

اثر ورق تقویتی بال و نبشی جان در اتصال پس کشیده تیر فولادی به ستون مرکب

محسن عزیزی

دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، خوزستان، ایران

Mohsen.30vil@gmail.com

نوید سیاه پلو

استادیار گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، خوزستان، ایران

siahpolo@acecr.ac.ir

واژگان کلیدی: اتصال پس کشیده، بارگذاری چرخه‌ای، اتلاف انرژی، ورق تقویتی، نبشی جان

چکیده

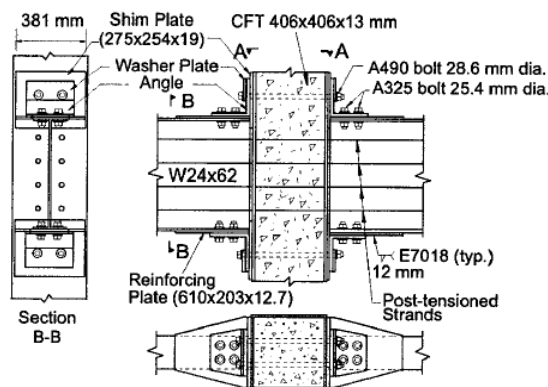
بررسی دقیق عملکرد اتصالات در یک سازه فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عدم دقت در طراحی و اجرای اتصالات در سازه‌های فولادی نه تنها موجب خرابی در خود اتصال می‌شود بلکه اثرات ویران کننده‌ای نیز بر اعضای سازه و در نتیجه کل سازه خواهد داشت. بر اساس اطلاعات موجود، اغلب ویرانی‌ها در سازه‌های فولادی در اثر ضعف عملکرد اتصالات گزارش شده است. یکی از اتصالات نوین، اتصال پس کشیده است. اجزای اصلی یک اتصال خمشی پس کشیده فولادی، شامل نبشی‌های فوقانی و تحتانی و کابل‌های با مقاومت بالاست. با توجه به پارامترها و اجزای مختلف این اتصال، نیاز به مطالعات بیشتری در رابطه با پارامترهای موثر این اتصال احساس می‌شود. در این مطالعه مدلسازی عددی اتصال پس کشیده تیر فولادی به ستون مرکب با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام گرفته و ضمن کنترل صحت مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی، ۴ نمونه از اتصال مدلسازی شده و تاثیر برخی پارامترها شامل عدم استفاده از ورق تقویتی، استفاده از ورق تقویتی با عرض و نبشی با طول بزرگتر، و استفاده از ورق کناری و ورق تقویتی جان بجای ورق تقویتی بال بر رفتار اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین بعنوان ایده‌ای جدید اثر استفاده از نبشی جان بر رفتار اتصال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که عدم استفاده از ورق تقویتی بال تیر باعث کاهش در سختی و ظرفیت خودمرکزی اتصال می‌شود. با افزایش طول نبشی و عرض ورق تقویتی، افزایش در ظرفیت خمشی و ظرفیت اعمال بار جانبی مشاهده می‌شود. استفاده از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری، بجای ورق تقویتی بال تیر، سختی ماندگار و ظرفیت اعمال بار جانبی کمتری را نسبت به اتصال با ورق تقویتی بال تیر ارائه می‌دهد. همچنین در صورتی که علاوه بر نبشی‌های فوقانی و تحتانی، از نبشی جان نیز استفاده شود، افزایش ظرفیت خمشی، ظرفیت اعمال بار جانبی، اتلاف انرژی، سختی اولیه و سختی ماندگار و همچنین کاهش دوران نسبی اتصال مشاهده می‌شود.

مقدمه

مشاهده خسارات وارده به ساختمان‌ها در اثر زلزله نورتریج (۱۹۹۴) روشن کرد که برخلاف رفتار مورد انتظار، شکست‌های ترد در اتصالات در سطح دوران‌های پلاستیک بسیار پایین‌تری در مقایسه با ظرفیت اتصال روی داده است. برای رفع این نقیصه محققان اتصالات جدیدی را پیشنهاد نمودند که اتصال پس کشیده یکی از آنهاست. با الهام از ایده استفاده از اتصالات پس کشیده اتلاف کننده در قابهای بتنی پیش ساخته، (Ricles et al., 2001) اتصال خمشی پس کشیده را برای استفاده در قابهای خمشی فولادی پیشنهاد کردند. یک اتصال خمشی پس کشیده فولادی، شامل نبشی‌های فوقانی و تحتانی، کابل‌های با مقاومت بالا، ورق‌های تقویتی و ورق‌های پیشانی است. جزئیات اتصال پس کشیده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مطالعات مختلفی در رابطه با اتصال پس کشیده‌ی تیر به ستون انجام شده است. (Ricles (2002) و همکاران همچنین (Garlock (2005) و همکاران یک سیستم اتصال پس کشیده تیر به ستون با نبشی‌های فوقانی و تحتانی را مورد آزمایش قرار دادند، نتایج آزمایشات نشان داد که اندازه و هندسه نبشی‌ها بر روی ظرفیت خمشی اتصال و ظرفیت اتلاف انرژی تاثیر می‌گذارد. همچنین هرچه تعداد رشته‌ها بیشتر باشد، سختی اتصال نیز بزرگتر است (Ricles et al., 2002). از نتایج

آزمایش Garlock (2005) و همکاران مشخص شد که استفاده از ورق‌های تقویتی بلندتر از کمانش موضعی تیر جلوگیری می‌کند (Garlock et al., 2005). همچنین Garlock (2003) و همکاران اتصال پس‌کشیده با نبشی‌های فوقانی و تحتانی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که نبشی‌ها با وجود تسلیم شدن، همچنان کارایی خود را حفظ می‌کنند و همچنین عملکرد و مکانیزم نبشی‌های تسلیم شده، بیشترین تاثیر را در استهلاک انرژی دارد (Garlock et al., 2003). Moradi and Shahria Alam (2015) مدل اجزا محدود اتصال پس‌کشیده‌ی تیر به ستون با نبشی پیچی را با استفاده از نرم افزار ANSYS ارائه دادند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار نیروی پس‌کشیدگی اولیه منجر به سختی اولیه‌ی بالاتر، ظرفیت خمشی بزرگتر و اتلاف انرژی بالاتر می‌شود (Moradi and Shahria Alam, 2015). گرامی و خاتمی (۱۳۹۰) مدل پیشنهادی اتصال پس‌کشیده با نرم افزار OPENSEES را ارائه دادند، از بررسی‌های انجام گرفته این نتیجه حاصل شد که مدل پیشنهادی ارائه شده برای اتصالات پس‌کشیده در نرم‌افزار OPENSEES به خوبی رفتار اتصال را شبیه‌سازی می‌کند (گرامی و خاتمی، ۱۳۹۰). شربتی و همکاران (۱۳۹۱) یک نمونه از اتصال پس‌کشیده را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند. نتایج صحت سنجی نشان داد که شبیه‌سازی انجام شده پیش‌بینی درستی از نتایج آزمایشگاهی دارد (شربتی و همکاران، ۱۳۹۱). احمدی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ی خود نشان دادند که استفاده از ورق تقویتی با طول بیشتر، مفصل پلاستیک ایجاد شده در تیر را از ناحیه بحرانی نزدیک اتصال دورتر می‌کند، و زمانی که طول ورق تقویتی بزرگتر باشد، احتمال وقوع گسیختگی ترد در نبشی کمتر است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). سروستانی و همکاران (۱۳۹۲) اثر استفاده از سخت‌کننده در نبشی‌های اتصالات را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که قابلیت اتلاف انرژی اتصالات پس‌کشیده شامل نبشی با سخت‌کننده بسیار بالا است (سروستانی و همکاران، ۱۳۹۲). عزیز و سیاه‌پلو (۱۳۹۷) ضمن مدلسازی و صحت‌سنجی اتصال با نرم‌افزار آباکوس، به بررسی اثر نیروی پس‌کشیدگی بزرگتر بر رفتار اتصال پرداختند. با توجه به صحت سنجی صورت گرفته، مشخص شد که مدلسازی اتصال پس‌کشیده با استفاده از روش عددی، قادر است بخوبی رفتار چرخه‌ای این اتصال را نشان دهد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل‌ها، توان اتصال در تحمل بار جانبی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نیروی پس‌کشیدگی اتلاف انرژی اتصال کاهش جزئی داشته است (عزیز و سیاه‌پلو، ۱۳۹۷). عزیز و سیاه‌پلو (۱۳۹۶) به بررسی اثر مقاومت و مشخصات نبشی بر رفتار اتصال پس‌کشیده پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از فولاد با مقاومت بالا برای نبشی، توانایی تحمل بار جانبی و اتلاف انرژی اتصال را افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از سخت‌کننده برای نبشی، ظرفیت اتلاف انرژی اتصال را به مقدار قابل توجهی بیشتر می‌کند (عزیز و سیاه‌پلو، ۱۳۹۶). Azizi (2018) و همکاران اثر قطر و آرایش کابل‌ها بر رفتار اتصال پس‌کشیده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش قطر کابل با ثابت ماندن نیروی پس‌کشیدگی باعث افزایش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود. بعلاوه، افزایش تعداد کابل‌ها از ۴ به ۶ عدد، منجر به افزایش توان اتصال در تحمل نیروی جانبی و افزایش اتلاف انرژی اتصال می‌شود. همچنین استفاده از تعداد کابل کمتر با قطر و نیروی پس‌کشیدگی معادل، و تغییر فاصله‌ی کابل‌ها از مرکز ثقل تیر تاثیری بر رفتار اتصال ندارد (Azizi et al., 2018). محمدی و اینانلو (۱۳۹۴) اثر برخی پارامترها بر رفتار اتصال پس‌کشیده در خرابی پیش‌رونده را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش یک تحلیل حساسیت برای یافتن موثرترین پارامتر در افزایش مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده انجام شد و نتایج نشان داد که افزایش نیروی پس‌کشیدگی بیشترین تاثیر را بر کاهش پاسخ سازه در برابر خرابی پیش‌رونده دارد (محمدی و اینانلو، ۱۳۹۴). با توجه به پارامترها و اجزای مختلف این اتصال، نیاز به مطالعات بیشتری در رابطه با پارامترهای موثر این اتصال احساس می‌شود. در این مقاله مدلسازی عددی اتصال پس‌کشیده با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام گرفته و ضمن کنترل صحت مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی (Ricles (2002) و همکاران نقش پارامترهای موثر در رفتار اتصال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد مطالعه شامل عدم استفاده از ورق تقویتی، استفاده از ورق تقویتی با عرض و نبشی با طول بزرگتر، استفاده از ورق کناری و ورق تقویتی جان بجای ورق تقویتی بال و استفاده از نبشی جان هستند. اثر استفاده از نبشی جان بر رفتار اتصال پس‌کشیده بعنوان ایده و پیشنهادی جدید در این مطالعه بررسی می‌شود.

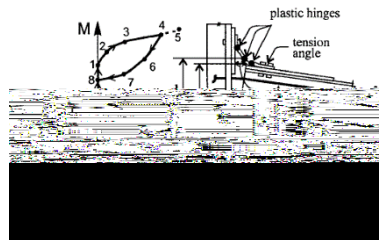


شکل ۱: جزئیات اتصال پس‌کشیده (Ricles et al., 2002)

رفتار اتصال پس کشیده

در اتصال پس کشیده فولادی کابل‌ها موازی با طول تیر و در تمام دهانه‌ها امتداد پیدا کرده و در خارج از اتصال به ستون مهار می‌شوند. نیروی پس-کشیدگی کابل‌ها باعث می‌شود که بال‌های تیر به بال ستون فشرده شوند و به این ترتیب در برابر ممان مقاومت نمایند، در حالی که نبشی‌ها و اصطکاک‌ها که در فصل مشترک تیر و ستون وجود دارد، در مقابل برش مقاومت می‌کنند. در واقع در این اتصال نبشی‌ها ابزارهای اتلاف کننده انرژی هستند، بنابراین هدف اولیه از وجود نبشی‌ها، اتلاف انرژی است. از ورق‌های تقویتی برای جلوگیری از تسلیم تیر، در بال‌های تیر استفاده می‌شود. همچنین ورق‌های پیشانی به نحوی بین بال‌های تیر و بال ستون قرار داده می‌شوند که فقط بال‌های تیر و ورق‌های تقویتی با ستون در تماس باشند.

(Garlock (2005) و همکاران نشان داده‌اند که در نبشی کششی، یک مکانیزم با تشکیل سه مفصل پلاستیک، مطابق شکل ۲ به وجود می‌آید که دو مفصل پلاستیک بر روی ماهیچه هر ساق نبشی و مفصل سوم، نزدیک پیچ‌هایی که نبشی را به ستون متصل می‌کنند، تشکیل می‌شود (Garlock et al., 2005). رفتار خمشی یک اتصال پس کشیده دارای نبشی بالا و نشیمن تحت بارگذاری چرخه ای مشابه شکل ۲ است، چرخش نسبی اتصال θ_r تا قبل از اینکه شکاف باز شود و بال کششی تیر از ستون جدا شود، برابر با صفر است، به طوری که سختی اولیه اتصال تحت لنگر اعمالی مشابه با یک اتصال خمشی جوشی است (Ricles et al., 2002).



شکل ۲: رفتار چرخه‌ای اتصال پس کشیده (Ricles et al., 2002)

لنگر در لحظه باز شدگی شکاف به نام لنگر فشاربرداری معروف است، نقطه ۱ در شکل سمت چپ نشان‌دهنده لحظه فشار برداری اتصال می‌باشد. با ادامه بارگذاری نبشی‌ها تسلیم می‌شوند (نقطه ۲) تا اینکه نبشی‌ها در نقطه ۳ دچار تسلیم پلاستیک کامل شوند. بین نقاط ۳ و ۵ سختی اتصال شامل سختی کابل‌های الاستیک و سخت‌شدگی کرنشی نبشی‌ها می‌باشد، در صورت ادامه بارگذاری در نقطه ۵ کابل‌های پس کشیده شروع به تسلیم می‌کنند و در صورت باربرداری در نقطه ۴ و قبل از تسلیم کابل‌ها، نبشی‌ها تا بسته شدن شکاف در لایه مرزی تیر-ستون، انرژی را بین نقاط ۴ تا ۸ اتلاف می‌کنند (Ricles et al., 2002).

مشخصات مدل‌ها

مدل آزمایشگاهی مرجع

نمونه اتصالات تحلیل شده در آزمایشگاه توسط Ricles (2002) و همکاران، به شکل صلیبی، از دو تیر در دو طرف یک ستون، کابل، نبشی و ورق‌های تقویت‌کننده و پیشانی ساخته شده‌اند، که نمونه‌ای از اتصال داخلی قاب‌ها است. تیرها در انتهای آزاد دارای تکیه‌گاه غلطکی و ستون در پایین دارای تکیه‌گاه مفصلی و در بالا آزاد است تا تغییر مکان جانبی اعمال شود. ارتفاع ستون استفاده شده در نمونه‌های اتصال، برابر ۳۶۵۸ میلی‌متر و طول کل نمونه‌ها، شامل دو تیر و ارتفاع مقطع ستون، برابر ۶۰۹۶ میلی‌متر است. نمونه‌ی مورد نظر برای صحت سنجی، نمونه‌ی PC6 از سری نمونه‌های مورد آزمایش توسط ریکلز می‌باشد. مقطع تیر W24×62 هست. برای ستون از مقطع فولادی پر شده با بتن (CFT) به ابعاد ۴۰۶×۴۰۶×۱۳ میلی‌متر استفاده شده است. جزئیات نمونه‌ی اتصال و مشخصات پیچ‌های مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شد. ورق‌های پیشانی بین نبشی‌ها و بال تیر با بال ستون قرار می‌گیرند. ابعاد این ورق ۲۷۵×۲۵۴×۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بال تیرها بوسیله‌ی ورق‌های تقویتی مسلح می‌شود تا تسلیم در آنها به حداقل مقدار برسد. ورق‌های تقویتی به ابعاد ۶۰۳×۲۰۳×۱۲/۷ میلی‌متر برای نمونه‌ی PC6 استفاده شده است. نمونه دارای ۴ کابل پس کشیده با مقاومت بالا در هر طرف جان تیر است که با فاصله‌های مساوی در ارتفاع تیر قرار می‌گیرند (Ricles et al., 2002). ستون از فولاد ASTM A500 GR.B با مقاومت تسلیم ۳۷۹ مگاپاسکال ساخته شده است. برای ورق‌های تقویتی و ورق‌های پیشانی از فولاد HSLA-100 و برای سایر مصالح فولادی از فولاد A36 استفاده شده است. خصوصیات مصالح فولادی استفاده شده در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی جهت صحت سنجی در جدول ۱ مشاهده می‌شود. هر نمونه با استفاده از یک سری سیکل‌های تغییر مکان جانبی متناسب با دامنه افزایشده تست می‌شود. این تغییر مکان‌ها شامل ۲ سیکل در هر زاویه رانش نسبی طبقه با دامنه‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷ درصد است و بدنبال آن سه سیکل زاویه رانش نسبی با دامنه‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد اعمال می‌شود (Ricles et al., 2002).

جدول ۱: خصوصیات مصالح فولادی مطابق با مطالعه (2002) Ricles و همکاران

کابل پس کشیده	ورق پیشانی	ورق تقویتی	نبشی	جان تیر	بال تیر	تنش (مگاپاسکال)
۱۳۰۵	۸۴۳	۸۴۳	۲۳	۲۶۶	۲۳۰	σ_y
۱۸۶۴	۸۹۵	۸۹۵	۴۶۵	۴۵۵	۴۲۱	σ_u

مدل‌های عددی

نمونه‌ی ساخته شده در این مقاله جهت صحت سنجی، از نظر هندسه، مشخصات مصالح و شرایط مرزی اتصال بر اساس مدل آزمایشگاهی PC6 ساخته شده توسط Ricles (2002) و همکاران می‌باشد. پارامترهای مورد مطالعه در مدل‌های عددی به شرح زیر می‌باشند: (۱) عدم استفاده از ورق تقویتی، (۲) استفاده از ورق تقویتی با عرض و نبشی با طول بزرگتر، (۳) استفاده از ورق کناری و ورق تقویتی جان بجای ورق تقویتی بال، (۴) استفاده از نبشی جان. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

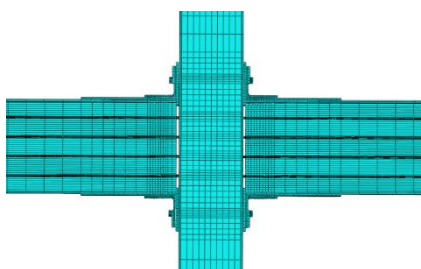
جدول ۲: مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

نبشی جان	ورق کناری و ورق تقویتی جان	طول نبشی (mm)	عرض ورق تقویتی (mm)	نام مدل
*	*	۲۰۳	۲۰۳	PC6
*	*	۲۰۳	*	PC6-RPF-0
*	√	۲۰۳	*	PC6-RPF0-RPW1
*	*	۲۵۰	۲۵۰	PC6-LL-WRP-250
√	*	۲۰۳	۲۰۳	PC6-LW

مدلسازی و صحت سنجی

مدلسازی

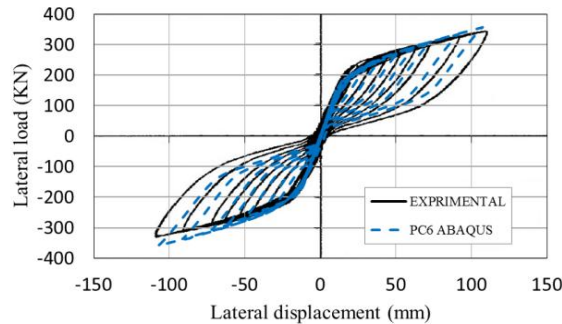
اجزایی که برای این اتصال در ماژول Part ایجاد شده‌اند شامل نبشی، تیر، ستون مرکب (شامل ۲ بخش فولادی و بتنی)، پیچ‌ها، ورق تقویتی، ورق پیشانی، کابل‌ها، ورق واشر، و تکیه‌گاه‌ها هستند. برای کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل و همچنین کاهش حجم خروجی آن، از تقارن حول جان تیر و ستون استفاده شده و نیمه اتصال شبیه سازی شده است. پس از ساخت هندسه‌ی مدل، ویژگی‌های مصالح در ماژول Property تعریف می‌گردد. ویژگی‌های مصالح تعریف شده در ماژول Property مطابق با مدل آزمایشگاهی به نرم افزار معرفی می‌شوند. مسئله دارای دو گام حل می‌باشد. Step1 جهت بارهای پیش‌تنیدگی کابل‌ها و پیچ‌ها و Step2 جهت بار چرخه‌ای جانبی می‌باشد. در این اتصال اندرکنش زیادی بین اجزاء وجود دارد، و از آنجا که تحلیلگر ضمنی (Implicit) آباکوس، توانایی بالایی در شبیه‌سازی رفتارهای غیرخطی دارد، بنابراین از این تحلیلگر برای بدست آوردن پاسخ اتصال به تغییر مکان جانبی استفاده شده است. برای تعریف تماس سطوحی که با یکدیگر برخورد دارند از تماس سطح به سطح (Surface to surface) استفاده شده است. همچنین از قید Tie جهت مقید نمودن اعضای که به یکدیگر جوش شده‌اند، استفاده شده است. در مرحله اول بارگذاری برای پیش‌تنیده کردن و پس کشیده کردن، از گزینه‌ی Bolt load نرم افزار استفاده شده است. در مرحله دوم، بارگذاری جانبی بصورت تغییر مکان جانبی به بالای ستون وارد شده است. شرایط مرزی اتصال از جمله تکیه‌گاه غلطکی انتهای تیر و تکیه‌گاه مفصلی پایین ستون، بدقت در نرم افزار شبیه‌سازی شده‌اند. کلیه اجزا با استفاده از المان‌های حجمی پیوسته، مرتبه اول و با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) موجود در آباکوس شبکه‌بندی شده‌اند. در شکل ۳ شبکه‌بندی اجزای محدود اتصال مشاهده می‌شود.



شکل ۳: مش بندی اتصال پس کشیده در نرم‌افزار

صحت سنجی

صحت سنجی مدل عددی از طریق مطابقت نمودار نیرو-جابجایی این مدل با نمودار نیرو-جابجایی مدل آزمایش شده توسط Ricles (2002) و همکاران انجام شده که در شکل ۴ قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار مدل عددی تطابق خوبی با نمودار مدل آزمایشگاهی دارد.

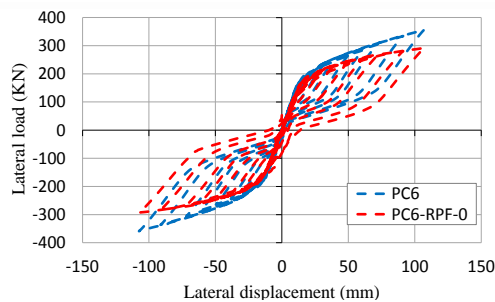


شکل ۴: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در زاویه رانش نسبی ۳٪: نمودار نیرو-جابجایی

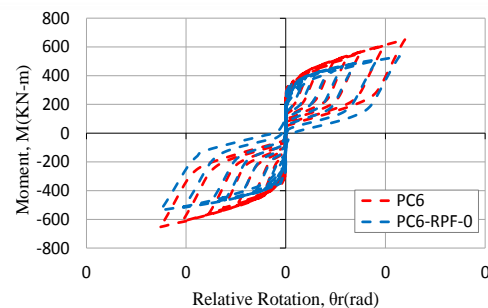
بررسی نتایج

تأثیر عدم استفاده از ورق تقویتی بال تیر، و استفاده از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری، بجای ورق تقویتی بال تیر

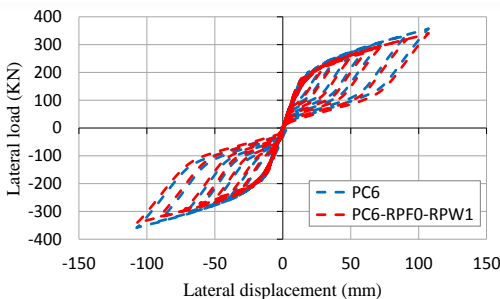
برای بررسی تأثیر عدم استفاده از ورق تقویتی بال تیر، و همچنین استفاده از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری، بجای ورق تقویتی بال تیر بر رفتار اتصال، مدل PC6-RPF-0 بدون ورق تقویتی ساخته شده و در مدل PC6-RPF0-RPW1 بجای ورق تقویتی جان تیر از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری استفاده شده است. نتایج این مدل ها با نتایج مدل PC6 مقایسه شده است. در شکل ۵ نمودارهای نیرو - جابجایی و ممان - دوران مدل ها با یکدیگر مقایسه شده اند.



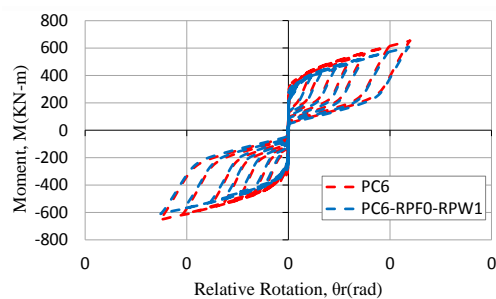
ب) نمودار نیرو-جابجایی اتصال PC6 و PC6-RPF-0



الف) نمودار لنگر-دوران اتصال PC6 و PC6-RPF-0



د) نمودار نیرو-جابجایی اتصال PC6 و PC6-RPF0-RPW1



ج) نمودار لنگر-دوران اتصال PC6 و PC6-RPF0-RPW1

شکل ۵: مقایسه نمودارهای چرخه ای مدل های PC6، PC6-RPF-0 و PC6-RPF0-RPW1

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که اتصال بدون ورق تقویتی، رفتار نیرو-جابجایی ضعیف‌تری دارد، به گونه‌ای که سختی اولیه و سختی ماندگار در این اتصال کاهش پیدا کرده است. اتلاف انرژی در اتصال PC6-RPF-0، ۶/۹٪ بیشتر از اتصال PC6 است، با این حال عدم استفاده از ورق تقویتی، خودمركزی اتصال را به خطر

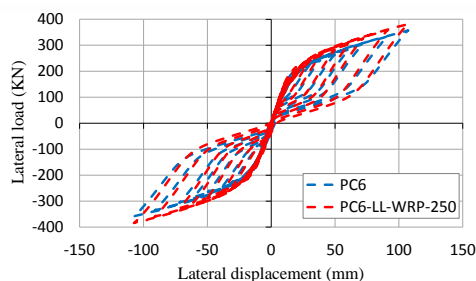
انداخته و جابجایی باقی مانده در این اتصال بیشتر شده است. خلاصه ی نتایج مدل‌ها در جدول ۳ آمده است. در این جدول، K_0 سختی اولیه ی اتصال در زاویه رانش نسبی ۳٪ قبل از فشاربرداری، K_{FR} سختی اتصال صلب با ابعاد تیر و ستون مشابه (برابر ۱۴۸۹۵ کیلو نیوتن بر متر)، $T_{max, FEN}$ بیشترین نیروی پس-کشیدگی در کابل‌ها و $\theta_{r, max}$ دوران نسبی بین تیرها و ستون‌ها در زاویه رانش نسبی ۳٪ است. همچنین در جدول ۳ نسبت ممان فشاربرداری به ظرفیت خمشی تیرها (M_d / M_p) و نیز نسبت ظرفیت ممان اتصال به ظرفیت خمشی تیر (M_{max} / M_p) داده شده که در زاویه رانش نسبی ۳٪ محاسبه شده است. مقدار T_u بر اساس اطلاعات شرکت سازنده ی کابل‌هاست و M_p بر اساس مصالح تیر و خصوصیات مقطع تعیین می‌شود (Ricles et al., 2002). از مقادیر جدول ۳ مشاهده می‌شود که در مدل PC6-RPF-0 حداکثر ظرفیت خمشی اتصال کاهش پیدا کرده است. همچنین ظرفیت اعمال بار جانبی در مدل PC6-RPF-0، ۲۱/۵٪ کمتر از نمونه ی PC6 می‌باشد. بعد از استفاده از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری جوش شده به بالهای تیر در اتصال PC6-RPF0-RPW1، مشاهده می‌شود که اتصال رفتار نیرو-جابجایی و ممان-دوران بهتری پیدا می‌کند، اما با این حال همچنان نسبت به اتصال PC6 سختی ماندگار کمتری دارد.

جدول ۳: نتایج تحلیل عددی مدل‌های PC6 و PC6-RPF-0 و PC6-RPF0-RPW1

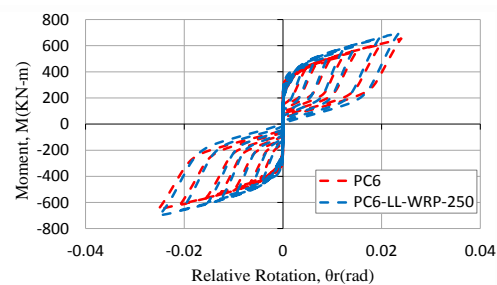
نام مدل	$\frac{K_0}{K_{FR}}$	M_p (kn.m)	T_u (kn)	$\frac{M_d}{M_p}$	$\frac{M_{max}}{M_p}$	$\frac{T_{max}}{T_u}$	$\theta_{r, max}$ (rad)
PC6	0.96	576	261	0.39	1.11	0.58	0.0253
PC6-RPF-0	0.84	576	261	0.35	0.92	0.50	0.0252
PC6-RPF0-RPW1	0.93	576	261	0.37	1.05	0.61	0.0251

اثر استفاده از نبشی و ورق تقویتی با طول و عرض بیشتر

برای بررسی اثر افزایش طول نبشی و عرض ورق تقویتی بر رفتار اتصال، مدل PC6-LL-WRP-250 ایجاد شده است. این اتصال مشابه اتصال PC6 می‌باشد، در اتصال PC6-LL-WRP-250 طول نبشی و عرض ورق تقویتی، بجای ۲۰۳ میلیمتر، ۲۵۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج با اتصال PC6 مقایسه می‌شود. در شکل ۶ نمودارهای نیرو-جابجایی و ممان-دوران مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که توان اتصال در تحمل نیروی جانبی در اتصال PC6-LL-WRP-250، بیشتر از اتصال PC6 است. همچنین اتلاف انرژی اتصال افزایش داشته است، بگونه‌ای که اتلاف انرژی در اتصال PC6-LL-WRP-250، ۱۷٪ بیشتر از اتصال PC6 است.



ب) نمودار نیرو-جابجایی



الف) نمودار لنگر-دوران

شکل ۶: مقایسه نمودارهای چرخه ای مدل‌های PC6 و PC6-LL-WRP-250

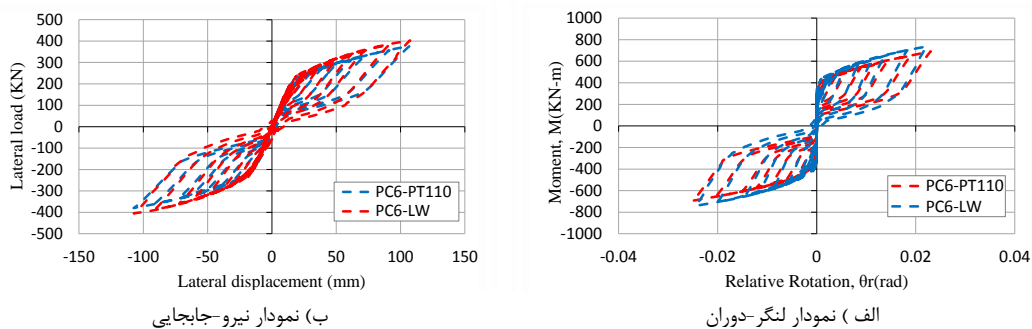
خلاصه‌ای از نتایج مدل‌ها در جدول ۴ آمده است. از مقادیری که در جدول ارائه شده است می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول نبشی و عرض ورق تقویتی، حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل‌ها کاهش پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که حداکثر لنگر اتصال نیز افزایش پیدا کرده است، بگونه‌ای که حداکثر لنگر در اتصال PC6-LL-WRP-250، ۹٪ بیشتر از اتصال PC6 است. همچنین سختی اولیه ی اتصال افزایش پیدا کرده و تقریباً برابر با سختی اتصال صلب جوشی است.

جدول ۴: نتایج تحلیل عددی مدل‌های PC6 و PC6-LL-WRP-250

نام مدل	$\frac{K_0}{K_{FR}}$	M_p (kn.m)	T_u (kn)	$\frac{M_d}{M_p}$	$\frac{M_{max}}{M_p}$	$\frac{T_{max}}{T_u}$	$\theta_{r, max}$ (rad)
PC6	0.96	576	261	0.39	1.11	0.58	0.0253
PC6-LL-WRP-250	0.99	576	261	0.39	1.21	0.48	0.0252

اثر استفاده از نبشی جان

در این مطالعه استفاده از نبشی جان بعنوان ایده‌ای جدید برای بهبود رفتار اتصال پس کشیده پیشنهاد شده است. برای بررسی اثر استفاده از نبشی جان بر رفتار اتصال، مدل PC6-LW ایجاد شده است. این اتصال با مدل PC6-PT110 با نیروی پس کشیدگی ۱۱۰ کیلونیوتن مقایسه می‌شود. در اتصال PC6-LW از نبشی جان با ابعاد $100 \times 100 \times 10$ میلیمتر و مصالح نبشی‌های فوقانی و تحتانی مشابه با مصالح نبشی‌های فوقانی و تحتانی متصل شده، و به جان تیر جوش شده است. در شکل ۷ نمودارهای نیرو-جابجایی و ممان-دوران مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود استفاده از نبشی جان، باعث افزایش ظرفیت خمشی، توان اتصال در تحمل بار جانبی، اتلاف انرژی، سختی اولیه و سختی ماندگار اتصال می‌شود.



شکل ۷: مقایسه نمودارهای چرخه‌ای مدل‌های PC6-LW و PC6-PT110

خلاصه‌ای از نتایج مدل‌ها در جدول ۵ آمده است. همانطور که از مقادیر جدول مشخص است با استفاده از نبشی جان، سختی اولیه‌ی اتصال برابر با سختی اتصال صلب جوشی شده است. از نمودار نیرو-جابجایی مشخص است که توان اتصال در تحمل بار جانبی در اتصال PC6-LW، بیشتر است، بگونه‌ای که توان اتصال در تحمل بار جانبی در این اتصال، ۲/۲٪ بیشتر از PC6-PT110 است. همچنین اتلاف انرژی اتصال افزایش داشته است، بگونه‌ای که اتلاف انرژی در اتصال PC6-LW، ۲۴/۵٪ بیشتر از اتصال PC6-PT110 است.

جدول ۵: نتایج تحلیل عددی مدل‌های PC6-LW و PC6-PT110

نام مدل	$\frac{K_0}{K_{FR}}$	M_p (kn.m)	T_u (kn)	$\frac{M_d}{M_p}$	$\frac{M_{max}}{M_p}$	$\frac{T_{max}}{T_u}$	$\theta_{r,max}$ (rad)
PC6-PT110	0.97	576	261	0.46	1.19	0.64	0.0249
PC6-LW	1.00	576	261	0.39	1.27	0.61	0.0244

نتیجه‌گیری

پس از زلزله‌ی سال ۱۹۹۴ نورتریج و عملکرد نامناسب اتصالات خمشی جوشی، مشخص شد که برای دستیابی به رفتار شکلپذیر و قابل اطمینان در اتصالات قابهای خمشی فولادی انجام تغییراتی در روش‌ها و مفاهیم طراحی گذشته، مصالح، ساخت، نصب و تضمین و کنترل کیفیت این سازه‌ها الزامی است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی در زمینه‌ی اتصالات پس کشیده صورت گرفته است، اما با توجه به رفتار خاص اتصال و جزئیاتی که در پیکربندی اتصال وجود دارد، و جهت رسیدن به بهترین عملکرد سازه، همچنان به مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز است. در این مطالعه نقش ورق تقویتی در رفتار اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مورد مطالعه شامل عدم استفاده از ورق تقویتی، استفاده از ورق تقویتی با عرض و نبشی با طول بزرگتر، استفاده از ورق کناری و ورق تقویتی جان بجای ورق تقویتی بال و استفاده از نبشی جان هستند. بنابراین نتایج بدست آمده از این مطالعه‌ی عددی بر روی اتصالات پس کشیده عبارتند از:

- * با توجه به صحت‌سنجی صورت گرفته، مشخص شد که مدلسازی اتصال پس کشیده با استفاده از روش عددی، قادر است بخوبی رفتار چرخه‌ای این اتصال را نشان دهد.
- * عدم استفاده از ورق تقویتی بال تیر باعث می‌شود که بعلت فشار تکیه گاهی موضعی در سطح تماس تیر و ستون، تیر تسلیم شود. این تسلیم موجب می‌شود که در تیر تغییر شکل دائمی ایجاد شود و بال‌های تیر در تماس مناسبی با ستون نخواهند بود. در نتیجه کاهش در سختی و ظرفیت خودمرکزی اتصال حاصل

می‌شود.

- * استفاده از ورق تقویتی جان تیر و ورق کناری، بجای ورق تقویتی بال تیر، سختی ماندگار و ظرفیت اعمال بار جانبی کمتری را نسبت به اتصال با ورق تقویتی بال تیر ارائه می‌دهد.
- * افزایش طول نبشی و عرض ورق تقویتی باعث بهبود رفتار نیرو - جابجایی و ممان - دوران اتصال خواهد شد، بگونه ای که افزایش در ظرفیت خمشی، ظرفیت اعمال بار جانبی، اتلاف انرژی، سختی اولیه و سختی ماندگار مشاهده می‌شود.
- * در صورتی که علاوه بر نبشی‌های فوقانی و تحتانی، از نبشی جان نیز استفاده شود، شاهد افزایش ظرفیت خمشی، ظرفیت اعمال بار جانبی، اتلاف انرژی، سختی اولیه و سختی ماندگار و همچنین کاهش دوران نسبی اتصال خواهیم بود.

مراجع

- احمدی جزنی، شادمان حیدری، امری، فرزین. (۱۳۹۵). تحلیل عددی اتصالات خمشی فولادی پس کشیده همراه بانبشی‌های فوقانی و تحتانی، فصلنامه آنالیز سازه - زلزله ۱۳ (۱).
- شربتی، هادیان فرد، لشکری. (۱۳۹۱). بررسی رفتار اتصالات قاب‌های خمشی فولادی پس کشیده، مجهز به اتلاف‌کننده‌های انرژی، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، ایران.
- عزیزی، سیاه‌پلو. (۱۳۹۶). بررسی تاثیر مقاومت و مشخصات نبشی بر رفتار اتصال فولادی پس کشیده با نبشی فوقانی و تحتانی، نشریه مهندسی سازه و ساخت.
- عزیزی، سیاه‌پلو. (۱۳۹۷). بررسی نقش پارامترهای موثر در رفتار اتصال پس کشیده‌ی تیر فولادی به ستون مرکب، نشریه مهندسی عمران شریف.
- گرامی، خاتمی. (۱۳۹۰). بررسی نقش پارامترهای موثر در رفتار اتصالات پس کشیده فولادی با نبشی‌های فوقانی و تحتانی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.
- محمدی، مجید و اینانلو. (۱۳۹۴). بررسی پارامترهای موثر بر رفتار اتصال پس کشیده کابلی در خرابی پیشرونده، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز، ایران.

Abaqus Inc., Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.16.

Abedi Sarvestani, Rasti Ardakani, Shirvand. (2014). Behavior of self-centering post-tensioned connections between beam and column includ angle with stiffener in steel moment resistant frame. *2nd International Congress on structure, Architecture and Urban Development*, Tabriz University, Iran.

Azizi, siyahpolo, Mahdavi. (2017). Investigating the Cyclic Behavior of Post-tensioned Steel Connections by Changing the Diameter and Arranging the Strands. *Soil Structure Interaction Journal 2 (1)*, JR_SSI-2-1_007.

Garlock M.M., Ricles J.M., Sause R. (2005). Experimental Studies of Full-Scale Posttensioned Steel Connections. *Journal of Structural Engineering*, pp. 438-448, March.

Garlock, M.M., J.M. Ricles, and R. Sause. Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connection.

Garlock M, Sause R, Ricles J. (2007). Behavior and design of posttensioned steel frame systems. *Journal of Structural Engineering*, ASCE; 133(3): 389-99.

S. Moradi, and M. Shahria Alam. (2015). Finite-Element Simulation of Posttensioned Steel Connections with Bolted Angles under Cyclic Loading. *This paper is part of the Journal of Structural Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9445/04015075(15)/\$25.00.

Ricles, J.M., Sause, R., Garlock, M. and C. Zhao. (2001). Post-Tensioned Seismic Resistant Connections for Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No.2, pp 113-121.

Ricles, J.M., Sause, R., Peng, S.W., and L.W. Lu. (2002). Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Post-Tensioned Steel Connections. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 7, pp. 850-859.