کرنش واقعی در نرم افزار آباکوس اعمال شده است.



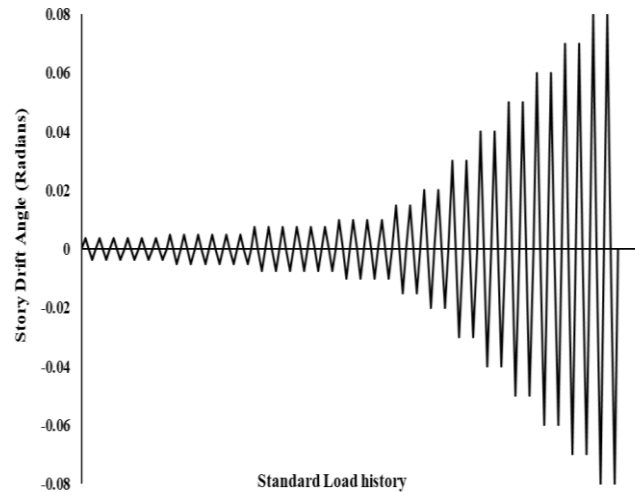
شکل ۳. مراحل ساخت اتصال با استفاده از تعریض بال‌های تیر و سخت کننده قائم داخلی

Fig. 3. The steps of making the connection by using the widening of the flanges of the beam and internal vertical stiffener

مشکلات موجود در اتصالات رایج را به صورت کامل حل می‌کند و روش ساخت بسیار ساده‌تری را ارائه می‌کند. به منظور ایجاد اتصال در ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده از ورق فولادی، ابتدا سه ورق ستون به یکدیگر جوش شده و شکل U را پدید می‌آورند. سپس سخت‌کننده قائم داخلی که از قبل دو سمت آن به صورت یک طرفه پخ خورده و لبه‌سازی شده است، روی ورق‌های پشت‌بندی که به دو وجه داخلی بال‌های ستون جوش شده است، قرار می‌گیرد. سپس سخت‌کننده داخلی در تمام طول خود به وسیله جوش نفوذی کامل به بال ستون با استفاده از تکنیک ورق پشت‌بند متصل می‌شود. پس از آن ورق چهارم ستون که یکی از جان‌های ستون است در جای خود نصب می‌شود. در محل اتصال تیر به ستون نیز از تعریض بال‌های تیر و سخت‌کننده قائم خارجی در راستای جان تیر استفاده شده است. سخت‌کننده‌های قائم خارجی با استفاده از جوش نفوذی کامل به بال ستون متصل می‌شود. لازم به ذکر است ارتفاع سخت‌کننده به میزانی در نظر گرفته می‌شود که در ضخامت دال بتنی و کف‌سازی گم شود. شکل‌های (۳ و ۴).

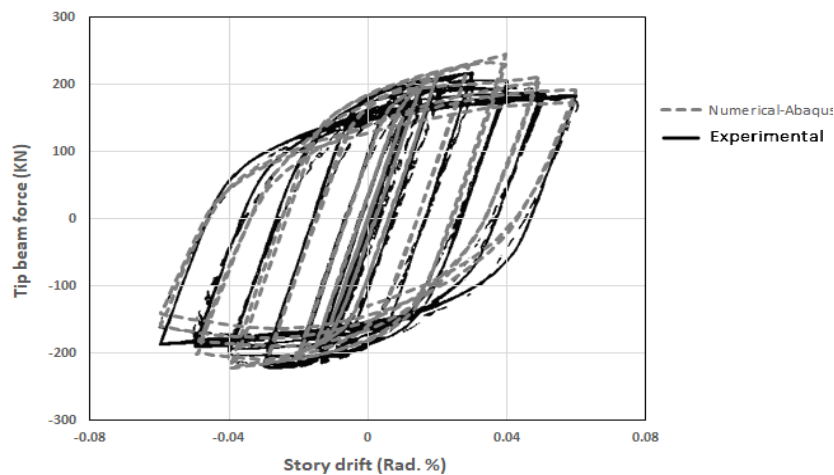
۳- مدل‌سازی و تحلیل

در این پژوهش کلیه مدل‌سازی‌ها و تحلیل نتایج مربوط به آن‌ها توسط نرم افزار تحلیل اجزای محدود Abaqus انجام گرفته است. روش تحلیل عددی کلیه مدل‌ها، به صورت غیر خطی می‌باشد و از حلگر Abaqus standard/ Implicit استفاده می‌شود. نوع استپی که برای تحلیل عددی غیرخطی استفاده



شکل ۵. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای [14] AISC-341-22

Fig. 5. Cyclic loading protocol of AISC-341-22 [14]



شکل ۶. نمودار هیستریزس حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی

Fig. 6. Hysteresis diagram obtained from numerical analysis and laboratory results

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از درستی آزمایشی

Table 1. Comparison of the results of verification

Specimen	Max drift (Rad. %)	Max Force in tension and compression (KN)
Experimental	0.06	205
Numerical - Abaqus	0.06	228

Abaqus با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، هماهنگی نسبتاً خوبی میان نتایج وجود دارد (شکل ۶). اختلاف موجود در نمودار هیستریزس حاصل شده از مطالعه تطبیقی تحلیل عددی و آزمایشگاهی را می‌توان به وجود تنش‌های پسماند موجود در مدل آزمایشگاهی یا عدم مدلسازی جوش و یکپارچه شدن کل مدل در تحلیل عددی تعمیم داد (جدول ۱).

۴- درستی آزمایشی

۴-۱- درستی آزمایشی عددی اتصال (UR)

مقاله مورد نظر برای درستی آزمایشی، مقاله صنیعی نیا و همکاران [15] می‌باشد و به مدلسازی یک نمونه اتصال ارائه شده موسوم به اتصال (UR) پرداخته شده است. نمودار هیستریزس نیرو- جابه‌جایی حاصل از مدلسازی عددی در نرم افزار

۵- بحث و نتایج

۱-۵- مشخصات مقاطع فولادی نمونه‌ها و شرایط مرزی و

بارگذاری

مشخصات مقاطع فولادی استفاده شده در نمونه‌های عددی که به منظور استخراج نتایج تحلیل به کار رفته‌اند در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

به منظور مقایسه هر چه بهتر اتصالات رایج خمشی با اتصالات پیشنهاد شده در این پژوهش تمامی مشخصات و جزئیات مربوط به تحلیل عددی مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است و تفاوت موجود در مدل‌ها، در جزئیات اتصال با بهره‌گیری از طرح پیشنهادی می‌باشد. در تمامی مدل‌ها دهانه آزاد تیر برابر ۲۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ستون فولادی جعبه‌ای برابر ۳۳۰۰

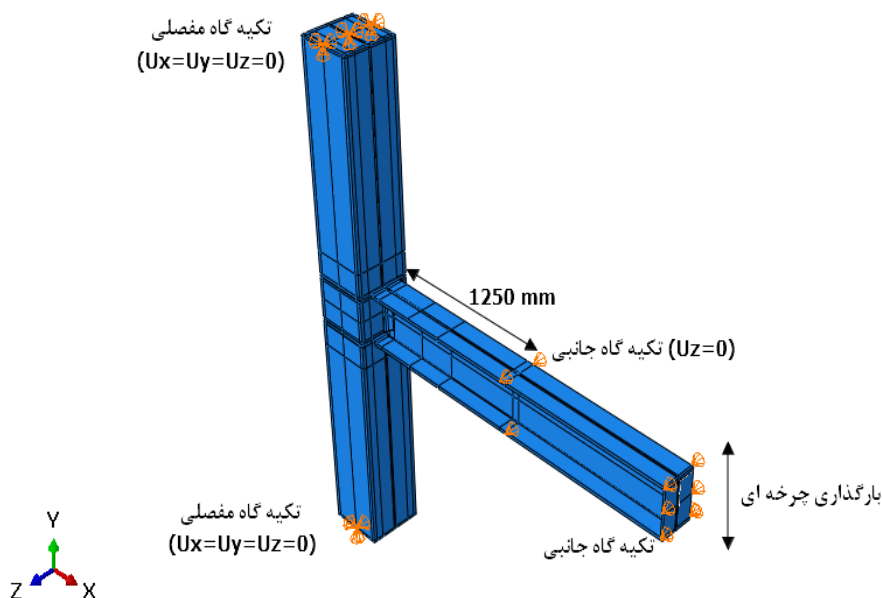
میلی‌متر است. مهار جانبی در قسمت میانی و انتهای تیر نیز تعبیه شده است. به منظور بارگذاری لرزه‌ای، جابه‌جایی چرخه‌ای دورانی مطابق پروتکل بارگذاری آیین نامه فولاد آمریکا -AISC 341-22 [14] به انتهای تیر اعمال شده است. همچنین به منظور جلوگیری از تمرکز تنش، ورق‌های صلبی در انتهای تیر و ستون تعبیه شده است. در قسمت ابتدایی و انتهایی ستون قیود مفصلی تعریف شده است (شکل ۷). سایر مشخصات مدل‌ها اعم از پارامترهای طراحی تعریض در بال‌های تیر در sp2-sp3a-sp3b، ابعاد و ضخامت سخت‌کننده قائم خارجی در اتصالات sp4 و sp5 در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد.

مشخصات مربوط به ابعاد و ضخامت سخت‌کننده قائم داخلی و ورق‌های پیوستگی افقی رایج نیز در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مقاطع فولادی مدل‌های عددی (واحد: میلی‌متر)

Table 2. Specifications of steel sections of numerical models (unit: mm)

Specimen	Box Column	I-Beam
All Specimens	400×400×25	240×300×8×20



شکل ۷. نمایی از شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌های عددی

Fig. 7. Finite element model and boundary conditions.

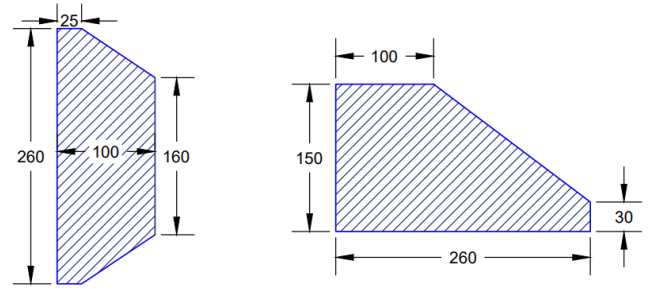
جدول ۳. ابعاد سخت‌کننده قائم داخلی و ورق‌های پیوستگی (واحد: میلی‌متر)

Table 3. Dimensions of internal vertical stiffeners and continuity plates (unit: mm)

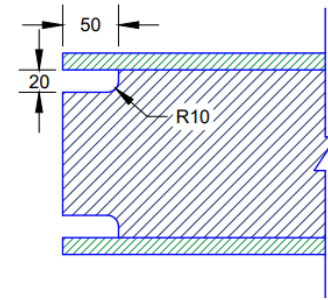
Specimen	Continuity Plate	Vertical Plate
Sp1	350×350×25	-
Sp2 to Sp5	-	640×350×25

۵-۲- کانتور تنش در مدل‌ها

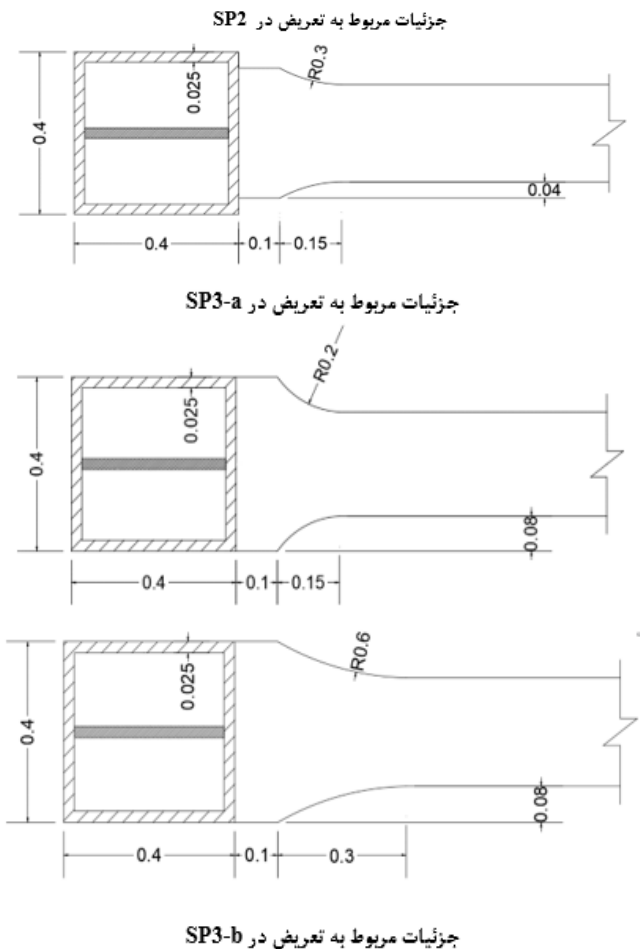
پس از تحلیل عددی مدل‌های مورد بحث در این پژوهش کانتور تنش در محل اتصال تیر به ستون حاصل شده است. در مدل SP2 تیر در نواحی انتهایی خود به تنش تسلیم خود رسیده است و وارد ناحیه پلاستیک شده است. در SP3-a تیر به صورت کامل وارد ناحیه پلاستیک شده است و عمده مفصل پلاستیک در فاصله‌ای دورتر از بر ستون به وقوع پیوسته است. بروز این موضوع با توجه به لحاظ کردن قاعده تیرضعیف- ستون قوی قابل پیش بینی بود. ستون در نواحی که در تعامل با ورق پیوستگی قائم می‌باشد، دچار تسلیم موضعی شده است. همچنین عمده تمرکز تنش در محل‌های تلاقی بال‌های تیر با جان ستون به دلیل تمرکز سختی اتفاق افتاده است. مدل SP3-b نیز به دلیل تشابه بسیار زیادی که با مدل SP3-a دارد، عملکرد مناسب و مطلوبی از خود نشان داده است. تنها تفاوت قابل بیان میان این دو مدل در توزیع کرنش پلاستیک و محل وقوع کماتش موضعی در بال‌های تیر و نواحی‌ای که در ورق پیوستگی قائم دچار تسلیم موضعی شده‌اند، می‌باشد. استفاده از سخت کننده قائم خارجی به دلیل وجود راهبردهای ذکر شده در آیین‌نامه‌های اتصالات پیش تأیید صلاحیت شده، منجر به دور شدن مفصل پلاستیک از بر ستون و ایجاد آن در ناحیه پس از سخت کننده قائم خارجی در SP4 گشته است. پس از جابه‌جایی ۰/۰۸ رادیان بال‌های تیر پس از مقطع سخت کننده دچار کماتش موضعی و جان تیر در مقاطعی دچار لهیدگی شده‌اند و پس از ۰/۰۶ رادیان افت مقاومت شدیدی را تجربه کرده‌اند. عدم هم عرض بودن بال‌های تیر با مقطع بال ستون منجر به ایجاد تمرکز تنش در نواحی تلاقی بال ستون با سخت کننده قائم شده است. همچنین کوپل نیروی برشی در جان‌های ستون پدید نیامده است و همین امر یکی از اهداف تحقیق را با مخاطره روبرو کرده است و از تمام ظرفیت باربری ستون چه از نظر خمش و برش به صورت کامل استفاده نشده است. به طور کلی مدل SP4 لزوم طرح لرزه‌ای برای قاب‌های خمشی ویژه که در محدوده حداقل جابه‌جایی ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ رادیان می‌باشند را برآورده کرده است. به منظور بهبود رفتار اتصال در مدل SP4 اقدام به ساخت مدل SP5 شده است. در این مدل از جزئیات تعریض در مدل SP3-a به انضمام جزئیات سخت کننده قائم خارجی به صورت یکپارچه در یک مدل استفاده شده است تا



مشخصات سخت کننده قائم خارجی (mm) مشخصات ورق تکی جان (mm)



مشخصات سوراخ دسترسی جوش (mm)



جزئیات مربوط به تعریض در SP3-b

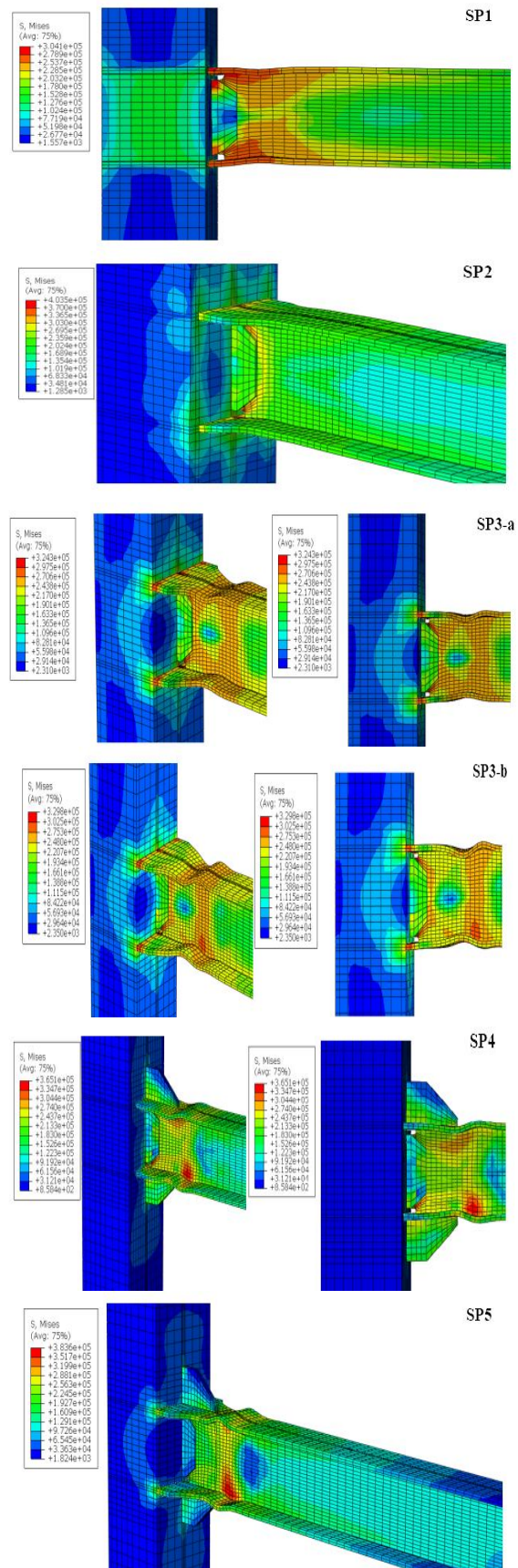
شکل ۸. سایر مشخصات مدل‌ها

Fig. 8. Other specifications of the models

از مزایای سخت‌کننده قائم خارجی در دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون و تأثیر تعریض بال‌های تیر در ایجاد مسیر انتقال بار مناسب در ناحیه چشمه اتصال به صورت هم‌زمان استفاده شود. نتیجه حاصل شده نشان می‌دهد که تیر به صورت کامل وارد ناحیه پلاستیک شده است و مفصل پلاستیک در بخش انتهایی سخت‌کننده قائم خارجی پدید آمده است. ایجاد کمناش موضعی در بال‌های تیر و میزان لهیدگی جان تیر تا حدود زیادی نسبت به SP4 کاهش پیدا کرده است. به طور کلی مدل SP5 به دلیل برخورداری از دو راهبرد طراحی اتصال رفتار خوب و مناسبی تا جابه‌جایی ۰/۰۷ رادیان از خود بروز داده است. در شکل (۹) کانتورهای تنش گزارش شده ناشی از تحلیل عددی نمونه‌ها قابل مشاهده است.

۵-۳- نمودار هیستریزس

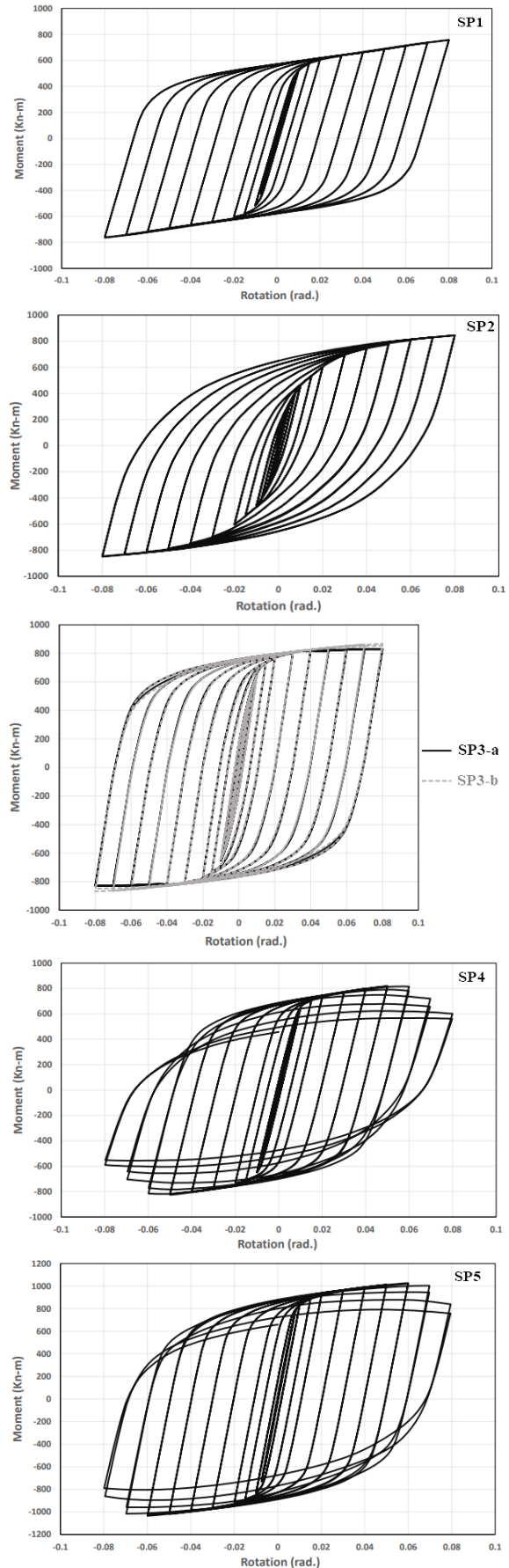
پس از تحلیل و بررسی عددی مدل‌ها اقدام به رسم نمودار هیستریزس لنگر خمشی - جابه‌جایی برای مدل‌ها شده است. در شکل (۱۰) نتایج هر مدل به تفصیل قابل مشاهده است. عدم وجود افت مقاومت شدید، تقارن بسیار مناسب میان بخش فشاری و کششی نمودار و عدم پدید آمدن باریک شدگی، نمایانگر ظرفیت جذب انرژی بالای مدل SP2 و عملکرد مطلوب آن می‌باشد. مدل‌های SP3-a و SP3-b از نظر جذب انرژی به دلیل وجود یک سطح زیر نمودار مناسب عملکرد مطلوبی از خود نشان داده‌اند. علاوه بر آن نمودار دو مدل در بیشتر نقاط با یکدیگر همپوشانی دارند. مدل SP3-b در حدود ۴٪ ظرفیت جذب انرژی بالاتری از خود نسبت به مدل SP3-a نشان داده است. تقارن محوری و عدم بروز افت مقاومت و سختی منفی در نمودار از دیگر ویژگی‌های نمودار این دو مدل است. SP4 تا بیشترین جابه‌جایی ۰/۰۶ رادیان از نظر بیشترین جذب انرژی و عدم افت مقاومت شدید و ایجاد سختی منفی رفتار و عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. اما در بازه جابه‌جایی ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ رادیان نمودار افت مقاومت شدیدی را تجربه کرده است. به طور کلی دلیل استفاده از سخت‌کننده قائم خارجی در این نمونه دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون بوده است و با توجه به ماهیت استفاده از ادواتی که موجب تقویت اتصالات خمشی می‌شوند، این امر تا حدود زیادی



شکل ۹. کانتور تنش در نمونه‌های عددی پس از جابه‌جایی ۰/۰۸ رادیان (واحد: KN/m²)
Fig 9. Stress contour in numerical samples after 0.08 radian Drift (unit: KN/m²)

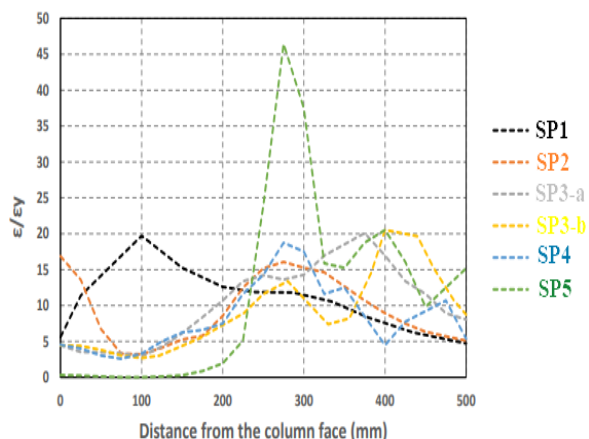
در این مدل برآورده شده است. اما به دلیل آن که عرض بال‌های تیر با عرض مقطع بال ستون برابر نیست، مسیر انتقال بار مناسبی در ناحیه چشمه اتصال پدید نیامده است و ورق پیوستگی قائم در ناحیه چشمه اتصال موفق به انتقال مناسب کوپل نیروی برشی به جان‌های ستون نشده است. همین امر موجب افت مقاومت شدید پس از جابه‌جایی $0/06$ رادیان شده است. در SP5 تا بیشترین جابه‌جایی $0/07$ رادیان هیچگونه افت مقاومتی دیده نشده است. علاوه بر آن نمودار هیستریزس حاصل شده از این مدل دارای یک سطح زیر نمودار مناسب با جذب نیروی بالا و تقارن مناسب میان بخش فشاری و کششی می‌باشد. همچنین بیشترین لنگر خمشی در بخش فشاری و کششی نمودار نسبت به مدل‌های پیشین افزایش پیدا کرده است.

بر اساس بررسی صورت گرفته SP3-a دارای بیشترین میزان جذب انرژی در مقایسه با SP1 و SP2 می‌باشد. معیار جذب انرژی میزان سطح زیر نمودار هیستریزس می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، عملکرد قابل قبول SP3-a در مقابل نمونه اتصال رایج خمشی (SP1) قابل مشاهده است (شکل ۱۱). به منظور بررسی هر چه بهتر نتایج حاصل از SP5 در ادامه اقدام به مطالعه تطبیقی نمودار هیستریزس این مدل با مدل‌های SP4 و SP3-a شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) پیداست، سطح جذب نیرو در SP5 نسبت به SP4 تا حدود زیادی افزایش پیدا کرده است. این موضوع بیانگر آن است که استفاده همزمان از دو ایده سخت‌کننده قائم خارجی و تعریض بال‌های تیر تا حدود زیادی موجب بهبود رفتار اتصال و دستیابی به عملکردی مطلوب می‌شود. همچنین از SP5 نقطه نظر جذب نیرو بسیار مناسب‌تر از SP4 عمل کرده است و حدود ۳۰ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است. SP5 تا بیشترین جابه‌جایی $0/07$ رادیان افت مقاومت شدیدی را تجربه نکرده است و تا انتهای پروسه بارگذاری از مقدار 0.8Mp بیشتر افت پیدا نکرده است. علاوه بر آن بیشترین میزان لنگر خمشی در SP5 بسیار بیشتر از SP4 می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه تطبیقی SP5 و SP3-a در شکل (۱۳) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود SP5 دارای سطح جذب نیروی بالاتری نسبت به مدل SP3-a می‌باشد.



شکل ۱۰. نمودار هیستریزس مدل‌ها حاصل تحلیل عددی

Fig. 10. FEA hysteresis diagrams



شکل ۱۵. نمودار مقایسه تطبیقی توزیع کرنش پلاستیک روی بال تیر به صورت

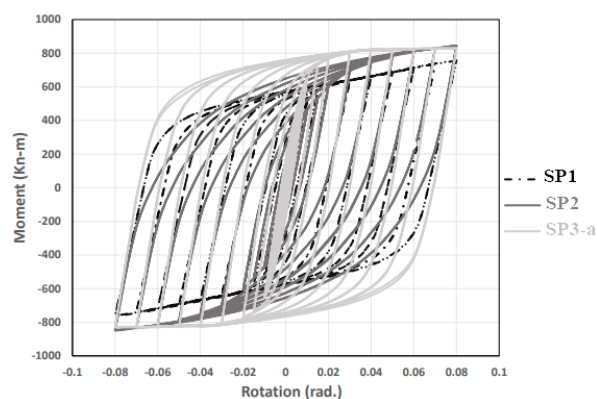
طولی در مدل‌های عددی پس از جابه‌جایی ۰/۰۸ رادیان

Fig. 15. Comparative comparison diagram of plastic strain distribution on the beam flange longitudinally in numerical models after drift of 0.08 radians

۴-۵- بررسی مدل‌های عددی از نظر توزیع کرنش پلاستیک

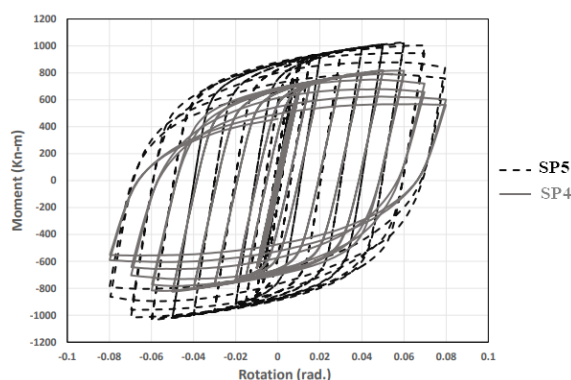
یکی از اهداف این پژوهش کفایت اتصالات پیشنهادی از نقطه نظر دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون و ایجاد آن در تیر به عنوان عضو جابه‌جایی کنترل می‌باشد. بدین منظور در این بخش به بررسی موضعی توزیع کرنش پلاستیک در اتصالات مدل‌سازی شده و مقایسه آن‌ها با مدل‌های رایج خمشی پرداخته شده است. در مدل‌های موجود برای دستیابی به یک مقایسه دقیق از مرکز بال کششی تیر خطی طولی تا فاصله‌ای مبنای بر ستون کشیده شده است و تاثیر کرنش پلاستیک در نقاط مرکزی بال تیر در فواصل گوناگون از بر ستون استخراج شده است (شکل ۱۴).

مقایسه تطبیقی نمودارهای توزیع کرنش پلاستیک حاصل از مدل‌های عددی با مدل رایج خمشی (SP1) در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده نشانگر نکته‌ای حائز اهمیت است. در SP1 در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از بر ستون مقادیر بیشترین کرنش پلاستیک به وقوع پیوسته است؛ در صورتی که در سایر مدل‌ها تا این فاصله، کرنش پلاستیک سیر نزولی داشته است و در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از بر ستون مقادیر کرنش پلاستیک افزایش پیدا کرده‌اند. SP2 تنها مدلی بوده است که در ابتدای امر سطح بالاتری از کرنش پلاستیک را نسبت به SP1 ثبت کرده است. این نتایج تأییدکننده تاثیر بالقوه استفاده از راهبردهای پیشنهادی در این تحقیق به منظور دستیابی به هدف ایجاد مفصل در تیر به عنوان عضو جابه‌جایی کنترل و جلوگیری از بروز کرنش‌های پلاستیک در بال ستون و ناحیه اتصال می‌باشد. SP5 که با حضور همزمان



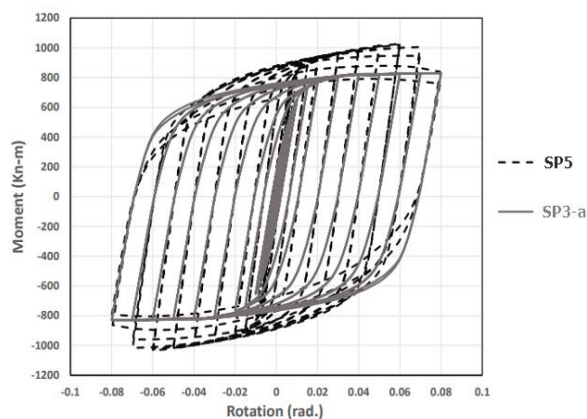
شکل ۱۱. نمودار هیستریزیس SP1, SP2 و SP3-a تا ۰/۰۸ رادیان

Fig. 11. FEA hysteresis diagram of SP1, SP2 and SP3-a in 0.08 radians



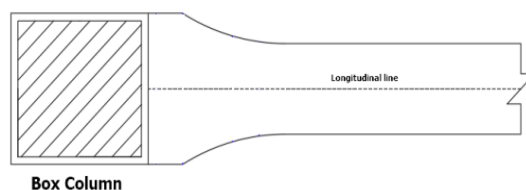
شکل ۱۲. نمودار هیستریزیس SP4 و SP5 تا ۰/۰۸ رادیان

Fig. 12. FEA hysteresis diagram of SP4 and SP5 in 0.08 radians



شکل ۱۳. نمودار هیستریزیس SP3-a و SP5 تا ۰/۰۸ رادیان

Fig. 13. FEA hysteresis diagram of SP3-a and SP5 in 0.08 radians



شکل ۱۴. نمونه‌ای از روند بررسی توزیع کرنش پلاستیک در نمونه‌های عددی

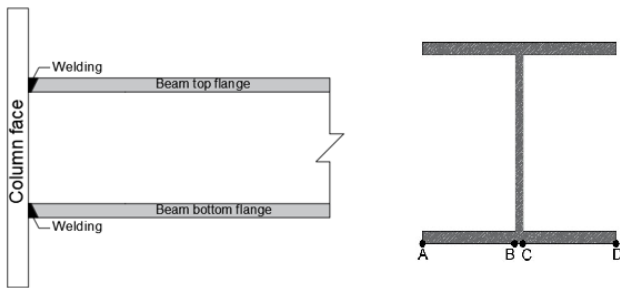
Fig. 14. An example of the process of investigating the distribution of plastic strain in numerical samples

شکل پذیر به شکست ترد در انتهای پروسه بارگذاری در قسمت‌های لبه‌ی بال تیر بسیار ناچیز است. SP5 بهترین عملکرد را در میان مدل‌های موجود داشته است. در این مدل احتمال بروز شکست ترد در انتهای پروسه بارگذاری بسیار ناچیز می‌باشد. این موضوع نیز از قبل به دلیل استفاده همزمان از سخت‌کننده قائم خارجی و تعریض بال‌های تیر و تأثیر این دو راهبرد در دور کردن مفصل پلاستیک، قابل پیش بینی بوده است (جدول ۵) و (شکل ۱۷).

جدول ۴. مشخصات مصالح جوش

Table 4. Welding material specification

Material	Fy (Mpa)	Fu (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)
Weld	525	560	0.26	12



شکل ۱۶. نماهایی از نقاط مد نظر در بررسی شاخص شکست جوش و معماری جوش مدلسازی شده

Fig.16. Views of the points considered in the examination of weld rupture index and modeled weld architecture

جدول ۵. مقادیر RI در مدل‌های عددی پس از جابه جایی ۰٫۰۸ رادیان

Table 5. RI values in numerical models after displacement of 0.08 radians

Specimen	Point	PEEQ	σ_m (MPa)	σ_{eff} (MPa)	RI
SP1	A	0.042	108.85	470.06	0.06
	B	0.256	119.05	345.95	0.43
	C	0.321	140.22	330.76	0.6
	D	0.0473	112.82	452.63	0.07
SP2	A	0.806	240.55	528.15	1.6
	B	0.42	174.43	531.55	0.68
	C	0.409	171.91	531.26	0.66
	D	0.82	237.7	528.19	1.61
SP3-a	A	0.4	119.78	519.67	0.55
	B	0.00011	144.05	130.04	0
	C	0.00005	130.06	133.72	0
	D	0.412	113.9	516.72	0.57
SP3-b	A	0.5	124.08	524.1	0.71
	B	0.0036	39.14	170.81	0.005
	C	0.0026	48.8	193.5	0.004
	D	0.53	126.68	525.03	0.76
SP4	A	0	56.31	130.6	0
	B	0.063	3.6	415.6	0.064
	C	0.46	-17.33	369.6	0.431
	D	0	69.3	190.98	0
SP5	A	0	120.781	370.45	0
	B	0	22.41	94.157	0
	C	0	18.03	90.11	0
	D	0	121.985	364.26	0

سخت‌کننده قائم خارجی و تعریض بال‌های تیر مدلسازی شد و مورد بررسی عددی قرار گرفت، مفصل پلاستیک را تا حدود زیادی از بر ستون دور کرده است و عمده‌ی مقادیر عددی کرنش پلاستیک به سبب وجود سخت‌کننده قائم خارجی در نواحی پس از اتمام آن به وقوع پیوسته است. به گونه‌ای که تنها مقادیری ناچیز از کرنش در بر ستون و بر روی بال کششی تیر مشاهده شده است.

۵-۵- بررسی شاخص شکست جوش در مدل‌های عددی

به منظور بررسی شکل‌پذیری و ارزیابی چگونگی و میزان ایجاد شکست در جوش نفوذی در ناحیه اتصال بال‌های تیر به بال ستون، در این بخش اقدام به بررسی مدل‌های عددی با معیاری تحت عنوان شاخص شکست جوش شده است رابطه (۱).

$$RI = \frac{PEEQ}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (1)$$

روند بررسی بدین صورت است که جوش نفوذی کامل در نواحی اتصال بال‌های تیر به بال ستون مدلسازی شده است و مشخصات مصالح فلز جوش به آن‌ها اختصاص داده شده است تا بهترین نتیجه به دست آید [16, 17, 18]. مشخصات فلز جوش در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد. بدیهی است با افزایش مقادیر عددی شاخص شکست جوش، نمونه‌ها در نقاط مورد نظر دچار کاهش ظرفیت شکل‌پذیری بشوند و در این نواحی در صورتی که جوش زده یا خراب باشد و تمهیدات لازم برای اجرای اصولی فرآیند جوشکاری صورت نپذیرد، دامنه و مد خرابی و شکست در این نقاط بحرانی از حالت شکست‌های شکل پذیر تبدیل به شکست‌های ترد شود (شکل ۱۶). SP2 بحرانی‌ترین نتایج را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است؛ به گونه‌ای که در بال تحتانی این مدل بیشترین میزان RI در قسمت‌های لبه‌ی بال تیر گزارش شده است. این موضوع نشانگر آن است که احتمال بروز شکست‌های ترد در جوش نفوذی در این نواحی بسیار بالاست و باید تمهیدات مربوط به عملیات جوشکاری در این مدل با حساسیت و تمرکز مناسب‌تر و بیشتری صورت پذیرد. رفتار مدل‌های SP3-a و SP3-b به علت معماری مدلسازی بسیار نزدیک این دو مدل نسبت به یکدیگر، بسیار مشابه می‌باشد. در هر دو مدل در نقاط میانی حداقل شاخص RI گزارش شده است. در نواحی لبه‌ی بال‌های تیر نیز مدل SP3-b کمی بحرانی‌تر از مدل SP3-a رفتار کرده است. در SP4 در نقاط میانی افزایش در شاخص شکست جوش مشاهده شده است و در نقاط کناری بال‌های تیر مقادیر RI برابر عدد صفر گزارش شده است. این مسئله نشانگر این موضوع می‌باشد که احتمال تغییر مدهای شکست

انجام تحلیل‌های بیشتر می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:
 ۱- اتصالات پیشنهادی دارای ظرفیت جذب انرژی بالا، زوال مقاومت و سختی پایین و عملکردی مناسب در کنار فراهم نمودن امکان اجرای آسان، سریع و بهینه می‌باشند.

۲- نمونه‌هایی که با استفاده از تعریض بال‌های تیر ساخته شده‌اند، دارای ظرفیت جذب انرژی ۱۸٪ بالاتر از نمونه‌های رایج خمشی با حضور ورق‌های پیوستگی افقی تا جابه‌جایی ۰/۰۶ رادیان، بدون ایجاد افت مقاومت شدید بوده‌اند. این درصد در نمونه‌ها با استفاده از سخت‌کننده‌های قائم خارجی در راستای جان تیر و حضور همزمان تعریض بال‌های تیر و سخت‌کننده‌های قائم خارجی در راستای جان تیر به ترتیب ۱۴٪ و ۲۸٪ بالاتر از نمونه‌های رایج خمشی گزارش شده است.

۳- در اتصالاتی که از سخت‌کننده قائم خارجی و تعریض بال‌های تیر به صورت همزمان استفاده شده است، میزان توزیع کرنش پلاستیک در جابه‌جایی بزرگ ۰/۰۸ رادیان به گونه‌ای بوده است که تا فاصله منتهی به نواحی پایانی سخت‌کننده قائم خارجی و تعریض توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه الاستیک بوده است و این موضوع نشانگر عملکرد مناسب این مدل (SP5) از این نظر می‌باشد.

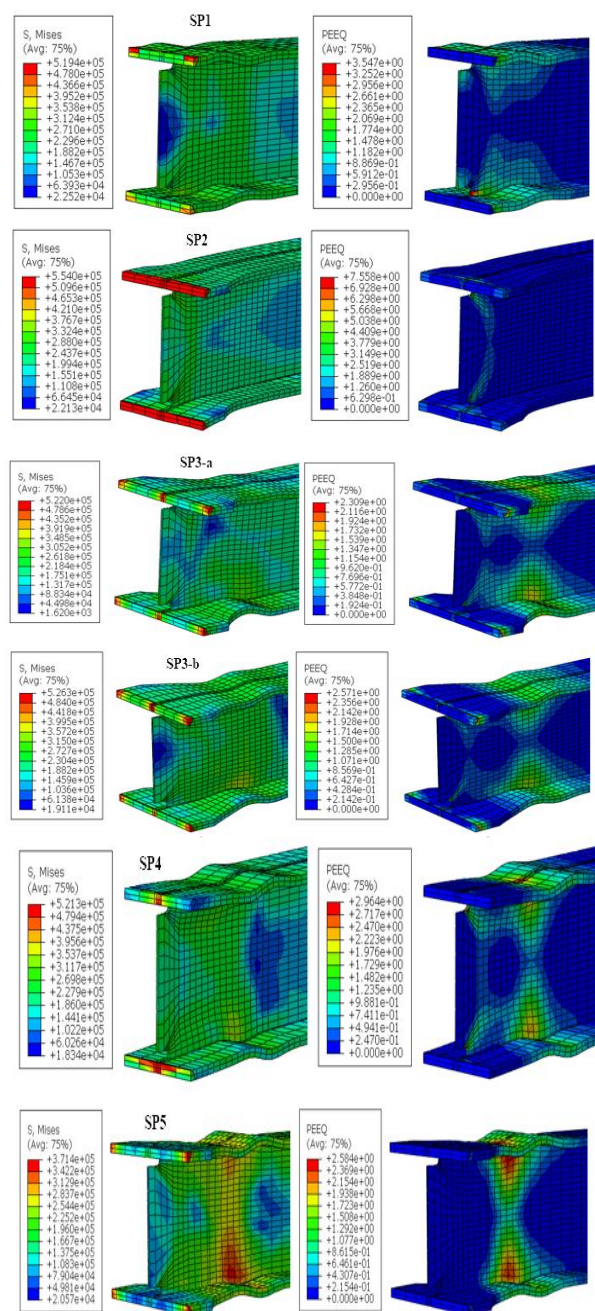
۴- کرنش پلاستیک در اتصالات پیشنهادی نسبت به نمونه‌های رایج خمشی در فاصله دورتری به وقوع پیوسته است. بدین صورت که متناسب با هندسه‌ی سخت‌کننده قائم خارجی یا المان‌های تعریض بال تیر در نواحی نزدیک به بال ستون کرنش پلاستیک روند نزولی داشته است و ماکزیمم کرنش پلاستیک در فواصل مورد انتظار پس از اتمام آن‌ها صورت گرفته است.

۵- امکان بروز شکست ترد در جوش نفوذی کامل در SP2 که تعریض بال تیر هم عرض با بال ستون نبوده است و حدود ۸۰ درصد از آن را پوشش داده است نسبت به سایر اتصالات پیشنهادی و همچنین اتصال خمشی مانند آن‌ها بحرانی‌تر بوده است.

۶- امکان بروز شکست ترد در جوش نفوذی در اتصالات با به کارگیری تعریض بال‌های تیر تنها در نواحی منتهی به لبه‌های بال تیر بحرانی بوده است (SP3-b و SP3-a).

۷- در اتصالاتی که توأم از تعریض بال‌های تیر و سخت‌کننده قائم خارجی در ناحیه اتصال تیر به ستون استفاده می‌شود، امکان بروز شکست ترد در جوش نفوذی در ناحیه اتصال بال‌های تیر به بال ستون بسیار ناچیز و به عبارتی برابر صفر بوده است.

۸- در پژوهش حاضر مدلسازی و بررسی اتصالات پیشنهادی با به



شکل ۱۷. توزیع کرنش تجمعی پلاستیک (PEEQ) و کانتور تنش در تیر و

جوش SP1 تا SP5 پس از جابه‌جایی ۰/۰۸ رادیان

Fig. 17. Distribution of Equivalent Plastic Strain (PEEQ) and stress contour in beam and weld SP1 to SP5 after displacement of 0.08 radians

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش امکان استفاده از ورق پیوستگی قائم داخلی ستون‌های باکس به منظور ایجاد چشمه اتصال بدون حضور ورق‌های پیوستگی افقی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. طبعاً حوزه اعتبار نتایج حاصل از این تحقیق در محدوده نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد و در صورت نیاز به تعمیم آن‌ها به موارد کلی نیاز به

مهندسی قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله تعارض منافع ندارند.

سهم نویسندگان

نویسنده اول ۵۱٪ و نویسنده دوم ۴۹٪ مشارکت داشته‌اند.

منابع مالی

از منابع مالی استفاده نشده است.

کارگیری سخت‌کننده‌های قائم داخلی با در ستون‌های میانی سازه (اتصال چهار تیر متعامد به وجوه ستون) مورد بررسی قرار نگرفته است. پیشنهاد می‌شود که این موضوع در تحقیقات آتی از نقطه نظر طراحی و کفایت اتصالات مورد توجه قرار گیرد. همچنین بررسی تأثیر افزایش یا کاهش عمق تیر بر روی عملکرد اتصالات نیز حائز اهمیت می‌باشد.

قدردانی نویسندگان

از حمایت معنوی دانشگاه علم و فرهنگ و دانشکده فنی

17(2), pp.579–592.

References

- [1] Popov, E.P., Yang, T.-S. and Chang, S.-P., 1998. Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake. *Engineering Structures*, 20(12), pp.1030–1038.
- [2] Lee, C.-H. and Uang, C.-M., 1997. Analytical modeling of dual panel zone in haunch repaired steel MRFs. *Journal of Structural Engineering*, 123(1), pp.20–29.
- [3] Hajjar, J.F., et al., 2003. Continuity plate detailing for steel moment-resisting connections. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*, 40(4), pp.189–212.
- [4] Mao, C., et al., 2001. Effect of local details on ductility of welded moment connections. *Journal of Structural Engineering*, 127(9), pp.1036–1044.
- [5] Saffari, H., Hedayat, A.A. and Goharrizi, N.S., 2013. Suggesting double-web I-shaped columns for omitting continuity plates in a box-shaped column. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 15(6), pp.585–603.
- [6] Saffari, H., Hedayat, A. and Soltani, G.N., 2015. New alternatives for continuity plates in I-beam to box columns connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, pp.212–223.
- [7] Jahanbakhti, E., Fanaie, N. and Rezaeian, A., 2017. Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp.180–191.
- [8] Rezaeian, A., Jahanbakhti, E. and Fanaie, N., 2020. Numerical study of panel zone in a moment connection without continuity plates. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(7), pp.3643–3661.
- [9] Rezaeifar, O. and Younesi, A., 2017. Analytical study of beam-to-HSS/CFT column connections by trapezoidal external stiffener. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), pp.579–592.
- [10] Ahmadi, M. and Mirghaderi, R., 2019. Experimental studies on through-plate moment connection for beam to HSS/CFT column. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, pp.154–170.
- [11] Najafgholipour, M., Peykari, K. and Dehghan, S., 2020. An alternative detail for continuity plates in steel beam to box-column moment-connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 167, p.105952.
- [12] Solhmirzaei, A., Tahamouli, M. and Hosseini, B., 2021. A new detail for the panel zone of beam-to-wide flange column connections with endplate. *Structures*, 34, pp.1108–1123.
- [13] Jamali, F., Hadianfard, M. and Saffari, H., 2022. Seismic behavior of through beam connection to steel box-column. *Journal of Constructional Steel Research*, 193, p.107261.
- [14] American Institute of Steel Construction (AISC), 2022. *Seismic provisions for structural steel buildings (AISC 341-22)*. Chicago: AISC.
- [15] Nia, Z.S., Ghassemieh, M. and Mazroi, A., 2013. WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 88, pp.90–108.
- [16] Ricles, J.M., et al., 2002. Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections. *Journal of Structural Engineering*, 128(7), pp.850–859.
- [17] Saneei Nia, Z., et al., 2014. Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(4), pp.717–729.
- [18] Saneei Nia, Z., Ghassemieh, M. and Mazroi, A., 2014. Panel zone evaluation of direct connection to box column subjected to bidirectional loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(11), pp.833–853.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Rajaiee, M. and Razavi Tabatabaei, A., 2027. Numerical Investigation of Removing Horizontal Continuity Plate in Beam to Column Connection in the Box Columns in Moment Resisting Frame Systems (MRFs). *Modares Civil Engineering journal*, 26(3), pp.43-57.

