بررسی رفتار اتصال تیرفلزی با مقطع کاهش یافته به ستون‌های بتن‌آرمه

علی بابائی نژاد[1]، عبداله کیوانی[2]، نادر هویدائی[3*]

۱-کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران
۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران
۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

پس از زلزله‌های دهه‌های اخیر که باعث ایجاد خرابی‌های گسترده در اتصالات تیر به ستون شد، دانشمندان و مهندسان اتصالات جدیدی را برای جلوگیری از شکست‌های ترد ارائه نمودند. از انواع این اتصالات جدید می‌توان به اتصال تیرفولادی به ستون بتنی(RCS) و اتصال تیرفولادی با مقطع کاهش یافته به ستون فولادی(RBS) اشاره کرد. اما این اتصالات جدید ایراداتی نیز دارند، مهمترین ایراد اتصال RCS عدم دورشدن کافی مفصل پلاستیک از چشمه اتصال و مهمترین ایراد اتصال RBS باربری کم ستون فولادی در مقایسه با ستون بتنی می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش ترکیب دو اتصال RBS وRCS و بررسی رفتار اتصال ترکیب یافته جدید است. در اتصال ترکیب یافته، ستون از نوع بتنی بوده و تیر فولادی متصل به ستون دارای مقطع کاهش یافته می‌باشد. با این ترکیب، هم ایراد اصلی اتصال RCS و هم ایراد اصلی اتصال RBS برطرف خواهد شد. اتصال ترکیب یافته جدید، در حالت ستون عبوری از ناحیه اتصال بوده و از لحاظ موقعیت قرارگیری، از نوع ستون گوشه است. در این مقاله اتصال ترکیب یافته جدید پیشنهادی در نرم‌افزار مدلسازی شده و تاثیر پارامترهایی چون عمق برش تیر، ضخامت ورق پوششی (کاورپلیت) و ضخامت سخت‌کننده بررسی شده و با اتصال RCS مقایسه شد. مطالعات پارامترهای ذکر شده روی اتصال پیشنهادی نشان می‌دهد که عمق برش تیر تاثیر بسزایی در کاهش خرابی فشاری و خرابی کششی بتن دارد و باعث کاهش تنش در کاورپلیت، سخت‌کننده و آرماتورها می‌گردد. افزایش ضخامت ورق پوششی نیز خرابی فشاری و کششی بتن و جذب انرژی اتصال را افزایش داده و باعث کاهش تنش در کاورپلیت می‌شود همچنین باعث انتقال مفصل پلاستیک بر روی تیر می‌شود. افزایش ضخامت سخت‌کننده نیز خرابی فشاری و کششی بتن، تنش سخت‌کننده و تنش آرماتورها را کاهش می‌دهد و همچنین باعث افزایش تنش در کاورپلیت شده و به مقدار اندکی جذب انرژی اتصال را افزایش می‌دهد. بطور کلی جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال مرکب باعث بهبود عملکرد اتصال میگردد.

کلمات کلیدی: اتصال RCS، اتصال RBS، اتصال ترکیب یافته جدید، تحلیل استاتیکی غیرخطی، عمق برش تیر.

[*]نویسنده مسئول: نادر هویدائی
پست الکترونیکی: hoveidaei@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۳

DOI: 10.22065/jsce.2017.77338.1081
شناسه دیجیتال
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77338.1081

۱- مقدمه

از قرن ۱۹ میلادی سیستم‌های قاب خمشی فولادی به عنوان یک سیستم سازه‌ای مناسب مطرح گردیده اند. متاسفانه در سال‌های ابتدایی این تصور غلط وجود داشت که قاب‌های خمشی فولادی قادراند به تنهایی و با کمک جاری شدن اعضا و اتصالات خود و به هر گونه که طراحی می‌شوند نیروهای ناشی از زلزله را بدون ایجاد گسیختگی و خرابی تحمل کنند و بسیاری از ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف اداری، تجاری، صنعتی و مسکونی بر اساس همین تفکر و عقیده اشتباه ساخته شد، اما زلزله‌های سال ۱۹۹۴ نورثریج و ۱۹۹۵ کوبه این عقیده را به چالش کشید زیرا تعداد زیادی شکست در محل اتصال تیر به ستون ایجاد شد که بیانگر عملکرد ضعیف این نوع اتصال و قاب بود [۱]. پس از این زلزله‌ها، بررسی‌ها وتلاش‌ها برای پیدا کردن راه‌حل‌ها و اتصالات جدید جهت بهبود ظرفیت تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌ها شروع شد که نتایج این تحقیقات منجر به ارائه اتصالات خمشی جدید شد که ضعف موجود در اتصالات خمشی قدیمی را نداشتند. این اتصالات جدید در دهه‌های اخیر رواج بیشتری پیدا کرده و در ساختمان‌های بلند کارایی بیشتری را از خود نشان داده اند. در قاب‌های خمشی جدید شکست‌های ترد به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. از انواع این اتصالات جدید می‌توان به اتصال تیر فولادی به ستون بتنی(RCS) و اتصال تیر فولادی با مقطع کاهش یافته به ستون فولادی(RBS) اشاره کرد که در این پژوهش به ترکیب این دو اتصال خواهیم پرداخت. مهمترین قسمت اتصال RCS محل اتصال تیر فولادی به ستون بتنی است که به دو دسته کلی اتصال با تیر عبوری در محل اتصال و اتصال با ستون عبوری در محل اتصال تقسیم می‌شوند [۲].

- **بیان مساله**

در این پژوهش ترکیب اتصال RCS و RBS مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و رفتار آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این اتصال ترکیب شده، از تیر با مقطع کاهش یافته که یکی از اعضای مهم اتصال RBS است و از ستون بتنی که مهمترین عضو اتصال RCS است استفاده خواهیم کرد و هدف از این کار کاستن معایب اتصال ترکیب یافته جدید می‌باشد بدین صورت که در اتصال RCS تشکیل مفصل پلاستیک در بر ستون مهمترین عیب این اتصال است و در اتصال ترکیب یافته با استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته این ایراد رفع شده و مفصل پلاستیک دورتر از بر ستون تشکیل می‌شود. همچنین در اتصال RBS مقاومت فشاری ستون فولادی نسبت به ستون بتنی کم می‌باشد. بنابراین در اتصال ترکیب یافته از ستون بتنی به جای ستون فولادی استفاده شده است تا این ضعف نیز مرتفع گردد.

نگاهی به زلزله‌های اخیر نشان دهنده آسیب‌پذیری بسیار زیاد سازه‌ها از ناحیه اتصالات می‌باشد بنابراین اهمیت اتصالات در سازه‌ها بر هیچ‌کس پوشیده نیست و جامعه مهندسی همواره سعی بر ارایه راهکارهای جدید دارند. سازه‌های مرکب تیرفولادی و ستون بتنی دارای مزایای بسیاری هستند، در این سازه‌ها مهمترین بخش، اتصالات هستند که در صورت داشتن جزییات مناسب می‌توان همزمان از مزایای سازه فولادی و بتنی نظیر شکل‌پذیری بالای سازه‌های فولادی و سختی بالاتر ساختمان بتنی استفاده کرد. تابحال هم اتصال RBS و هم اتصال RCS بطور فراوان در ادبیات فنی مورد بحث و بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند اما ترکیب اتصال RBS و RCS بدان صورت مورد توجه قرار نگرفته است. لذا ضرورت انجام تحلیلهای نرم افزاری و نیز مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه بخوبی احساس میشود.

۲- کارهای انجام‌شده

با توجه به این که در این پژوهش ترکیب دو اتصال RBS و RCS مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت بنابراین به چند نمونه تحقیقات قبلی انجام شده در مورد هردو اتصال RCS و RBS به طور مختصر می‌پردازیم.

در طول دهه ۱۹۸۰ بسیاری از آزمایشات روی اتصالات تیر به ستون RCS توسط آمریکا و ژاپن انجام گرفته است. حدود ۴۰۰ اتصال RCSدر ژاپن و ۱۷ اتصال در آمریکا مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بسیاری از اتصالات آزمایش شده در ژاپن بطور خصوصی توسط شرکت‌های ساختمانی و با هدف اولیه دستیابی به جزئیات مشخص این نوع اتصالات پشتیبانی شده‌اند. نتایج این آزمایش‌ها جالب بودند اما دارای ارزش تحقیقاتی کافی برای تعیین مکانیزم‌های انتقال نیروهای داخلی اتصال نبودند[۳]. همزمان با انتشار دستورالعملASCE در سال۱۹۹۴،

۱۹نمونه اتصال میانی تیر پیوسته تحت بار چرخه‌ای در دانشگاه Cornell توسط Kanno [۴] مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که جزئیات اتصال تأثیر مستقیم روی مقاومت و شکل‌پذیری اتصال داشتند، اما تأثیری روی سختی کلی نمونه نداشت. همچنین آزمایشات نشان دادند که نیروی فشاری محوری در ستون مقاومت، سختی و شکل‌پذیری را افزایش داد. در دانشگاه میشیگان، چهار آزمایش اتصال RCS فضایی همراه با دال(دو اتصال میانی و دو اتصال کناری) و با در نظر گرفتن اندرکنش دال بتنی و گلمیخ‌های برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط Liang [۵] انجام گرفت. طراحی نمونه‌ها براساس معیار ستون قوی-تیرضعیف به منظور کنترل تغییرشکل اتصال براساس خرابی انجام گرفت. نتایج نشان داد که همه نمونه‌ها عملکرد لرزه‌ای مناسبی داشتند و عرض مؤثر دال برای محاسبه لنگر مثبت تیر می‌تواند برابر با عرض ستون بتنی درنظرگرفته شود. همچنین Sakaguchi [۶] ۱۳اتصال تیر به ستون RCS میانی و چهار اتصال کناری همراه با دال را مورد آزمایش قرار داد و هدف بررسی عملکرد برشی کاورپلیت‌های ناحیه اتصال بود . نیروهای برشی اعمالی در اتصال توسط صفحه جان فولادی، صفحه بتنی، و کاورپلیت‌ها تحمل می‌شوند. مطابق با نتایج طول مؤثر جان فولادی و کاورپلیت‌ها از آزمایش‌ها تعیین شدند و معادله عرض مؤثر صفحه بتنی در اتصال پیشنهاد شد. همچنین Nishiyama و Kuramoto [۷] ۳ اتصال تیر به ستون برای سازه‌های کامپوزیت را مدل سازی نمودند. این نمونه‌ها به منظور بررسی عملکرد سازه‌ای و مکانیزم‌های انتقال تنش مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق با نتایج، استفاده از کاورپلیت‌های ضخیم‌تر و صفحات رویه‌ای تکیه‌گاهی ادامه‌دار برای افزایش عملکرد سازه‌ای اتصالات مؤثر هستند. دانشمندان ژاپنی با همکاری دانشگاه استنفورد آمریکا [۸] اقدام به ارائه روش و مدل های جدید طراحی قاب های RCS کردند که این روش‌ها بر پایه اتصال با تیر عبوری از چشمه اتصال هستند. تمرکز این تحقیقات روی ناحیه فولادی و جزئیات تیر عرضی بود. این تحقیقات نشان داد بهتر است در طراحی اتصالات مدهای خرابی نیز در نظرگرفته شود. در دانشگاه تگزاس [۹] تحقیقاتی بر روی اتصال RCS، در حالت ستون میانی و تیر پیوسته برای محاسبه مقاومت و سختی اتصال، روی پانزده نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای یکنواخت انجام شد که نتایج حاکی از وجود دو نوع مد گسیختگی در اتصال بود که عبارتند از: ۱-گسیختگی برشی و تسلیم جان تیر و خردشدن و ترک برداشتن بتن ۲-گسیختگی خمشی و خردشدن بتن در محل‌های با نواحی تنش خمشی بالا. در دانشکده مهندسی دانشگاه Chiba ژاپن[۱۰] رفتار اتصال تیرفولادی به ستون بتنی که قبلا آزمایش شده بود را با استفاده از روش المان محدود به صورت سه بعدی غیرخطی مدل‌سازی کردند و به دو نتیجه مهم رسیدند که عبارتند از: ۱- مدل‌های تحلیلی پیشنهاد شده می‌تواند به طور صریح رفتارهای اجزای اتصال را با درنظرگرفتن رفتار لغزشی بین صفحات فولادی و بتن مشخص کند و ۲- رفتار لغزشی بین صفحات فولادی و بتن تاثیرات زیادی روی رفتار برشی اعضا می‌گذارد.

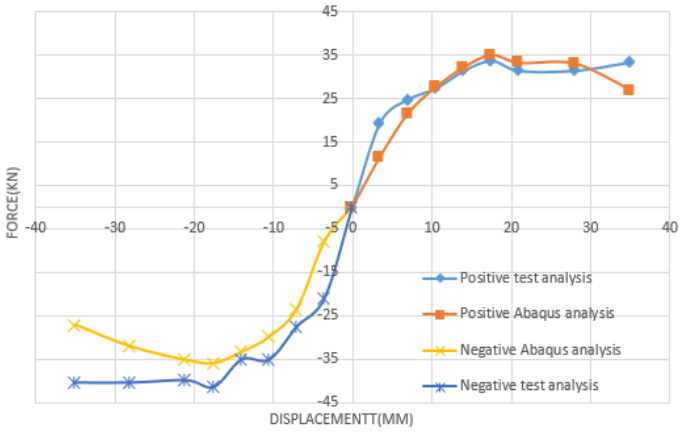
رضوی و کیوانی [۱۱] به بررسی رفتار و مکانیزم شکست اتصال جوشی سه تیر فولادی به ستون بتن آرمه کناری پرداختند. برای دستیابی به این هدف یک نوع اتصال با دتایل مشخص برای شبیه‌سازی و آزمایش انتخاب و با توجه به ضخامت کاورپلیت مشخص شد که افزایش ضخامت ورق‌ها تاثیراندکی در بهبود رفتار این نمونه‌ها دارد، چرا که بیشتر مکانیزم‌های خرابی به وجود آمده شامل تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها بوده و انرژی در تیرها مستهلک شده است.

تحقیقاتی در زمینه کمانش موضعی تیرهای RBS تحت بارهای چرخه‌ای [۱۲] انجام شد و پیشنهاد شد که برای به تاخیر انداختن کمانش موضعی قسمت RBS از سخت‌کننده‌هایی در مقطع کاهش یافته تیر استفاده شود. در این تحقیقات مشخص گردید استفاده از سخت‌کننده در محل RBS مانع از توزیع تنش‌های اضافی در تیر می‌گردد. تحقیقاتی نیز با موضوع بررسی آزمایشگاهی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به ستون‌های دارای فضای خالی دایره‌ای پر شده با بتن [۱۳] انجام شد و مشخص گردید که استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی تاثیرات بسیار مثبتی در عملکرد لرزه ای اتصال می‌گذارد.

۳- روش تحقیق

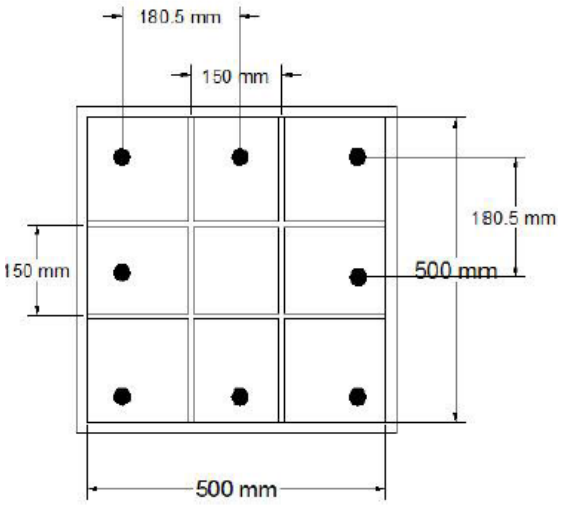
از آنجایی که در بین نرم‌افزارهای المان محدود قوی ترین نرم‌افزار مدل‌سازی نرم‌افزار آباکوس بوده و بیشترین توانایی را در مدل‌سازی بتن دارد بنابراین نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی و تحلیل اتصالات انتخاب گردید. برای مدل‌سازی رفتار واقعی بتن در نرم‌افزار از مدل عددی Wahalathantri [۱۴] که مدل اصلاح شده Hsu [۱۵] است، استفاده شد. در ابتدا یک نمونه اتصال RCS که توسط مرادیان و همکاران [۱۶]

در آزمایشگاه ساخته شده بود در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و مطابق شکل۱ نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نرم‌افزار مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزاری دارای تطابق مناسبی می‌باشند و بدین ترتیب صحت‌سنجی مدل نرم‌افزاری تایید گردید.

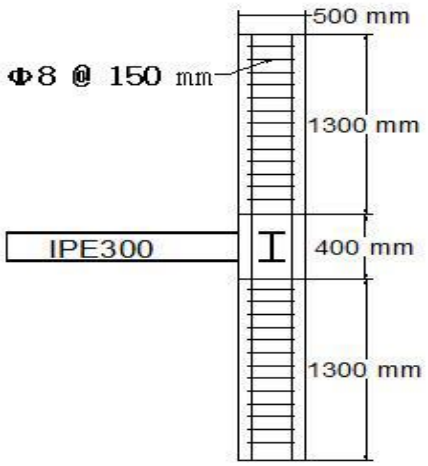


شکل۱: نمودار نیرو- جابجایی تیر در آزمایش و نرم‌افزار.

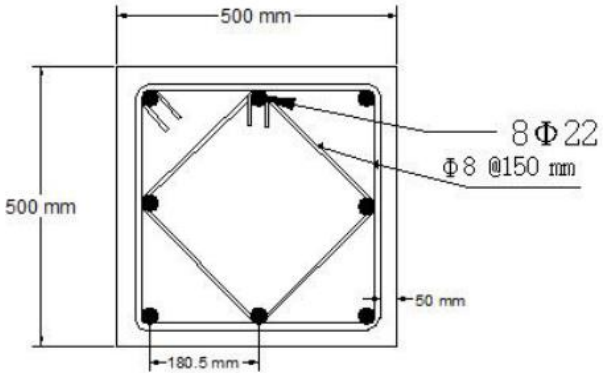
برای بررسی کامل اتصال ترکیب یافته ۱۸ مدل اتصال در نرم‌افزار ساخته و تحلیل گردد که ۳ مدل از ۱۸ مدل، اتصال RCS می‌باشند که دلیل این امر توانایی مقایسه اتصال ترکیب یافته با اتصال RCS بود که با این مقایسه مزایا و معایب اتصال ترکیب یافته مشخص می‌شد. بنابراین ۳ مدل دارای تیرهای معمولی بوده و برشی در بال آنها ایجاد نشد اما ۱۵ مدل دارای تیر با مقطع کاهش یافته بودند. مشخصات کلی اتصال در همه این ۱۸ مدل یکسان بود. مطابق اشکال۲ تا ۴ اجزای بکار رفته در این اتصالات عبارتند از : ۱- ستون بتنی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر و به ارتفاع ۳ متر، ۲- تیرفولادی IPE300 به طول ۱/۵ متر، ۳- ورق پوششی فولادی (کاورپلیت)، ۴- سخت‌کننده فولادی ۵- میلگرد شماره ۲۲ با طول ۲/۹ متر و ۶- خاموت شماره ۸ مربعی.



شکل۲: نحوه آرایش سخت‌کننده‌ها و میلگردها در هسته بتن

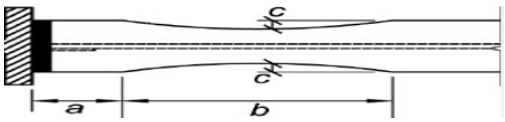


شکل۳: نحوه آرایش خاموت‌ها در ستون و تیرها



شکل۴: مشخصات خاموت‌ها.

پس از تعیین مشخصات کلی اتصالات، حال نوبت به تعیین مشخصات مقطع کاهش یافته تیر در ۱۵ مدل می‌رسد. با توجه به جنبه نوآوری این مقاله و عدم وجود تحقیقات قبلی در مورد اتصال ترکیب یافته، ضوابط مندرج در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در مورد کاهش مقطع تیر مبنای کار قرار گرفت. مطابق شکل۵ برای تعیین مشخصات مقطع کاهش یافته تیر باید سه پارامتر مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان تعیین گردد. این سه پارامتر توسط فرمول‌های ۱ تا ۳ مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در زیر ارائه شده است.



شکل۵: پارامترهای مقطع کاهش یافته.

$$0.5b_f \le a \le 0.75b_f \qquad (۱)$$

$$0.65d \le b \le 0.85d \qquad (۲)$$

در محدودیت های اشاره شده، b_f عرض بال تیر، d ارتفاع تیر، a فاصله شروع برش تا بر ستون، b طول مقطع برش یافته و c عمق برش تیر می‌باشد. اندازه پارامترهای a و b در ۱۵ مدلی که از تیر با مقطع کاهش یافته استفاده شده است ثابت بوده و با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند.

$$a = 0.65b_f \rightarrow 0.65 \times 150 = 97.5mm \rightarrow a = 97.5mm: cte$$

$$b = 0.65d \rightarrow 0.65 \times 300 = 195mm \rightarrow a = 195mm: cte$$

برای تعیین پارامتر c که همان عمق برش تیر است سه عمق برش متفاوت انتخاب شده است تا علاوه بر بررسی تاثیر جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی در اتصال مرکب، تاثیر افزایش عمق برش تیر در رفتار اتصال ترکیب یافته نیز بررسی و تحلیل گردد.

$$C_1 = 0.1b_f \rightarrow 0.1 \times 150 = 15mm \rightarrow C_1 = 15mm : C15$$

$$C_2 = 0.15b_f \rightarrow 0.15 \times 150 = 22.5mm \rightarrow C_2 = 22.5mm : C22.5$$

$$C_3 = 0.25b_f \rightarrow 0.25 \times 150 = 37.5mm \rightarrow C_3 = 37.5mm : C37.5$$

پس از مشخص شدن ابعاد و اندازه همه پارامترها مطابق جدول۱، حال می توان اتصالات را نام گذاری کرد. در جدول شماره ۱، حروف CP نماد کاورپلیت بوده و عدد مقابل آن ضخامت کاورپلیت را مشخص می‌کند، حرف S نیز نماد سخت‌کننده بوده و عدد مقابل آن ضخامت سخت‌کننده را نشان می‌دهد. ضخامت‌ها بر حسب میلی‌متر نوشته شده‌اند. عدد مقابل C نیز عمق برش تیر را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد.

جدول۱: اتصالات مدل سازی شده

NUM	MODELS	NUM	MODELS
1	CP10-S10-C0	10	CP30-S10-C15
2	CP20--S10-C0	11	CP30-S10-C22.5
3	CP30-S10-C0	12	CP30-S10-C37.5
4	CP10-S10-C15	13	CP10-S15-C15
5	CP10-S10-C22.5	14	CP10-S15-C22.5
6	CP10-S10-C37.5	15	CP10-S15-C37.5
7	CP20-S10-C15	16	CP10-S20-C15
8	CP20-S10-C22.5	17	CP10-S20-C22.5
9	CP20-S10-C37.5	18	CP10-S20-C37.5

با توجه به اینکه امکان مقایسه همه مدل‌ها به صورت همزمان وجود ندارد لذا این مدل‌ها تقسیم بندی می‌شوند تا بتوان تاثیر پارامترهای مختلف را به خوبی بررسی کرد. مدل‌ها در قالب نه گروه مختلف تقسیم بندی می‌شوند. مطابق جدول۲ در سه گروه اول ضخامت کاورپلیت و سخت کننده ثابت بوده و تاثیر عمق برش تیر بر روی رفتار اتصال بررسی می‌شود. مطابق جدول۳ در گروه‌های چهار تا شش، تاثیر ضخامت کاورپلیت بر رفتار اتصال ترکیب یافته در حالتی که ضخامت سخت‌کننده و عمق برش تیر ثابت باشد بررسی می‌شود. درگروه‌های هفت تا نه ، مطابق جدول۴ تاثیر ضخامت سخت‌کننده بر رفتار اتصال ترکیب‌یافته در حالتی که ضخامت کاورپلیت و عمق برش تیر ثابت باشد بررسی خواهد شد.

جدول۲: گروه های ۱ تا ۳

GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3
CP10-S10-C0	CP20-S10-C0	CP30-S10-C0
CP10-S10-C15	CP20-S10-C15	CP30-S10-C15
CP10-S10-C22.5	CP20-S10-C22.5	CP30-S10-C22.5
CP10-S10-C37.5	CP20-S10-C37.5	CP30-S10-C37.5

جدول۳: گروه های ۴ تا ۶

GROUP 4	GROUP 5	GROUP 6
CP10-S10-C15	CP10-S10-C22.5	CP10-S10-C37.5
CP20-S10-C15	CP20-S10-C22.5	CP20-S10-C37.5
CP30-S10-C15	CP30-S10-C22.5	CP30-S10-C37.5

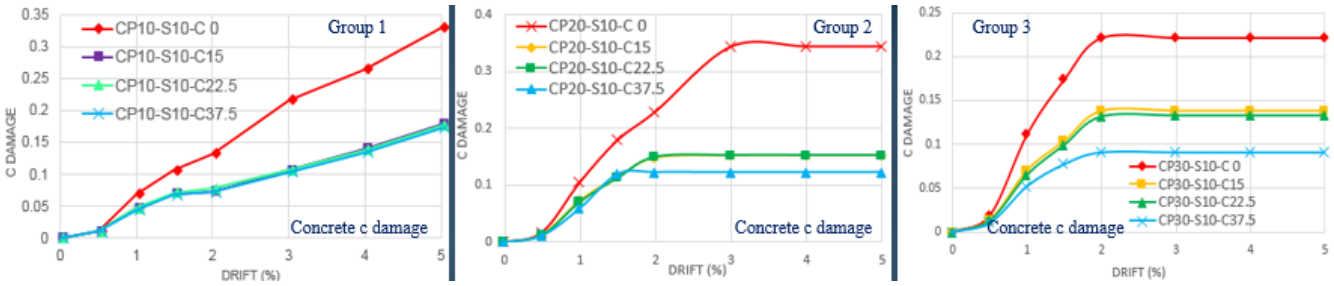
جدول۴: گروه های ۷ تا ۹

GROUP 7	GROUP 8	GROUP 9
CP10-S10-C15	CP10-S10-C22.5	CP10-S10-C37.5
CP10-S15-C15	CP10-S15-C22.5	CP10-S15-C37.5
CP10-S20-C15	CP10-S20-C22.5	CP10-S20-C37.5

۴- بحث و نتایج

- **خرابی فشاری ستون بتنی در اتصالات گروه های ۱ تا ۳**

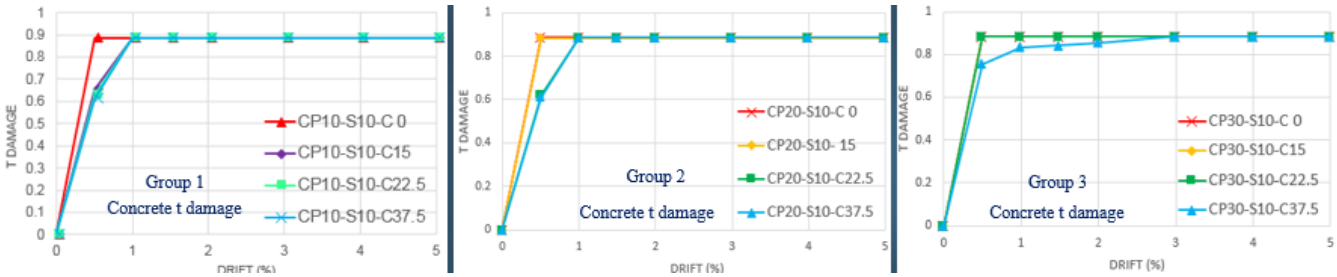
مطابق شکل۶ در اتصال مرکب و برای هر سه گروه جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی باعث کاهش چشمگیر در خرابی فشاری ستون بتنی می‌شود. دلیل کاهش خرابی فشاری بتن، افزایش تغییرشکل قسمت کاهش یافته تیرهای متصل به ستون است. زیرا افزایش کرنش و تغییرشکل تیرها سبب می‌شود تا نیروی کمتری از تیرها به چشمه اتصال و ستون بتنی رسیده و تنش در ستون کاهش یابد. کاهش تنش در ستون نیز کاهش خرابی فشاری ستون بتنی را به ارمغان می‌آورد. بنابراین خرابی فشاری ستون بتنی اتصال ترکیب یافته همیشه کمتر از خرابی فشاری ستون بتنی اتصال RCS است. مطابق شکل۶ بیشترین کاهش در خرابی فشاری ستون بتنی زمانی است که عمق برش تیر ماکزیمم باشد. در بین اتصالات ترکیب یافته، نمودارهای شکل۶ نشان می‌دهد که افزایش عمق برش تیر نیز باعث کاهش خرابی فشاری ستون بتنی می‌شود و می‌توان گفت که بین خرابی فشاری ستون بتنی و عمق برش تیر رابطه عکس وجود دارد و این امر یکی از مهمترین دستاوردهای این پژوهش می‌باشد و می‌توان با برش تیر متصل به ستون در اتصال مرکب خرابی فشاری ستون بتنی را تا ۵۰ درصد کاهش داد.



شکل۶: خرابی فشاری ستون بتنی در اتصالات گروه های ۱ تا ۳.

- **خرابی کششی ستون بتنی اتصالات گروه های ۱ تا ۳**

مطابق شکل۷ در اتصالات مرکب، استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی باعث می‌شود تا خرابی کششی بتن قبل از رسیدن به ماکزیمم خرابی خود، کاهش یابد. در گروه های ۱ و ۲ افزایش عمق برش تاثیری در به تاخیرانداختن ماکزیمم خرابی کششی ندارد اما مطابق شکل۷ در گروه سه مشاهده می‌شود که با افزایش عمق برش تیر خرابی کششی ماکزیمم در دریفت های بالاتر رخ می‌دهد. بنابراین جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی باعث بهبود خرابی کششی ستون بتنی می‌شود. و این امر نیز یکی از دستاوردهای مهم این تحقیق است.

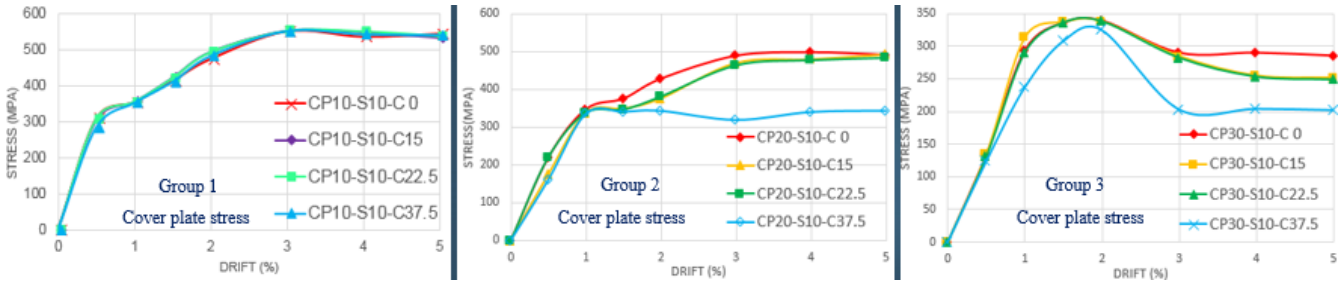


شکل۷: خرابی کششی ستون بتنی در اتصالات گروه های ۱ تا ۳.

- **تنش در کاورپلیت اتصالات گروه های ۱ تا ۳**

مطابق شکل۸ در اتصالات گروه یک، جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی تاثیری در تنش کاورپلیت ندارد که دلیل این امر ضخامت کم کاورپلیت می‌باشد. زیرا علی‌رغم تغییرشکل زیاد تیرهای با مقطع کاهش یافته، نیرویی که به کاورپلیت می‌رسد برای ایجاد تنش همانند اتصال RCS کافی می‌باشد. بنابراین تاثیر مثبت یا منفی‌ای در نمودارها مشاهده نمیشود. اما در گروههای دو و سه که

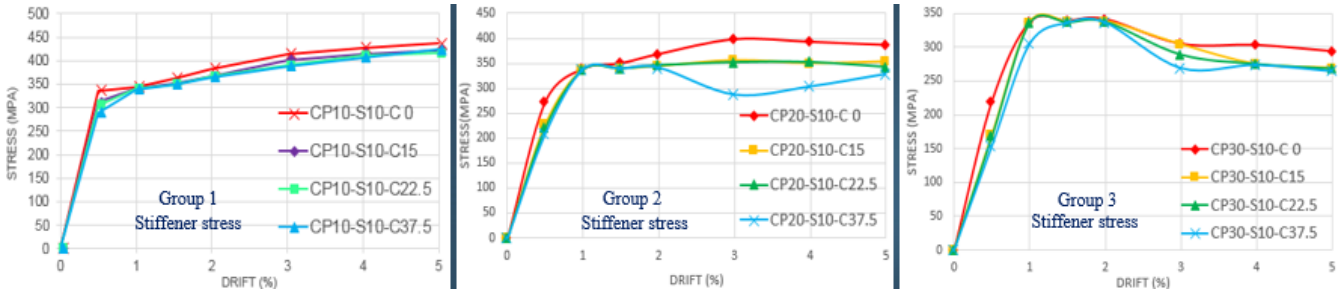
ضخامت کاورپلیت افزایش یافته، عمق برش بسیار موثر عمل کرده و مطابق شکل۸ شاهد کاهش چشمگیر در تنش کاورپلیت هستیم، به عبارتی زمانی که ضخامت کاورپلیت بیشتر است عمق برش تیر موثرتر عمل می‌کند. در بین اتصالات ترکیب یافته نیز نتایج نمودارها نشان می‌دهد که افزایش عمق برش تیر باعث کاهش تنش در کاورپلیت می‌شود و بین آنها رابطه عکس برقرار است. بنابراین مشخص می‌شود که جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی تنش در کاورپلیت را بطور چشمگیری کاهش می‌دهد.



شکل۸: تنش در کاورپلیت اتصالات گروه های ۱ تا ۳.

- **تنش در سخت‌کننده اتصالات گروه های ۱ تا ۳**

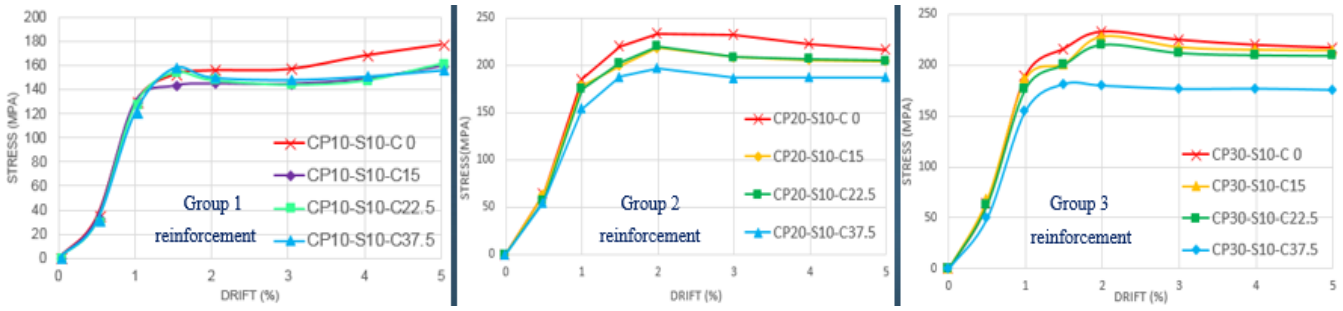
مطابق شکل۹ بیشترین تنش در سخت‌کننده اتصال RCS (خطوط قرمز هر نمودار) ایجاد می‌شود. جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی باعث کاهش تنش در سخت‌کننده می‌شود. بنابراین تاثیر مثبت دیگر جایگزینی تیرها، در کاهش تنش سخت‌کننده قابل لمس است. دلیل کاهش تنش در سخت‌کننده افزایش تغییرشکل تیر و کاهش تنش وارده به چشمه اتصال و به طبع آن سخت‌کننده است.



شکل۹: تنش در سخت کننده اتصالات گروه های ۱ تا ۳.

- **تنش در آرماتورهای اتصالات گروه های ۱ تا ۳**

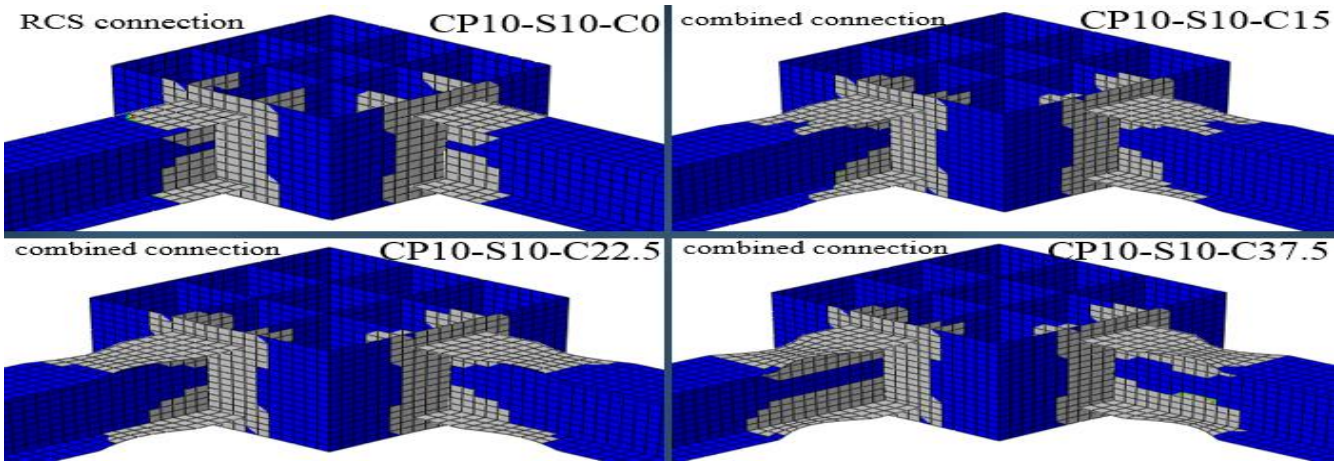
مطابق شکل۱۰ بیشترین تنش در آرماتورها مربوط به آرماتورهای اتصال RCS است که در هر نمودار با خطوط قرمز مشخص شده است و کمترین تنش در آرماتورها مربوط به آرماتورهای اتصال ترکیب یافته با ماکزیمم عمق برش تیر است و مشاهده می‌شود که در اتصالات ترکیب یافته افزایش عمق برش نیز مطابق شکل۱۰ باعث کاهش تنش در آرماتورها می‌گردد. لذا بین تنش در آرماتورها و عمق برش تیر رابطه عکس برقرار است. بنابراین تاثیر بسیار مثبت دیگر جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی در کاهش تنش آرماتورها می‌باشد.



شکل۱۰: تنش در آرماتورهای اتصالات گروه های ۱ تا ۳.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۱**

مطابق شکل۱۱ با توجه به ضخامت کم کاورپلیت و سخت‌کننده (ضخامت هر دو ۱۰ میلی‌متر است)، نواحی تسلیم در اتصال RCS و اتصال ترکیب یافته با عمق برش ۱۵ میلی‌متر تقریبا یکسان است. زیرا رفتارهای دو اتصال با توجه به عمق برش کم تیر در اتصال ترکیب یافته شبیه یکدیگر می‌باشد. با افزایش عمق برش در اتصالات ترکیب یافته شاهد افزایش میزان نواحی تسلیم در بال تیر هستیم. میزان نواحی تسلیم در اتصال ترکیب یافته و در جان تیر مطابق شکل۱۱ تا زمانی که کل بال در ناحیه کاهش یافته به تسلیم نرسیده باشد تقریبا ثابت می‌ماند اما زمانی که کل بال تیر در ناحیه کاهش یافته دچار تسلیم شود، کرنش پلاستیک در جان تیر شروع به گسترش کرده و نواحی تسلیم در جان تیر و در قسمت کاهش یافته افزایش می‌یابد، درحالیکه در اتصال RCS مطابق شکل۱۱ شروع تسلیم از بال تیر بوده اما افزایش سطح تسلیم تقریبا به صورت همزمان در بال و جان تیر اتفاق می‌افتد اما در اتصال کاهش یافته فقط نواحی کمی از جان تیر قبل از تسلیم کل بال در قسمت کاهش یافته دچار تسلیم می‌شود که در شکل مشخص است و تا زمانی که کل بال در قسمت کاهش یافته تسلیم نشود شاهد افزایش تسلیم در جان تیر نخواهیم بود که دلیل این امر شکل‌پذیری بالای بال‌های تیر با مقطع کاهش یافته می‌باشد.

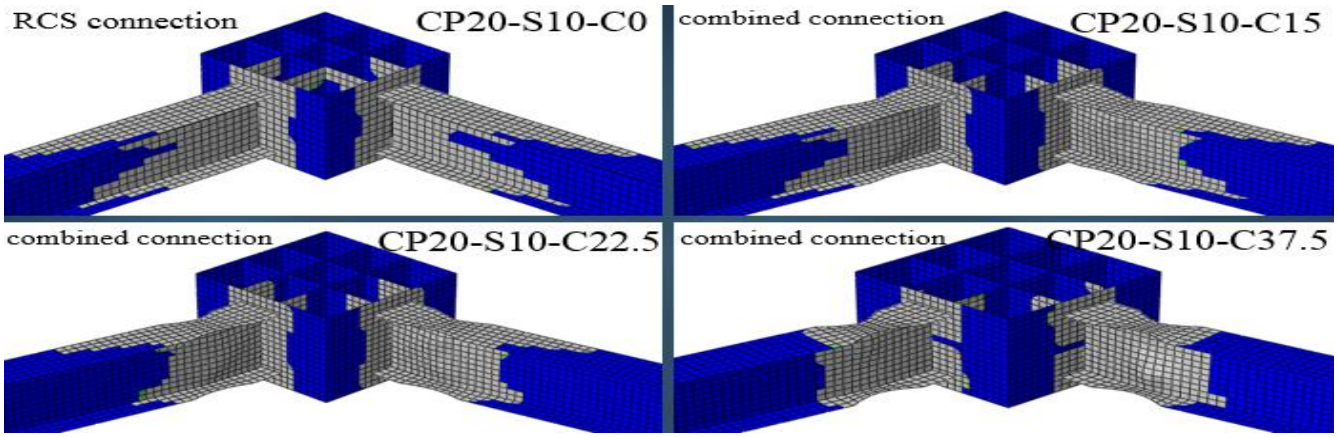


شکل۱۱: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۱.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۲**

مطابق شکل۱۲ کمترین ناحیه تسلیم در سخت‌کننده مربوط به اتصال ترکیب یافته با عمق برش ماکزیمم است، لذا می‌توان گفت که سطح ناحیه دارای کرنش پلاستیک در سخت‌کننده اتصالات ترکیب یافته همیشه کمتر از سطح ناحیه دارای کرنش پلاستیک در سخت‌کننده اتصالات RCS است. در خصوص کاورپلیت نیز می‌توان همین نتیجه‌گیری را کرد بدین صورت که ناحیه تسلیم در کاورپلیت اتصال ترکیب یافته با ماکزیمم عمق برش هم از ناحیه تسلیم در کاورپلیت اتصال RCS و هم از ناحیه تسلیم در کاورپلیت سایر اتصالات ترکیب یافته با عمق برش مختلف، کمتر است. بیشترین نواحی تسلیم در بال و جان تیر مربوط به اتصال RCS است و دوباره کمترین ناحیه تسلیم در بال و جان تیر مربوط به اتصال ترکیب یافته با عمق برش ماکزیمم می‌باشد، با افزایش عمق برش، سطح ناحیه تسلیم در بال و جان

تیر کاهش می‌یابد، در واقع افزایش عمق برش مطابق شکل۱۲ تغییرشکل تیر را بالا برده و مانع از گسترش کرنش پلاستیک در تیر می‌گردد و کرنش پلاستیک را در قسمت کاهش یافته تیر محدود کرده و پس از آن بجای افزایش سطح کرنش پلاستیک شاهد افزایش تغییرشکل تیر در مقطع کاهش یافته خواهیم بود پس می‌توان گفت عمق برش رابطه معکوس با میزان ناحیه تسلیم در بال و جان تیر دارد. در اتصالات ترکیب یافته گروه ۲، صد درصد ناحیه کاهش یافته تیر تسلیم شده و دارای کرنش پلاستیک می‌باشند و مشخص گردید که کمترین ناحیه تسلیم در سخت‌کننده، کاورپلیت، جان و بال تیر مربوط این عمق برش است که دلیل این امر وجود کمانش در دو قسمت تیر و یک دوران می‌باشد، کمانش اول، کمانش خارج از صفحه در جان تیر و کمانش دوم، کمانش خارج از صفحه در بال تیر می‌باشد، دلیل ایجاد این کمانش تاثیر بارهای رفت و برگشتی در قسمت کاهش یافته تیر است همچنین کاهش مقطع تیر در قسمت کاهش یافته سبب دوران تیر تحت بارهای سیکلیک می‌گردد. بنابراین کرنش بسیار زیاد تیر در اتصال ترکیب یافته باعث کاهش ناحیه کرنش پلاستیک در کاورپلیت و سخت‌کننده می‌گردد در حالیکه در اتصال RCS تیر دچار کمانش یا دوران نمی‌شود و به همین دلیل دارای ماکزیمم ناحیه تسلیم در تیر، کاورپلیت و سخت‌کننده است.

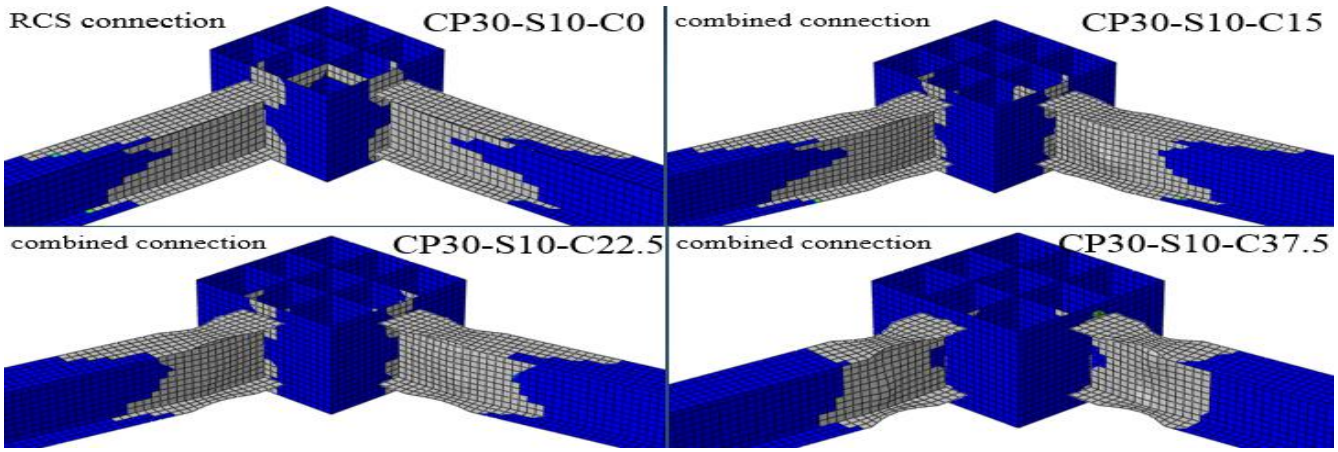


شکل۱۲: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۲.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۳**

بیشترین ناحیه تسلیم در سخت‌کننده مطابق شکل۱۳ مربوط به سخت‌کننده اتصال RCS و کمترین آن مربوط به سخت‌کننده اتصال ترکیب یافته با بیشترین عمق برش می‌باشد، بنابراین جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته به جای تیر معمولی باعث کاهش کرنش پلاستیک در سخت‌کننده می‌شود، لذا عمق برش رابطه عکس با میزان ناحیه تسلیم در سخت‌کننده دارد. بیشترین سطح کرنش پلاستیک در کاورپلیت مربوط به اتصال RCS و کمترین ناحیه تسلیم مربوط به اتصال ترکیب یافته با عمق برش۲۲/۵ میلی‌متری است و در عمق برش۳۷/۵ میلی‌متری، در هیچ نقطه از کاورپلیت کرنش پلاستیک وجود ندارد. دلیل کاهش زیاد کرنش پلاستیک در کاورپلیت استفاده شده در اتصالات ترکیب یافته، افزایش ضخامت آن و دوران تیر و کمانش خارج از صفحه جان و بال تیر می‌باشد. افزایش عمق برش باعث افزایش دوران تیر می‌گردد و افزایش دوران تیر باعث کاهش سطح تسلیم در کاورپلیت می‌شود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عمق برش سبب کاهش سطح تسلیم در کاورپلیت می‌گردد پس می‌توان با جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته با عمق برش ۲۲/۵ میلی‌متر به جای تیر معمولی در اتصال مرکب، کرنش پلاستیک کاورپلیت را به حداقل رساند. همچنین می‌توان با جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته با عمق برش۳۷/۵ میلی‌متر به جای تیر معمولی، کرنش پلاستیک کاورپلیت را به صفر رساند. اما با توجه به کم بودن ضخامت سخت‌کننده نسبت به کاورپلیت، بازهم مطابق شکل۱۳ شاهد ناحیه تسلیم هرچند بسیارکم در سخت‌کننده خواهیم بود که این امر به افزایش شکل‌پذیری کل اتصال کمک می‌کند بنابراین با کاهش زیاد خرابی فشاری بتن چشمه اتصال و سطح تسلیم در سخت‌کننده و به صفر رساندن کرنش پلاستیک در کاورپلیت، مفصل پلاستیک به طور کامل از چشمه اتصال و بر ستون دور شده و نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته به جای تیر معمولی باعث عملکرد بسیار مطلوب اتصال مرکب می‌گردد. افزایش عمق برش نیز از گسترش کرنش پلاستیک در تیر

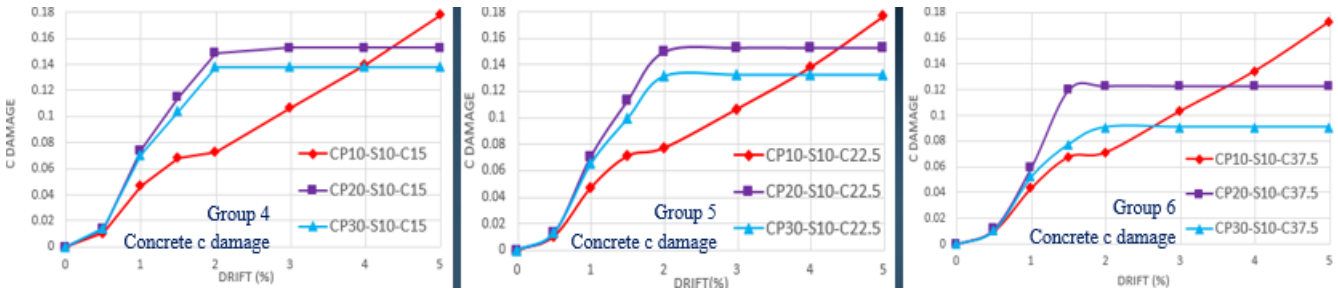
جلوگیری می‌کند به عبارتی افزایش عمق برش و به طبع آن افزایش تغییرشکل تیر مانع از گسترش سطح تسلیم در تیر شده و کرنش پلاستیک را در قسمت کاهش یافته تیر محدود می‌کند، بنابراین با افزایش عمق برش شاهد کاهش نواحی تسلیم شده در تیرها هستیم.



شکل۱۳: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۳.

- **خرابی فشاری ستون بتنی گروه های ۴ تا ۶**

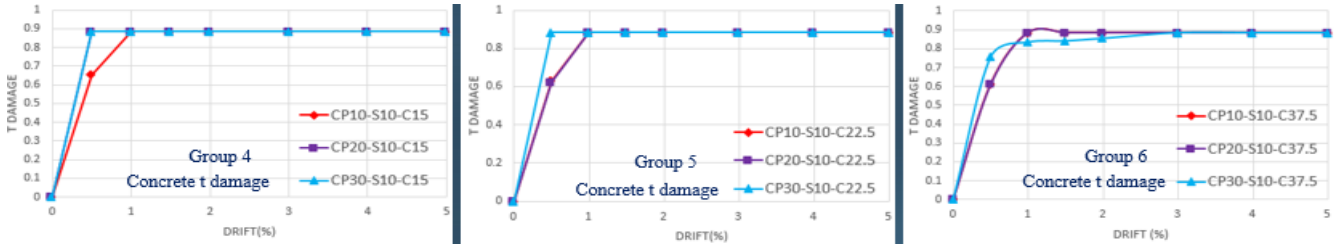
مطابق شکل۱۴ در گروه‌های ۴ تا ۶ عمق برش تیر در هر گروه ثابت بوده و ضخامت کاورپلیت متغیر می‌باشد. در هر سه گروه افزایش ضخامت کاورپلیت از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر باعث افزایش خرابی فشاری ستون شده است به عبارتی اثر ضخامت کاورپلیت برای افزایش خرابی فشاری بتن بیشتر از اثرکاهشی تغییرشکل مقطع کاهش یافته تیر است. اما زمانی که ضخامت کاورپلیت از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند مطابق شکل۱۴ نه تنها شاهد افزایش خرابی فشاری نیستیم بلکه خرابی فشاری بتن کمتر می‌شود که دلیل این امر آن است که که اثر کاهشی تغییرشکل مقطع کاهش یافته تیر بیشتر از اثر افزایشی ضخامت کاورپلیت میباشد. به عبارتی با افزایش ضخامت کاورپلیت، مقطع کاهش یافته تیر دچار کرنش و تغییرشکل بیشتری می‌شود و بین ضخامت کاورپلیت و کرنش تیر رابطه مستقیم برقرار است و چون اثر تغییرشکل مقطع کاهش یافته تیر بیشتر از اثر افزایش ضخامت کاورپلیت است بنابراین خرابی فشاری ستون بتنی کم می‌شود درحالیکه در اتصال RCS همیشه با افزایش ضخامت کاورپلیت، خرابی فشاری ستون بتنی افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، افزایش ضخامت کاورپلیت در اتصال مرکب همیشه به ضرر ستون بتنی است اما زمانیکه از تیر با مقطع کاهش یافته استفاده می‌شود افزایش ضخامت کاورپلیت نه تنها به ضرر ستون بتنی نبوده بلکه باعث کاهش تنش در آن می‌شود و این امر یکی از مهمترین دستاوردهای اتصال مرکب با تیرهای دارای مقطع کاهش یافته است.



شکل۱۴: خرابی فشاری ستون بتنی در اتصالات گروه۴ تا ۶.

- **خرابی کششی ستون بتنی گروه های ۴ تا ۶**

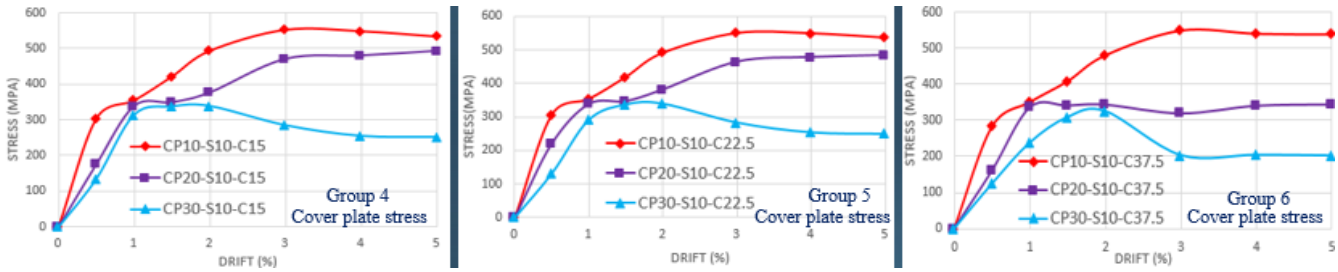
در اتصال RCS خرابی کششی ستون بتنی همیشه با افزایش ضخامت کاورپلیت افزایش می‌یابد که این یک ایراد برای اتصال مرکب محسوب می‌شود. در حالیکه بدلیل تغییرشکل و کرنش تیرهای دارای مقطع کاهش یافته مشاهده می‌شود که مطابق شکل۱۵ با افزایش ضخامت کاورپلیت خرابی کششی یا تغییری نمی‌کند و یا کاهش می‌یابد و شاهد افزایش خرابی کششی ستون بتنی نخواهیم بود و این امر یک اتفاق مهم در این اتصال می‌باشد.



شکل۱۵: خرابی کششی ستون بتنی در اتصالات گروه۴ تا ۶.

- **تنش در کاورپلیت اتصالات گروه های ۴ تا ۶**

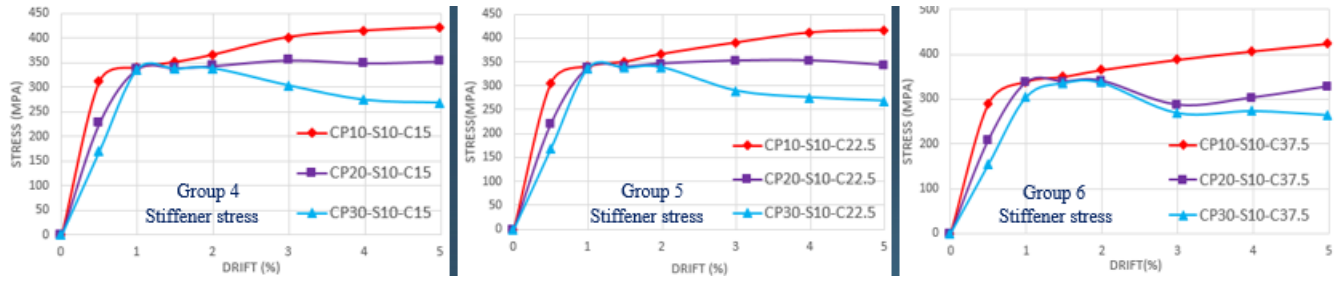
مطابق شکل۱۶ در هر سه گروه با افزایش ضخامت کاورپلیت تنش در آن کاهش یافت و این امریست طبیعی زیرا با افزایش ضخامت کاورپلیت ظرفیت باربری آن افزایش یافته و تنش در آن کاهش می‌یابد اما کاهش تنش در کاورپلیت اتصالات ترکیب یافته هنگام افزایش ضخامت آن بیشتر از کاهش تنش در کاورپیلت اتصال RCS است و این امر نشان می‌دهد که کاهش مقطع تیر در کاهش بیشتر تنش کاورپلیت نقش موثر ایفا می‌کند.



شکل۱۶: تنش در کاورپلیت اتصالات گروه۴ تا ۶.

- **تنش در سخت‌کننده اتصالات گروه های ۴ تا ۶**

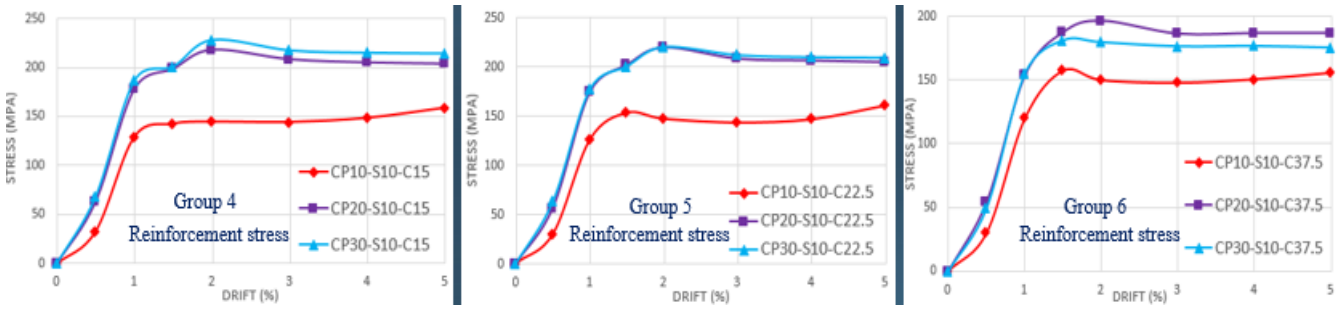
مطابق شکل۱۷ افزایش ضخامت کاورپلیت باعث می‌شود تا تنش در سخت‌کننده کاهش یابد و بدلیل پیوستگی میان کاورپلیت و سخت‌کننده و همچنین اثر مقطع کاهش یافته تیر مطابق نمودارهای شکل۱۷، شاهد کاهش تنش در سخت‌کننده هستیم. پس می‌توان گفت که بین ضخامت کاورپلیت و تنش سخت‌کننده رابطه عکس برقرار است.



شکل۱۷: تنش در سخت‌کننده اتصالات گروه۴ تا ۶.

- **تنش درآرماتورهای اتصالات گروه های ۴ تا ۶**

مطابق شکل۱۸ افزایش ضخامت کاورپلیت از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر باعث افزایش تنش درآرماتورها شده است که دلیل این امر افزایش تنش وارده به ستون و سپس آرماتورها بدلیل افزایش ضخامت کاورپلیت می‌باشد. در هر ۳ گروه هنگام افزایش ضخامت از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر، اثر افزایشی تنش در آرماتورها بدلیل افزایش ضخامت کاورپلیت کاملا بر اثر کاهشی تنش در آرماتورها بدلیل تغییرشکل مقطع کاهش یافته تیر غلبه کرده و شاهد افزایش تنش هستیم. اما وقتی ضخامت از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر افزایش پیدا کرد مطابق شکل۱۸ رفتار اتصالات متفاوت شد. در گروه ۴ افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر باعث افزایش چشمگیر در تنش آرماتورها نمی‌شود و به همان اندازه که هنگام افزایش ضخامت از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر تنش در آرماتورها بالا رفته، افزایش نمی‌یابد که دلیل آن افزایش بسیار زیاد تغییرشکل تیر است که مانع از افزایش زیاد تنش آرماتورها می‌شود. هرچند بازهم شاهد افزایش تنش هستیم. اما در گروه ۵ افزایش ضخامت کاورپلیت از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل۱۸، باعث افزایش تنش نشده و نمودارها کاملا روی هم منطبق می‌شوند که دلیل این امر این است که اثر افزایشی تنش در آرماتورها بدلیل افزایش ضخامت کاورپلیت با اثر کاهشی تنش در آرماتورها بدلیل تغییرشکل بسیار زیاد تیر باهم برابر بوده و سبب شده است که علیرغم افزایش ضخامت کاورپلیت تغییری در تنش آرماتورها به وجود نیاید. در گروه ۶ نیز با افزایش ضخامت کاورپلیت شاهد یک دستاورد بسیار مهم هستیم و آن نیز کاهش تنش در آرماتورها علی‌رغم افزایش ضخامت کاورپلیت است. در واقع اثر کاهش تنش در آرماتورها بدلیل تغییرشکل و کرنش بسیار زیاد مقطع کاهش یافته بیشتر از اثر افزایشی تنش در آرماتورها بدلیل افزایش ضخامت کاورپلیت بوده و شاهد هستیم علی‌رغم افزایش ضخامت کاورپلیت تنش در آرماتورها کاهش می‌یابد و این امر یکی از دستاوردهای بسیار خوب استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال مرکب است زیرا چنین اتفاقی هیچگاه در اتصال RCS رخ نمی‌دهد و همیشه در اتصال RCS با افزایش ضخامت کاورپلیت تنش در آرماتورها افزایش می‌یابد. در واقع در اتصال RCS افزایش ضخامت کاورپلیت همیشه به ضرر آرماتورها بود زیرا تنش درآنها افزایش پیدا می‌کرد اما در اتصال ترکیب یافته نه تنها به ضرر آرماتورها نبوده بلکه باعث کاهش تنش در آرماتورها شد.



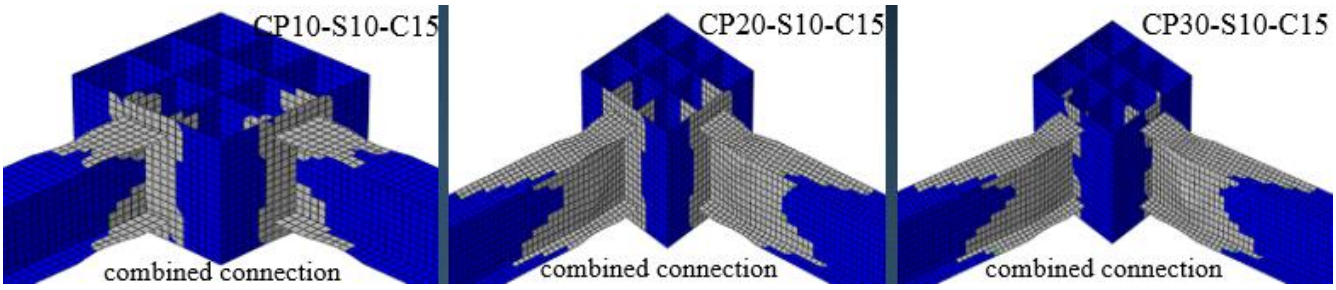
شکل۱۸: تنش در سختکننده اتصالات گروه۴ تا ۶.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۴**

افزایش ضخامت کاورپلیت باعث افزایش تنش‌های وارده به چشمه اتصال می‌گردد در حالیکه مطابق شکل۱۹ با افزایش ضخامت کاورپلیت کرنش پلاستیک در سخت‌کننده کاهش می‌یابد، که دلیل این امر افزایش تغییرشکل تیر با مقطع کاهش یافته در اثر افزایش ضخامت کاورپلیت است که باعث کاهش تنش وارده به اتصال شده و از کرنش پلاستیک سخت‌کننده می‌کاهد.

با افزایش ضخامت کاورپلیت سطح ناحیه تسلیم در تیرها مطابق شکل۱۹ افزایش پیدا می‌کند که دلیل این امر افزایش ظرفیت باربری کاورپلیت و ثابت ماندن ظرفیت تیرها است زیرا ضخامت کاورپلیت ۲ برابر و سپس ۳ برابر تیرها می‌شود و همین امر باعث ایجاد تنش‌های اضافی در تیرها می‌شود. اما تیرها که تمایلی برای تحمل این تنش‌ها ندارند تغییرشکل‌های زیادی را از خود نشان داده و دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شوند. بنابراین با افزایش ضخامت کاورپلیت کرنش پلاستیک در تیرها افزایش می‌یابد، لذا می‌توان گفت که بین ضخامت کاورپلیت و کرنش پلاستیک تیر رابطه مستقیم برقرار است. اما افزایش ضخامت کاورپلیت مطابق شکل۱۹ فقط تا حدی باعث افزایش سطح تسلیم در تیرها می‌گردد سپس با افزایش ضخامت کاورپلیت تاثیری در میزان سطح ناحیه تسلیم تیرها بوجود نیامده چرا که بیشتر تنش‌ها در مقطع کاهش یافته تیر متمرکز شده و به جای افزایش سطح ناحیه تسلیم در تیر شاهد افزایش کمانش جان و بال تیر و دوران آن

خواهیم بود، پس می‌توان گفت که افزایش کمانش و دوران تیر در قسمت کاهش یافته تیر جایگزین افزایش سطح ناحیه تسلیم می‌گردد به عبارتی مقطع کاهش یافته مانع از گسترش بیشتر ناحیه تسلیم در تیر می‌شود که این امر یکی از مزیت‌های تیر با مقطع کاهش یافته در مقایسه با تیرهای معمولی است. همچنین بین ضخامت کاورپلیت و تغییرشکل تیرها رابطه مستقیم برقرار است.

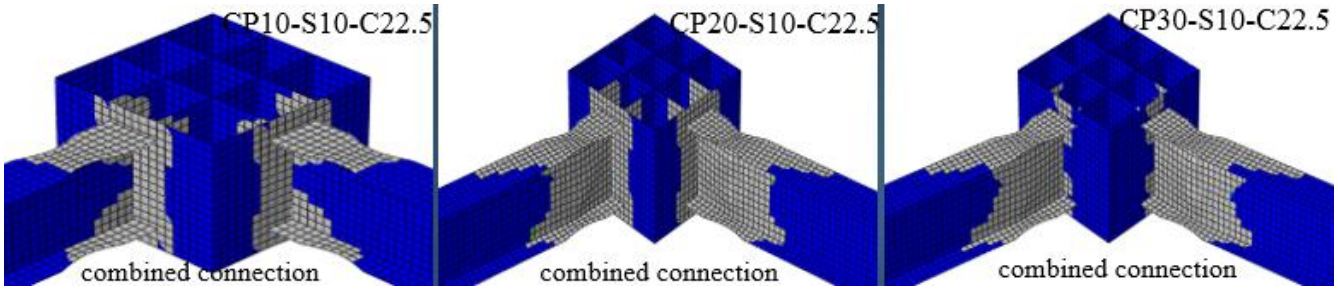


شکل۱۹: نواحی تسلیم در اتصالات گروه۴.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۵**

با افزایش ضخامت کاورپلیت، تنش در آن کم شده و در نتیجه میزان کرنش پلاستیک در کاورپلیت کاهش می‌یابد پس بین ضخامت کاورپلیت و تنش کاورپلیت رابطه معکوس برقرار است. افزایش ضخامت کاورپلیت باعث افزایش تنش‌های وارده به چشمه اتصال می‌گردد در حالیکه مطابق شکل ۲۰ با افزایش ضخامت کاورپلیت کرنش پلاستیک در سخت‌کننده کاهش می‌یابد، که دلیل این امر افزایش تغییرشکل تیر بعلت افزایش ضخامت کاورپلیت است که باعث کاهش تنش وارده به اتصال شده و از کرنش پلاستیک سخت‌کننده می‌کاهد. به عبارتی میزان کاهش تنش و کرنش پلاستیک در سخت‌کننده در اثر تغییرشکل تیر بیشتر از میزان افزایش تنش و کرنش پلاستیک در سخت‌کننده در اثر افزایش ضخامت کاورپلیت بوده و این امر باعث کاهش کرنش پلاستیک سخت‌کننده شده است.

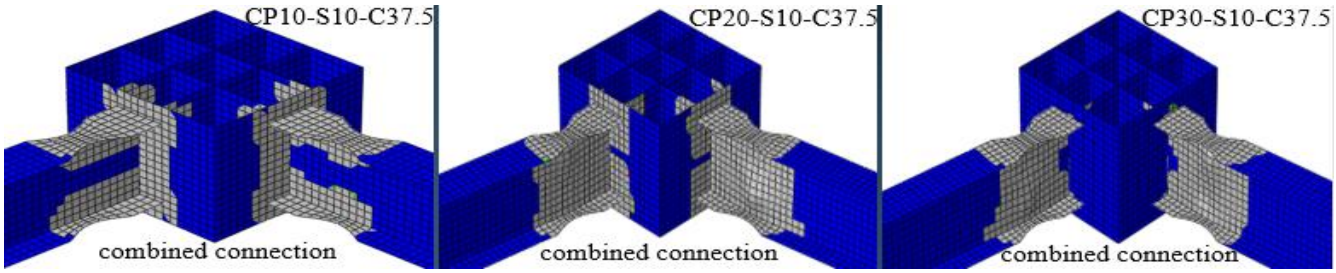
مطابق شکل۲۰ میزان ناحیه تسلیم در بال و جان قسمت کاهش یافته تیر برای اتصال با ضخامت کاورپلیت ۱۰ میلی‌متر در حدود ۹۰ درصد و صفر درصد می‌باشد اما با افزایش ضخامت کاورپلیت میزان ناحیه تسلیم در بال و جان قسمت کاهش یافته تیر ۱۰۰درصد می‌شود. با افزایش ضخامت کاورپلیت سطح ناحیه تسلیم در تیرها افزایش پیدا می‌کند که دلیل این امر افزایش ظرفیت باربری کاورپلیت و ثابت ماندن ظرفیت تیرها است زیرا ضخامت کاورپلیت ۲ برابر و سپس ۳ برابر ضخامت تیرها می‌شود و همین امر باعث ایجاد تنش‌های اضافی در تیرها می‌شود اما تیرها که تمایلی برای تحمل این تنش‌ها ندارند تغییرشکل‌های زیادی را از خود نشان داده و دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شوند بنابراین با افزایش ضخامت کاورپلیت کرنش پلاستیک در تیرها افزایش می‌یابد، اما افزایش کرنش پلاستیک در تیرها تا یک حدی ادامه داشته و سپس با افزایش ضخامت کاورپلیت بجای افزایش کرنش پلاستیک، کمانش جان و بال تیر و دوران تیر در قسمت کاهش یافته افزایش خواهد یافت. پس می‌توان گفت که افزایش کمانش و دوران تیر در قسمت کاهش یافته جایگزین افزایش سطح ناحیه تسلیم می‌گردد به عبارتی مقطع کاهش یافته مانع از گسترش بیشتر سطح ناحیه تسلیم در تیر می‌شود که این امر یکی از مزیت‌های تیر با مقطع کاهش یافته در مقایسه با تیرهای معمولی است.



شکل۲۰: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۵.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۶**

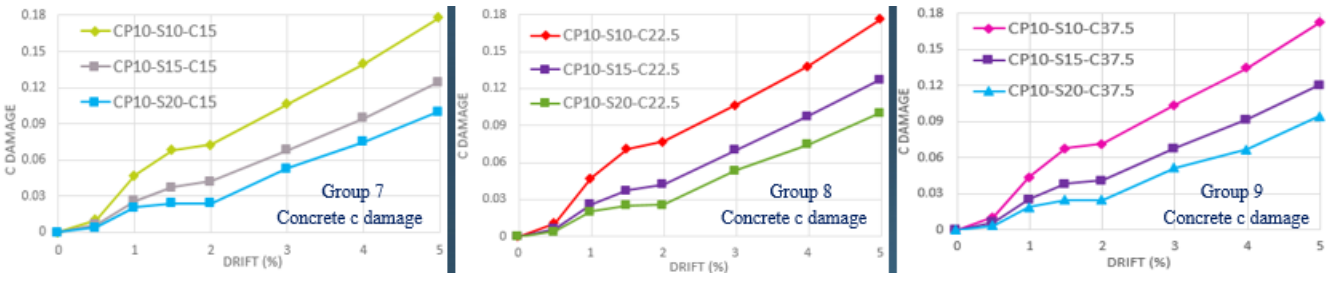
مطابق شکل۲۱، با افزایش ضخامت کاورپلیت سطح ناحیه کرنش پلاستیک در آن کاهش پیدا می‌کند بطوریکه هنگام استفاده از کاورپلیت ۳۰ میلی‌متری هیچ نقطه ای از کاورپلیت دچار تسلیم نمی‌گردد. افزایش ضخامت کاورپلیت میزان نواحی تسلیم در سخت‌کننده را نیز کاهش می‌دهد. افزایش ضخامت کاورپلیت باعث افزایش دوران و تغییرشکل تیر می‌گردد بنابراین هرچقدر ضخامت کاورپلیت بیشتر شود سطح ناحیه تسلیم در تیر افزایش می‌یابد که دلیل این امر افزایش ظرفیت باربری کاورپلیت و ثابت ماندن ظرفیت تیرها است زیرا ضخامت کاورپلیت ۲ برابر و سپس ۳ برابر ضخامت تیرها می‌شود و همین امر باعث ایجاد تنش‌های اضافی در تیرها می‌شود اما تیرها که تمایلی برای تحمل این تنش‌ها ندارند تغییرشکل‌های زیادی را از خود نشان داده و دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شوند بنابراین با افزایش ضخامت کاورپلیت کرنش پلاستیک در تیرها افزایش می‌یابد اما نکته بسیار جالب در مورد تیرهای با مقطع کاهش یافته عدم گسترش ناحیه تسلیم بعد از مقطع کاهش یافته می‌باشد به عبارتی کرنش پلاستیک در ناحیه کاهش یافته متمرکز شده و دیگر شاهد گسترش نواحی تسلیم در تیر نخواهیم بود و به جای افزایش سطح تسلیم در تیر، افزایش کمانش در جان و بال تیر مقطع کاهش یافته و افزایش دوران کل تیر را شاهد خواهیم بود پس بطور کلی با افزایش ضخامت کاورپلیت سطح تسلیم در تیر افزایش می‌یابد اما این افزایش تا یک حدی بوده و پس از آن بجای افزایش نواحی کرنش پلاستیک، تغییرشکل قسمت کاهش یافته تیر افزایش می‌یابد و قسمت کاهش یافته تیر مانع تسلیم نواحی بیشتر در تیر می‌گردد.



شکل۲۱: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۶.

- **خرابی فشاری ستون های بتنی در اتصالات گروه های ۷ تا ۹**

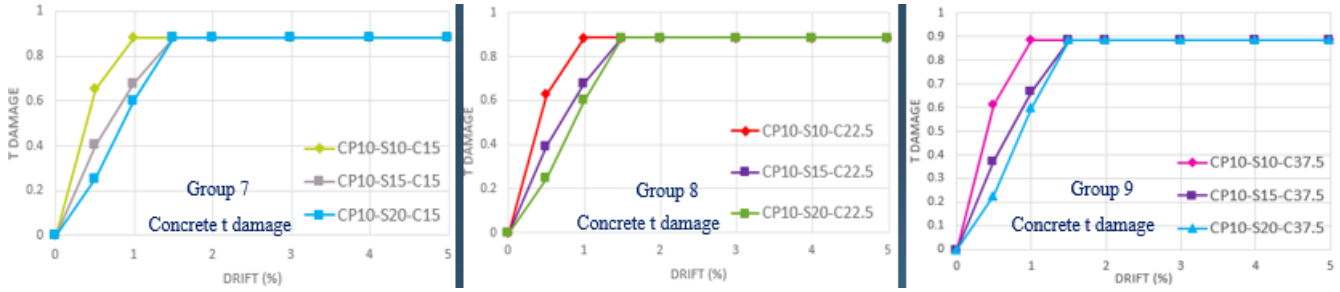
مطابق شکل۲۲ افزایش ضخامت سخت‌کننده باعث کاهش خرابی فشاری ستون بتنی شده است. البته میزان کاهش در اتصال RCS فقط بدلیل افزایش ضخامت سخت‌کننده است اما در اتصال ترکیب یافته علاوه بر آن، تغییرشکل مقطع کاهش یافته تیر نیز باعث کاهش بیشتر خرابی فشاری ستون بتنی شده است. افزایش ضخامت سخت‌کننده باعث افزایش محصورشدگی بتن شده و همین امر مقاومت فشاری ستون بتنی را افزایش داده و خرابی فشاری ستون بتنی کاهش می‌یابد.



شکل۲۲: خرابی فشاری ستون بتنی در اتصالات گروه۷ تا ۹.

- **خرابی کششی ستون های بتنی در اتصالات گروه های ۷ تا ۹**

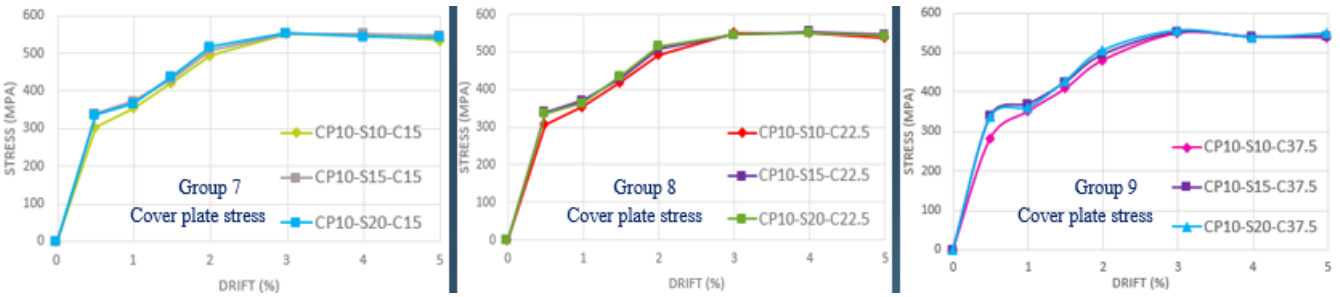
مطابق شکل۲۳ افزایش ضخامت سخت‌کننده باعث افزایش مقاومت کششی بتن و تغییرشکل زیاد تیر شده و سبب می‌شود تا ماکزیمم خرابی کششی بتن دیرتر اتفاق بیافتد و همچنین باعث می‌شود خرابی کششی بتن مطابق نمودارها، قبل از دریفت ماکزیمم کاهش یابد بنابراین مشخص شد که با افزایش ضخامت سخت‌کننده خرابی کششی ستون بتنی کاهش می‌یابد.



شکل۲۳: خرابی کششی ستون بتنی در اتصالات گروه۷ تا ۹.

- **تنش در کاورپلیت اتصالات گروه های ۷ تا ۹**

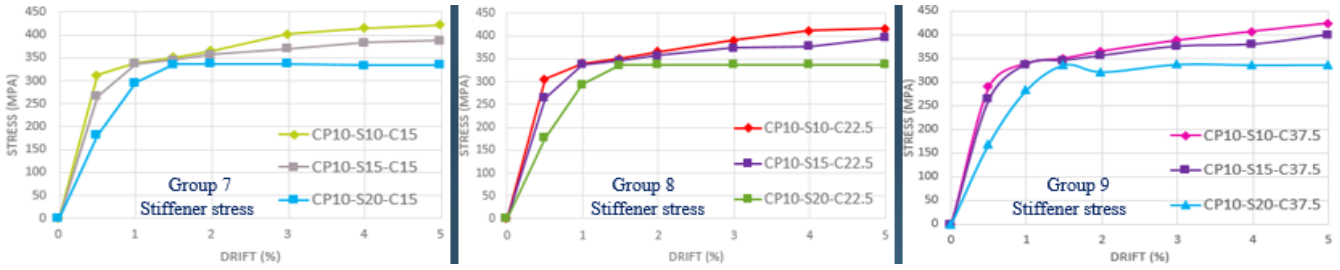
افزایش ضخامت سخت‌کننده مطابق شکل۲۴ تقریبا تاثیری در تنش کاورپلیت در هر سه گروه ندارد اما اگر قرار بر قضاوت ریزبینانه باشد باید اذعان نمود افزایش ضخامت کاورپلیت باعث افزایش جزیی تنش در کاورپلیت می‌شود که دلیل این امر کاهش جزیی کرنش در کاورپلیت بوده که باعث افزایش تنش در آن شده است.



شکل۲۴: تنش در کاورپلیت اتصالات گروه های ۷ تا ۹.

- **تنش در سخت کننده اتصالات گروه های ۷ تا ۹**

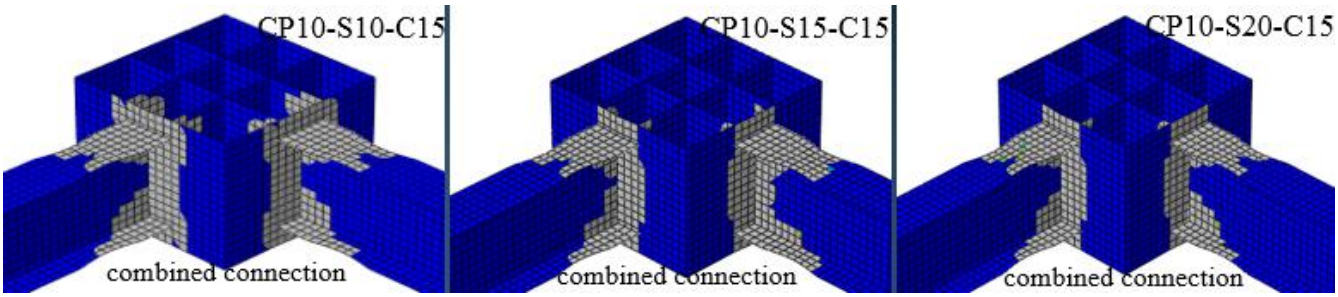
مطابق شکل۲۵، افزایش ضخامت سخت‌کننده باعث افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود و همین امر باعث می‌شود تا تنش در سخت‌کننده همه اتصالات گروه‌های۷ تا ۹ کاهش یابد.



شکل۲۵: تنش در سخت کننده اتصالات گروه های ۷ تا ۹.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۷**

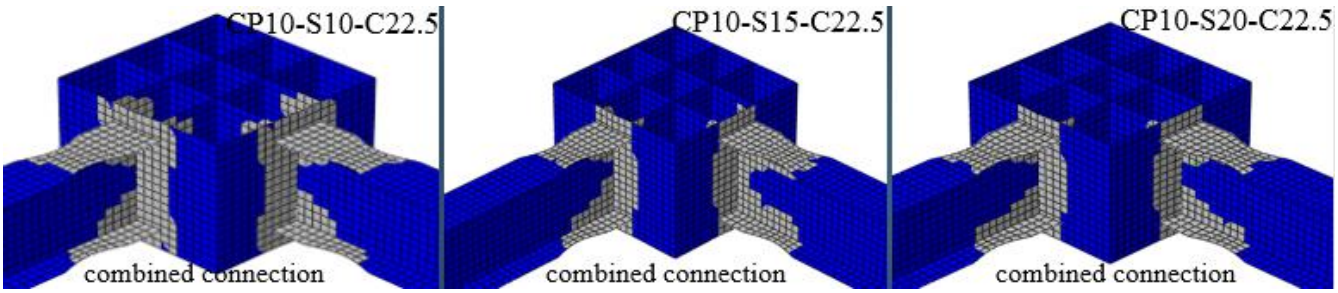
مطابق شکل۲۶ با افزایش ضخامت سخت‌کننده، میزان ناحیه تسلیم در آن کاهش پیدا می‌کند بنابراین می‌توان گفت که بین ضخامت سخت‌کننده و کرنش پلاستیک سخت‌کننده رابطه عکس برقرار است. اما افزایش ضخامت سخت‌کننده تاثیر کمی روی ناحیه تسلیم در کاورپلیت می‌گذارد و تقریبا می‌توان گفت که ناحیه تسلیم در کاورپلیت ثابت می‌باشد. میزان ناحیه تسلیم در تیرها نیز با افزایش ضخامت سخت‌کننده دچار تغییرات بسیار اندکی می‌شود هرچند این تغییرات بصورت افزایش ناحیه تسلیم در تیرها می‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت که افزایش ضخامت سخت‌کننده تاثیر بسیار اندکی در کرنش پلاستیک کاورپلیت و تیرها می‌گذارد و با توجه به عمق برش ۱۵ میلی‌متری در تیرها، رفتار اتصال ترکیب یافته، بیشتر شبیه اتصال RCS می‌باشد. همچنین میزان دوران کاورپلیت در ناحیه اتصال به تیرها با افزایش ضخامت سخت‌کننده افزایش می‌یابد.



شکل۲۶: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۷.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۸**

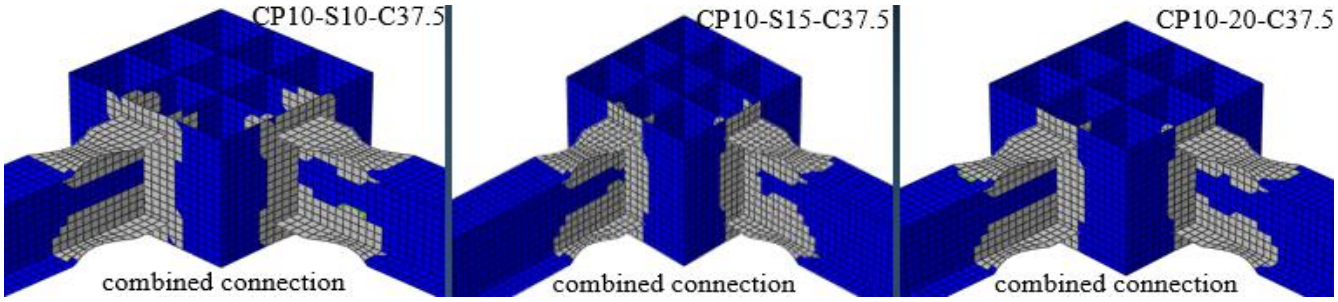
با افزایش ضخامت سخت‌کننده مطابق شکل۲۷ میزان نواحی تسلیم در سخت‌کننده کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که میان ضخامت سخت‌کننده و کرنش پلاستیک سخت‌کننده رابطه عکس وجود دارد. با افزایش ضخامت سخت‌کننده، میزان نواحی تسلیم در کاورپلیت تقریبا ثابت است و تغییرات بسیار ناچیز می‌باشد. افزایش ضخامت سخت‌کننده بر روی کرنش پلاستیک تیرها هم تاثیر می‌گذارد و مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سخت‌کننده، نواحی کرنش پلاستیک در جان تیر گسترش می‌یابد و کرنش پلاستیک در بال تیر تقریبا ثابت می‌باشد.



شکل۲۷: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۸.

- **نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه۹**

مطابق شکل۲۸ میان ضخامت سخت‌کننده و کرنش پلاستیک رابطه معکوس برقرار است و با افزایش ضخامت سخت‌کننده شاهد کاهش کرنش پلاستیک و کاهش سطح ناحیه تسلیم در آن هستیم. میزان ناحیه تسلیم در کاورپلیت با افزایش ضخامت سخت‌کننده تقریبا ثابت است. تمام بال تیرها در هرسه اتصال به تسلیم رسیده است. همچنین با افزایش ضخامت سخت‌کننده شاهد افزایش کرنش پلاستیک در جان قسمت کاهش یافته تیر هستیم که دلیل این امر افزایش اندک تنش در تیرها می‌باشد.



شکل۲۸: نواحی تسلیم شده در اتصالات گروه ۹.

۵-نتیجه‌گیری

استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال مرکب باعث کاهش چشمگیر خرابی فشاری و خرابی کششی ستون بتنی می‌شود . بر اساس نتایج تحلیلها می‌توان با انتخاب مناسب عمق برش تیر، خرابی فشاری بتن را تا ۵۰ درصد نیز کاهش داد که این امر بهترین و مهمترین دستاورد جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی است.

جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال RCS باعث کاهش چشمگیر تنش در اجزای فولادی اتصال RCS (کاورپلیت، سخت‌کننده و آرماتورها) می‌شود که یک دستاورد بسیار مهم است.

استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال مرکب باعث کاهش نواحی تسلیم شده اجزای فولادی اتصال اعم از تیرهای متصله، کاورپلیت، سخت‌کننده و آرماتورها می‌شود. به عبارتی اجزای فولادی متحمل کرنش پلاستیک کمتری می‌شوند.

افزایش ضخامت کاورپلیت و سخت‌کننده در اتصال RCS باعث افزایش تنش‌های وارده به ستون بتنی میگردد. در صورت استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیر معمولی در اتصال مرکب، افزایش ضخامت کاورپلیت و سخت‌کننده نه تنها تنش در ستون را افزایش نمی دهد بلکه باعث کاهش تنش در ستون بتنی نیز می‌گردد.

ما بین عمق برش تیر و تنش کاورپلیت، تنش سخت‌کننده و تنش آرماتورها رابطه عکس برقرار است. همچنین بین عمق برش تیر و خرابی فشاری و کششی ستون بتنی رابطه عکس برقرار است.

بطور کلی جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته بجای تیرمعمولی در اتصال مرکب نه تنها هیچ تاثیر منفی‌ای در رفتار اتصال ندارد بلکه باعث بهبود عملکرد اتصال شده و باعث کاهش چشمگیر خرابی ستون بتنی شده و تنش در اجزای فولادی اتصال را به شکل قابل ملاحظه ای کاهش می‌دهد. علاوه بر این می‌توان با افزایش عمق برش تیر در اتصالات مرکب، باز هم عملکرد اتصال مرکب را بهبود بخشید و باعث کاهش تنش در همه اجزای اتصال مرکب شد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده بجای کاهش مقطع بال تیر، از روش‌های دیگری نظیر حرارت دادن تیر در نزدیکی ستون، برش جان تیر، سوراخ کردن بال تیر و یا سوراخ کردن جان تیر استفاده شود تا مشخص گردد کدامیک از روش‌های کاهش مقطع تیر در بهبود عملکرد اتصال مرکب موثرتر عمل می‌کنند. البته انجام تحقیقات آزمایشگاهی وسیع در کنار تحلیل های اجزای محدود پیشنهادی جهت بررسی هر چه بیشتر عملکرد و مکانیزمهای شکست اتصالات مذکور ضروری به نظر می رسد.

مراجع

[1] Huang Y, Yi W, Zhang R, Xu M, (2014 Feb). “Behavior and design modification of RBS moment connections with composite beams”, Engineering Structures. 28; 59: 39-48.
[2] Altoontash, A, (2004) “Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints” Diss. Stanford University.
[3] W. Li, Q. Li, W. Jiang, L. Jiang, (2011),” Seismic performance of composite reinforced concrete and steel moment frame structures – state-of-the-art”, Elsevier, Composites: Part B 42: 190–206.

[4] R. Kanno, (1993),” Strength, deformation, and seismic resistance of joints between steel beams and reinforced concrete columns”, PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y.
[5] X.M. Liang, (2003),” Seismic behavior of RCS beam–column subassemblies and frame systems designed following a joint deformation-based capacity design approach” PhD Thesis, The University of Michigan, USA.
[6] H. Kuramoto, I. Nishiyama, (2004),” Seismic performance and stress transferring mechanism of through-column-type joints for composite reinforced concrete and steel frames”, J Struct Eng ASCE; 130(2):352–60.
[7] N. Sakaguchi, (1991),” Shear capacity of beam–column connection between steel beans and reinforced concrete columns”, J Struct Constr Eng Archit Inst Japan; 428:69–78
[8] Ryoichi K, and Deierlein.GG, (2002). "Design model of joints for RCS frames." Composite Construction in Steel and Concrete IV: 947-958.
[9] Sheikh TM, Deierlein GG, (1989). Yura JA, Jirsa JO. Beam-column moment connections for composite frames: Part 1. Journal of Structural Engineering.115 (11):2858-76.
[10] Noguchi H, Yonezawa K, (1996). "Analytical study on the shear performance of steel beam-RC column connections in hybrid structurs" Eleventh world conference on earthquake engineering, Dipartment of architecture, Faculty of engineering, Chiba university.
[11] Razavi Khosroshahi S, Keyvani A,” Experimental Study of Welded Connection of
Three Steel Beams to Lateral Reinforced Concrete Column”, 10th International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, 2015
[12] Li FX, Kanao I, Li J, Morisako K, (2009 May).” Local buckling of RBS beams subjected to cyclic loading. Journal of structural engineering” 6; 135(12):1491-8.
[13] Wang WD, Han LH, Uy B, (2008 May),” Experimental behaviour of steel reduced beam section to concrete-filled circular hollow section column connections” Journal of Constructional Steel Research. 31; 64(5):493-504.
[14] Wahalathantri BL, Thambiratnam DP, Chan TH, Fawzia S. “A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS”. InProceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing 2011 Apr 28 (pp. 260-264). Queensland
[15] Hsu, L.S., & Hsu, C.-T.T. (1994). Complete stress-strain behavior of high-strength concrete under compression. Magazine of Concrete Research, 46(169), 301-312.University of Technology.
[16] Moradian. N, Keyvani. A, (2012). “Experimental study of welded connection of two steel beams to corner reinforced concrete column”, Master of science thesis, Shahid Madani Azarbaijan University, Faculty of Technology and Engineering.