

مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار چرخه‌ای اتصالات سه بعدی خمی فولادی جوشی تیر I به ستون قوطی با استفاده از دیافراگم داخلی و خارجی

فرهنگ فرجید^{۱*}، آرش محمدی فارسانی^۲

۱. استادیار و عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
۲. دانشجوی دکترا مهندسی عمران - زلزله، پژوهشکده ساختمان و مسکن، تهران

*f.farahbod@bhrc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۴
تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۲۱

چکیده

مقاله حاضر، به مطالعه تجربی و تحلیلی رفتار اتصالات سه بعدی خمی جوشی تیر I به ستون‌های قوطی شکل فولادی، تحت اثر بار محوری ثابت روی ستون، بار جانبی چرخه‌ای در یک راستای اتصال و بار تقلیل ثابت در راستای متعمد دیگر آن می‌پردازد. برای این منظور، ابتدا آزمایش‌هایی مشکل از چهار نمونه شامل دو نمونه اتصال سه بعدی میانی و دو نمونه کناری هستند. نمونه‌های میانی شامل یکی ستون قوطی سرد شکل داده شده و تیرهای متصل از چهار طرف همراه با دیافراگم خارجی، و دیگری ستون قوطی ساخته شده از ورق فولادی همراه با دیافراگم داخلی است. نمونه‌های کناری نیز مشابه نمونه‌های میانی دارای دو حالت استفاده از دیافراگم داخلی و دیافراگم خارجی هستند. در اتصالات با دیافراگم خارجی، ورق‌های پوششی فولادی مانند حلقه به دور ستون، با جوش شیاری و به بالهای تیر، با جوش گوشه متصل شده‌اند. سپس بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مدل‌های تحلیلی اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS توسعه داده شد و تأثیر سه پارامتر بار محوری ستون، ضخامت ورق ستون و ضخامت ورق‌های پوششی بر رفتار اتصال میانی با دیافراگم خارجی، به صورت تحلیلی بررسی شد. در نتایج آزمایشگاهی تمامی نمونه‌ها ملاحظه شد که رفتار لرزه‌ای نمونه‌های با دیافراگم خارجی در حالت کلی، بسیار نزدیک به نمونه‌های با دیافراگم داخلی است و با مود گسیختگی تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و دقیقاً در انتهای ورق‌های پوششی همراه می‌باشد ولی تفاوت جزئی به علت تجربه کرنش‌های کوچک‌تر از حد تسلیم در چشمی اتصال در نمونه میانی با دیافراگم خارجی در مقایسه با دیافراگم داخلی مشاهده شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی نیز هماهنگی مناسبی با نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد. در بررسی تحلیلی پارامتری مشاهده شد که هر یک از پارامترهای فوق می‌تواند مود گسیختگی و شکل پذیری سیستم را تغییر دهد به طوری که با افزایش نسبت بار محوری ستون به مقدار حدود ۰.۴۲، با وجود افزایش نسبت اتلاف انرژی، مود گسیختگی از محل تیر به ستون تغییر می‌یابد و برای نسبت‌های بیش‌تر از ۰.۵۸، به کمانش کلی ستون و گسیختگی ترد متهی خواهد شد.

واژگان کلیدی: دیافراگم خارجی و داخلی، اتصال خمی سه بعدی، ستون قوطی سرد شکل داده شده، بار جانبی چرخه‌ای.

۱- مقدمه

لرزه‌ای این اتصال نسبت به اتصالات مشابه توسط ورق‌های پیوستگی داخلی و همچنین سخت‌کننده‌های T شکل، بهتر است. زیرا در حالت استفاده از ورق پیوستگی داخلی، جوش شیاری بر ستون مستعد شکست است و در حالت استفاده از سخت‌کننده T شکل، تسلیم در جان آن یعنی در سخت‌کننده افقی مقطع T شکل، اتفاق می‌افتد که در فلسفه طراحی لرزه‌ای، شکست یا تسلیم اجزای اتصال، توصیه نمی‌شود، در حالی که در اتصال پیشنهادی آن‌ها، همه اجزای اتصال تا انتهای تاریخچه بارگذاری در محدوده رفتار الاستیک باقی مانندند. مطالعات تجربی و عددی روی اتصالات تیر فولادی I به ستون Zang و همکاران [10] به انجام رسید. مطالعه تجربی آن‌ها شامل دو نمونه اتصال میانی طراحی شده با فلسفه تیر قوی و چشمۀ اتصال ضعیف و دو نمونه اتصال خارجی طراحی شده با فلسفه تیر ضعیف و ستون قوی بود. نتایج نشان داد که نمونه‌های با مود گسیختگی تیر، توانایی اتلاف انرژی بیشتری دارند و نمونه‌های با مود گسیختگی چشمۀ اتصال، ضریب شکل‌پذیری جابجایی بیشتری دارند. Bagheri Sabbagh و همکاران [11] با انجام مطالعات عددی به بررسی دیتیل‌های مختلف برای اتصال تیر فولادی I به ستون لوله‌ای توسط دیافراگم خارجی پرداختند. آن‌ها یک جزیيات خاص برای این گونه اتصالات توسعه دادند تا ضمن برطرف نمودن مسئله اعوجاج پائل جان ستون و همچنین مسئله تمرکز تنش در دیافراگم خارجی، بتواند یک مکانیسم اتلاف انرژی چند فیوزی را نمایش دهد. Saneei Nia و همکاران [12-14] با انجام مطالعات تجربی و عددی، عملکرد اتصالات خمی مستقیم و غیر مستقیم تیر I به ستون قوطی با دیافراگم داخلی تحت بارگذاری چرخهای یک جهته و دو جهته را مورد بررسی قرار دادند و در خصوص کنترل مقاومت چشمۀ اتصال، ضابطه ستون قوی- تیر ضعیف، هندسه‌ی ورق‌های تقویتی بال و طراحی ورق‌های پیوستگی، پیشنهادهایی ارائه نمودند. Erfani و همکاران [15] یک روش جدید برای اتصال تیر I به ستون قوطی توسط تیر کوتاه انتهایی با انجام مطالعات عددی، پیشنهاد نمودند. مطالعه ادبیات فنی نشان می‌دهد که عمدۀ پژوهش‌های تجربی و عددی صورت گرفته روی نمونه‌های دو بعدی با

ستون‌های قوطی شکل، مقاطع مناسبی برای تحمل بارهای وارد شده در ساختمان‌ها به شمار می‌روند زیرا این مقاطع به دلیل تقارن حول دو محور متعامد دارای مشخصات هندسی یکسان در دو جهت هستند و از طرفی باعث سهولت اتصال تیرها در دو جهت متعامد می‌شوند. اما به دلیل این که صفحه جان تیر I با صفحات جان ستون قوطی فاصله دارد و همچنین سختی خارج از صفحه بال ستون بسیار کم است، بیشتر به دیافراگم‌های داخلی به عنوان ورق‌های پیوستگی، نیاز است. با این حال به دلیل عدم دسترسی آسان به درون مقاطع قوطی و لزوم استفاده از ورق‌های پیوستگی یا سخت‌کننده‌هایی که بتوانند وظیفه ورق‌های پیوستگی را انجام دهنند، راهکارهای مربوطه در شرایط مختلف و شناخت درست رفتار اجزای اتصال، همچنان مورد بررسی پژوهشگران است [1-15]. Ting و همکاران [1] مطالعات تحلیلی را در مورد انواع مختلف سخت‌کننده خارجی برای اتصال تیر I به ستون قوطی انجام دادند و سخت‌کننده‌های T شکل را به عنوان مؤثرترین شکل هندسی در بین انواع دیگر سخت‌کننده‌های مورد بررسی، به منظور ایجاد صلیبت کافی و توزیع مناسب تنش‌ها در وجه ستون، گزارش نمودند. Lee و همکاران [2] در ادامه پژوهش مذکور، یک روش ساده برای طراحی سخت‌کننده‌های T شکل در این گونه اتصالات ارائه نمودند و اعتبار این روش را با انجام مطالعات تجربی و عددی، تأیید نمودند. استفاده از دیافراگم خارجی، برای اتصال به مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتون، در مطالعات تحلیلی Alostaz و Schneider [3] و [4] همچنین در مطالعات تجربی Alostaz و Schneider، بررسی شد. آن‌ها نشان دادند در اتصالات بدون دیافراگم، اعوجاج‌های بزرگ جداره لوله باعث می‌شود جوش نفوذی بال و جداره لوله به طور شدیدی مستعد گسیختگی شود. از طرفی در حالت استفاده از دیافراگم خارجی، هر چه زاویه‌ی لبه دیافراگم با تیر کم‌تر باشد یا به عبارت دیگر تیر از بر ستون دورتر شود، توزیع تنش در اطراف ستون یکنواخت‌تر می‌شود. Goswami و Murty [7] با انجام مطالعات عددی روی اتصالات جوشی تیر I به ستون قوطی توسط دیافراگم خارجی همراه با سخت‌کننده‌های مختلف، نشان دادند که عموماً رفتار

این نوع اتصالات در قاب‌های خمشی فولادی متوسط و ویژه، در ساختمان‌های بلندمرتبه کشور، هنوز اتصالات فوق‌الاشاره به عنوان اتصالات از پیش تأیید شده، در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [16] ارائه نشده است. بنابراین لزوم انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی تکمیلی تمام مقیاس، به منظور امکان‌سنجی و ارزیابی عملکرد لردهای مطلوب این نوع اتصالات، امری مهم به شمار می‌رود.

شکل ۱. چگونگی ساخت اتصال با دیافراگم خارجی

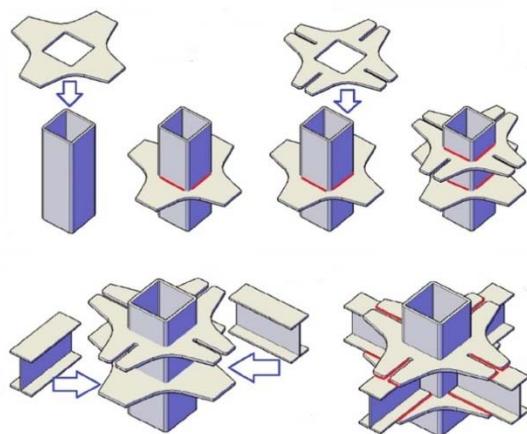


Fig. 1. Assembly of joint with external diaphragm

در این مطالعه هم‌چنین از روش اجزاء محدود با به کارگیری نرم افزار ABAQUS برای پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها و نیز درستی آزمایی نتایج آزمایش و تحلیل بهره‌گیری شده است. در انتها اثر پارامترهایی مانند: بار محوری فشاری ستون، ضخامت ورق دیافراگم، ضخامت ورق مقطع ستون، مقاومت مصالح، مورد مطالعه عددی قرار گرفته است.

۲- برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

۲-۱- نمونه‌های آزمایش

بر اساس تغییر شکل یک قاب خمشی فرضی تحت اثر بارهای جانبی که یک نقطه عطف در نزدیکی وسط دهانه تیرها و وسط ارتفاع ستون‌ها ایجاد می‌شود [10]، نمونه‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس برای اتصالات میانی و کناری به صورت محدود بین نقاط عطف و در حالت سه بعدی در نظر گرفته و ساخته شده است. مدل ساده‌ای از نمونه‌های آزمایشگاهی و چگونگی اعمال بارگذاری در شکل (۲) نشان

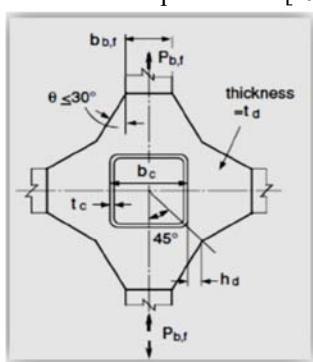
ستون‌های لوله‌ای بوده است و از طرفی این پژوهش‌ها با جزئیات استفاده از دیافراگم خارجی، بسیار محدود بوده است؛ به طوری که هم‌چنان رفتار چشمی اتصال، آثار هندسه ورق‌های پوششی، به ویژه در پیکربندی سه بعدی آن، نیازمند بررسی بیشتر است.

در این پژوهش برای اتصال جوشی تیر I به ستون قوطی فولادی سرد شکل داده شده (HSS) از ورق‌های پوششی با شکل هندسی جدید خاصی و بدون هیچ سخت کننده‌ای، به عنوان دیافراگم خارجی برای اتصالات تیر- ستون‌های فولادی میانی و کناری استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، روش اجرا به این صورت است که پس از تولید ستون قوطی سرد شکل داده شده، ورق پوششی پایینی که قبلاً به شکل هندسی مورد نظر بریده شده است، از یک انتهای ستون مانند حلقه وارد شده و در موقعیت مورد نظر خود به ستون جوش داده می‌شود. سپس تیر اصلی در محل نصب روی این دیافراگم قرار گرفته و با جوش گوش به دیافراگم خارجی تحتانی متصل می‌شود. ورق پوششی فوکانی نیز مشابه دیافراگم تحتانی از انتهای دیگر ستون وارد شده یا از قبل به صورت موقت در نزدیکی موقعیت اصلی خود قرار گرفته که پس از حضور تیر اصلی، روی بال تیر قرار گرفته و با جوش شیاری با نفوذ کامل به ستون و با جوش گوش در شکافی که به همین منظور در وسط دیافراگم خارجی فوکانی، ایجاد شده است، به بال تیر متصل می‌شود. به منظور مقایسه، اتصالات خمشی تیر I به ستون قوطی و با استفاده از ورق‌های پوششی روسربی و زیرسری جوش شده به تیر و ستون و هم‌چنین استفاده از دیافراگم داخلی به عنوان ورق پیوستگی که از نظر ابعاد تیر و ستون و ضخامت ورق‌ها کاملاً مشابه نمونه‌های با دیافراگم خارجی است، مورد آزمایش قرار گرفته است. در این حالت، ستون مورد استفاده، از نوع ساخته شده از ورق می‌باشد که در آن برای انجام جوش شیاری ورق پیوستگی به وجه چهارم ستون، ورق وجه چهارم ستون سه تکه شده است. بدیهی است که اتصال جدید با دیافراگم خارجی و استفاده از ستون قوطی سرد شکل داده شده، از نظر ساخت، بسیار سریع‌تر، کم هزینه‌تر و ساده‌تر می‌باشد. هم‌چنین ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که با وجود نیاز مبرم به

$0.75 \leq t_d/t_c \leq 2.0$ $\theta \leq 30^\circ$

و b_c ، t_c و t_d ، به ترتیب، مقدار بیرون آمدگی دیافراگم خارجی از گوشی ستون، ضخامت مقطع ستون، عرض مقطع ستون و ضخامت ورق دیافراگم است. f_{du} و f_{dy} به ترتیب تنש نهایی و تنش تسليم ورق دیافراگم بر حسب MPa و P_{bf} نیروی نهایی در بال کششی یا فشاری تیر است. در CIDECT نیروی تسليم، 0.7 برابر نیروی نهایی تعیین شده است.

Fig. 3. Geometry of external diaphragm in CIDECT and related parameters [19]



شکل ۳. هندسه دیافراگم خارجی در CIDECT و پارامترهای مربوطه [19]

مشخصات نمونه‌های آزمایش و جزئیات طراحی اتصال برای ورق‌های پوششی به ترتیب در جداول (۱) و (۲) خلاصه شده است. لازم به ذکر است که در خصوص کتربل ابعاد ورق‌های پوششی، از مقاومت خمی جان صرف‌نظر شده و ضریب کاهش مقاومت بر اساس مبحث دهم برابر واحد منظور شده است. در جدول (۳) نیز پارامترهای طراحی شامل نسبت مقاومت فشاری مورد نیاز به ظرفیت فشاری طرح ستون ($\frac{P_r}{P_c}$)، نسبت مجموع مقاومت‌های خمی اسمی ستون‌ها در بالا و پایین گره به مجموع مقاومت‌های خمی مورد انتظار تیرها در بر ستون ($\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*}$) و نسبت مقاومت برشی طراحی چشمی اتصال به مقاومت برشی مورد نیاز آن ($\frac{\emptyset V_n}{V_{up}}$) مطابق آیین‌نامه‌های AISC 360 و AISC 341 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمنان، ارائه شده است.

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب جزئیات ابعادی و اجرایی نمونه‌های اتصال سه بعدی میانی و کناری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقاطعه تیر و ستون مورد نظر در این مقاله

داده شده است. مطابق این شکل، بارگذاری در یک راستا یعنی در امتداد محور X به صورت چرخه‌ای به انتهای بالای ستون اعمال می‌شود و در راستای متعامد یعنی در امتداد محور Y، به صورت ثقلی و ثابت در طول آزمایش به انتهای آزاد تیرها وارد می‌شود. در واقع، فرض بر این است که نیروی زلزله فقط در یک راستا روی سازه اثر می‌نماید و تیرهای متعامد تنها تحت بار ثقلی ناشی از وزن کف طبقه هستند. هدف از در نظر گرفتن این نوع بارگذاری و جزئیات ساخت برای این اتصال، در نظر گرفتن شرایط واقعی اتصال و باندسه‌ی کامل آن است.

شکل ۲. مدل شماتیک نمونه‌های آزمایش و شرایط بارگذاری

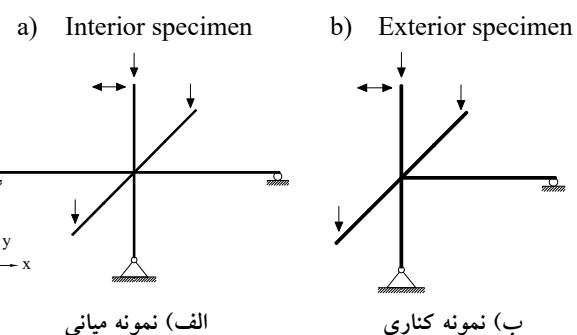


Fig. 2. Schematic model of the test specimens and loading

در طراحی اجزاء اتصال نمونه‌های با دیافراگم داخلی از ضوابط آیین‌نامه AISC 341-16 و AISC 358-16 [17,18] بهره گرفته شده است و در نمونه‌های با دیافراگم خارجی علاوه بر آیین‌نامه‌های مذکور برای تعیین ابعاد هندسی دیافراگم خارجی و مقاومت آن از آیین‌نامه CIDECT [19] استفاده شده است. به این ترتیب مقاطعه تیر و ستون شرایط فشردگی لرزه‌ای با شکل‌پذیری زیاد را ارضا می‌نمایند و نسبت مجموع ظرفیت ستون‌ها به مجموع ظرفیت تیرها در همه موارد بزرگ‌تر از یک است. در خصوص نمونه‌های با دیافراگم خارجی با توجه به شکل (۳) مقاومت نهایی اتصال از رابطه (۱) به دست آمده است [19]:

$$P_{bf} = 3.17(t_c/b_c)^{\frac{2}{3}}(t_d/b_c)^{\frac{2}{3}}((t_c + h_d)/b_c)^{\frac{1}{3}} b_c^2 f_{du} \quad (1)$$

که در آن:

$$(b_c/2 + h_d)/t_d \leq 240/\sqrt{f_{dy}}$$

$$17 \leq b_c/t_c \leq 67$$

$$0.07 \leq h_d/b_c \leq 0.4$$

ارائه شده است و برای تحلیل نتایج مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

۲-۲- شرایط مزدی و تنظیمات آزمایش

جزئیات تنظیمات نمونه‌های آزمایشگاهی برای اتصال میانی با دیافراگم خارجی در شکل (۶) نشان داده شده است. دو انتهای دور تیرها در امتداد اصلی دارای تکیه‌گاه غلتکی و پایین ستون با تکیه‌گاه مفصلی مهار شده است. همچنین بار ثقلی در دو انتهای تیرهای فرعی، به وسیله‌ی دو سبد فولادی، حاوی وزنهای فولادی، در مجموع با احتساب وزن خود سبد فولادی، به مقدار ۳۹ کیلو نیوتون برای هر طرف، به انتهای تیر فرعی نمونه وارد می‌شود. در شکل مذکور سبد پر شده با

بر اساس تحلیل و طراحی یک ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمی فولادی ویژه در دو امتداد متعامد تعیین شده است و اتصالات مورد نظر مربوط به اولین تراز طبقات است. بار محوری فشاری ستون روی تمام نمونه‌ها به صورت پیش‌تنیده پسکشیده و برابر ۵۰۰ و ۳۰۰ کیلونیوتون (معادل ۰.۱۵ و ۰.۰۹ ظرفیت فشاری طرح ستون) به ترتیب در ستون نمونه‌های اتصال میانی و کناری ایجاد شده است. تنظیمات بارگذاری فشاری ستون، برای تمام نمونه‌ها، قبل از اعمال بار جانبی انجام شده است.

لازم به ذکر است که پس از طراحی اولیه و ساخت نمونه‌ها، از مصالح مورد استفاده، نمونه‌های کششی استاندارد تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات آن‌ها در جدول (۴)

شکل ۴. جزئیات ابعادی و اجرایی نمونه‌های میانی

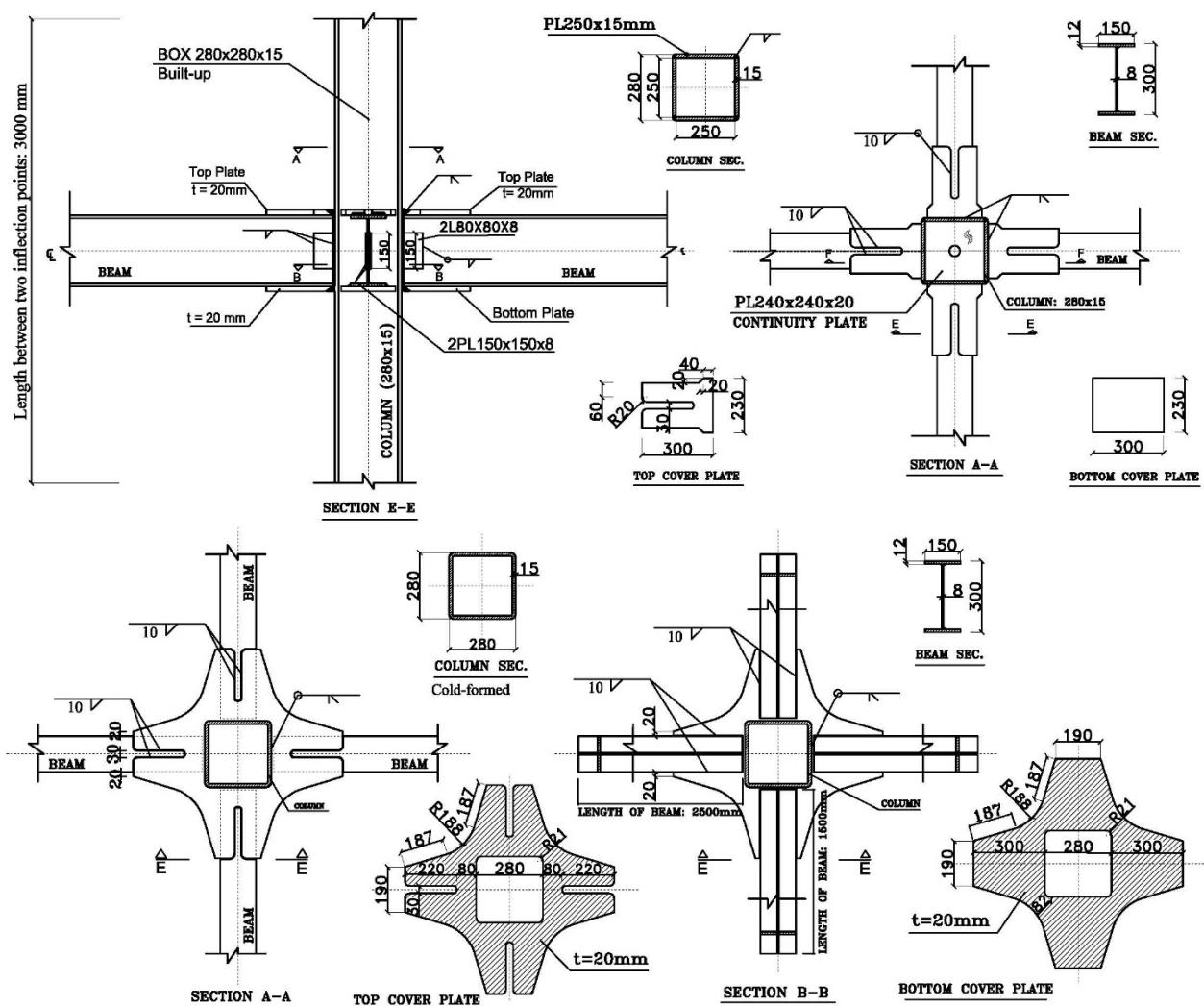


Fig. 4. Details of the interior specimens

شکل ۵. جزئیات ابعادی و اجرایی نمونه‌های کناری

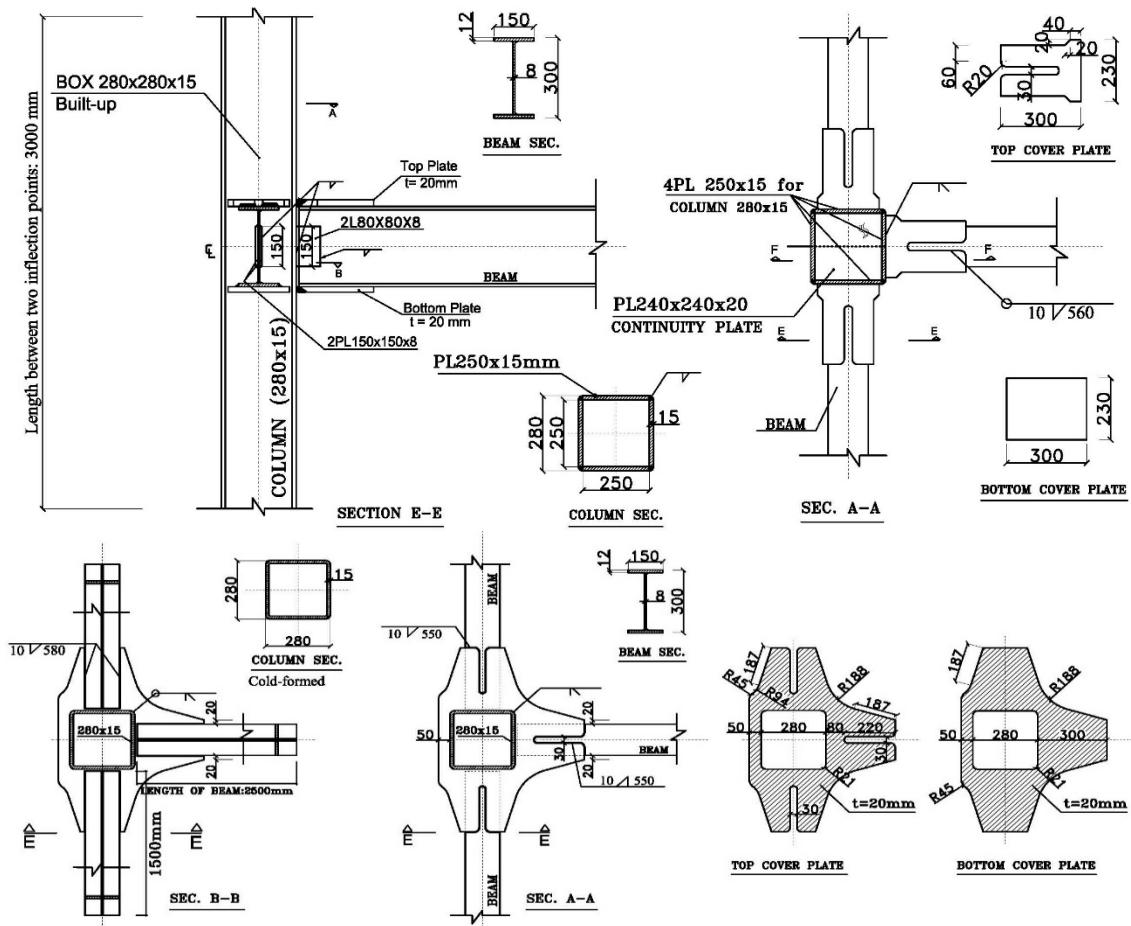


Fig. 5. Details of the exterior specimens

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

NO.	Specimen label	Type of joint	Column section	Beam section $d \times b_f \times t_w \times t_f$	Type of diaphragm	Type of column	Axial load (kN)	Expected lateral load (kN)
1	IND-1	Interior	280x15	300x150x8x12	Internal	Built-up	500	200
2	EXD-1	Interior	280x15	300x150x8x12	External	Cold-formed	500	200
3	IND-2	Exterior	280x15	300x150x8x12	Internal	Built-up	300	100
4	EXD-2	Exterior	280x15	300x150x8x12	External	Cold-formed	300	100

Table 1. Specifications of experimental specimens

جدول ۲. جزئیات طراحی برای ورق‌های پوششی بال

نمونه‌های با دیافراگم خارجی EXD									
t_c (mm)	b_c (mm)	t_d (mm)	h_d (mm)	F_{du} (MPa)	F_{dy} (MPa)	P_{bf} (kN)	P_{bfy} (kN)	h_o (mm)	M_n (kN.m)
15	280	20	40	370	240	1307.7	915	320	292.8
C_{pr}	R_y	F_y (MPa)	Z (mm ³)	M_{pr} (kN.m)	L (mm)	S_h (mm)	V_{pr} (kN)	M_{uc} (kN.m)	$\frac{M_{uc}}{\emptyset M_n}$
1.2	1.15	240	670750	222.2	5000	300	144.5	265.5	0.91

نمونه‌های با دیافراگم داخلی IND									
V_{pr} (kN)	t_p (mm)	b_p (mm)	A_g (mm ²)	F_y (MPa)	d (mm)	h_o (mm)	M_n (kN.m)	M_{uc} (kN.m)	$\frac{M_{uc}}{\emptyset M_n}$
144.5	20	190	3800	240	300	320	291.8	265.5	0.91

, $M_{uc} = M_{pr} + V_{pr}S_h$, $M_n = P_{bfy} \times h_o$ or $A_gF_y \times h_o$, $V_{pr} = \frac{2M_{pr}}{(L-2S_h)} + V_{gravity}$ $M_{pr} = C_{pr}R_yF_yZ$

Table 2. Design details for cover plates

جدول ۳. پارامترهای طراحی

NO.	Specimen label	P_{bf} (kN)	$\frac{P_r}{P_c}$	$\sum M_{pc}^*$ (kN.m)	$\sum M_{pb}^*$ (kN.m)	$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*}$	$\frac{\emptyset V_n}{\emptyset V_{up}}$ (kN)	V_{up} (kN)	$\frac{\emptyset V_n}{V_{up}}$
1	IND-1	-	0.15	660	531	1.24	1300	1460	0.89
2	EXD-1	1307.7	0.15	660	531	1.24	1300	1460	0.89
3	IND-2	-	0.09	697	265	2.63	1300	730	1.78
4	EXD-2	1307.7	0.09	697	265	2.63	1300	730	1.78

Table 3. Design parameters

جدول ۴. خصوصیات مصالح نمونه های آزمایشگاهی بر اساس تست کوپان

NO.	Components	t (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	Elongation %
1	Diaphragm	20	272	452.3	26.4
2	Box-built-up	15	276.7	438.3	27.5
3	Beam flange	12	306	382.8	27.6
4	Beam web	8	330.3	398.3	28.1
5	Box-tube	15	245	390	27

Table 4. Material properties of specimens based on coupon test

AISC 341-16 [17] است. تغییر مکان سنج ها و کرنش سنج های لازم با توجه به پروتکل SAC [20] در موقعیت های حساس برای اندازه گیری جابه جایی های انتهای فوکانی ستون، لغزش تکیه گاه ها و تغییر شکل های تیر و ستون و اجزای اتصال به کار گرفته شدند.

وزنه های فولادی و همچنین تکیه گاه جانبی تعییه شده برای تیر اصلی، در فاصله یک متری از بر ستون نشان داده شده است. همچنین فاصله محل اعمال بارهای ثقلی روی تیرهای فرعی تا مرکز ستون برابر ۱۵۰۵ میلی متر و مقدار بار محوری فشاری ستون مطابق جدول (۱) است.

شکل ۶. تنظیمات آزمایش برای اتصال نمونه میانی با دیافراگم خارجی

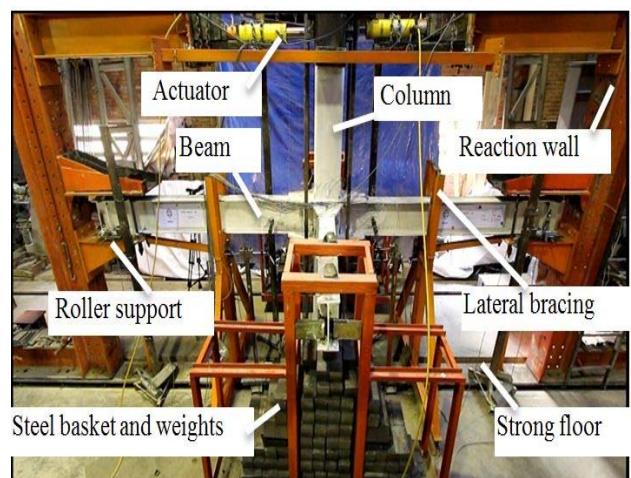


Fig. 6. Test setup for interior connection with external diaphragm

۳- نتایج آزمایش

۳-۱- مشاهدات

۳-۱-۱- اتصالات میانی

نمونه ۱ EXD-1 تا چرخش طبقه ۱٪ (تا سیکل ۲۲) رفتار الاستیک داشته و رفتار غیر خطی در آن مشاهده نشد. در چرخش طبقه ۱/۵٪ (از سیکل ۲۳) جاری شدن موضعی در بال و جان تیر و در محل انتظار تشکیل مفصل پلاستیک، یعنی درست در انتهای ورق های دیافراگم خارجی و در تیر، ایجاد شد و با افزایش میزان چرخش طبقه (افزایش بار جانبی) میزان جاری شدن نیز افزایش یافت. در نهایت پس از تحمل چرخش طبقه ۶٪ (سیکل ۳۴) آزمایش با گسیختگی بال و جان تیر متوقف شد. لازم به ذکر است که تمامی جوش ها در طول انجام آزمایش دچار گسیختگی نشدند و افت بار با گسیختگی بال تیر شروع شد. بیشینه بار جانبی تحمل شده توسط نمونه در چرخش طبقه ۶٪ برابر با ۲۳۵ kN مشاهده شد. لازم به ذکر است که چشمی اتصال این نمونه در طول

۲-۳- بارگذاری جانبی چرخه ای و اندازه گیری ها

پس از اعمال بار محوری فشاری در ستون و بارهای ثقلی در انتهای تیرهای فرعی، بار جانبی چرخه ای به انتهای بالایی ستون و در امتداد محور اصلی (محور X) اعمال شده است. تاریخچه ای این بارگذاری بر اساس پروتکل بارگذاری آین نامه

گسیختگی نامطلوب در این آزمایش‌ها رخ نداد. در نمونه EXD-2 در چرخش طبقه $1/5\%$ (از سیکل ۲۳) جاری شدن موضعی در بال و جان تیر و در محل مورد انتظار تشکیل مفصل پلاستیک ایجاد شد و با افزایش میزان چرخش طبقه

شکل ۷. تصویر نمونه EXD-1 در انتهای آزمایش در دریفت طبقه 6%



Fig. 7. EXD-1 specimen at the end of test and drift story 6%

شکل ۸ تصویر نمونه IND-1 در انتهای آزمایش در دریفت طبقه 6%

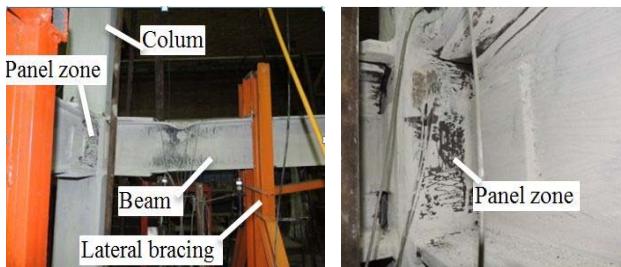


Fig. 8. IND-1 specimen at the end of test and drift story 6%

(افزایش بار جانبی) میزان جاری شدن نیز افزایش یافت. در نهایت پس از تحمل چرخش طبقه 6% (سیکل ۳۴) آزمایش به دلیل افت بار بیش از 20% درصد متوقف شد. لازم به ذکر است که تمامی جوش‌ها در طول انجام آزمایش دچار گسیختگی نشدند و افت بار با تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از کمانش‌های غیر ارتقای بال و جان تیر شروع شد. بیشینه بار جانبی تحمل شده توسط نمونه در چرخش طبقه 6% برابر با $102/4 \text{ kN}$ مشاهده شد. لازم به ذکر است که چشممه اتصال این نمونه نیز همان‌طور که انتظار می‌رفت در طول آزمایش الستیک باقی ماند و ورق‌های بالاسری و زیرسری نیز تا انتهای آزمایش وارد ناحیه‌ی غیر خطی نشدند به طوری که هماهنگ با مشاهدات آزمایش، کرنش‌های نسبتی در نواحی مقابل گوشه‌های ستون، کرنش سنج‌های نصب شده روی ورق‌های دیافراگم خارجی، کرنش‌های تا نزدیک تسلیم ورق (۱۳۳۵ میکرواسترین) را

آزمایش، الستیک باقی ماند و ورق‌های بالاسری و زیر سری نیز در انتهای آزمایش به میزان کمی وارد ناحیه غیر خطی شدند به طوری که هماهنگ با مشاهدات آزمایش کرنش‌های بزرگ‌تر از 1500 میکرواسترین (بر اساس حد کرنش الستیک از نسبت $\frac{F_y}{E}$ و با توجه به مقادیر تنش تسلیم ارائه شده در جدول (۴) جاری شدن ورق‌ها را نشان داد. مقادیر کرنش در ورق دیافراگم خارجی و در قسمت‌های ماهیچه‌ای (متصل به گوشه‌های ستون) در طول آزمایش در محدوده رفتار خطی باقی ماندند. در چرخش طبقه 6% میزان سطوح جاری شده افزایش یافت و کمانش موضعی بال تیر آغاز شد. پدیده‌های جاری شدن و کمانش موضعی در تیر و خارج از ناحیه اتصال اتفاق افتاد. با توجه به تعییه تکیه‌گاه‌های جانبی در نزدیکی محل تشکیل مفصل پلاستیک و رعایت فاصله مورد نظر آئین نامه‌ها برای فراهم نمودن شرایط اتكای جانبی کافی، پدیده کمانش پیچشی جانبی تیر در طول آزمایش، مشاهده نشد. پس آزمایش‌های انجام شده با نتایج مورد انتظار همراه بود و هیچ‌گونه گسیختگی نامطلوب در این آزمون‌ها رخ نداد.

نتایج آزمایش در مورد نمونه EXD-1 نیز به طور کلی مشابه نمونه IND-1 بود با این تفاوت که از نسبت دریفت $1/5\%$ تا انتهای آزمایش، در چشممه اتصال، به طور مشهودی جاری شدگی اتفاق افتاد. بیشینه بار جانبی تحمل شده توسط نمونه در چرخش طبقه 6% برابر با 227 kN مشاهده شد. جاری شدن چشممه اتصال، از نسبت دریفت $1/5\%$ آغاز شد و مقادیر کرنش از مرز 1500 میکرواسترین عبور نمود. در نهایت، آزمایش با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و تغییرشکل‌های بزرگ غیر ارتقای بال و جان تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک و افت مقاومت به پایان رسید.

شکل (۷) تصویر نمونه EXD-1 و شکل (۸) تصویر نمونه IND-1 را در انتهای آزمایش نشان می‌دهد.

۱-۲-۳-۱- اتصالات کناری

آزمایش‌های انجام شده در خصوص اتصالات کناری ماند اتصالات میانی، دارای نتایج مورد انتظار بود و هیچ‌گونه

می شود. همچنین منحنی های چرخه ای پایدار (بدون جمع شدگی) در همه موارد آزمایش شده، نشان دهنده قابلیت اتلاف انرژی بالای این نوع اتصالات است. همه نمونه ها از تغییر مکان جانبی نسبی طبقه ۴ درصد، بدون کاهش مقاومت، عبور نمودند که یکی از الزامات اساسی آیین نامه AISC341-16 [17] برای پذیرش اتصالات خمی ویژه است. به منظور مقایسه دقیق تر قابلیت اتلاف انرژی نمونه های آزمایش شده، از ضریب اتلاف انرژی D که مطابق شکل (۱۴) به صورت زیر تعریف می شود، استفاده شده است [10]:

$$D = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBC+ODF)}} \quad (2)$$

در جدول (۵) مقادیر این ضریب برای نمونه های آزمایش ارائه شده است. ملاحظه می شود که مقادیر ضریب اتلاف انرژی برای نمونه های با دیافراگم داخلی اندکی بیشتر از نمونه های با دیافراگم خارجی است که میزان آن حدود ۷ درصد برای اتصال میانی و حدود ۱۵ درصد برای اتصال کناری است.

شکل ۱۰. منحنی های چرخه ای اتصالات میانی

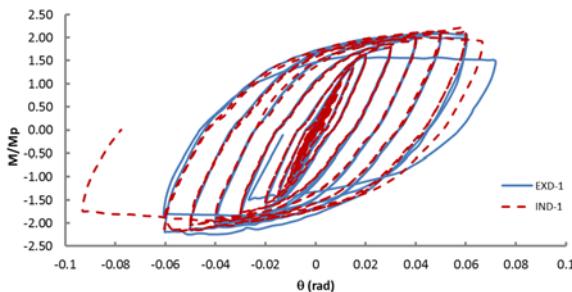


Fig. 10. Hysteretic curves of interior connections

شکل ۱۱. منحنی های پوش اتصالات میانی

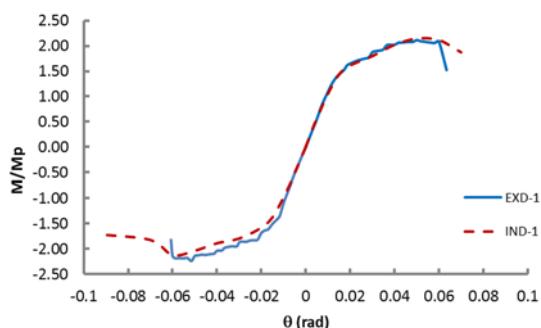


Fig. 11. Back bone curves of interior connections

نشان دادند؛ چرا که محل تمرکز تنش هستند و در این نواحی انتظار تنش ها و کرنش های بیشتری نسبت به سایر نقاط دیافراگم می رود. در نمونه IND-2 که مشاهدات آزمایش بسیار شبیه به نمونه EXD-2 بود، بیشتر بار جانبی تحمل شده توسط نمونه در چرخش طبقه ۶٪ برابر با $98/6$ kN مشاهده شد. شکل (۹) تصاویر نمونه های مذکور را در انتهای آزمایش نشان می دهد.

شکل ۹. تصویر نمونه های EXD-2 و IND-2 در انتهای آزمایش

الف) نمونه EXD-2 ب) نمونه IND-2

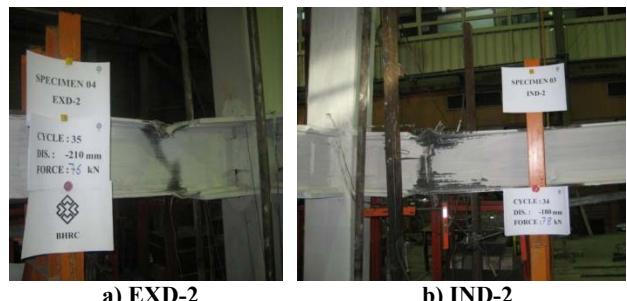


Fig. 9. IND-2 and EXD-2 specimens at the end of test

۳-۲- عملکرد لرزه ای

عملکرد لرزه ای اتصالات میانی و کناری و مقایسه نمونه های با دیافراگم داخلی و خارجی، با بررسی و تحلیل شاخص هایی مانند منحنی های چرخه ای، قابلیت اتلاف انرژی و ضریب شکل پذیری بدست آمده از منحنی های پوش، ارزیابی می شود [10]. شکل (۱۰) منحنی های چرخه ای اتصالات میانی و شکل (۱۱) منحنی پوش آنها را نشان می دهد. این منحنی ها در واقع رابطه بین نیروی جانبی در انتهای بالای ستون و جایه جایی مانند آن را نشان می دهد که در این شکل ها به صورت نسبت لنگر تحمل شده به لنگر پلاستیک تیر ($\frac{M}{M_p}$) و نسبت جایه جایی به ارتفاع ستون ($\frac{\Delta}{h}$)، نرمالیزه شده است. منظور از لنگر تحمل شده، M ، با توجه به شکل (۲) عبارت است از نیروی جانبی در انتهای بالای ستون ضرب در نصف ارتفاع ستون (۱۵۰۰ میلی متر). به همین ترتیب شکل های (۱۲ و ۱۳) منحنی های مذکور را برای اتصالات کناری نشان می دهند. با ملاحظه منحنی های چرخه ای، نزدیک بودن عملکرد نمونه های با دیافراگم داخلی و خارجی در اتصالات میانی و کناری اثبات

طی آزمایش باشد، تعیین شده است و تغییر مکان تسليم بر اساس تغییر مکان مانند اولین مقادیر کرنش عبور کرده از مرز ۱۵۳۰ میکرو استرین تعیین شده است و در نهایت ضربی شکل پذیری محاسبه و در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای اتصال میانی، این ضربی، برای نمونه با دیافراگم خارجی حدود ۱۰ درصد بیشتر از نمونه‌ی با دیافراگم داخلی است در حالی که برای اتصال کناری، این ضربی، حدود ۸ درصد کمتر نتیجه شده است.

جدول ۵. ضربی اتلاف انرژی و شکل پذیری نمونه‌های آزمایش

NO.	Specimen label	Failure mode	D	μ
1	IND-1	Beam-panel zone	2.65	7.46
2	EXD-1	Beam	2.53	8.19
3	IND-2	Beam	3.37	7.44
4	EXD-2	Beam	2.7	6.88

Table 5. Energy dissipation and ductility coefficient of specimens

۴- مدل سازی عددی

رفتار لرزه‌ای همه نمونه‌های آزمایش شامل نمونه‌های با دیافراگم داخلی و خارجی به صورت عددی شبیه‌سازی شد. نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS/standard [21] برای انجام شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. هر دو نوع ویژگی‌های غیر خطی مصالح و غیر خطی هندسی در نظر گرفته شد و برای حل معادلات غیر خطی، روش نیوتون- رافسون به کار گرفته شد. برای در نظر گرفتن پلاستیسیته مصالح فولاد، از مدل سخت شوندگی ترکیبی یعنی ترکیب سخت شوندگی ایزوتروپیک و سخت شوندگی سینماتیک همراه با معیار تسليم فن میزس و قانون جریان مرتبط، استفاده شده است. رابطه تنش- کرنش مصالح فولاد، به صورت سه خطی که در شکل (۱۵) نشان داده شده است [15]، فرض شده است و در آن مدول الاستیسیته و ضربی اتلاف انرژی پواسون به ترتیب برابر با 200 GPa و 0.3 در نظر گرفته شده است. همچنین تنش تسليم و تنش نهایی فولاد برابر مقادیر به دست آمده از آزمایش کششی، مطابق جدول (۴) لاحظ شده است اما به منظور پیش‌بینی اولیه نتایج و همچنین طراحی اولیه اتصال، به ترتیب برابر 240 MPa و 400 MPa فرض شده بود.

شکل ۱۲. منحنی‌های چرخه‌ای اتصالات کناری

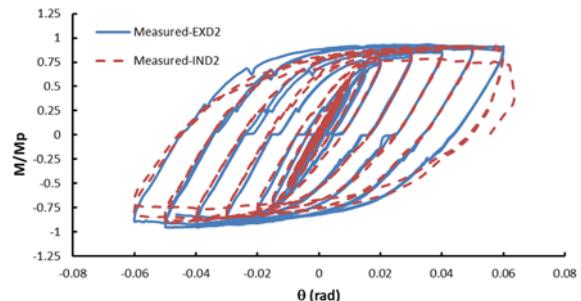


Fig. 12. Hysteretic curves of exterior connections

شکل ۱۳. منحنی‌های پوش اتصالات کناری

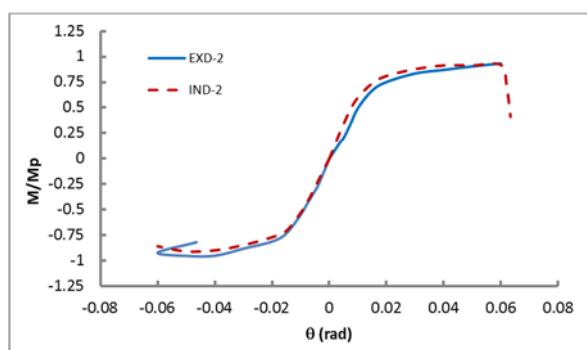


Fig. 13. Back bone curves of exterior connections

شکل ۱۴. تعریف ضربی اتلاف انرژی

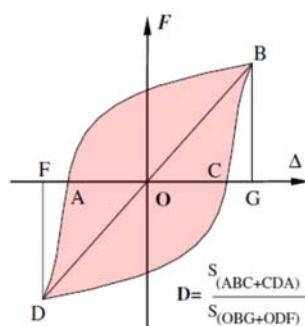


Fig. 14. Definition of energy dissipate coefficient [10]
ضربی شکل پذیری اتصال را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود [10]:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

که در آن Δ_u و Δ_y به ترتیب تغییر مکان نهایی و تغییر مکان نظیر تسليم نمونه در منحنی‌های پوش است. تغییر مکان نهایی بر اساس بیشینه مقدار مشاهده شده در آزمایش که نیروی جانبی مانند آن بیشتر از ۸۵ درصد بیشینه نیروی تحمل شده

به تعبیه‌ی تکیه‌گاه جانبی در فاصله حدود یک متری از برستون، جابجایی دو نقطه از بال تیرها (یک نقطه از بال بالای تیر و یک نقطه از بال پایین تیر) در فاصله مذکور در راستای محور y مقید شد ($U_y = 0$). لازم به ذکر است که در محل بارهای مرکز و تکیه‌گاهها و همچنین محل اعمال بار چرخه‌ای، از سخت‌کننده‌هایی در نمونه‌ی آزمایشی و در مدل‌سازی استفاده شد.

شکل ۱۶. مدل اجزاء محدود نمونه میانی با دیافراگم خارجی و شرایط مرزی و بارگذاری

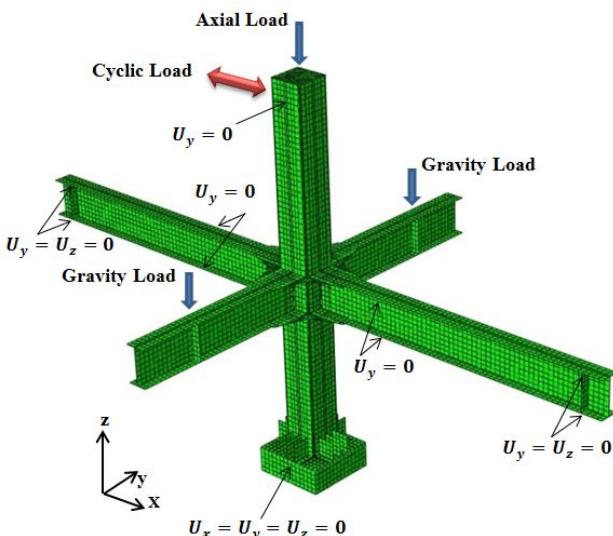


Fig. 16. Finite element model for interior specimen with external diaphragm and boundary and loading conditions

۴-۲-پیش‌بینی‌ها و اعتبار نتایج

اعتبار نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با مقایسه شاخص‌هایی مانند رفتار چرخه‌ای، مود گسیختگی و توزیع تنش‌ها و آنچه از انجام آزمایشات به دست آمده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۱۷) مقایسه‌ی رفتار چرخه‌ای نمونه‌های شامل دیافراگم خارجی را برای اتصالات میانی و کناری، با نتایج عددی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به میزان قابل قبولی، نتایج حاصل از آزمایش را پیش‌بینی نمودند. همچنین مود گسیختگی مدل‌های شبیه‌سازی شده همراه با توزیع تنش فن میزس، در شکل (۱۸) نشان داده شده است. به

شکل ۱۵. رابطه تنش-کرنش فرض شده برای مصالح فولاد

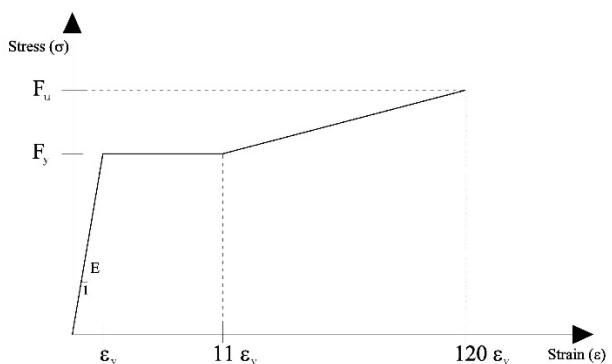


Fig. 15. Assumed stress-strain relation for steel material [15]

۴-۳-نوع المان‌ها و مش بندی

در مدل‌سازی ورق‌های فولادی تیر و ستون و اجزای اتصال از المان پوسته‌ی نازک S4R بهره‌گیری شده است. برای مدل‌سازی تماس بین سطوح و اجزای اتصال تیر به ستون و اتصال سخت‌کننده‌ها به تیر و ستون، که در محل جوش‌های نفوذی و گوشه انجام می‌پذیرد، از المان اندرکنشی Tie استفاده شده است.

بارگذاری و شرایط مرزی این مدل‌ها مطابق شرایط در نظر گرفته شده برای نمونه‌های آزمایشی در آزمایشگاه است که در شکل (۱۶) نشان داده شده است. بار محوری فشاری روی ستون به صورت یک بار گسترده معادل روی ورق صلب انتهای بالایی ستون اعمال شد. همچنین نیروهای قائم در نزدیکی انتهای تیرهای فرعی که در امتداد محور y قرار دارند، برای ایجاد ممان ناشی از بارهای ثقلی کف طبقه روی اتصال، اعمال شد. بارگذاری چرخه‌ای پس از اعمال بارهای ثقلی مذکور، در نزدیکی انتهای بالای ستون و در راستای تیرهای اصلی، یعنی در امتداد محور X اعمال شد. در انتهای پایینی ستون، جابه‌جایی دو نقطه از ورق صلب روی محور تقارن مقطع در امتداد محور y ، در هر سه راستای متعامد مقید گردید ($U_x = U_y = U_z = 0$). در انتهای بالایی ستون جابه‌جایی مرکز سطح ورق صلب، تنها در راستای محور y مقید گردید ($U_y = 0$). جابه‌جایی انتهای دور تیرهای اصلی در راستای محورهای y و Z مقید شد ($U_y = U_z = 0$). با توجه

کیلونیوتون معادل ۰.۴۲ ظرفیت طراحی ستون، که با لهیدگی جزئی در برابر ورق دیافراگم و وارد شدن چشمی اتصال به ناحیه‌ی تسليم خود همراه بوده است، دارای مقدار استهلاک انرژی بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها است.

۴-۲- ضخامت ورق ستون

با تضعیف چشمی اتصال و کاهش مقاومت برشی آن، نوع خرابی ایجاد شده در مدل‌ها و شکل توزیع تنش‌ها در محل اتصال بررسی شده است. در جدول (۷) خلاصه نتایج مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، با افزایش مقاومت چشمی اتصال، نقطه‌ی شروع مود خرابی از ستون به تیر انتقال می‌یابد. همچنین با افزایش مقاومت برشی چشمی اتصال، میزان استهلاک انرژی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است و در نمونه با ضخامت ستون ۱۵ میلی‌متر به بیشترین خود می‌رسد. در مدل با ضخامت ستون ۸ میلی‌متر، لهیدگی و کمانش موضعی مقطع ستون، خارج از ناحیه چشمی اتصال، باعث ایجاد شکست ترد شده است و در مدل‌های با ضخامت ورق ستون ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر، ناحیه چشمی اتصال کاملاً تسليم شده و مود حاکم بر خرابی است.

۴-۳- ضخامت ورق‌های پوششی

در جدول (۸) خلاصه نتایج تحلیل عددی برای اتصال میانی با دیافراگم خارجی، برای آثار تغییر در ضخامت ورق‌های پوششی، ارائه شده است. برای ضخامت ورق پوششی ۱۰ میلی‌متر، اثر مقاومت ورق پوششی و مقاومت ورق ستون با منظور نمودن مقادیر متفاوت تنش تسليم، در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که از این جدول ملاحظه می‌شود برای ضخامت‌های کوچک‌تر از ۲۰ میلی‌متر، مود گسیختگی از تیر به ستون منتقل می‌شود به جز حالتی که در آن مقادیر تنش تسليم ورق پوششی و ورق ستون، هر دو، برابر 450 MPa است. اما بیشترین مقدار اتلاف انرژی در ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای ورق پوششی به دست می‌آید که مشابه نمونه‌های آزمایش شده می‌باشد. همچنین با کم شدن ضخامت ورق‌های پوششی،

طور کلی اختلاف جزئی بین این نتایج را می‌توان به نوع المان انتخاب شده برای اجزای مقاطع، منحنی تنش- کرنش واقعی مصالح در قسمت‌های مختلف مقاطع و اثر تنش‌های پسماند نسبت داد.

۴-۳- مطالعه پارامتریک

در تمامی مدل‌های اجزاء محدود که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت، ابعاد تیر، ستون و شکل اتصال مطابق با نمونه طراحی شده تیر I شکل به ستون HSS با دیافراگم خارجی (EXD-1) است و موارد متغیر در مدل‌ها، مقدار نیروی محوری فشاری ستون، ضخامت جداره ستون و ضخامت ورق‌های پوششی اتصال است. به منظور به دست آوردن معیاری مناسب از عملکرد چرخه‌ای مدل‌های تحلیلی، شاخص‌های لرزه‌ای شامل منحنی‌های چرخه‌ای نمونه، پوش منحنی‌های چرخه‌ای، مود گسیختگی مدل تحلیلی، توزیع تنش فون میس، مقادیر ضربه شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و بیشینه نیروی جانی قابل تحمل هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه برای هر یک از تغییر پارامترها، خلاصه نتایج ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که در همه تحلیل‌های عددی، مقادیر تنش تسليم و تنش نهایی مصالح فولادی به ترتیب برابر با 240 و 400 و رابطه تنش- کرنش مطابق شکل (۱۵) در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۱- نیروی محوری فشاری ستون

خلاصه نتایج تحلیل عددی برای تأثیر نیروی محوری فشاری ستون بر عملکرد لرزه‌ای اتصال میانی با دیافراگم خارجی در جدول (۶) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش بار محوری ستون، از ۰ تا ۸۰۰ کیلونیوتون معادل ۰.۲۴ ظرفیت طراحی ستون، تغییر زیادی روی عملکرد چرخه‌ای اتصال ایجاد نشده است. با افزایش بار محوری، مود خرابی در این چند مدل، از تیر به ستون تغییر پیدا کرده است. مدل‌های با بار محوری ستون ۱۹۰۰ و ۲۳۵۰ کیلونیوتون (به ترتیب معادل 0.58 و 0.71 ظرفیت طراحی ستون)، با کمانش کلی ستون همراه بوده و دچار افت شدید در باربری و عملکرد لرزه‌ای شدند. همچنین مدل با نیروی محوری ۱۴۰۰

تنش ها به ویژه در گوشه های ستون افزایش یافته است و منجر

شکل ۱۷. مقایسه بین منحنی های چرخه ای پیش بینی شده با نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه های EXD1 و EXD2

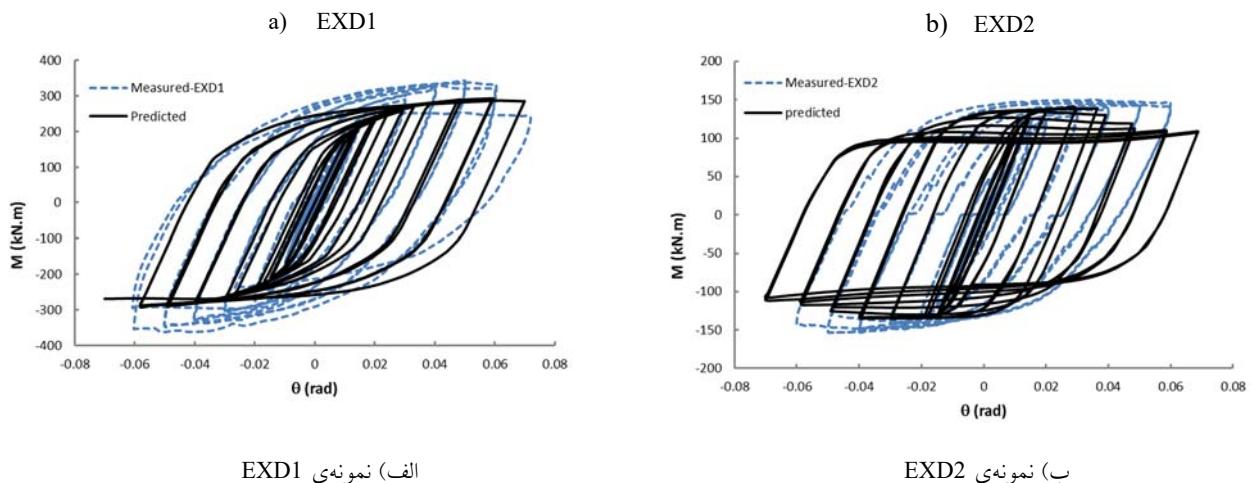


Fig. 17. Comparison between predicted hysteresis curves with test results for EXD1 and EXD2 specimens

شکل ۱۸. مود گسینختگی مدل های اجزاء محدود برای نمونه های EXD1 و EXD2

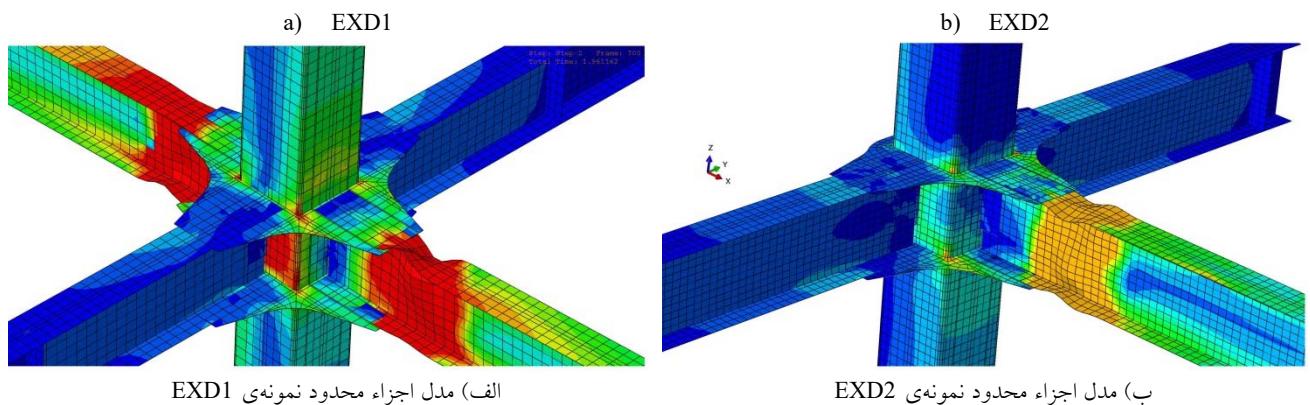


Fig. 18. Failure modes of finite element models for EXD1 and EXD2 specimens

جدول ۶. خلاصه نتایج برای نیروی محوری

NO.	Axial load (kN)	$\frac{P_r}{P_c}$	F_y (MPa)	Max. lateral load (kN)	Max. drift ratio %	Ductility coefficient	Energy dissipation (kN.m)	Failure mode
1	0	0	240	150	7	5.6	587.5	beam
2	800	0.24	240	150	7	5.5	591.7	beam
3	1400	0.42	240	160	6.5	5.4	631.5	column
4	1900	0.58	240	140	4.7	4.4	404.1	column
5	2350	0.71	240	123	3.2	2.5	205.3	column

Table 6. Summary of results for axial load

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج برای ضخامت ورق ستون

NO.	Thickness of column plate (mm)	F_y (MPa)	Max. Lateral load (kN)	Max. drift ratio %	Ductility Coefficient	Energy dissipation (kN.m)	Failure mode
1	8	240	87	5.2	4.3	256.3	column
2	10	240	110	7	6.8	427.2	column
3	12	240	130	7	6.4	487	column
4	15	240	150	7	5.6	587.5	beam

Table 7. Summary of results for thickness of column plate

جدول ۸ خلاصه‌ی نتایج برای ضخامت ورق‌های پوششی

NO.	Thickness of EXD (mm)	F_{yc} (MPa)	F_{yd} (MPa)	Max. Lateral load (kN)	Max. Drift ratio %	Ductility Coefficient	Energy dissipation (kN.m)	Failure mode
1	10	240	240	118	7	6.6	444.2	column
2	10	240	450	150	7	5.6	547.1	column
3	10	450	450	140	7	5.1	484.6	beam
4	15	240	240	150	7	6.2	541.1	column
5	20	240	240	150	7	5.6	587.5	beam

Table 8. Summary of results for thickness of cover plates

۳. به طور کلی نتایج آزمایش با نتایج پیش‌بینی شده سازگار

بود و هیچ گونه گسیختگی نامطلوبی رخ نداد. مفصل پلاستیک و دوران‌های غیرارتجاعی در تیر شکل گرفت، اجزای اتصال شامل ورق‌های پوششی و جوش‌ها در طول آزمایش الاستیک باقی ماندند و دچار گسیختگی نشدند.

۴. ناحیه‌ی چشممه‌ی اتصال در نمونه‌های با دیافراگم خارجی در مقایسه با نمونه‌های با دیافراگم داخلی، کرنش‌های کوچک‌تری را تجربه نمودند.

۵. نمونه‌های طراحی شده بر اساس روابط موجود در آینه‌نامه ۱۶-۳۴۱ AISC و CIDECT که مورد آزمایش قرار گرفتند، اعتبار روابط مذکور را برای این نوع اتصالات نیز تأیید نمودند؛ به ویژه برای کترل ابعاد ورق دیافراگم خارجی و کترول ضخامت چشممه‌ی اتصال، می‌توان مقادیر نیاز و ظرفیت را از آینه‌نامه‌های مذکور برای اطمینان تعیین نمود.

۶. نیروی محوری فشاری ستون با نسبت‌های کمتر از ۰.۲۴ ظرفیت فشاری ستون، اثر محسوسی در رفتار اتصالات نداشتند، اما با افزایش بار محوری تا حدود ۰.۴۲، با وجود دارا بودن مقادیر ضریب شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مناسب، مود خرابی از تیر به ستون انتقال یافت و برای

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۴ نمونه آزمایشگاهی تمام مقیاس از اتصالات سه بعدی خمی جوشی تیر I شکل به ستون قوطی سرد شکل داده شده با دیافراگم خارجی و همچنین به ستون قوطی ساخته شده با ورق با دیافراگم داخلی، تحت بار جانبی رفت و برگشتی در یک راستا، بار ثقلی ثابت در راستای متعامد دیگر و بار محوری ثابت روی ستون، به صورت تجربی و عددی، مطالعه شد و در ادامه، مطالعات پارامتریک در خصوص اتصالات تیر I شکل به ستون قوطی سرد نورد با دیافراگم خارجی انجام گرفت. مطالعات یاد شده نشان داد که:

۱. تفاوت رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ساخته شده با دیافراگم خارجی در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با دیافراگم داخلی، در زمینه‌های منحنی‌های چرخه‌ای، حداکثر بار جانبی قابل تحمل و مود گسیختگی، ناچیز است.

۲. تمام نمونه اتصالات آزمایش شده، معیارهای پذیرش اتصالات تیر به ستون در قابهای خمی فولادی ویژه برای شکل‌پذیری زیاد را، ارضاء نمودند به طوری که همه نمونه‌ها توансند حداقل چرخش طبقه ۰.۰۶ رادیان را بدون کاهش مقاومت کسب نمایند.

- a vertical plate passing through the column. *Engineering Structures*, 32, 2034-2048.
- [6] Han L. H. & Li W. 2010 Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab: Experiments. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1374-1386.
- [7] Goswami R. & Murty C. V. R. 2010 Externally reinforced welded I-beam-to-Box-column seismic connection. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(1), 23-30.
- [8] Li W. & Han L. H. 2011(1) Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab: Analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 127-139.
- [9] Wang W., Chen Y., Li W. & Leon R. T. 2011 Bidirectional seismic performance of steel beam to circular tubular column connections with outer diaphragm. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40, 1063-1081.
- [10] Zhang D., Gao Sh. & Gong J. 2012 Seismic behaviour of steel beam to circular CFST column assemblies with external diaphragms. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, 155-166.
- [11] Bagheri Sabbagh A., Petkovski M., Pilakoutas K. & Mirghaderi R. 2012 Experimental work on cold-formed steel element for earthquake resilient moment frame buildings. *Engineering Structures*, 42, 371-386.
- [12] Saneei Nia Z., Ghassemieh M. & Mazroi A. 2013 Panel zone evaluation of direct connection to box column subjected to bidirectional loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23, 833-853.
- [13] Saneei Nia Z., Mazroi A. & Ghassemieh M. 2014 Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate. *Journal of Constructional Steel Research*, 101, 207-223.
- [14] Saneei Nia Z., Mazroi A., Ghassemieh M. & Pezeshki H. 2014 Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(4), 717-729.
- [15] Erfani S., Asnafi A. A. & Goudarzi A. 2016 Connection of I-beam to box-column by a short stub beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 136-150.

نسبت‌های بیشتر، کاهش مقادیر مذکور ملاحظه شد به طوری که برای نسبت‌های بیشتر از 0.58 در خصوص اتصالات میانی، منجر به کمابی کلی ستون در چرخش طبقه حدود 0.025 شد.

۷. با کاهش ضخامت ورق ستون، مود خرابی در نمونه‌های با ضخامت ستون کمتر از ۱۵ میلی‌متر به ستون انتقال یافت و میزان استهلاک ارزشی نمونه‌ها نیز کاهش پیدا نمود.

۸. برای ورق‌های پوششی با ضخامت‌های کوچک‌تر از ۲۰ میلی‌متر، مود گسیختگی از تیر به ستون منتقل می‌شود به جز حالتی که در آن هر دو مقاومت ورق پوششی و ورق ستون، برابر ۴۵۰ MPa است.

۶- سیاستگذاری

این کار با حمایت مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهران و جناب آقای محمدرضا بهادرانی انجام شده است.

۷- اعلام تعارض منافع

نویسنده‌گان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافعی وجود ندارد.

۸- مراجع

- [1] Ting L. C., Shanmugam N. E. & Lee S. L. 1991 Box-column to I-beam connections with external stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 18(3), 209-226.
- [2] Lee S. L., Ting L. C. & Shanmugam N. E. 1993 Use of external T-stiffeners in box-column to I-beam connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 26, 77-98.
- [3] Alostaaz Y. M. & Schneider S. P. 1996 Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 40(2), 95-127.
- [4] Schneider S. P. & Alostaaz Y. M. 1998 Experimental behavior of connections to concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 45(3), 321-352.
- [5] Mirghaderi S. R., Torabian Sh. & Keshavarzi F. 2010 I-beam to Box-column connection by

- [19] CIDECT 2004 Design Guide 9 for Structural Hollow Section Column Connections, International Committee for the Development and Study of Tubular Structures (CIDECT), Köln.
- [20] SAC 1997 Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Specimens, SAC/BD-97/02 Version 1.1, SAC Joint Venture, Sacramento, CA.
- [21] SIMULIA 2006 Abaqus user's manual. Version 6.6, Providence, Rhode Island, USA.
- [16] Road, Housing and Urban Development Research Center. 2014 Iranian National Building Code: Design and Construction of Steel Buildings- Division 10. Tehran, Iran (In Persian).
- [17] AISC/ANSI 341 2016 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago (IL), USA.
- [18] AISC/ANSI 358 2016 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago (IL), USA.

Experimental and analytical study for evaluating the hysteresis behavior of three-dimensional welded steel moment connection of I beam to box column using inner and outer diaphragm

Farhang Farahbod^{1*}, Arash Mohammadi Farsani²

- 1- Assistant Professor of Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran
 2- Ph. D. Student of Earthquake Engineering, Institute of Building & Housing, Tehran, Iran

*f.farahbod@bhrc.ac.ir

Abstract:

The present paper focused on experimental and analytical study for evaluating the behavior of three-dimensional welded steel moment connection of I beam to box column under constant axial load on the column, cyclic loading in one direction and constant gravity load on the other orthogonal direction of the connection. Box columns are suitable sections for bearing loads on buildings because they have the same geometrical properties in two directions due to the symmetry around the two orthogonal axes and on the other hand they facilitate the joining of the orthogonal beams. However, due to the lack of easy access to the inside of the box sections and the need to use continuity plates or stiffeners that can perform the duty of continuity plates, the relevant solutions under different conditions and proper understanding of the behavior of connection components are still under investigation. In this research, first four specimens, including two internal and two external three-dimensional joints, are made and tested. The internal specimens consist of a cold-formed steel box column (HSS) and connected beams from four sides with the external diaphragm, and the other one with a built-up steel column and inner diaphragm. The external specimens are also the same as the internal samples include two types of inner and two types of the outer diaphragm. In all joints with the outer diaphragm, the steel cover plate connected to the column as a collar by groove welding and the web of beams by fillet welding. Then after, based on the experimental results, analytical finite element models are developed using ABAQUS software and the effect of three parameters such as the axial load of the column, the column steel plate thickness, and the thickness of cover plates on the behavior of internal joints with external diaphragm are studied analytically. Generally, experimental results of all specimens showed that the seismic behavior of samples with the external diaphragm is more close to the other one with the inner diaphragm and the failure mode followed by occurring plastic hinge in the beam precisely at the end of cover plate. However, there is a little bit different due to the experience of smaller strains than the yield limit of the panel zone in the internal joint specimen with the outer diaphragm compared to the inner diaphragm. The results extracted from the nonlinear analysis also illustrated suitable accuracy with the experimental results. Each of the parameters mentioned above could change the failure mode and ductility of the connection system. In other words, increasing the ratio of the axial load to the nominal capacity of the column to the value of 0.42, the failure mode transfers from beam to the column despite the growing of ratio of energy dissipation. Meanwhile, for the column bearing load ratio more than 0.58, global buckling of the column and brittle failure will happen. Moreover, by decreasing the plate thickness of the column less than 15 mm, the failure mode transfers from beam to column and the energy dissipation of the specimens reduces. Also, for cover plates, less than 20 mm thick, the mode of failure will take place in the column.

Keywords: Outer and inner diaphragm, three-dimensional moment connection, cold steel column (HSS), cyclic lateral load.