

رفتار اتصال تیر فولادی به ستون بتنی دایره‌ای تقویت شده به وسیله ورق CFRP

یاسر محمدی

دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه دانشگاه فردوسی مشهد

محمد رضا اصفهانی *

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

محمد طاهر کمالی

دانشیار دانشگاه هرمزگان

چکیده

: مزایای قاب ساخته شده از ستون بتنی و تیر فولادی (RCS) باعث استفاده روزافزون آن‌ها در سازه‌ها شده است. از جمله ضعف این سازه‌ها جزئیات اجرایی پیچیده برای اتصال تیر به ستون است. در این مقاله رفتار اتصال تیر فولادی به ستون بتنی دایره‌ای به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی شده است. در بخش آزمایشگاهی دو اتصال خارجی RCS با ستون دایره‌ای ساخته و آزمایش شده است. در نمونه اول طبق راهنمای طراحی سازه‌های کامپوزیت تیر فولادی به ستون بتنی (ASCE 1994) به منظور جلوگیری از شکست فشاری بتن از تنگ‌های نزدیک به هم به فاصله ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. در نمونه دوم فاصله تنگ‌های استفاده شده به حداکثر مقداری که آیین‌نامه ACI-318-14 مجاز دانسته (۷۵ میلی‌متر) افزایش داده شده و برای مقاوم سازی در بالا و پایین تیر از دورپیچ ورق های پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP) استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که هر دو نمونه دارای رفتاری شکل پذیر بوده و دارای مقاومت زیادی در جابجای‌های نسبی بالا هستند. تقویت نمونه دوم به وسیله ورق های CFRP باعث افزایش ۱۳ درصدی مقاومت نهایی اتصال شده است. همچنین شکل پذیری نمونه تقویت شده افزایش یافته است. بنابراین استفاده از ورق‌های FRP می‌تواند جایگزین مناسبی برای اتصال های پیچیده RCS گردد. در بخش تحلیلی بررسی رفتار اتصال، هر دو نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار آباکوس مدل شد و نمودار پوش نیرو- جابجایی تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که رفتار اتصال‌ها به درستی توسط مدل‌های تحلیلی قابل پیش بینی است.

واژه‌های کلیدی: اتصال، تیر فولادی، ستون بتنی، CFRP.

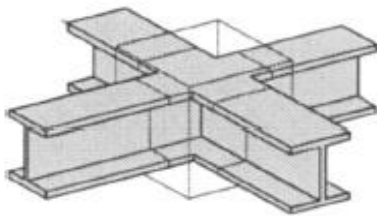
* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

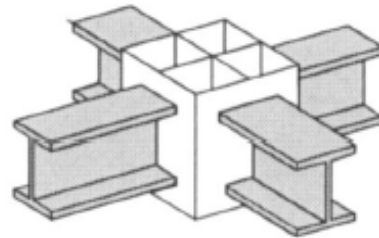
گسترده تری مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل ۱ دو انواع اتصال RCS آورده شده است.

شیخ و همکارانش [۲] ۱۷ اتصال تیر- ستون RCS داخلی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که اتصال های مورد آزمایش به طور کلی دارای دو حالت شکست هستند، حالت اول شکست برشی است که با تسلیم جان فولادی و ترک خوردگی بتن رخ می دهد. حالت دوم خردشدگی بتن است که در بالا و پایین تیر رخ می دهد که علت آن تنش فشاری بالایی می باشد که تیر فولادی به بتن اطراف خود منتقل می کند. حالت های شکست اتصال RCS در شکل ۲ نشان داده شده است.

مقاومت بالای بتن در عضو فشاری مانند ستون و عملکرد مناسب و یکسان فولاد در کشش و فشار در اعضای مانند تیر، محققین را به ساخت سازه های مرکب تیر فولادی و ستون بتنی^۱ (RCS) سوق داده است. استفاده از ستون های بتنی سبب افزایش سختی و خاصیت میرایی در سازه ها می شود و همچنین هزینه ساخت و ساز را کاهش می دهد. استفاده از تیر فولادی سبب افزایش جذب انرژی، افزایش شکل پذیری و کاهش بار مرده سازه می شود. سازه های RCS به دو نوع تیر پیوسته و ستون پیوسته طبقه بندی می شوند. آزمایش ها نشان داده است که سازه های RCS با طراحی تیر پیوسته دارای شکل پذیری بیشتری هستند [۱]. بنابراین به طور

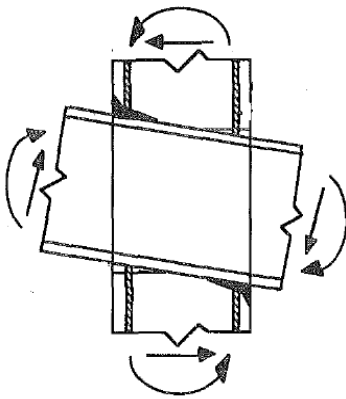


اتصال RCS با تیر پیوسته

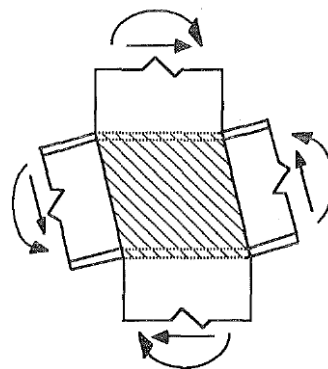


اتصال RCS با ستون پیوسته

شکل ۱- انواع اتصال تیر فولادی به ستون بتنی [۱]



خردشدگی بتن در بالا و پایین تیر



شکست برشی با تسلیم جان فولادی

شکل ۲- انواع حالت های خرابی اتصال تیر فولادی به ستون بتنی [۲]

الیافی فلزی و بتن با سیمان مهندسی شده در ناحیه اتصال بود. کانو [۴] نوزده نمونه اتصال داخلی را با هدف بررسی حالت های شکست اتصال، عملکرد اتصال دارای بتن با مقاومت بالا، نسبت طول به عرض اتصال و اثر بار محوری ستون بر عملکرد اتصال،

پاراموتسیون و وایت [۳] ۹ اتصال خارجی RCS گوشه را با جزئیات متفاوت مورد بررسی قرار دادند. از جمله متغیرهایی که در این آزمایش ها مورد ارزیابی قرار گرفت، تاثیر تنگ های عبوری با نسبت های مختلف از جان تیر فولادی، استفاده از بتن

¹ Reinforced Concrete Columns and Steel Beams

بتن اطرافش ایجاد می‌شود. کمیته طراحی سازه‌های مرکب تیر فولادی به ستون بتنی ASCE1994 برای جلوگیری از این حالت شکست روش‌های مختلفی را پیشنهاد داده است [۱۲]. از جمله این روش‌ها می‌توان استفاده از ورق‌های فولادی به منظور محصور کردن بتن در بالا و پایین ناحیه اتصال را نام برد. کاربرد این ورق‌ها محصور سازی بتن و جلوگیری از خرد شدن بتن است. این روش بخاطر برش دادن ورق‌های مورد نیاز، خم دادن و جوش دادن مجدد آنها به ناحیه اتصال اجرای اتصال را دچار پیچیدگی می‌کند. از دیگر روش‌های پیشنهادی کمیته ASCE1994 برای جلوگیری از خرد شدن بتن در نواحی بحرانی بالا و پایین تیر فولادی استفاده از دورپیچ‌های نزدیک به هم در نزدیکی ناحیه اتصال می‌باشد. در این پژوهش برای جلوگیری از خرد شدن بتن ستون در نواحی اتصال و همچنین ارائه یک اتصال ساده، از ورق‌های CFRP در بالا و پایین اتصال استفاده شده است. بدین منظور دو نمونه بزرگ ساخته و آزمایش شد. در نمونه اول، بتن ستون ناحیه اتصال به کمک تنگ‌های نزدیک به هم به فاصله ۲۵ میلی‌متر محصور شده است. در نمونه دوم با محصور سازی بتن بالا و پایین ناحیه اتصال با استفاده از ورق‌های پلیمر مسلح الیاف کربن^۱، خردشدگی بتن در نواحی اطراف ناحیه اتصال کنترل می‌شود. نتایج تحقیق اصفهانی و کیانوش [۱۳] نشان داده است که محصور سازی بتن توسط ورق‌های CFRP، مقاومت فشاری و شکل پذیری ستون‌های بتنی دایره ای شکل را به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌دهد. همچنین برای ساده سازی بیشتر اجرای اتصال RCS، در اجرای تنگ‌های ناحیه اتصال، از سوراخ کردن جان تیر برای ایجاد حلقه تنگ خودداری شده است. تنگ‌های اجرا شده در این ناحیه به صورت نیمه حلقه و با رعایت طول خم ۹۰ درجه اجرا شده‌اند. در بیشتر پژوهش‌های گذشته در حوزه اتصال‌های RCS رفتار اتصال داخلی بررسی شده است و پژوهش‌های اندکی بر روی رفتار اتصال خارجی انجام شده است. ستون‌های دایره ای در پل‌ها کاربرد زیادی داشته و استفاده از ورق‌های FRP در تقویت آنها به راحتی امکان پذیر است. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق در بهسازی سازه‌های RCS موجود و ایجاد سازه‌های مقاوم تر با اجرای ساده تر مورد استفاده قرار گیرد.

مورد آزمایش قرار داد. جزئیات مختلفی مانند ورق‌های فولادی قرار گرفته شده در نواحی اطراف بالا و پایین تیر فولادی و اثر گل‌میخ‌های برشی در ناحیه اتصال از دیگر متغیرهای در نظر گرفته شده در این آزمایش‌ها بود. بوگجا [۵] پنج اتصال داخلی و یک اتصال خارجی مختلط تیر-ستون همراه با دال را تحت بارهای چرخه ای در دو جهت اصلی مورد آزمایش قرار داد. نمونه‌های این محقق شامل ستون‌های بتنی مسلح با پروفیل‌های فولادی عبوری از میان ستون می‌باشد. پارامنتسیون و وایت [۶] یک مدل ارزیابی مقاومت برشی قابل تحمل توسط اتصال RCS ارائه دادند. در این مدل با استفاده از کرنش‌های صفحه‌ای رابطه‌هایی برای پیش بینی مقاومت برشی قابل تحمل توسط اتصال‌های خارجی و اتصال‌های داخلی RCS ارائه داده شد. چن و چنگک [۷] به منظور ارزیابی رفتار اتصال RCS با دال و بدون دال، شش اتصال را مورد آزمایش قرار دادند. پارامترهای در نظر گرفته شده در این نمونه‌ها تاثیر دال، تاثیر شکل خاموت بندی منطقه اتصال، نوع بارگذاری و اثر عبور تیر از ناحیه اتصال بود. کورامتو و نیشیما [۱] سه اتصال تیر-ستون RCS را مورد آزمایش قرار دادند. جزئیات اتصال مورد نظر از نوع اتصال ستون پیوسته RCS بود که به وسیله سخت کننده‌های افقی تقویت شده بودند. این آزمایش نشان داد که استفاده از جعبه‌های فلزی ضخیم تر و صفحات باربری گسترش یافته، در عملکرد سازه ای اتصال‌های RCS موثر است. علیزاده و همکارانش [۸] دو جزئیات اجرائی جدید برای اتصال داخلی RCS پیشنهاد دادند. متغیر اثر اضافه نمودن سخت کننده به دورپیچ‌های فولادی بالا و پایین تیر در این اتصال‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین علیزاده و همکارانش [۹] اثر بتن خودتراکم بر رفتار اتصال RCS را مورد ارزیابی قرار دادند. از دیگر تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته می‌توان به مطالعات لی وی و همکارانش [۱۰] و نیشیاما و همکارانش [۱۱] اشاره نمود.

۲-هدف از تحقیق و اهمیت پژوهش

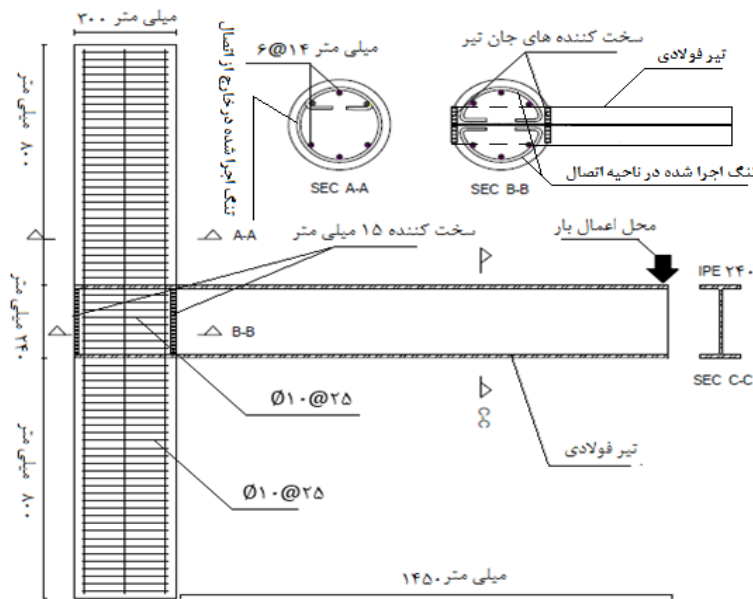
اساسی ترین دلیل ایجاد ناپایداری در اتصال RCS خرد شدن بتن در بالا و پایین تیر فولادی ناحیه اتصال است. علت خرد شدگی بتن، نیروی فشاری بالایی است که به علت چرخش تیر فولادی در

¹ Carbon Fiber Reinforced Plastic

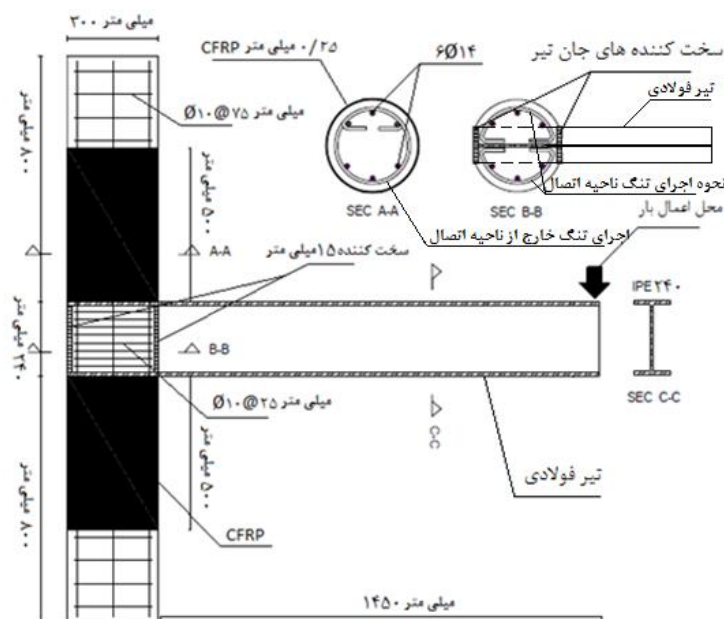
۳- نمونه های آزمایشگاهی

جان تیر همانند نمونه اول به ۲۵ میلیمتر کاهش یافته است. از مقطع IPE 240 با طول ۱۷۵۰ میلی متر به عنوان تیر در هر دو نمونه استفاده شده است. در هر دو نمونه چهار سخت کننده به ضخامت ۱۵ میلی متر در ابتدا و انتهای ناحیه اتصال به جان تیر جوش شده است. هدف از این سخت کننده ها جلوگیری از حالت شکست برشی تیر ناحیه اتصال است. در نمونه دوم برای دورپیچ بالا و پایین ستون در هر قسمت از دولایه پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی به طول ۵۰۰ میلی متر استفاده شده است. شکل ۳ جزئیات اجرایی نمونه اول و شکل ۴ جزئیات اجرایی مرتبط با نمونه دوم را نشان داده است.

هر دو نمونه از نوع اتصال RCS خارجی و از نوع تیر پیوسته هستند (شکل ۳ و ۴). طول ستون ۱۸۴۰ میلی متر و قطر ستون ۳۰۰ میلی متر می باشد. نسبت آرماتور طولی بکار رفته در ستون ۱/۳ درصد است به گونه ای که از ۶ عدد آرماتور با قطر ۱۴ میلیمتر استفاده شده است. آرماتور تنگ های مورد استفاده در هر دو نمونه دارای قطری به اندازه ۱۰ میلی متر می باشند. در نمونه اول فاصله تنگ ها در سرتاسر ستون ۲۵ میلیمتر می باشد. در نمونه دوم فاصله تنگ ها در خارج از ناحیه جان تیر ۷۵ میلیمتر می باشد. فاصله تنگ ها در نمونه دوم در ناحیه



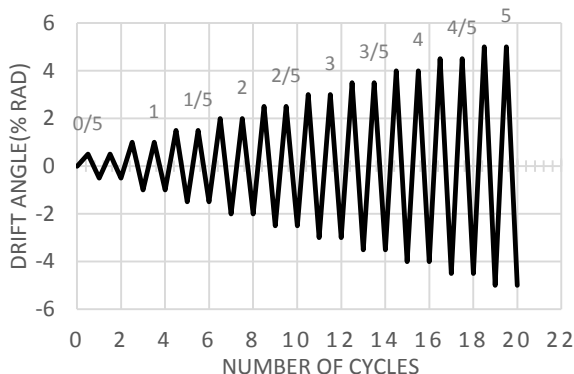
شکل ۳- جزئیات نمونه ۱



شکل ۴- جزئیات نمونه ۲



شکل ۵- تجهیزات آزمایش



شکل ۶- جابجایی نسبی های اعمال شده به اتصال

۶- نتایج آزمایش

در نمونه اول ترک های خمشی از جابجایی نسبی یک درصد در ناحیه بالا و پایین اتصال تیر فولادی به ستون بتنی شروع به رشد کردن نمودند. ترک های قطری از جابجایی نسبی ۲/۵ درصد آغاز شدند. در جابجایی نسبی ۴/۵ درصد جداشدگی بتن ناحیه اتصال از فولاد از کنارها که به علت اجرای تنگ نیمه حلقه ای بود آغاز شد و در جابجایی نسبی پنج درصد مقدار بازشدگی ترک خمشی ناحیه بالا و پایین تیر به ۶/۲ میلی متر رسید. علت خرابی و افت مقاومت در نمونه اول را می توان خرد شدگی و ریزش بتن ناحیه اطراف تیر فولادی دانست. در شکل ۷ خرابی های ایجاد شده در اتصال شماره ۱ مشاهده می شود. ترک های ایجاد شده در ناحیه اتصال نمونه اول در شکل ۷- الف و خرد شدگی بتن به علت نیروی فشاری در ناحیه اتصال در شکل ۷- ب نشان داده شده است.

۴- مشخصات مواد

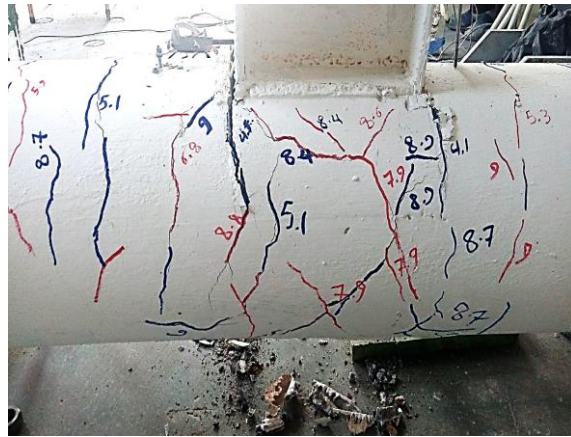
طرح اختلاط بتن بر اساس آئین نامه ۱۴-۳۱۸-۱۴ ACI انجام گرفته است [۱۴]. مقاومت فشاری بتن استفاده شده در ستون ها ۴۰/۵ مگاپاسکال می باشد. تنش تسلیم فولاد تیر برابر ۳۵۶ مگاپاسکال و تنش نهایی آن برابر ۴۹۳ مگاپاسکال می باشد. آرماتورها تنش تسلیم ۴۰۸ مگاپاسکال و تنش نهایی ۶۱۵ مگاپاسکال را دارا هستند. همچنین ورق های CFRP دارای مدول الاستیسیته ۲۳۰ گیگا پاسکال و تنش نهایی ۴۹۰۰ مگاپاسکال می باشد. هر لایه ورق CFRP دارای ضخامت ۰/۱۱۱ میلی متر می باشد.

۵- روش آزمایش

در آزمایش بار به صورت کنترل جابجایی به انتهای تیر وارد شده است. دو انتهای ستون در حقیقت نقاط عطف میانی در ستون های بالا و پایین قاب اتصال RCS می باشند. همچنین نقطه انتهایی تیر نیز نقطه عطف میانی تیر در نظر گرفته شده است. بنابراین در این نقاط تمام تکیه گاه ها غلطکی در نظر گرفته شده اند. از آنجا که طبق آزمایش کانو [۴] بار فشاری سبب افزایش شکل پذیری و سختی اتصال می شود و انجام آزمایش بدون اعمال بار فشاری سبب رفتار محافظه کارانه اتصال می شود در هر دو آزمایش با استفاده از یک جک هیدرولیکی مقدار نیرویی معادل ۱۰۰ kN به صورت فشاری به ستون وارد شده است. در طول زمان آزمایش مقدار بار فشاری وارد به ستون ثابت بوده است. همچنین برای اعمال بار رفت و برگشتی به تیر از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۶۰۰ kN استفاده شده است. در نقطه اعمال بار، جابجایی سنجی لیزری قرار گرفته که بتوان مقدار جابجایی مورد نظر را اندازه گیری کرد. تجهیزات آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

شروع بارگذاری از جابجایی نسبی ۱/۰۵ درصد بوده است. و جابجایی های نسبی ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ درصد هر کدام در دو سیکل رفت و برگشت به نمونه ها اعمال شده که در مجموع ۲۰ سیکل بارگذاری در هر آزمایش به ثبت رسیده است. جابجایی های نسبی اعمال شده به سازه در نمودار شکل ۶ آورده شده است.

¹ Drift



الف- ترک های خمشی و قطری ایجاد شده در نمونه اول ب- خرد شدگی بتن اطراف اتصال RCS در نمونه اول
شکل ۷- خرابی های ایجاد شده در اتصال شماره ۱

بتن در ناحیه جان تیر به علت اجرای نیمه حلقه تنگ ها و ترک های قطری دانست که در ناحیه اتصال بوجود آمده بود. همچنین از جابجایی نسبی چهار درصد ترک هایی در چسب CFRP ظاهر شد که نشان دهنده فشار زیادی است که در نتیجه محصور سازی بتن در ورق های CFRP بوجود آمده بود. خرابی های ایجاد شده در نمونه دوم در شکل ۸-الف و ۸-ب نشان داده شده است.

در نمونه دوم، رشد ترک های قطری همانند نمونه اول از جابجایی نسبی یک درصد و دقیقاً در مرز بالا و پایین اتصال تیر فولادی به ستون بتنی آغاز شد. در جابجایی نسبی چهار درصد، جدا شدگی بتن ناحیه اتصال به علت اجرای نیمه حلقه تنگ ناحیه اتصال آغاز گردید و در جابجایی نسبی پنج درصد این جدا شدگی به حدود هفت میلی متر رسید. علت اصلی افت مقاومت در نمونه دوم را می توان جداشدگی

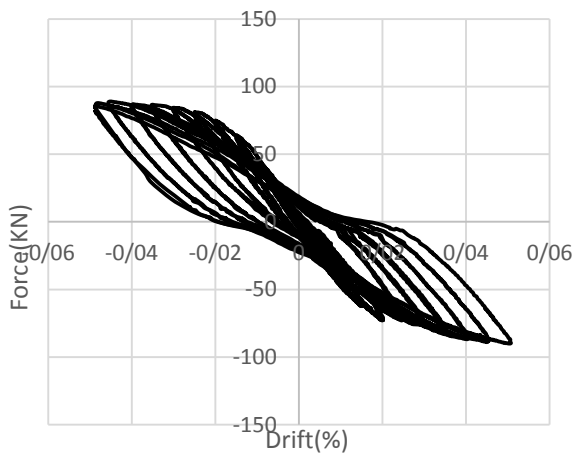


الف- ترک های قطری و خمشی ایجاد شده در نمونه دوم ب- جداشدگی بتن ناحیه اتصال در ناحیه جان تیر
شکل ۸- خرابی های ایجاد شده در اتصال ۲

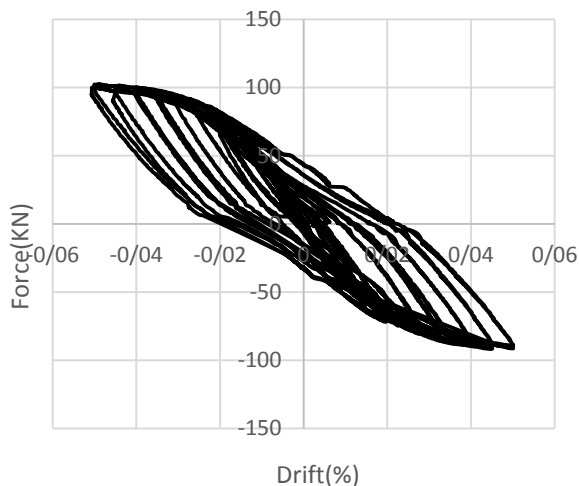
جابجایی نسبی ۴/۵ درصد افزایش بار با افزایش مقدار جابجایی هماهنگ بوده است، اما از این جابجایی نسبی به بعد بخاطر جدا شدگی بتن ناحیه اتصال و رشد ترک های قطری در اطراف ناحیه اتصال این روند کاهش می یابد. از مقایسه نمودار نیرو - جابجایی می توان متوجه شد که با وجود سه برابر شدن فاصله تنگ ها در نمونه دوم نسبت به نمونه اول به علت اثر محصور سازی بتن در نمونه دوم ناشی از ورق های CFRP ظرفیت باربری نهایی در این نمونه ۱۳ درصد نسبت به نمونه اول رشد داشته است.

نمودار پوش- نیرو جابجایی دو نمونه به صورت مقایسه ای در شکل ۹ آورده شده است. در ابتدا که خرابی و ترک مهمی در اتصال نمونه اول ایجاد نشده است منحنی پوش نیرو- جابجایی دو اتصال به صورت تقریبی بر یکدیگر منطبق هستند. از جابجایی نسبی ۲/۵ درصد با رشد ترک ها و شروع خرد شدن بتن به علت نیروی فشاری ناحیه اتصال در نمونه اول، سختی این اتصال کاهش یافته و شدت افزایش بار همراه با افزایش جابجایی کاهش می یابد. اما در نمونه دوم به علت عدم خردشدگی بتن ناحیه اتصال تا

در نظر گرفته شده اند. تابع تسلیم پیشنهادی توسط لب لینر [۱۵] و اصلاح شده توسط لی و وینوس [۱۶] برای لحاظ نمودن ارزیابی متفاوتی از مقاومت تحت اثر کشش و فشار مورد پذیرش قرار گرفته است.

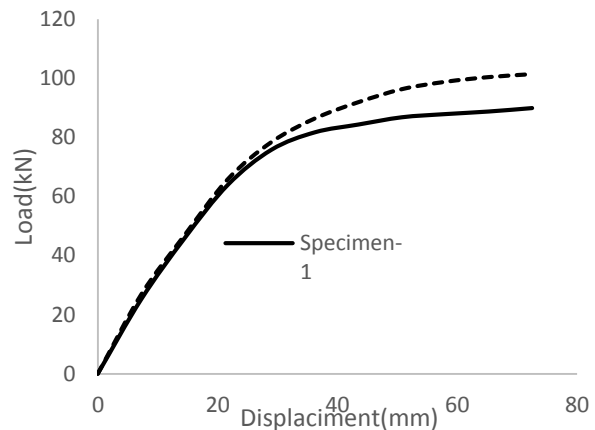


شکل ۱۰- نمودار هیستریزیس نمونه ۱



شکل ۱۱- نمونه هیستریزیس نمونه ۲

در این مدل، آسیب همسانگرد و قانون جریان پتانسیل، ناوابسته فرض گردیده اند. پاسخ کششی و فشاری بتن در بارگذاری کششی و فشاری در شکل ۱۲ آورده شده است. کاهش سختی الاستیک روی شاخه نرم شوندگی منحنی تنش- کرنش کششی و فشاری می باشد که به ترتیب با استفاده از دو متغیر خسارت، d_c و d_t تعیین شده اند. این دو متغیر خسارت می توانند مقادیری بین صفر تا یک داشته باشند. مقدار صفر نشان می دهد که مصالح آسیب ندیده است و مقدار یک بیانگر افت کلی مقاومت می باشد. مقدار این پارامتر تابعی از هندسه و نوع مدل بتن مسلح است.



شکل ۹- نمودار مقایسه نیرو - جابجایی دو نمونه آزمایش شده

علاوه بر حداکثر نیروی قابل تحمل توسط یک اتصال، میزان شکل پذیری آن نیز از پارامترهای بسیار مهم در بررسی رفتار آن می باشد. میزان شکل پذیری یک سازه را از بررسی نمودار بارگذاری و باربرداری چرخه ای 1 آن می توان بررسی کرد.

اتصال های نمونه یک و نمونه دو به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. نمودار هیستریزیس اتصال شماره یک دارای لاغرشدگی می باشد در حالی که نمودار شماره ۲ را می توان جزء نمودارهای هیستریزیس چاق دسته بندی نمود. مساحت سطح محصور در نمونه ۲ که نشانه جذب انرژی اتصال می باشد بسیار بیشتر از نمونه اول می باشد. این شکل پذیری و جذب انرژی بیشتر در حالی در نمونه تقویت شده به وسیله ورق ها CFRP رخ داده است که فاصله تنگ های محصور کننده بتن در آن حداکثر مقداری است که برای ستون های دایره ای آئین نامه ACI-14 محصور کننده در نمونه اول، حداقل مقدار مجاز آئین نامه مورد اشاره می باشد (محصور شدگی زیاد).

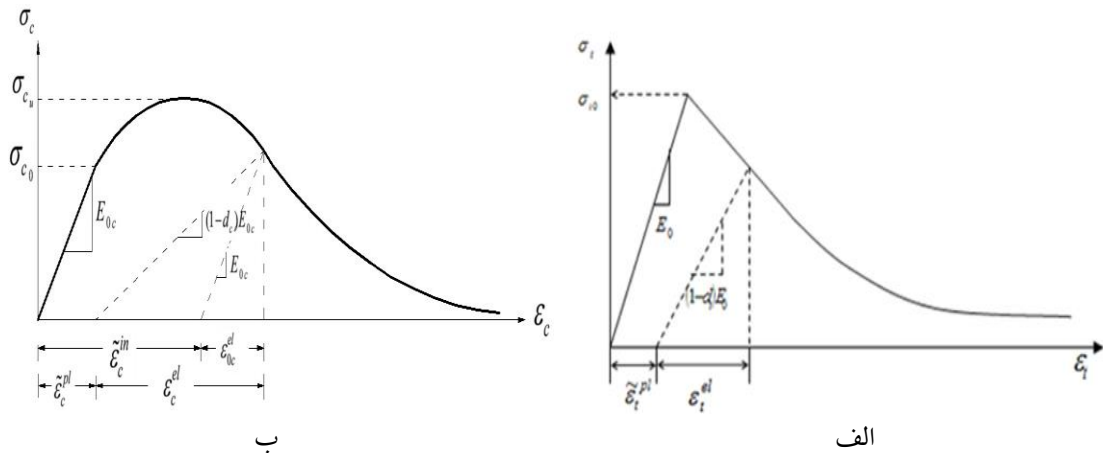
۷- مدل سازی عددی

در ادامه رفتار اتصالات مورد آزمایش قرار گرفته شده در نرم افزار آباکوس^۲ مورد صحت سنجی قرار گرفته است. در شبیه سازی رفتار بتن اتصال RCS از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک^۳ استفاده شده است. این مدل بر اساس رفتار پلاستیک پیوسته می باشد که در آن دو مکانیزم شکست اصلی شامل خرد شدن فشاری و ترک خوردگی کششی بتن

³ Concrete damage plasticity model

¹ Hysteresis

² Abaqus



شکل ۱۲- رفتار بتن الف: در حین بارگذاری و باربرداری در کشش ب: در حین بارگذاری و باربرداری فشار [۱۶]

که بر اثر محصورشدگی در اثر خاموت ها زاویه اتساع می تواند برای بتن مسلح بین ۲۰ تا ۴۰ درجه تعریف شود. در این مدلسازی زاویه اتساع ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ اتصال مرکب تیر فولادی به ستون بتنی نمونه دو مدل شده در آباکوس آورده شده است. بار ۱۰۰ kN به صورت بار گسترده به سطح بالایی ستون وارد شده است. همچنین در نقطه اعمال بار رفت و برگشتی به تیر، حلقه صلبی تعریف شده تا از تمرکز تنش در تیر جلوگیری کند. ورق های CFRP تقویت کننده ناحیه بالا و پایین ستون با رنگ مشکی در شکل ۱۳ مشخص است.

پارامتر های d_c ، d_t ، σ_c و σ_t به صورت زیر تعریف می شوند. σ_c و σ_t به ترتیب تنش فشاری و کششی در هر لحظه هستند. f_c و f_t به ترتیب تنش فشاری حداکثر و تنش کششی حداکثر قابل تحمل توسط مقطع می باشند.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (2)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (3)$$

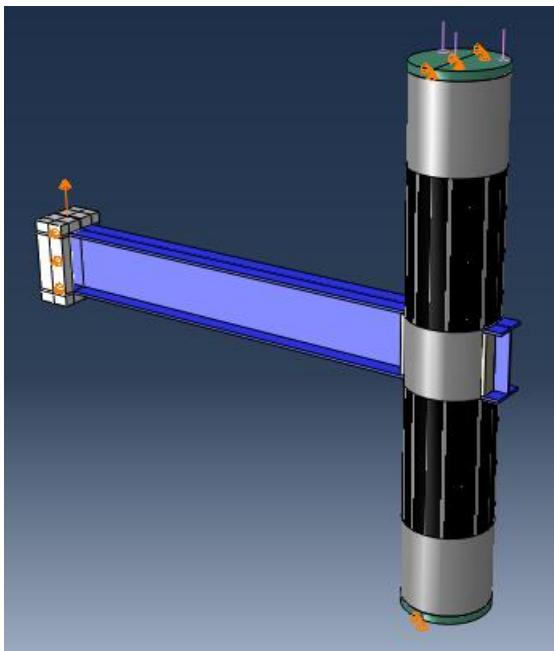
$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (4)$$

$\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ ، $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ ، $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ، $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ به ترتیب کرنش پلاستیک کششی، کرنش پلاستیک فشاری، کرنش ترک خوردگی کششی و کرنش غیرالاستیک فشاری می باشند. روابط تنش-کرنش تحت اثر کشش و فشار تک محوره به صورت زیر می باشد. همچنین کرنش ترک خوردگی، $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ و کرنش غیرالاستیک فشاری، $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ را می توان به این صورت به دست آورد:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (6)$$

در اینجا $\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$ و $\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0}$ بوده که به ترتیب کرنش الاستیک کششی و فشاری برای مصالح آسیب ندیده می باشند [۱۶]. از جمله پارامترهای تاثیر گذار دیگر در این مدل، زاویه اتساع بتن می باشد که مقدار کرنش پلاستیک بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می کند. بر اساس یافته های ورمر و بارست [۱۷] موادی مانند خاک، سنگ و بتن زاویه اتساع ۲۰ درجه دارند



شکل ۱۳- نمونه شماره ۲ مدل شده در نرم افزار آباکوس

تیر فولادی و ستون بتنی با المان 3D-solid هشت گرهی و میلگردهای طولی و عرضی با المان خریای ۳ بعدی دو گرهی مدل

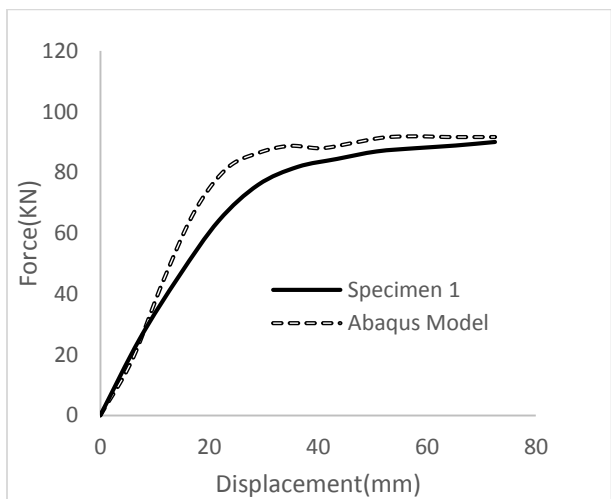
۸- نتیجه گیری

در این پژوهش دو اتصال خارجی RCS با ستون دایره ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در نمونه اول برای کنترل خردشدگی بتن بالا و پایین تیر از حداقل فاصله تنگ مجاز در آئین نامه -ACI 318 14 (۲۵ میلی متر) استفاده شد و در نمونه دوم فاصله تنگ ها به حداکثر مقدار مجاز آئین نامه مذکور به ۷۵ میلی متر افزایش یافت. در نمونه دوم از دو لایه دورپیچ ورق های پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی برای محصور سازی بتن بالا و پایین تیر استفاده شد. حالت خرابی در نمونه اول، خرد شدگی بتن اطراف ناحیه اتصال در ستون بود. لیکن در نمونه دوم، به علت محصور شدگی مناسب بتن که به وسیله ورق های CFRP انجام شد، حالت خرابی به شکست بتن ناحیه اتصال تغییر پیدا کرد. از نمودار پوش نیرو-جابجایی دو اتصال مشخص شد که نمونه تقویت شده توسط CFRP با وجود فاصله تنگ سه برابری نسبت به نمونه اول دارای مقدار بار قابل تحملی حدود ۱۳ درصد بیشتر از نمونه اول است. همچنین از مقایسه مساحت محصور در نمودار هیستریزس هر دو اتصال مشخص شد که میزان جذب انرژی نمونه دوم بسیار بیشتر از نمونه اول بدست آمده است. بنابراین می توان از دورپیچ های پلیمری مسلح (FRP) برای بهسازی و بهبود رفتارهای اتصال RCS با ستون دایره ای استفاده کرد. در بخش مدلسازی عددی، به مدل سازی اتصال های آزمایش شده در نرم افزار آباکوس پرداخته شد. در این مدل سازی ها رفتار بتن با استفاده از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک و رفتار آرماتورها و تیر فولادی با استفاده از نمودار تنش - کرنش بدست آمده از آزمایش کشش مدلسازی شد. نمودارهای مقایسه پوش نیرو-جابجایی هر دو اتصال مدل شده در نرم افزار آباکوس به خوبی توانست رفتار نمونه های آزمایشگاهی شامل ظرفیت نهایی اتصال و سختی اولیه را به درستی پیش بینی کند.

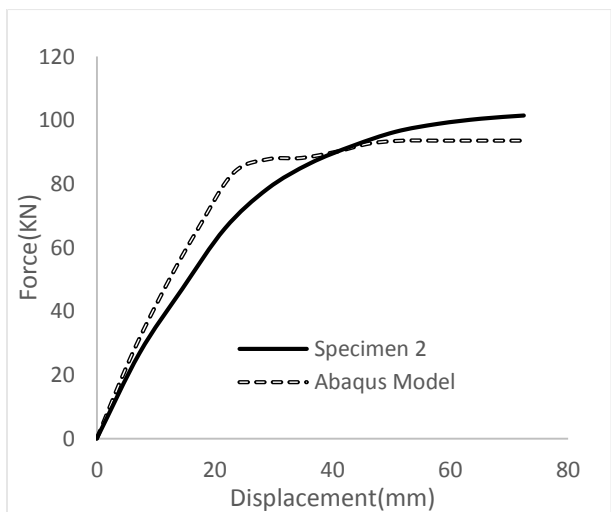
۹- مراجع

- [1] Kuramoto H., Nishiyama I., Seismic Performance and Stress Transferring Mechanism of Through-Column-Type joints for Composite Reinforced Concrete and Steel Frames, Journal of Structural Engineering, 130(2), p: 352-360, 2004.
 [2] Sheikh T.M., Deierlein G.G., Yura J.M., Jirsa J.O., Beam-Column moment connections for

سازی شده اند. اندرکنش بین آرماتورها و بتن و قسمتی از تیر که در بتن قرار گرفته است به صورت مدفون و از نوع Embed تعریف شده است. نوع تحلیل در نظر گرفته شده برای آنالیز سازه از نوع Explicit در نظر گرفته شده است. برای افزایش سرعت محاسبات Mass Scale برابر با $10^{-5} * 2.35$ برای آنالیز در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۴ و ۱۵ نمودار حاصل از آنالیز نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برای نمونه اول و نمونه دوم به صورت مقایسه ای آورده شده است. نمودارهای مقایسه پوش نیرو-جابجایی هر دو اتصال مدل شده در نرم افزار آباکوس به خوبی توانسته مدل های آزمایشگاهی را پیش بینی کند و در هر دو نمونه سختی اولیه و نیروی نهایی قابل تحمل توسط اتصال به درستی برآورد شده است.



شکل ۱۴- مقایسه مدلسازی نرم افزار آباکوس با مدل آزمایشگاهی برای نمونه ۱



شکل ۱۵- مقایسه مدلسازی نرم افزار آباکوس با مدل آزمایشگاهی برای نمونه ۲

- [16] Lee J, Fenves G.L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of engineering mechanics*, Vol 124, p: 892-900, 1998
- [17] Vermeer P.A, De Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock, 29(3), p: 311-9, 1984
- composite frames: part1, *Journal of Structural Engineering*, , 115(11), p: 2858 -76, 1989.
- [3] Parra-Montesinos G., Wight J.K., Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections, *Journal of structural Engineering* , 126(10), p: 1113-21., 2000.
- [4] Kanno R., Strength deformation and seismic resistance of joints between steel beams and reinforced concrete columns PhD dissertation , cornell University Ithaca N, Y; 1993
- [5] Bugeja M.N., Seismic behavior of composite moment resisting frame systems PhD dissertation Texas A&M University, USA; 1999.
- [6] Parra-Montesinos G., and Wight J.K., Modeling Shear Behavior of Hybrid RCS Beam-Column Connections, *Journal of Structural Engineering*, 127(1), p: 3-11, 2001.
- [7] Chenga C.T., Chen C.C., Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 61, p :587–606., 2005.
- [8] Alizadeh S., Attari Nader K.A., Kazemi M.T., The seismic performance of new detailing for RCS connections., *Journal of Constructional Steel Research.*, 91., p :76–88., 2013.
- [9] Alizadeh S., Attari Nader K.A., Kazemi M.T., Experimental investigation of RCS connections performance using self-consolidated concrete, *Journal of Constructional Steel Research.*, 114, p :204–216, 2015.
- [10] Li W., Li Q.N., Jiang L., Jiang W.S., Seismic performance of composite reinforced concrete and steel moment frame structures-state-of-the-art, *Composite Part*, 42(2), p: 190-206, 2011.
- [11] Nishiyama I., Kuramoto H., Noguchi H., Guidelines seismic design of composite reinforced concrete and steel building , *Journal of structural Engineering* , 130(2), p: 336-42, 2004
- [12] By the ASCE Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete Columns, Guidelines for Design Joints between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns, 120(80), p: 2330-2357., 1994
- [13]] Esfahani M. R., Kianoush M. R., Axial Compressive Strength of Reinforced concrete Columns Wrapped With Fiber Reinforced Polymers (FRP), *International journal of Engineering.*, 18(1), p: 1-11, 2005.
- [14] ACI Committee 318 (2014), Building code requirements for reinforced concrete, Report No ACI 318-14.
- [15] Lubliner J, Oliver J, Oller S, Onate E, A plastic-damage model for concrete, *International Journal of solids and structures*, vol.25, p:299-326, 1989.

The behavior of steel beams connecting to circular concrete columns strengthened by CFRP sheet

Yaser Mohamadi

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University Of Mashhad (FUM) ,Iran

Mohammad Reza Esfahani *

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University Of Mashhad (FUM), Iran

Mohammad Taher Kamali

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hormozgan University Of Bandar Abas, iran

Abstract

In this paper, the behavior of connection of steel beams to circular concrete columns is investigated analytically and experimentally. In the experimental part, two exterior connections of steel beam to circular concrete column (RCS) are tested. In the first specimen, based on the design guide of composite structures (ASCE 1994), transvers reinforcement in the column with the minimum spacing of 25mm is used to prevent compressive failure of concrete at the top and bottom of the steel beam. In the second specimen, the spacing of transvers reinforcement in the column at the top and bottom of the beam increased to 75mm which is the maximum allowable value in columns. Moreover, for strengthening the column at the top and bottom of the beam, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets are used. The experimental and analytical results show that the connections of both specimens are ductile and have great strength in high drift. The reinforcement of the second specimen using CFRP sheets improves the ultimate strength by 13%. Also, the ductility of the reinforced specimen is increased. As a result, the use of FRP sheets can be good alternatives for complex connections of steel beams to concrete columns. Also, both experimental specimens were modeled by Abaqus software, and the load- displacement relationships of the specimens were obtained and compared with the test results. The comparison shows that the analytical model can predict the behavior of the connections, appropriately.

Keywords: connection, beam steel, concrete column, CFRP.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir

