

بررسی آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ای اتصال خمشی نوین T شکل تیر فولادی به ستون فولادی پر شده با بتن (CFT)

حمید محمدی گرفمی^۱، امید رضائی‌فر^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، rezayfar@semnan.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸)

چکیده

المان‌های T شکل به دلیل مزایای زیادی که دارند، از جهت سهولت اجرا، صرفه اقتصادی و شکل‌پذیری مناسب یکی از پرکاربردترین المان‌های اتصال تیر به ستون می‌باشد. استفاده از بولت‌های میان‌گذر برای برقراری اتصال بین بال سپری و بال ستون متداول است. اما انتقال مستقیم تنش‌ها به بدنه ستون، باعث تضعیف عملکرد پیچ‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌شود. به همین جهت در این پژوهش در اقدامی نوآورانه از دیافراگم خارجی ستون به همراه بولت‌های میان‌گذر استفاده گردید و عملکرد مشترک و توأمان آن‌ها بر روی عملکرد اتصال مورد بررسی قرار گرفت. بر مبنای نمونه‌های صحت‌سنجی شده در نرم افزار آباکوس، دو نمونه اتصال با بولت میان‌گذر با و بدون دیافراگم خارجی طراحی و ساخته شدند سپس عملکرد آنها در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که عملکرد کلی هر دو اتصال کاملاً مطلوب بوده و ضوابط پذیرش اتصالات صلب را بر مبنای آیین‌نامه‌های AISC و FEMA را به خوبی می‌گذرانند و می‌توانند به عنوان یک اتصال صلب در قاب‌های خمشی ویژه استفاده شوند. هر دو نمونه آزمایشگاهی بدون زوال مقاومت به دوران نسبی ۰/۰۶ رادیان دست یافتند. شکست نهایی در نمونه فاقد دیافراگم خارجی در سیکل نخست دوران نسبی ۰/۰۷ رادیان با جداشدگی مهره از بولت‌های میان‌گذر اتفاق افتاد در حالی که این موضوع در نمونه دارای دیافراگم خارجی به صورت شکل‌پذیر و همراه با تغییر شکل در بال و جان تیر رخ داد.

واژگان کلیدی

اتصال خمشی تیر به ستون، ستون مرکب CFT، اتصال T شکل، بولت میان‌گذر، دیافراگم خارجی

The experimental study of the cyclic behavior of a new T-shaped bending connection of steel beam to steel column filled with concrete (CFT)

H.M. Garfamy, O. Rezayfar

Abstract

T-shaped elements are widely used in many beam-column connections due to the abundant advantages, such as ease of implementation, economic efficiency, and appropriate ductility. The through bolts were utilized to connect the Tee profile to the column flange. However, the direct transfer of stresses to the body of the column decreases the performance of bolts under the cyclic loads. Therefore, in an innovative effort, the external diaphragm of the column with the through bolt was used to evaluate the combine effect of them on the connection performance. Based on the validated models in ABAQUS software, two samples were designed and assembled with and without the external diaphragm and the performance of them was evaluated in the laboratory. The results indicated that the overall performance of both connections were quite well and they passed the acceptance criteria according to AISC and FEMA codes and can be used in the special moment resisting frames as fully restraint connections. Both experimental specimens achieved a relative rotation of 0.06 radians without strength degradation. The final failure in the specimen without the external diaphragm occurred in the first cycle of the 0.07 relative rotations with the separation of the nut from the through bolts, while this issue in the specimen with an external diaphragm is ductile and deformable in the flange and the web of beam.

Keywords

Beam-to-column flexural connection, CFT composite column, T-shaped connection, Through bolt, External diaphragm

ستون‌های مرکب پرشده با بتن (CFT) از ترکیب بتن و فولاد تشکیل شده و مزایای هر دو را دارا هستند. این ستون‌ها به علت وجود جداره پیوسته فولادی نیازی به قالب‌بندی ندارند.

ستون پرشده با بتن می‌تواند خصوصیتی از جمله مقاومت، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی بالا را فراهم نماید [۱]. ستون فولادی پر شده با بتن علاوه بر افزایش قابل‌توجه ویژگی‌های سازه‌ای، می‌تواند زمان ساخت را نیز به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهد [۲].

اگرچه ستون‌های قوطی شکل پر شده با بتن نسبت به ستون‌های با مقطع تو خالی معمولی از عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری برخوردار هستند اما از طرفی در این نوع ستون‌ها به علت وجود بتن در مقطع اجرای ورق پیوستگی امکان‌پذیر نیست. بنابراین در اتصالات صلب تیر فولادی به ستون مختلط ضعف در چشمه اتصال مشاهده می‌شود [۳]. در مناطق با لرزه‌خیزی بالا استفاده از اتصال تیر به جداره ستون بدون سخت‌کننده و با جوش توصیه نمی‌شود. بنابراین در اتصال تیر فولادی به ستون مرکب پرشده با بتن می‌باشد اجرای جزئیات مناسبی که موجب کاهش اعوجاج و کرنش‌های بزرگ در بال ستون شود ضروری است [۴]. Kanatani و همکارانش به منظور ارزیابی تغییر شکل‌های خارج از صفحه اتصالات و از بین بردن مشکلات در زمینه جوشکاری، بولت‌های عبوری اتصال خمشی را به‌عنوان جایگزینی برای دیافراگم به کار بردند [۵]. Sheet و همکارانش به بررسی رفتار اتصال با بولت عبوری از ستون و همچنین ترکیب بولت و مقطع تیر عبوری از ستون پرداختند [۶]. المان‌های T شکل یکی از مهم‌ترین اجزای اتصالات تیر به ستون فولادی می‌باشد که به علت مزایایی همچون سهولت در فرآیند ساخت، حمل و نصب و شکل‌پذیری مناسب، اقتصادی و مقاوم بودن بسیار کاربردی می‌باشد. پیچ کردن بال سپری به بال ستون در ستون‌های قوطی شکل یکی از مشکلات این اتصال عنوان می‌شود. به همین دلیل در این پژوهش به‌صورت نوآورانه از بولت‌های میان‌گذر برای اتصال بال سپری به بال ستون استفاده شده است.

هدف از انجام این پژوهش معرفی و ارائه دو اتصال صلب اقتصادی و مقاوم به‌منظور بهره‌مندی در سازه‌های متشکل از ستون‌های فولادی پرشده با بتن می‌باشد که علاوه بر حل چالش‌ها و معضلات موجود و احراز ضوابط فنی آیین‌نامه‌های مربوطه، موجب تسهیل و تسریع فرآیند اجرا گردد.

اثر میزان تراکم و فشردگی بتن روی مقاومت فشاری ستون‌های CFT را Han و Yao بررسی کردند [۷]. تحقیقات Dundu روی ستون‌های CFT با تکیه‌گاه‌های ساده نشان داد که ستون‌های لاغر با کماتش سرتاسری همراه با کماتش موضعی کوچک در وسط ستون خراب می‌شوند، اما ستون‌های کوتاه با له شدن بتن همراه با تسلیم لوله فولادی گسیخته می‌شوند.

Johansson, Susantha و Hatzigeorgiou مدل‌های تحلیلی برای ستون CFT ارائه نمودند که قادر به پیش‌بینی مقاومت محوری ستون‌های CFT کوتاه با دقت مناسب می‌باشند [۸-۱۰]. De Oliveira و همکارانش با استفاده از این مدل‌ها اثر محصورشدگی روی ستون‌های CFT را مورد بررسی قرار دادند. در آزمایش‌های دی اولیورا و همکارانش مدهای شکست مختلفی مشاهده گردید که تابعی از نسبت طول به قطر، نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی و مقاومت فشاری بتن می‌باشد [۱۱].

Chung و همکارانش، به ارزیابی اعضای CFT با مقاومت بالا تحت بار خارج از مرکز پرداخته‌اند. در تحلیل آن‌ها از فولاد پر مقاومت و بتن پر مقاومت استفاده شده است [۱۲]. Ricles و همکارانش [۱۳] نیز تحقیقاتی را بر روی رفتار چشمه‌اتصال ستون‌های CFT انجام دادند. تحقیقات آن‌ها شامل آزمایش بر روی ۱۰ نمونه اتصال خمشی با ابعاد واقعی تحت بار زلزله بود. هر نمونه اتصال تیر بال پهن به ستون جعبه‌ای با جزئیات متفاوتی بود. در این نمونه‌ها اثر تلف‌شدن انرژی در چشمه‌اتصال نیز بررسی شده است. همچنین مشخص گردید با استفاده از دیافراگم داخلی می‌توان چشمه اتصال را سخت‌تر کرد اما این کار باعث ایجاد تمرکز کرنش در محل سوراخ دسترسی جوش و شکست جوش می‌شود.

تحقیقات دیگر بر روی سخت‌کننده‌ها، نشان داد که اتصالات با دیافراگم خارجی مقاومت کافی و شکل‌پذیری مناسبی دارند [۱۴]. بر اساس این تحقیقات ابعاد سخت‌کننده خارجی بر ظرفیت تغییر شکل و استهلاک انرژی در این اتصالات تأثیر زیادی دارد. با افزایش نسبت بارمحوری، تغییر شکل‌های نهایی و استهلاک انرژی تجمعی اتصال کمی کاهش می‌یابد همچنین در مدل‌های کای و همکارانش از بولت فولادی جهت افزایش مقاومت برشی و درگیر کردن بتن با جداره فولادی ستون پرشده با بتن استفاده می‌شود.

Ricles و همکارانش در سال ۲۰۰۴ رفتار لرزه‌ای اتصالات خمشی بین تیرهای I شکل و ستون CFT را از طریق

آزمایشگاهی تحت بار چرخه‌ای بررسی نمودند. نتایج آزمایشات نشان داد که نمونه‌های شامل اتصالات جوشی با دیافراگم‌های بیرونی و داخلی و سپری‌های پیچ شده دارای مقاومت، سختی و انعطاف‌پذیری استثنایی هستند. بهترین عملکرد در نمونه‌های جوشی و پیچی زمانی است، که اتصال به گونه‌ای باشد که تمرکز تنش به حداقل برسد و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل گردد [۱۳].

Koester و همکارانش [۱۵] تحقیقی را در ارتباط با تعیین مکانیزم انتقال نیرو و مدهای شکست اتصال خمشی سپری پیچ شده که جزئیات آن توسط رایکل و همکارانش داده شده بود، انجام دادند و مشاهده شد که گسیختگی شامل ترکیب شکست برشی چشمه اتصال و لهیدگی موضعی در محل عکس‌العمل نیروی وارده در جداره فولاد بود. سپس مدل‌ها و فرمول‌های جدید برای محاسبه برش چشمه اتصال توسعه داده شد.

تحقیقات در مورد اتصال ستون CFT در فاز سوم در سال ۲۰۰۰ افزایش یافت، وقتی که محققان بر توسعه اتصالات مختلف متمرکز شدند. بعد از آن تحقیقات جامع بر روی رفتار و عملکرد انواع جدید اتصالات ستون‌های CFT تحت بارگذاری ثابت و چرخه‌ای توسط محققان زیادی انجام شد [۱۶].

اگرچه جزئیات مختلفی برای اتصال صلب تیر به ستون مرکب پر شده با بتن معرفی شده است؛ اما اکثر آن‌ها هنوز به صورت تئوری بوده و تا رسیدن به حالت عملی و اجرایی فاصله زیادی دارند. برای مثال کین و همکارانش مطالعاتی آزمایشگاهی روی مدل‌هایی با مقیاس واقعی با دیافراگم میانی انجام دادند. با توجه به نتایج تحقیقات کین و همکارانش، اتصال با دیافراگم عبوری شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی قابل‌قبولی تحت بار لرزه‌ای از خود نشان می‌دهد.

Hu و همکارانش در سال ۲۰۱۱ کاربرد روش هوش مصنوعی را در اتصالات ستون‌های فولادی پر شده با بتن در قاب‌های خمشی مرکب مطالعه نمودند [۱۷]. این اتصالات ابداعی با استفاده از میلگردهای کششی با خصوصیات الاستیک و ظرفیت استهلاک انرژی بالا کاربرد دارد. مدل‌سازی ساده مطابق با شکل واقعی اتصال برای رسیدن به فرمول استفاده شد و مشاهده شد که قاب‌ها با اتصالات مرکب عملکرد بسیار خوبی دارند [۱۷].

سخت‌کننده خارجی (اتصال یقه‌ای) یکی از مناسب‌ترین نوع سخت‌کننده‌ها برای توسعه داخل کشور است. زیرا اجرای آن راحت‌تر و ارزان‌تر است. نتایج کارهای آزمایشگاهی و

عددی رفتار خوب اینگونه اتصالات را نشان می‌دهد. اتصالات با سپری پیچ شده رفتار لرزه‌ای مناسبی داشته و دارای مقاومت، سختی و انعطاف‌پذیری استثنایی هستند اما با مشکل گسیختگی شامل ترکیب شکست برشی چشمه اتصال و کماتش موضعی بال‌های ستون و لهیدگی موضعی در محل عکس‌العمل نیروهای وارده در جداره فولاد مواجه هستند. همچنین در صورت استفاده از این اتصال در ستون‌های جعبه‌ای پر شده با بتن به همراه بولت‌های میان‌گذر، مشکلات دیگری از قبیل شکست در مکان سوراخ‌ها در جابه‌جایی‌های بالا، تغییر طول نسبی بولت‌های عبوری تحت بارهای چرخه‌ای و کاهش سطح عملکرد آن‌ها و نیز تراکم بالای محصول قطر بولت‌های میان‌گذر به‌ویژه در اتصالات چهارطرفه به‌عنوان سدی برای عبور بتن از ناحیه اتصال بوجود خواهد آمد. به‌منظور حل این مشکلات استفاده از دیافراگم‌های خارجی و اتصال آن‌ها به سپری‌ها می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب مطرح باشد. بدین ترتیب می‌توان از مزایای دیافراگم‌های خارجی شامل مقاومت کافی، شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسب در ترکیب با اتصالات سپری به همراه بولت‌های میان‌گذر بهره برد و مشکلات مطرح‌شده را برطرف نمود. دیافراگم‌های خارجی بر خلاف سپری‌ها که نیروها را مستقیماً به جداره ستون وارد می‌کنند، نیروهای بال تیر را پیرامون مقطع ستون پخش کرده و مانع از تغییر شکل‌های بزرگ در مقطع ستون نسبت به اتصال با سپری می‌شوند. این در حالیست که ترکیب این دو با هم می‌تواند مشکلات اتصالاتی که صرفاً دارای دیافراگم خارجی هستند شامل اشغال فضای اطراف محل اتصال و ایجاد مشکل در هنگام اجرای دیوارهای پیرامونی، نمای ساختمان و همچنین اجرای آسانسور در چاله‌های آن‌ها، گسیختگی جوش دیافراگم به بال تیر در تغییرشکل‌های بالا و گسترش آن به بال و جداره ستون به خصوص در نواحی تحت تأثیر گرمای بالای جوش، کماتش موضعی دیافراگم خارجی، کاهش شدید سختی مماسی پس از محدوده الاستیک و درنهایت تسلیم شدید آن‌ها را نیز به خوبی مرتفع نماید و به‌نوعی این دو می‌توانند پشتیبان یکدیگر باشند. به گونه‌ای که در صورت افت مقاومت در یکی، دیگری جبران نماید. نیز ضمن عملکرد مشترک مطلوب، قطر بولت‌های میان‌گذر و ابعاد دیافراگم‌های خارجی و یا مشخصه‌های مقاومتی آن‌ها در یک اتصال ترکیبی کاهش می‌یابد و حتی بسته به نیاز می‌توان در طراحی از قطر بولت‌ها یا ابعاد دیافراگم‌های خارجی و به طور کلی ظرفیت مقاومتی یکی در یک بازه معین کاست و بر دیگری افزود. این راهکار به‌منظور مقاوم‌سازی و یا بهسازی

چشمه اتصال قوی در نظر گرفته شده است.

۲-۲ طراحی سپری‌ها، بولت‌های میان‌گذر و دیافراگم خارجی

در این مطالعه با توجه به تحقیقات انجام‌شده روند طراحی بر اساس آیین‌نامه‌های (AISC 358(2016) (اتصالات پیش‌پذیرفته برای قاب‌های خمشی فولادی متوسط و ویژه در کاربردهای لرزه‌ای) [۱۸]، مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی) [۱۹] و کتاب طراحی اتصالات به روش حالات حدی (LRFD) صورت گرفته است [۲۰]. با توجه به روند و روابط کنترلی، محاسبات طراحی سپری‌ها، بولت‌های میان‌گذر و دیافراگم خارجی به صورت ذیل می‌باشد:

اتصال خمشی تیر UB ۲۰۳×۱۳۳×۸×۶ میلی‌متر به ستون BOX ۲۰۰×۲۰۰×۶ میلی‌متر پر شده با بتن به مقاومت فشاری ۴۷ مگاپاسکال مطلوب می‌باشد. اطلاعات هندسی و مشخصات تیر و ستون در جداول (۱) و (۲) به ترتیب ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات هندسی و مشخصات تیر

تیر	PG. 1		
	پارامتر	توصیف	واحد
d_b	عمق تیر	cm	۲۱/۹
h_w	ارتفاع جان تیر	cm	۲۰/۳
b_f	عرض بال تیر	cm	۱۳/۳
t_f	ضخامت بال تیر	cm	۰/۸
t_w	ضخامت جان تیر	cm	۰/۶
I_b	ممان اینرسی مقطع تیر	cm ⁴	۲۷۸۹
S_b	اساس مقطع تیر	cm ³	۲۵۵
Z_b	مدول پلاستیک مقطع تیر	cm ³	۲۸۶
F_{ymin}	تنش تسلیم فولاد	kg/cm ²	۲۸۱۰
F_{umin}	تنش نهایی فولاد	kg/cm ²	۳۶۹۰
F_{ue}	تنش نهایی فلز الکتروود E70	kg/cm ²	۴۹۰۰
M_u	حداکثر لنگر خمشی تیر	t.m	۷/۲۳
$C_u = T_u$	نیروی کششی و فشاری از طرف تیر به سپری	kg	۳۳۰۱۴

خلاصه نتایج طراحی سپری‌ها و بولت‌های میان‌گذر و ضخامت ورق دیافراگم خارجی در جدول (۳) نشان داده شده است. نمای کلی اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است.



لرزه‌ای ساختمان‌های موجود که دارای اتصالات سپری بولت‌های میان‌گذر می‌باشند نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در بخش دوم روند طراحی اتصالات پیشنهادی ارائه شده است. بخش سوم به روند ساخت نمونه‌ها می‌پردازد و سپس در بخش چهارم پیکربندی آزمایش توضیح داده می‌شود. در بخش‌های پنجم و ششم نیز به ترتیب نتایج حاصل از آزمایش و مقایسه آنها با نتایج حاصل از آنالیز تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- طرح نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه ابعاد تیر و ستون در هر دو نمونه ثابت در نظر گرفته شده است. اتصال بالا و پایین ستون به صورت مفصلی می‌باشد. بولت‌های میان‌گذر و دیافراگم‌های خارجی برای انتقال نیرو از تیر به ستون و مرتفع کردن نیاز به ورق پیوستگی در نظر گرفته شده اند. ابعاد سپری‌ها و قطر بولت‌ها در هر دو نمونه ثابت می‌باشد. نمونه دوم که در آن دیافراگم خارجی به مجموعه اتصال اضافه گردیده است، اتصال پیشنهادی است که در آن دیافراگم خارجی به سپری‌ها به صورت افقی اضافه گردیده است. نمونه نخست نیز اتصال سپری با بولت‌های میان‌گذر و به منظور مقایسه می‌باشد.

۲-۱-۲ طراحی و کنترل طراحی نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه‌ها

روند طراحی نمونه‌ها بر اساس موارد ذیل است:

۲-۱-۲-۱ کنترل فشردگی لرزه‌ای

بال و جان تیر و ستون باید از نظر فشردگی لرزه‌ای کنترل گردند. با توجه به این‌که تیر از نوع تیرورق و ستون از نوع مقطع توخالی پر شده با بتن می‌باشد، این مقاطع بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۹] و با استفاده از روابط محدودیت نسبت پهنا به ضخامت در اعضای فشاری با شکل‌پذیری زیاد کنترل شده‌اند.

۲-۱-۲-۲ کنترل تیر ضعیف-ستون قوی

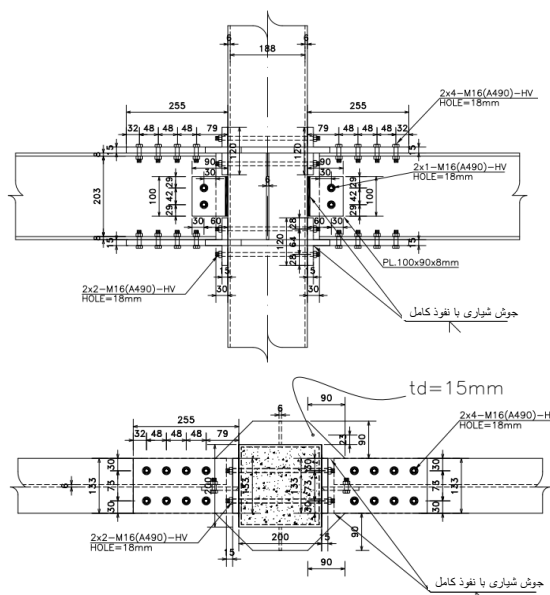
ضابطه کنترلی تیر ضعیف-ستون قوی یکی از کنترل‌های با اهمیت در اتصالات قاب‌های خمشی ویژه می‌باشد. این کنترل بر اساس بند ۱۰-۳-۹-۲ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان انجام شده است.

۲-۱-۳ کنترل چشمه اتصال

چشمه اتصال ضعیف موجب بیشتر شدن احتمال شکست در جوش‌های شیاری اتصال می‌شود. بنابراین، در این مطالعه

جدول ۲- اطلاعات هندسی و مشخصات ستون

ستون	C. 1		
	پارامتر	توصیف	واحد
مقدار	عمق ستون	cm	۲۰
d_c	ارتفاع جان ستون	cm	۱۸/۸
h_w	عرض بال ستون	cm	۲۰
b_{cf}	ضخامت بال ستون	cm	۰/۶
t_{cf}	ضخامت جان ستون	cm	۰/۶
t_{cw}	ممان اینرسی مقطع ستون	cm ⁴	۴۴۳۸
I_c	مدول پلاستیک مقطع ستون	cm ³	۲۰۰۰
Z_c			



شکل ۱- شمای کلی اتصال (واحدها بر حسب میلی‌متر)

جدول ۴- مشخصات مصالح به کار رفته در تحلیل اجزاء محدود

ضخامت/قطر	نوع فولاد مصرفی	F_y (MPa)	F_u (MPa)	Elongation (%)
جان تیر				
۶	ST37	۳۲۸	۴۱۴	۲۰
بال تیر				
۸	ST37	۲۸۱	۳۶۹	۲۲
سپری و دیافراگم خارجی				
۱۵	ST37	۳۱۲	۴۰۷	۲۲
جداره ستون CFT				
۶	ST52	۵۷۱	۵۹۸	۱۲
بولت‌های میان‌گذر				
۱۶	۱۰/۹	۱۲۴۰	۱۳۴۷	۷

بر اساس آزمون کشش ورق‌های فولادی و بولت‌های میان‌گذر و آزمون تعیین مقاومت فشاری بتن مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی به دست آمده است. پروتکل بارگذاری مورد استفاده در این تحلیل در شکل (۲) قابل مشاهده است. بارگذاری به صورت چرخه‌ای و بر اساس شرایط و پروتکل SAC [۲۱] اعمال شده است.

با توجه به اهداف از پیش تعیین شده که در راستای حل مسائل مربوط به اتصالات سپری، بولت میان‌گذر و دیافراگم خارجی و افزایش سطح عملکرد و بهینه‌تر نمودن طرح است و همچنین با توجه به محدودیت در تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی،

جدول ۳- خلاصه نتایج طراحی سپری‌ها و بولت‌های میان‌گذر

پارامتر	توصیف	واحد	مقدار
D_b	قطر پیچ‌های اتصال جان سپری به بال تیر	cm	۱/۶
No. of Bolts	تعداد کل پیچ‌ها	-	۴
No. of Rows	تعداد ردیف‌ها	-	۲
b	عرض بال سپری در محل اتصال به بال ستون	cm	۱۳/۳
b'	عرض بال سپری در محل اتصال به بال تیر	cm	۱۳/۳
$t_{w,T}$	ضخامت جان سپری	cm	۱/۵
LT	طول سپری	cm	۲۴
b_{FT}	طول بال سپری در قسمت اتصال به ستون	cm	۱۲
D_b	قطر پیچ‌های اتصال بال سپری به بال ستون	cm	۱/۶
t_{FT}	ضخامت بال سپری	cm	۱/۵
h_{sw}	ارتفاع ورق وصله جان تیر به ستون	cm	۱۰
b_{sw}	عرض ورق وصله جان تیر به ستون	cm	۹
t_{sw}	ضخامت ورق وصله جان تیر به ستون	cm	۰/۸
n_w in each row	تعداد پیچ‌های جان	-	۲
D_w	قطر پیچ	cm	۱/۶

۳-۲ مشخصات مصالح و بارگذاری

مشخصات مصالح به کار رفته در تحلیل اجزای محدود به صورت خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به این که این مطالعه تحلیلی-آزمایشگاهی می‌باشد، مشخصات مصالح

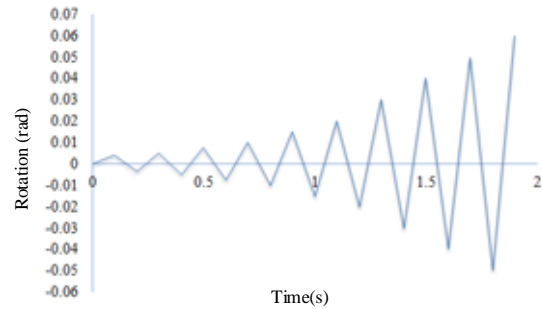
داده شده است.

جدول ۵- مشخصات ابعادی و جزئیات اتصالات نمونه‌های

TSTB و TSTBOD

نمونه	TSTBOD	TSTB
مقطع ستون (میلی‌متر)	۲۰۰×۲۰۰×۶	۲۰۰×۲۰۰×۶
طول ستون (میلی‌متر)	۳۴۰۰	۳۴۰۰
مقطع تیر (میلی‌متر)	۲۰۳×۱۳۳×۶×۸	۲۰۳×۱۳۳×۶×۸
طول تیر (میلی‌متر)	۲۵۲۰	۲۵۲۰
طول جان و بال و عرض سپری (میلی‌متر)	۲۲۰×۱۲۰×۱۳۳	۲۲۰×۱۲۰×۱۳۳
ضخامت بال و جان سپری (میلی‌متر)	۱۵	۱۵
قطر بولت‌های میان‌گذر و پیچ‌ها (میلی‌متر)	۱۶	۱۶
ضخامت ورق اتصال جان (میلی‌متر)	۱۰	۱۰
ضخامت دیافراگم خارجی (میلی‌متر)	۱۵	-

یک نمونه اتصال با سپری و بولت میان‌گذر و یک نمونه با اضافه نمودن دیافراگم خارجی به‌عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شد. بدیهی است با نتایجی که از این نمونه‌ها به دست می‌آید، می‌توان توسط نرم‌افزار آباکوس به مطالعه دقیق سایر جزئیات مربوط به سپری، دیافراگم خارجی و بولت‌های میان‌گذر پرداخت.

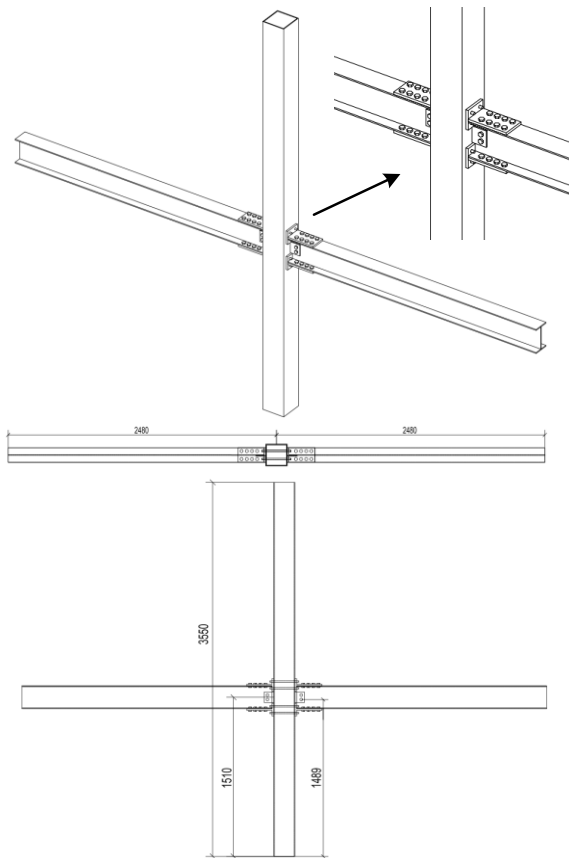


شکل ۲- بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده در تحلیل اجزاء محدود بر اساس پروتکل SAC

نتایج به دست آمده از تحلیل‌های اجزاء محدود نمونه‌ها نشان داده شده است که هر دو نمونه می‌تواند نتایج خوبی در اهداف این مطالعه داشته باشد. بنابراین، یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس اتصال با سپری و بولت‌های میان‌گذر و دیگری با اضافه کردن دیافراگم خارجی طراحی شد. دلیل انتخاب نمونه دوم مشکلات عنوان شده در اتصال سپری با بولت‌های میان‌گذر تحت بارهای چرخه‌ای و تأثیر آن در عملکرد این اتصال می‌باشد. ابعاد مقطع تیر و ستون و همچنین ابعاد سپری‌ها و قطر بولت‌های میان‌گذر در هر دو نمونه آزمایشگاهی یکسان و همانند جزئیات ارائه شده در بخش طراحی در نظر گرفته شده است. تیرها در نمونه‌ها به صورت تیروورق و ستون از مقاطع HSS سرد نورد شده می‌باشد. دو نمونه آزمایشگاهی برای تشخیص و مجزا نمودن نتایج با نام‌های TSTB^۱ و TSTBOD^۲ مشخص شده‌اند، که اتصال نمونه TSTB سپری با بولت‌های میان‌گذر و نمونه TSTBOD همراه با دیافراگم خارجی متصل به سپری‌ها می‌باشد. مشخصات ابعادی و جزئیات اتصالات نمونه‌های TSTB و TSTBOD در جدول (۵) آورده شده است.

۳- ساخت نمونه‌ها

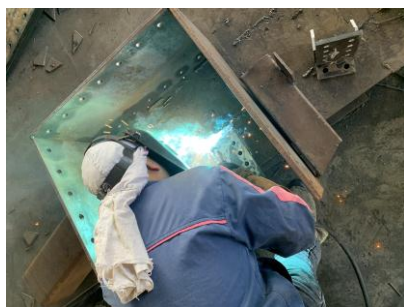
برای مشخص شدن جزئیات هندسی اجزای نمونه‌ها در نقشه‌های سازه‌ای، نقشه‌های کارگاهی^۱ تهیه گردید. نقشه‌های کارگاهی کلی مربوط به هر اتصال در شکل‌های (۳) و (۴) نشان



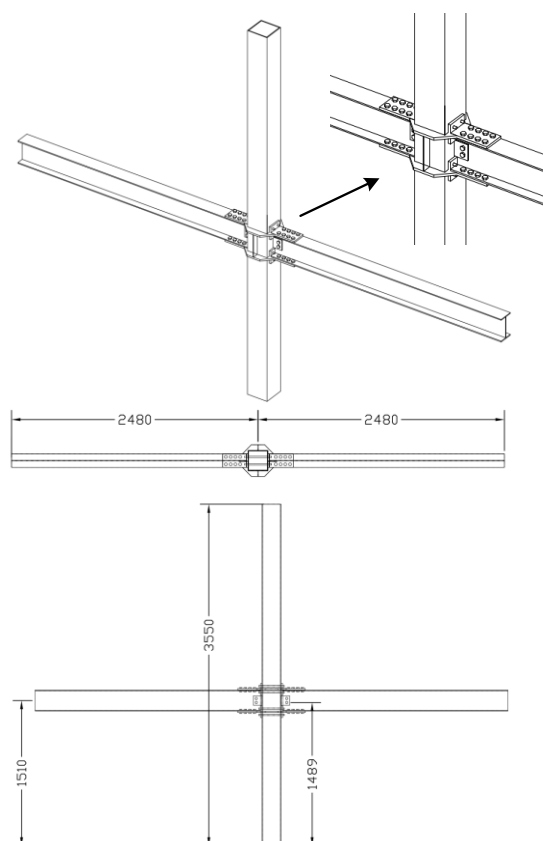
شکل ۳- نقشه کارگاهی تیر، ستون و اتصال سپری با بولت‌های میان‌گذر



خودمتراکم^۳ بوده و طرح اختلاط آن در جدول (۶) آورده شده است. نسبت آب به سیمان در این طرح اختلاط ۰/۳۳ است.



شکل ۵- برشکاری، جوشکاری و سوراخکاری بال و جان سپری



شکل ۴- نقشه کارگاهی تیر، ستون و اتصال سپری با بولتهای میان گذر به همراه دیافراگم خارجی

جدول ۶- طرح اختلاط بتن مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی

مصلح	مقدار مصرفی (کیلوگرم بر متر مکعب)
سیمان	۴۵۰
شن	۶۰۰
ماسه	۱۰۰۰
پودر سنگ	۲۰۰
فوق روان کننده بتن	۳/۱۵

مصلح مصرفی در بتن شامل شن نخودی ۱۲/۵ میلی‌متر، ماسه ۶ میلی‌متر، سیمان پرتلند تیپ ۲ و پودر سنگ است. بتن توسط میکسر کارگاهی تهیه شد. نمونه برداری به صورت سه نمونه مکعبی به بُعد ۱۵ سانتی‌متر به منظور تست مقاومت فشاری بتن انجام گردید. ستون‌ها به صورت قائم به ستون‌های سوله کارگاه مقید شدند و بتن داخل آن‌ها ریخته شد. با گذشت ۲۸ روز از بتن‌ریزی داخل ستون‌ها و مقاوم شدن آن، بولتهای میان‌گذر با استفاده از امپکت برقی پیش‌تیبیده شدند. به منظور حصول اطمینان از ایجاد حداقل نیروی پیش‌تیبیدگی مورد نیاز از آچار ترکمتر مدرج دارای گواهی کالیبراسیون بهره گرفته شد.

مشخصات فرآیند جوشکاری (WPS) مطابق استاندارد AWS D 1.1 [۲۲] در نظر گرفته شده است. پروفیل ستون و ورق‌های مورد نظر در اندازه‌های مشخص شده در نقشه‌ها برش خورده و سوراخکاری لازم بر روی آن‌ها صورت پذیرفت. در مرحله بعد با توجه به مشخصات فرآیند جوشکاری، لبه ورق‌هایی که توسط جوش شیاری با نفوذ کامل به ورق یا المان دیگری متصل می‌شوند، پخ زده شده و به وسیله عملیات سنگ‌زنی آماده شدند. از همان پروفیل و ورق‌هایی که قطعات از آن برش خورده‌اند، نمونه‌هایی برای آزمون کشش فولاد آماده‌شد. پس از عملیات تسمه‌سازی، سوراخکاری و قطعه‌زنی، قطعات جوشی به هم مونتاژ و جوشکاری شد (شکل ۵).

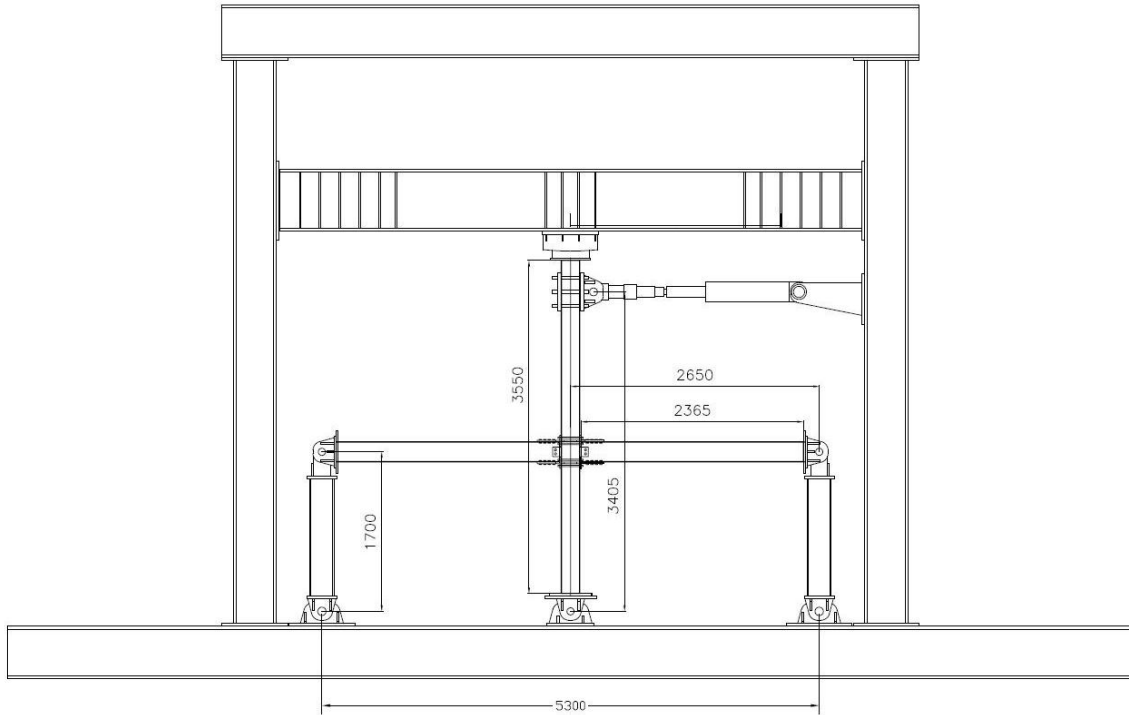
در کلیه جوشکاری‌ها از فرآیند جوش GMAW با گاز CO₂ میکس استفاده شده است. قطر الکتروود مصرفی ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. پس از جوشکاری جان به بال سپری‌ها، نفوذ کامل جوش با دستگاه تست التراسونیک^۲ مورد آزمایش و پذیرش قرار گرفت. در این مرحله سپری‌ها توسط پیچ‌های میان‌گذر به ستون متصل گردید. پس از نصب سپری‌ها به ستون، داخل باکس ستون بتن‌ریزی شد. بتن مورد استفاده از نوع بتن

است. به طوری که ستون به صورت قائم و تیر به صورت افقی قرار گرفته و نیرو به انتهای ستون وارد می‌شود. روش بارگذاری نمونه در این مطالعه مشابه روشی است که توسط Qin و همکارانش [۲۳] به کار رفته است. اتصال انتهای ستون به صورت مفصلی می‌باشد و تکیه‌گاه‌های انتهای تیر با جزئیات مناسب به صورت غلتکی در نظر گرفته شده است.

در نهایت بال و جان تیرها به وسیله پیچ، مهره و واشر به ترتیب به جان سپری‌ها و ورق اتصال جان جوش شده به بال ستون، متصل گردیدند.

۴- پیکربندی آزمایش

پیکربندی آزمایش در آزمایشگاه در شکل (۶) نشان داده شده



شکل ۶- پیکربندی نمونه‌های اتصال در آزمایشگاه



(الف) نمونه TSTB



(ب) نمونه TSTBOD

شکل ۷- نمونه‌های آزمایشگاهی

بارگذاری توسط یک جک هیدرولیکی که به دیواره قاب صلب آزمایشگاه متصل شده است، به صورت افقی به انتهای ستون CFT اعمال می‌گردد. اتصال جک به قاب صلب به صورت گیردار و به ستون به صورت مفصلی می‌باشد. در قسمت بالای ستون و پس از مفصل بارگذاری یک سیستم غلتکی مناسب برای ایجاد تکیه‌گاه جانبی و جلوگیری از حرکت خارج از صفحه ستون تعبیه شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD طول تیر از بر ستون تا مرکز مفصل انتهایی تیر ۲۵۵ سانتی‌متر و ارتفاع ستون بین دو مفصل بالا و پایین آن ۳۴۰/۵ سانتی‌متر می‌باشد.

به منظور جلوگیری از تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های ناخواسته کلیه تکیه‌گاه‌ها پس از بسته شدن کنترل شده و تراز شدند. شکل (۷) نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD را نشان می‌دهد. قبل از هر آزمایش کلیه ابعاد هندسی و جوش‌های اتصال کنترل و با نقشه‌های اجرایی مطابقت داده شدند.

در نمونه دوم که دارای دیافراگم خارجی می‌باشد، قسمتی از دیافراگم‌های خارجی که توسط جوش شیاری با نفوذ کامل به سپری‌ها متصل می‌گردد، پخ زده شده و سپس به سپری‌ها جوش شدند. به منظور عدم ترکیب اتصال جوشی و پیچی در راستای طولی تیرها و رسیدن به عملکرد مشترک مطلوب دیافراگم‌های خارجی با بولت‌های میان‌گذر، دیافراگم‌های خارجی در گوشه گرد ستون و حد فاصل آن تا سپری‌ها و همچنین محدوده قرارگیری بال تیرهای عمود بر صفحه، فاقد جوش می‌باشند. به عبارت دیگر دیافراگم خارجی در این قسمت‌ها به بال و جان ستون متصل نیست. سایر قسمت‌های دیافراگم با جوش گوشه به جان ستون متصل گردیده‌اند. ورق قائمی به ضخامت ۶ میلی‌متر که میانه دیافراگم خارجی فوقانی را به تحتانی متصل می‌کند در نقش جان تیر عمود بر صفحه، به منظور جلوگیری از تغییرشکل‌های احتمالی خارج از صفحه دیافراگم خارجی تعبیه

شده است.

سطوح ورق‌های درگیر در اتصالات اصطکاکی، قبل از پیش‌تینده کردن پیچ‌ها، کاملاً بر روی یکدیگر قرار گرفته و کیپ شده‌اند و چفت و بست میان سطوح مذکور بدون اعمال فشار محصول پیش‌تینده کردن پیچ‌ها اتفاق افتاده است.

به منظور مشاهده تسلیم‌شدگی و ترک‌خوردگی‌ها در نمونه معمولاً از آب‌آهک استفاده می‌شود. محل نزدیک اتصال تیر به ستون در نمونه‌ها با آب‌آهک پوشانده شد تا کماتش موضعی، تغییرشکل‌ها و گسیختگی‌ها با ریختن آهک حین بارگذاری مشخص گردد. پیکربندی کلی نمونه‌ها در قاب صلب بارگذاری آزمایشگاه در شکل (۸) قابل مشاهده است.

کرنش‌سنج‌ها بر اساس راهنمای موجود در بسته آن‌ها نصب شده‌اند. شکل (۹) کرنش‌سنج‌ها بر روی دیافراگم خارجی در نمونه TSTBOD را نشان می‌دهد.

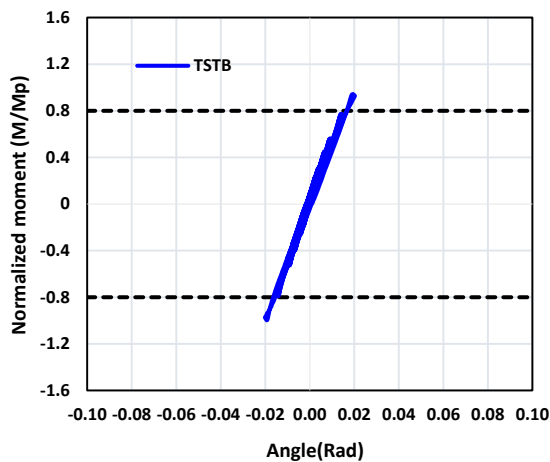


شکل ۸- پیکربندی کلی نمونه‌ها در قاب صلب بارگذاری آزمایشگاه

۵- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش نتایج آزمایش نمونه‌ها شامل مشاهدات عینی، منحنی‌های هیستریزس، تغییرشکل‌های هر نمونه در زوایای مختلف دوران حین و پس از پایان بارگذاری و نتایج کرنش‌سنج‌ها گزارش می‌گردد. پس از آن نتایج آزمایشات تفسیر

شده‌است. در ادامه اتصالات از لحاظ لرزه‌ای ارزیابی شده، دوران چشمه اتصال در دو نمونه محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین نمونه‌های تحلیلی بر مبنای نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده و توزیع تنش و کرنش در آن‌ها بررسی شده است.



شکل ۱۰- نمودار هیستریزیس در پایان محدوده دوران نسبی ۰/۰۲ رادیان



شکل ۹- کرنش سنج‌های چسب‌بند شده روی دیافراگم خارجی در نمونه TSTBOD

دوران نسبی، نمونه در مجموع تحت ۲۸ چرخه کامل بارگذاری قرار گرفت. با این حال تا انتهای این چرخه، نشانه‌ای از کماتش و تغییر شکل‌های موضعی در بال و جان تیر مشاهده نشد. تا انتهای بارگذاری در دو چرخه دوران نسبی ۰/۰۴ رادیان، در نمودار هیستریزیس هیچ کاهش مقاومتی مشاهده نشد. ریزش آهک و در نتیجه تسلیم‌شدگی جان در محدوده بین دو سپری و نزدیک بال‌ها گسترش یافته است. سپری‌ها و اتصال آن‌ها به بال ستون و بال تیر و نیز اتصال جان تیر به بال ستون همچنان سالم باقی مانده و تسلیم‌شدگی در محدوده آن‌ها مشاهده نمی‌شود. تا انتهای بارگذاری در محدوده ۰/۰۴ رادیان دوران نسبی، نمونه در مجموع تحت ۳۰ چرخه کامل بارگذاری قرار گرفت. در این حالت، نشانه‌های کوچکی از کماتش موضعی در بال تیر مشاهده گردید. همچنین آهک بخش‌های کوچکی از جداره فولادی ستون در قسمت گوشه گرد آن ریخته است که نشان‌دهنده تسلیم جزئی جداره در این ناحیه می‌باشد. در دوران نسبی ۰/۰۶ رادیان کماتش موضعی بال قابل مشاهده می‌باشد. ریزش آهک در جان تیر به وضوح مشاهده می‌شود و تا یک سوم جان نفوذ کرده است. پلاستیک‌شدگی در کل مقطع در حال گسترش است و تمرکز این پلاستیک‌شدگی بال و جان تیرها در محدوده‌ای پس از جان سپری‌ها می‌باشد. ریزش آهک رو و زیر بال تیرها تا لبه محل اتصال جان سپری به بال آن‌ها پیش رفته است اما گسیختگی در این قسمت مشاهده نمی‌شود. هیچ‌گونه شکست و یا پارگی تا پایان دومین چرخه بارگذاری در دوران نسبی ۰/۰۶ رادیان رخ نداده است. مفصل پلاستیک کاملاً دور از ستون و بعد از جان سپری‌ها تشکیل شده است و آسیبی به اتصال و ستون وارد نشده است. همچنین منطقه تسلیم جداره فولادی

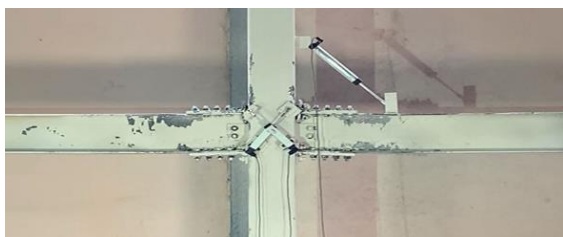
۱-۵- نتایج آزمایش نمونه TSTB

۱-۱-۵- مشاهدات عینی آزمایش

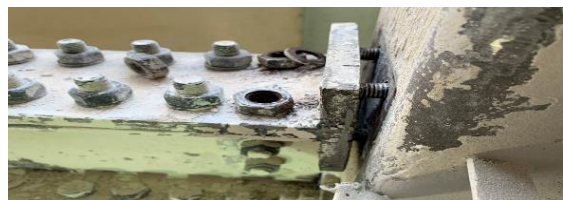
نمونه تحت بارگذاری ۲۴ چرخه اول، ۶ چرخه با دوران نسبی ۰/۰۳۷۵ رادیان، ۶ چرخه با دوران نسبی ۰/۰۰۵، ۶ چرخه با دوران نسبی ۰/۰۷۵، ۴ چرخه با دوران نسبی ۰/۰۱ و ۲ چرخه با دوران نسبی ۰/۰۱۵ به صورت کاملاً الاستیک باقی مانده و هیچ‌گونه ریزشی در پوشش آهکی در بال و جان تیر و ادوات اتصال مشاهده نشد. لذا تا بارگذاری در محدوده ۰/۰۱۵ رادیان هیچ‌گونه تسلیم و پلاستیک‌شدگی در نمونه مشاهده نشد.

در سیکل نخست دوران نسبی ۰/۰۲ رادیان، ریزش آهک در محل اتصالات و مشخصاً پیچ‌های اتصال بال تیر به جان سپری و جان تیر به ورق اتصال به مقدار کم مشاهده گردید. تا این قسمت هیچ‌گونه کماتشی در بال و جان تیر رخ نداد. تا این مرحله نمونه تحت ۲۶ چرخه بارگذاری قرار گرفت. با این حال هیچ‌گونه تکیدگی و ریزش آهک تا این محدوده در بال و جان تیر مشاهده نشد. شکل (۱۰) نمودار هیستریزیس در لحظه پس از بارگذاری تا دوران نسبی ۰/۰۲ رادیان نشان می‌دهد.

در اولین چرخه بارگذاری با دوران نسبی ۰/۰۳ رادیان، ریزش آهک بال تیر در ناحیه پس از جان سپری به طول حدود ۳۵ سانتی‌متر و همچنین ریزش آهک جان تیر در محدوده اتصال و بعد از آن اتفاق افتاد. در انتهای چرخه دوم بارگذاری در محدوده ۰/۰۳ رادیان، ریزش آهک و تسلیم‌شدگی در جان و بال تیر گسترش یافت. تا انتهای بارگذاری در محدوده ۰/۰۳ رادیان



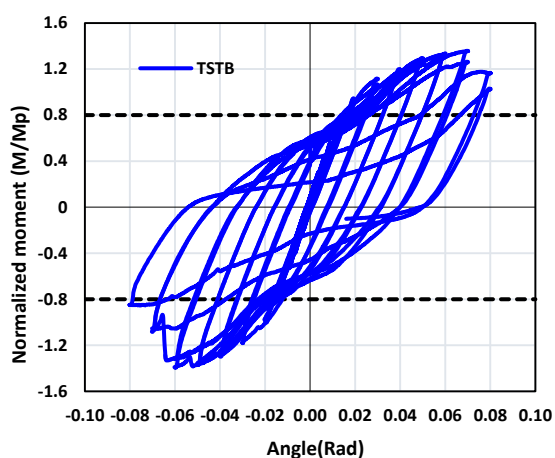
شکل ۱۱- تغییرشکل نمونه TSTB در دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان



شکل ۱۲- جزئیات تسلیم و گسیختگی نمونه TSTB پس از بارگذاری تا دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان

۵-۱-۲- ارزیابی لرزه‌ای نمونه TSTB

نمودار هیستریزیس به دست آمده از آزمایش نمونه با اتصال سپری و بولت‌های میان‌گذر TSTB در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- نمودار هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی TSTB

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال، رفتار هیستریزیس نمونه با ضوابط پذیرش آیین‌نامه‌های AISC و FEMA [۲۴ و ۲۵] مقایسه می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در حالت کلی حلقه‌های هیستریزیس نمونه TSTB پایدار بوده و شکل‌پذیری و استهلاک انرژی مناسبی را نشان می‌دهد.

ستون در این محدوده از بارگذاری گسترش یافته است. در چرخه‌های بارگذاری با دوران نسبی ۰/۰۷ رادیان، به تدریج تسلیم‌شدگی در بال تیر افزایش یافته و پلاستیک‌شدگی در جان تیر نیز گسترش می‌یابد. نمودار هیستریزیس در ابتدای چرخه نخست دوران نسبی ۰/۰۷ رادیان زوال مقاومت جزئی نشان می‌دهد. این زوال مقاومت تا پایان چرخه دوم و ضمن گسیختگی مهره یکی از بولت‌های میان‌گذر در سیکل اول بارگذاری تشدید شد. جان و بال تیر به میزان قابل‌توجهی وارد محدوده پلاستیک شده‌است. نکته جالب‌توجه در این محدوده بارگذاری گسیختگی از محل مهره بولت‌های میان‌گذر و زوال مقاومت تا پایان چرخه دوم می‌باشد. آهک قسمت‌هایی از ستون در گوشه گرد آن و در بالای اتصال نیز ریخته است که این حاکی از تسلیم جداره فولادی ستون در این محدوده بارگذاری می‌باشد.

به منظور مشاهده و بررسی رفتار اتصال پس از گسیختگی از محل بولت‌های میان‌گذر و زوال مقاومت حادث‌شده، بارگذاری تا ۰/۰۸ رادیان ادامه یافت. زوال مقاومت به تدریج افزایش یافته و شاهد گسیختگی در اتصال می‌باشیم. شکل (۱۱) وضعیت ستون، بال و جان تیرها و اتصال را در پایان چرخه دوم بارگذاری در دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ناحیه تسلیم در گوشه گرد ستون‌ها گسترش یافته، بولت‌های میان‌گذر سپری‌های بالا گسیخته شده و بال سپری‌ها از بال ستون جدا شده است و ناحیه تسلیم در بال و جان تیرها نیز گسترش یافته است. همچنین در دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان زوال مقاومت به دلیل گسیختگی مهره دو عدد از بولت‌های میان‌گذر و از حیز ارتفاع ساقط شدن آن‌ها بسیار بالا می‌باشد. در شکل (۱۲) جزئیات تسلیم و گسیختگی نمونه TSTB پس از بارگذاری تا انتهای چرخه‌های دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان نشان داده شده است.

همانطور که بیان شد، تسلیم قسمت‌هایی از گوشه گرد ستون که از دوران ۰/۰۳ رادیان شروع شد به تدریج و تا ۰/۰۸ رادیان گسترش یافت. تسلیم و تغییرشکل‌های موضعی بال و جان تیرها از ۰/۰۳ رادیان شروع و تا ۰/۰۸ رادیان گسترش یافت. از سیکل نخست دوران نسبی ۰/۰۷ رادیان زوال نسبی ایجاد شده به دلیل گسیختگی مهره از دو بولت میان‌گذر تشدید یافت و در ادامه در چرخه‌های دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان شاهد زوال مقاومت بسیار زیادی بودیم.

در انتهای بارگذاری با دوران نسبی $0/04$ رادپان ریزش آهک در بال تیر به میزان کمی گسترش یافته و در جان تیر ریزش آهک مشاهده نگردید. همچنین آثاری از کماتش موضعی تا پایان بارگذاری چرخه 30 در نمونه مشاهده نشد. با افزایش دامنه بارگذاری تا دوران نسبی $0/05$ رادپان، ریزش آهک و تسلیم‌شدگی در بال بالا و پایین تیرها و در محدوده پس از جان سپری به سمت انتهای تیرها به طور محسوسی افزایش یافت. با ادامه بارگذاری تا انتهای دوران نسبی $0/05$ رادپان تکیدگی آهک به میزان جزئی در جان تیر و زیر آخرین ردیف پیچ جان سپری مشاهده گردید که به معنای شروع تسلیم‌شدگی جان در این محدوده بارگذاری می‌باشد.

تا انتهای بارگذاری با دوران نسبی $0/05$ رادپان نمونه تحت 32 چرخه کامل بارگذاری قرار گرفت. همچنین در انتهای این محدوده از بارگذاری، کماتش موضعی در بال تیر مشاهده گردید. با بارگذاری در محدوده دوران نسبی $0/06$ رادپان ریزش پوشش آهک در بال تیر افزایش یافت. همچنین تکیدگی آهک در جان تیر در این محدوده از بارگذاری به میزان قابل توجهی به سمت داخل عمق جان افزایش و در نتیجه تسلیم در کل مقطع تیر گسترش یافت. نیز تغییرشکل و کماتش موضعی در بال تیر افزایش پیدا کرد. در انتهای بارگذاری در محدوده دوران نسبی $0/07$ رادپان کماتش موضعی در بال تیرها افزایش یافت. ریزش آهک و در نتیجه تسلیم‌شدگی در بال و جان تیر گسترش یافت. تمرکز تسلیم‌شدگی در بال و جان عمدتاً در محدوده پس از جان سپری می‌باشد. در بارگذاری با دوران نسبی $0/08$ رادپان ریزش آهک و تسلیم‌شدگی در بال و جان تیرها و کماتش موضعی در بال‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافت. پس از بارگذاری در محدوده دوران نسبی $0/08$ رادپان، زوال مقاومت با توجه به نمودار هیستریزس چشم گیر است. همان‌گونه که در شکل (۱۵) و محدوده ریزش آهک‌ها مشاهده می‌شود، تقریباً کل جان به سمت داخل عمق آن وارد محدوده پلاستیک شده است.



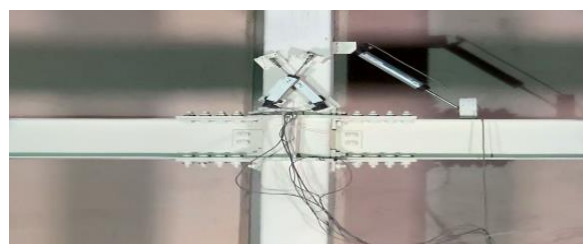
شکل ۱۵- تغییرشکل نمونه TSTBOD در دوران نسبی $0/08$ رادپان

بر اساس آیین‌نامه لرزه‌ای آمریکا (AISC-341) مقاومت اتصال در دوران نسبی $0/04$ رادپان باید حداقل 80 درصد ظرفیت لنگر پلاستیک باشد که با توجه به شکل (۱۳) این معیار برای اتصال نمونه TSTB صدق می‌کند. بنابراین از نظر AISC این اتصال موردپذیرش در قاب‌های خمشی ویژه می‌باشد. باین‌حال، با توجه به این‌که نمونه TSTB در $0/04$ رادپان دوران نسبی هیچ‌گونه زوال مقاومتی نداشته و ظرفیت تحمل دوران نسبی $0/06$ رادپان را بدون آسیب قابل‌توجه داشته است، این اتصال از نظر FEMA نیز برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه مورد تأیید می‌باشد. همچنین همان‌گونه که ذکر شد، برای بررسی عملکرد این اتصال و مشاهده مد شکست، بارگذاری این نمونه تا $0/08$ رادپان ادامه یافت و پارگی در تیر و ادوات اتصال مشاهده نگردید. تنها دو مهره بولت‌های میان‌گذر در دوران نسبی $0/07$ رادپان هرز شد و از آن بیرون آمد. نظر به اینکه این موضوع در دوران‌های نسبی بیش از $0/06$ رادپان به وقوع پیوسته است، بنابراین شکل‌پذیری اتصال مورد تأیید می‌باشد.

۲-۵- نتایج آزمایش نمونه TSTBOD

۱-۲-۵- مشاهدات عینی آزمایش

پس از آغاز بارگذاری نمونه و تا پایان چرخه 28 بارگذاری نمونه به‌صورت الاستیک باقی‌مانده و هیچ‌گونه تکیدگی آهک در بال و جان تیر، سپری و دیافراگم خارجی مشاهده نشد. شکل (۱۴) وضعیت نمونه را در بارگذاری تا دوران نسبی $0/03$ رادپان نشان می‌دهد.

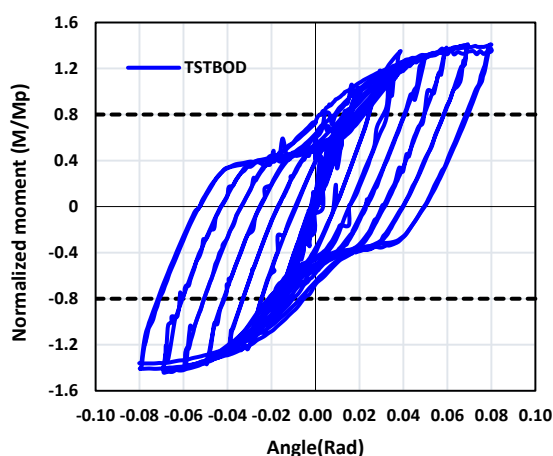


شکل ۱۴- وضعیت نمونه اتصال TSTBOD در بارگذاری تا دوران

نسبی $0/03$ رادپان

در نخستین سیکل دوران نسبی $0/04$ رادپان ریزش آهک از لبه بال تیر آغاز شده و تسلیم‌شدگی در این ناحیه مشاهده گردید. با ادامه بارگذاری تا انتهای چرخه 30 همچنان جان تیر بدون تسلیم باقی‌مانده و در این قسمت ریزش آهک مشاهده نشد. بارگذاری تا دو چرخه با دوران نسبی $0/04$ ادامه یافت.

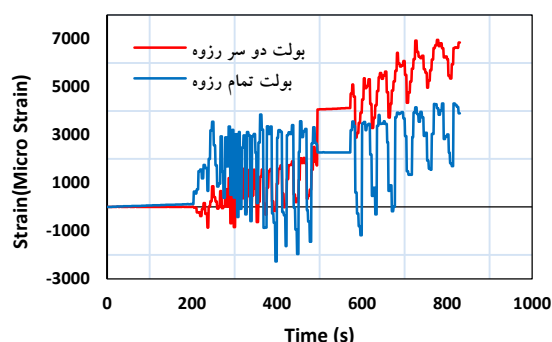
مقاومتی نداشته و به دوران نسبی که در قاب‌های خمشی ویژه $0/06$ رادیان می‌باشد دست یافته است. بنابراین این اتصال از نظر ضوابط لرزه‌ای FEMA مورد تأیید می‌باشد.



شکل ۱۷- نمودار هیستریزس نمونه آزمایشگاهی TSTBOD

۳-۵- نتایج کرنش سنج‌ها

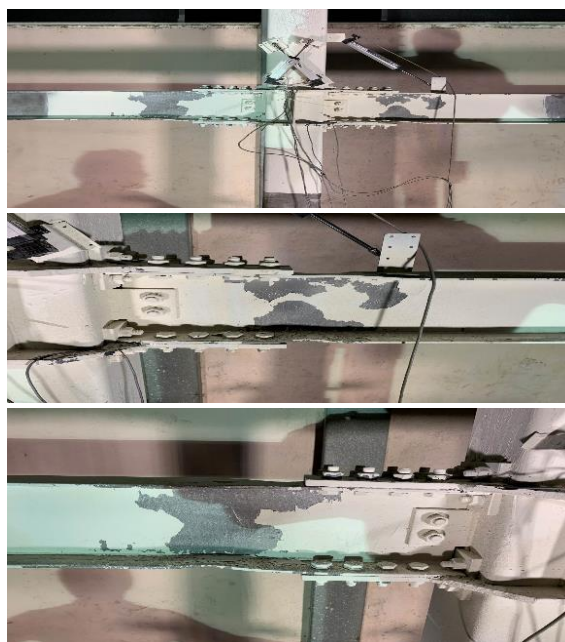
نتایج خروجی به دست آمده از کرنش‌سنج‌ها در نمونه TSTB در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در نمونه TSTB کرنش‌سنج بر روی دو بولت میان‌گذر که یکی به صورت تمام رزوه و دیگری به صورت دو سر رزوه بود نصب گردید. همانطور که در شکل (۱۸) نشان داده شده است بولت تمام رزوه به دلیل درگیری بیشتر با بتن داخل ستون دچار کرنش کمتری شده و لذا مقاومت بیشتری از خود نشان داده است.



شکل ۱۸- نمودار نتایج به دست آمده از کرنش‌سنج‌های بولت‌های میان‌گذر نمونه TSTB

متأسفانه به دلیل اختلال در عملکرد دستگاه دیتالاگر و نرم‌افزار مربوط به آن، خروجی نتایج مربوط به کرنش‌سنج‌ها در نمونه TSTBOD ثبت نگردید یا فایل متنی حاوی نتایج به شکل نامعلومی از دست رفت.

در شکل (۱۶) جزئیات تسلیم‌شدگی و تغییرشکل‌های نمونه TSTBOD پس از بارگذاری تا دوران نسبی $0/08$ رادیان نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود هیچ نشانه‌ای از ریزش آهک روی بدنه ستون و تسلیم‌شدگی در آن دیده نمی‌شود.

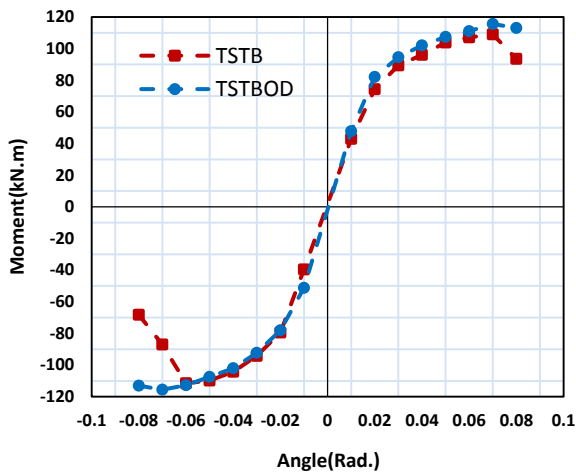


شکل ۱۶- جزئیات تسلیم‌شدگی و تغییرشکل‌های نمونه TSTBOD در دوران نسبی $0/08$ رادیان

۲-۲-۵- ارزیابی لرزه‌ای اتصال TSTBOD

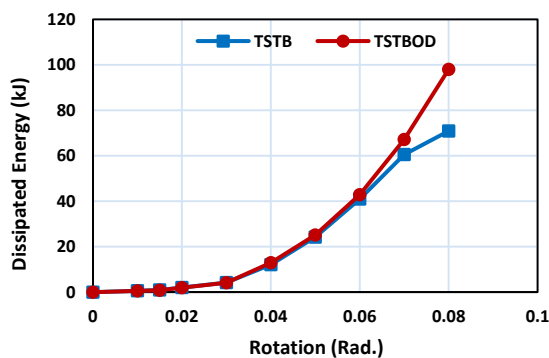
نمودار هیستریزس برای نمونه اتصال سپری با بولت‌های میان‌گذر و دیافراگم خارجی TSTBOD در شکل (۱۷) نشان داده شده است. به منظور ارزیابی لرزه‌ای اتصال، رفتار هیستریزس نمونه با ضوابط پذیرش اتصالات صلب مقایسه می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود نمونه در دوران $0/04$ رادیان هیچ‌گونه زوال مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. بنابراین نمونه TSTBOD از نظر ضوابط پذیرش اتصالات صلب آیین‌نامه AISC برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه مورد تأیید می‌باشد. زیرا معیار آیین‌نامه AISC دارا بودن مقاومت برابر 80% درصد لنگر پلاستیک تیر در دوران نسبی $0/04$ رادیان می‌باشد.

اتصال TSTBOD همچنین از نظر ضوابط پذیرش FEMA350 مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود در دوران نسبی که در قاب‌های خمشی ویژه برابر $0/04$ رادیان می‌باشد، نمونه TSTBOD زوال



شکل ۲۰- نمودارهای پوش هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD

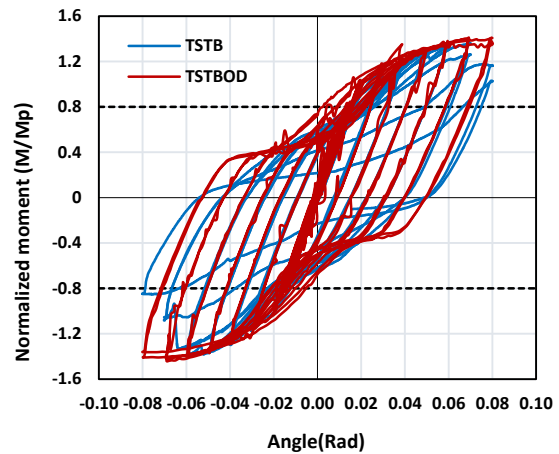
انرژی جذب شده نشانه‌ای از توانایی یک سازه در موضوع مقاومت در برابر زلزله است. زیرا شامل هر دو جنبه مقاومت و ظرفیت تغییرشکل می‌باشد. انرژی جذب شده با محاسبه مساحت چرخه‌های منحنی هیستریزس به دست می‌آید. با توجه به صلب بودن چشمه اتصال و ستون، انرژی از طریق تغییرشکل‌ها و کمانش‌های تیر مستهلک می‌شود. مقایسه میزان انرژی جذب شده و تلف شده توسط هر دو نمونه نشان می‌دهد نمونه TSTBOD در بازه دوران ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ رادیان استهلاک انرژی بیشتری داشته است. در واقع نمونه TSTBOD که دارای ظرفیت تغییرشکل‌های بزرگتری می‌باشد دارای استهلاک انرژی بیشتری در پایان آزمایش می‌باشد. شکل (۲۱) میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های TSTB و TSTBOD را در بازه‌های دورانی آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های TSTB و TSTBOD در بازه‌های دورانی آزمایش

۵-۴- مقایسه بین نمونه‌های TSTB و TSTBOD

مقایسه بین نمودار هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD نشان می‌دهد که تا پایان دوران نسبی ۰/۰۶ رادیان انطباق مناسبی بین نمودارهای هیستریزس دو نمونه برقرار است. زوال مقاومت برای نمونه با اتصال سپری و بولت‌های میان‌گذر TSTB پس از چرخه اول دوران نسبی ۰/۰۷ رادیان آغاز شده و تا پایان دوران نسبی ۰/۰۸ رادیان به دلیل جداشدگی مهره از بولت‌ها به شدت افزایش می‌یابد و در حالت کلی زوال مقاومت در آن بیشتر از نمونه TSTBOD می‌باشد. نمونه TSTBOD در زوایای دوران نسبی بیشتر از ۰/۰۷ رادیان زوال مقاومت کمی دارد. مقایسه نمودار هیستریزس نمونه‌های آزمایش در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۹- مقایسه نمودارهای هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD

بنابراین، زوال مقاومت در نمونه TSTBOD به صورت تدریجی بوده، اما در نمونه TSTB تقریباً ناگهانی و شدید رخ می‌دهد. همچنین با توجه به جداشدگی مهره از بولت‌های میان‌گذر در نمونه TSTB در چرخه نخست با دوران نسبی ۰/۰۷، این نمونه از شکل‌پذیری پایین‌تری نسبت به نمونه TSTBOD برخوردار می‌باشد.

مقایسه بین نمودار پوش هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی TSTB و TSTBOD نشان می‌دهد عملکرد نمونه TSTBOD از لحاظ شکل‌پذیری به دلیل زوال جزئی مقاومت در سیکل پایانی، بهتر است. نمودارهای پوش هیستریزس نمونه‌های آزمایش در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی دو نمونه آزمایشگاهی، می‌توان گفت که اتصال با سپری و بولت‌های میان‌گذر یکی از بهترین اتصالات صلب برای سازه‌های با ستون‌های پرشده با بتن به خصوص در هنگام استفاده از مقاطع HSS به‌عنوان جداره ستون می‌باشد. روند طراحی پیشنهادی در این مطالعه برای سپری‌ها، بولت‌های میان‌گذر و دیافراگم خارجی، به خوبی می‌تواند عملکرد مناسب اتصال را تضمین نماید. نتایج آزمایش نشان می‌دهد افزودن دیافراگم خارجی به سیستم اتصال سپری و بولت‌های میان‌گذر به خوبی از شکست ترد و زوال مقاومت ناگهانی نمونه جلوگیری می‌کند. هر دو نمونه آزمایشگاهی بدون زوال مقاومت به دوران نسبی $0/06$ رادیان دست یافتند، با این حال شکست نهایی نمونه دارای دیافراگم خارجی به صورت شکل‌پذیر و باکمانش بال و جان تیر همراه بوده، اما در نمونه فاقد دیافراگم خارجی در سیکل نخست دوران نسبی $0/07$ رادیان جداشدگی مهره از بولت‌های میان‌گذر اتفاق افتاد. در اتصال با دیافراگم خارجی، مفصل پلاستیک دور از ستون و در محل مناسب ایجاد شده و کرنش پلاستیک تا عمق جان مقطع گسترش می‌یابد. همچنین افزایش سختی چشمه اتصال و عدم تغییر شکل پلاستیک در ناحیه چشمه اتصال از ویژگی‌های مناسب آن است. اما در اتصال بدون دیافراگم خارجی تمرکز تنش در بولت‌های میان‌گذر بوده و منجر به ایجاد شکست در این بخش می‌شود. همچنین بخش‌هایی از گوشه گرد ستون در این اتصال دچار تکیه‌گی آهک و تسلیم شده است. اتصال خمشی تیر به ستون فولادی پرشده با بتن TSTB و TSTBOD با ساختاری که در این مطالعه استفاده شد، ضوابط پذیرش اتصالات صلب در قاب‌های خمشی ویژه را به خوبی پاس می‌نماید و از نظر هر دو آیین‌نامه FEMA و AISC مورد تأیید می‌باشد.

نظر به آزمایشات انجام‌شده، اتصالات پیشنهادی برای حالتی که قاب صرفاً در یک جهت دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در صورتی که قاب در دو جهت متعامد دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی باشد، نیاز به بررسی بیشتر و رفع مشکلات اجرایی احتمالی می‌باشد.

۷- مراجع

- Constructional Steel Research, Vol 58, pp. 703-723.
- [3] Rezaifar, O. and Younesi, A. (2017), "Experimental study discussion of the seismic behavior on new types of internal/external stiffeners in rigid beam-to-CFST/HSS column connections", Journal of Construction and Building Materials, Vol. 136, pp. 574-589.
 - [4] Alostaz, Y.M. and Shneider, P. (1998), "Connections to concrete-filled steel tubes", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 748.
 - [5] Kanatani, H., Tabuchi, M., Kamba, T., Hsiaolien, J. and Ishikawa, M. (1987), "A study on concrete filled RHS column to H-beam connections fabricated with HT bolts in rigid frames", Proceedings of the 1st Composite and Construction in Steel and Concrete Conference, pp. 614-635.
 - [6] Sheet, I.S., Gunasekaran, U. and MacRae G.A. (2013), "Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 86 pp. 167-182.
 - [7] Han, L.H. and Yao, G.H. (2003), "Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, pp.751-767.
 - [8] Susantha, K.A.S., Ge, H.B. and Usami, T. (2001), "A capacity prediction procedure for concretefilled steel columns", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 483-520.
 - [9] Johansson, M. (2002), "The efficiency of passive confinement in CFT columns", Steel and Composite Structures, Vol. 2, pp. 379-396.
 - [10] Hatzigeorgiou, G.D. (2008), "Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns", Part I: Theory, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1573-1578.
 - [11] de Oliveira, W.L.A., De Nardin, S., de Cresce El, A.L.H. and El Debs, M.K., (2010), "Evaluation of passive confinement in CFT columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp.487-495.
 - [12] Chung, K.S., Kim, J.H. and Yoo, J.H., (2012), "Prediction of hysteretic behavior of high-strength square concrete-filled steel tubular columns subjected to eccentric loading", International Journal of Steel Structures, Vol. 12, pp. 243-252.
 - [13] Ricles, J.M., Peng, S.W. and Lu, L.W. (2004), "Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam moment connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 130, pp. 223-232.
 - [14] Nie, J., Qin, K. and Cai, C.S. (2008), "Seismic behavior of connections composed of CFSSTCs and steel-concrete composite beams-experimental study", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, pp.1178-1191.
 - [15] Koester, B.D., (2000), "Panel zone behavior of moment connections between rectangular concrete-filled steel tubes and wide flange beams", PhD dissertation, University of Texas at Austin.
 - [16] Chen, Z., Qin, Y. and Wang X. (2015), "Development of connections to concrete-filled rectangular tubular columns", Advanced Steel Construction, Vol. 11, pp. 408-426.
 - [17] Hu, J.W., Choi, E. and Leon, R.T. (2011), "Design, analysis and application of innovative composite PR connections between steel beams and CFT columns", Smart Materials and Structures, Vol. 20, pp. 0964-1726.
 - [18] ANSI/AISC 358-16, (2016), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for
 - [1] McCormac, J.C. and Brown, R.H. (2012), "Design of reinforced concrete", Ninth edition, Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc pp. 263-281.
 - [2] Hajjar, J.F. (2002), "Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering", Journal of



$$= 2.4 \times 2.2 \times 4070 = 15628.8 \text{ kg}$$

$$R_n = \min(R_{n,1}, R_{n,2}) = 11721.6 \text{ kg}$$

$$t_{w,T1} = \frac{T_u}{\phi \cdot n_b \cdot R_n} = \frac{33014}{0.75 \times 4 \times 2 \times 11721.6} = 0.47 \text{ cm}$$

عرض بال تیر برابر با ۱۳/۳ سانتی متر و عرض بال ستون ۲۰ سانتی متر است. چنانچه عرض بال سپری در محل اتصال به بال ستون را ۱۳/۳ سانتی متر در نظر بگیریم برای کنترل کشش می توان نوشت:

$$T_u \leq \phi \cdot T_n \Rightarrow 33014 \leq 0.9 \times 13.3 \times t_{w,T2} \times 3120 \Rightarrow t_{w,T2} = 0.88 \text{ cm}$$

$$A_1 = (b - 2 \times (D_b + 0.2)) = 13.3 - (2 \times (1.6 + 0.2)) = 9.7 \text{ cm}$$

$$A_2 = 0.85 \times b = 0.85 \times 13.3 = 11.31 \text{ cm}$$

$$t_{w,T3} = \frac{T_u}{\phi \times \min(A_1, A_2) \times F_u} = \frac{33014}{0.75 \times 9.7 \times 4070} = 1.11 \text{ cm}$$

$$t_{w,T} = \max(t_{w,T1}, t_{w,T2}, t_{w,T3}) \approx 1.2 \text{ cm}$$

تعیین نیروی اهرمی:

$$a = \frac{b_{ft} - g}{2} = \frac{12 - 6.4}{2} = 2.8 \text{ cm}$$

$$b = \frac{g}{2} - \frac{t_{wT}}{2} - r = \frac{6.4}{2} - \frac{1.5}{2} - 1 = 1.45 \text{ cm}$$

$$F = \frac{T_u}{4} = \frac{33014}{4} = 8254 \text{ kg}$$

$$Q = F \left[\frac{100bd_b^2 - 14wt_{fT}^2}{62ad_b^2 + 21wt_{fT}^2} \right] = 8254 \left[\frac{100(1.45)(1.6)^2 - 14(6)(1.5)^2}{62(2.8)(1.6)^2 + 21(6)(1.5)^2} \right] = 2066 \text{ kg}$$

$$M_{u,1} = Fb - Qa = (8254 \times 1.45) - (2066 \times 2.8) = 6184 \text{ kg.cm}$$

$$M_{u,2} = Qa = 2066 \times 2.8 = 5784 \text{ kg.cm}$$

$$M_u = \max(M_{u,1}, M_{u,2}) = 6184 \text{ kg.cm}$$

$$Z_T = \frac{12}{2} \times \frac{T_{fT}^2}{4} = 1.5T_{fT}^2$$

$$M_u \leq \phi M_n \Rightarrow 6184 \leq 0.9 \times 1.5T_{fT}^2 \times 3120 \Rightarrow T_{fT} \geq 1.21 \text{ cm}$$

کنترل پیچ های اتصال جان:

Seismic Applications, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.

[۱۹] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، طرح و اجرای ساختمان های فولادی، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان.

[۲۰] ازهری، م. و میرقادی، س.ر. (۱۳۹۳). "طراحی سازه های فولادی به روش حالات حدی و مقاومت مجاز، جلد ششم-طراحی اتصالات"، انتشارات ارکان دانش.

[21] SAC. SAC/BD-97/02 Version 1.1., (1997), Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other specimens, Sacramento (CA): SAC Joint Venture.

[22] AWS D1.1/D1.1M, (2015), Structural welding code-steel, The American Welding Society (AWS).

[23] Qin, Y., Chena, Z., Yang, Q. and Shang, K. (2014), "Experimental seismic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns", Journal of Constructional Steel Research Vol. 93, pp. 32-43.

[24] ANSI/AISC 341-1, (2016), Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.

[25] FEMA350, (2000), Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings.

پیوست

محاسبات طراحی سپری ها، بولت های میان گذر و دیافراگم خارجی:

در ادامه محاسبات اتصال خمشی تیر UB ۶×۸×۱۳۳×۲۰۳ میلی متر به ستون ۶×۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی متر پرشده با بتن به مقاومت فشاری ۴۷ مگاپاسکال آورده شده است.

$$M_u = \phi \cdot M_p = \phi \times Z_b \times F_y = 0.9 \times 286 \times 2810 \times 10^{-5} = 7.23 \text{ ton.m}$$

$$C_u = T_u = \frac{M_u}{d_b} = \frac{7.23 \times 10^5}{21.9} = 33014 \text{ kg}$$

چنانچه از پیچ های با قطر ۱۶ میلی متر برای اتصال جان سپری به بال تیر استفاده کنیم، خواهیم داشت:

$$\text{Stress ratio} = \frac{T_u}{\phi \cdot A_{nb} \cdot n_b \cdot F_{nv}} = \frac{33014}{0.75 \times 2.01 \times 4 \times 2 \times 0.45 \times 10000} = 0.61$$

$$L_{c,mid} = 3d_b - d_b = 2d_b = 3.2 \text{ cm}$$

$$L_{c,end} = 2d_b - \frac{1}{2}d_b = 1.5d_b = 2.4 \text{ cm}$$

$$R_{n,1} = 1.2 \times L_{c,end} \times F_u = 1.2 \times 2.4 \times 4070 = 11721.6 \text{ kg}$$

$$R_{n,2} = 2.4 \times D_b \times F_u$$



$$= 1015 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{vv} = \frac{V_{max}}{2n_w \cdot A} = \frac{6 \times 1000}{2(2) \times 2.01} = 746 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_r = \sqrt{(f_{vt})^2 \times (f_{vv})^2} = \sqrt{(1015)^2 \times (746)^2} = 1260 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_v = 0.2F_u = 0.2 \times 10000 = 2000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Stress ratio} = \frac{f_v}{F_v} = \frac{1260}{2000} = 0.63$$

کنترل گسیختگی ورق اتصال جان:

$$A_v = [h_{sw} - n_w(D_w + 0.2)]t_{sw} = [10 - 2(1.6 + 0.2)] \times 0.8 = 5.12 \text{ cm}^2$$

$$V_p = 0.3F_u A_v = 0.3 \times 3690 \times 5.12 \times 10^{-3} = 5.67 \text{ ton}$$

$$\text{Stress ratio} = \frac{V_{max}}{V_p} = \frac{6}{5.67} = 1.0$$

تعیین ضخامت ورق دیافراگم خارجی:

$$P_{b,f}^* = 2.86(4t_c + t_d)t_c f_{c,y} + 3.30 h_d t_d f_{d,y}$$

$$\text{if } \theta = 45^\circ \Rightarrow h_d = 2.3 \text{ cm}$$

$$f_{c,y} \geq f_{d,y} \Rightarrow f_{c,y} = f_{d,y} = 3120 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_{d,1} = \frac{P_{b,f}^* - (11.44t_c^2 f_{c,y})}{2.86t_c f_{c,y} + 3.3h_d f_{d,y}} = \frac{33014 - (11.44 \times (0.6)^2 \times 3120)}{(2.86 \times 0.6 \times 3120) + (3.3 \times 2.3 \times 3120)} = 0.69 \text{ cm}$$

$$\text{Range of validity: } \frac{h_d}{b_c} \geq 0.15 \frac{t_{b,f}}{t_d}$$

$$t_{d,2} = 0.15 \times \frac{t_{b,f} \times b_c}{h_d} = 0.15 \times \frac{0.8 \times 20}{2.3} = 1.04 \text{ cm}$$

$$t_d = \max(t_{d,1}, t_{d,2}) = 1.04 \text{ cm} \Rightarrow \text{Select } t_d = 1.5 \text{ cm}$$

$$M_p = Z_b \cdot f_y = 286 \times 2810 \times 10^{-5} = 8.03 \text{ ton.m}$$

$$C_{pr} = \frac{f_y + f_u}{2f_y} = \frac{2810 + 3690}{2 \times 2810} = 1.15$$

$$M_{pr} = C_{pr} \cdot R_y \cdot M_p = 1.15 \times 1.15 \times 8.03 = 10.62 \text{ ton.m}$$

$$V_{pr} = \frac{2M_{pr}}{L} = \frac{2 \times 10.62}{2.65} = 8 \text{ ton}$$

$$V_{max} = \frac{2 \times 1.1 \times M_u}{L \times 0.01} = \frac{2 \times 1.1 \times 7.23}{2.65 \times 0.01} = 6 \text{ ton}$$

$$f_v = \frac{V_{max}}{n_w \times \pi \times \frac{D_w^2}{4}} = \frac{6 \times 1000}{2 \times \pi \times \frac{1.6^2}{4}} = 1492 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_v = 0.2F_u = 0.2 \times 10000 = 2000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Stress ratio} = \frac{f_v}{F_v} = \frac{1492}{2000} = 0.75$$

کنترل ورق اتصال جان:

$$f_v = 1.5 \times \frac{V_{max}}{h_w \times t_w} = 1.5 \times \frac{6 \times 1000}{10 \times 0.8} = 1125 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_v = 0.4F_y = 0.4 \times 2810 = 1124 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Stress ratio} = \frac{f_v}{F_v} = \frac{1125}{1124} = 1.0$$

$$J = \frac{\pi \times (D_w \times S_w)^2 \times \frac{n_w}{2} \times (4 \left(\frac{n_w}{2}\right)^2 - 1)}{24} = \frac{\pi \times (1.6 \times 4.2)^2 \times \frac{2}{2} \times (4 \left(\frac{2}{2}\right)^2 - 1)}{24} = 18 \text{ cm}^4$$

$$y_{max} = \left(\frac{n_w}{2} - 0.5\right) \times 4.2 = \left(\frac{2}{2} - 0.5\right) \times 4.2 = 2.1 \text{ cm}$$

$$f_{vt} = \frac{V_{max} \times S_{ow} \times y_{max}}{2J} = \frac{6 \times 1000 \times 2.9 \times 2.1}{2(18)}$$

بی نوشت

¹ Shop drawings

² Ultrasonic test

³ Self-compacting concrete

⁴ T-Stub with through bolts

⁵ T-Stub with through bolts & outer diaphragm