



بررسی عملکرد اتصالات فولادی پس کشیده (PT)

رضا شربتی^۱، غلامرضا هوائی^۲، یزدان حیاتی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، R.Sharbaty@aut.ac.ir

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

عملکرد نامناسب قابهای خمشی فولادی در برابر زلزله های اخیر، منجر به انجام تحقیقات گسترده در زمینه محدود کردن خسارت و تغییرشکل‌های پلاستیک در اعضای اصلی قاب، حذف تغییر مکان‌های نسبی باقیمانده در قاب و افزایش ظرفیت دوران پلاستیک اتصالات گردید. برای رسیدن به این اهداف، توسط محققان استفاده از نوع جدیدی از قابها با اتصالات پس کشیده پیشنهاد شد. اتصالات پس کشیده، شامل کابل های با مقاومت بالا برای ایجاد خاصیت خود مرکزی و اتلاف کننده ها برای کنترل تغییر شکل های پلاستیک هستند. در این مقاله هدف بررسی عملکرد لرزه ای اتصالات پس کشیده است. اتصال پس کشیده با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل شده و تحت بارگذاری رانشی قرار گرفته استنتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و چگونگی توزیع تنش و کرنش در اجزای مختلف اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل عددی بیانگر عملکرد مناسب نبشی در کاهش تغییر شکل های خمیری در اعضای اصلی است. در این نوع اتصال، تیر، ستون و کابل تحت زلزله مبنای طراحی ارتجاعی باقی می ماند و بیشتر تغییر شکل های خمیری در نبشی رخ می دهد. بنابراین اتصال در باربرداری خود مرکز خواهد بود.

کلمات کلیدی: قابهای خمشی فولادی، اتصالات پس کشیده، نیروی بازگرداننده، اتلاف کننده انرژی، مدل عددی

۱- مقدمه

دلیل اصلی محبوبیت قاب های خمشی فولادی، فقط مزایای زیبایی و تطبیق پذیری با معماری نیست، بلکه قاب های خمشی، به عنوان سیستم های با شکل پذیری بالا، توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل های غیرالاستیک بزرگ، بدون تنزل عمده در مقاومت و بدون ایجاد ناپایداری را دارند. در طی زلزله نورتریج (۱۹۹۴) در آمریکا موارد زیادی از گسیختگی ناگهانی در ناحیه اتصالات قاب های خمشی جوشی صلب مشاهده شد که عمدتاً در محل جوش نفوذی بال تیر به ستون رخ داد. پس از زلزله راهکارهای متفاوتی برای افزایش شکل پذیری اتصالات این قاب ها از جمله استفاده از اتصالات نیمه صلب پیچی و اتصالات صلب بهبود یافته ارائه شد. اگرچه قاب های دارای اتصالات پیچ شده، باعث حذف جوش و گسیختگی ترد مربوط به آن می شوند، اما ایجاد تغییر شکل های غیرالاستیک در اعضای اصلی سازه ای و کماتش موضعی در بال و جان تیر در ناحیه ی اتصال، باعث ایجاد خسارت عمده به سازه و تغییر شکل های نسبی غیرارتجاعی در طبقات می شود که هزینه های زیادی برای بازسازی بعد از زلزله های سنگین در پی دارد. با الهام بخشی از پیشرفت های اخیر در سیستم های مقاوم لرزه ای بتنی پیش ساخته، اتصالات خمشی فولادی جدید با مطرح کردن تکنولوژی پس کشیدگی ایجاد شده اند (ریکلز و همکاران [۱۲] و [۲]). ریكلز و همكاران [۲] اتصالی را برای قاب های خمشی معرفی کردند که از

کابل های فولادی با مقاومت بالا برای پس کشیدگی اتصال و ایجاد نیروی بازگرداننده استفاده کردند. همچنین نبشی های بالا و پایین توانایی اتلاف انرژی مناسبی برای اتصال فراهم کردند. کریستاپلوس و همکاران [۳] اتصالات پس کشیده مشابهی با استفاده از جزئیات متفاوت، معرفی کردند. آنها با استفاده از میلگرد های با مقاومت بالا در وسط ارتفاع مقطع تیر، پاسخ خود مرکز ایجاد کردند و میلگرد هایی که در زیر بال بالایی و بالای بال پایینی تیر قرار گرفتند، انرژی را تلف کردند. روهاس و همکاران [۴] و کیم و کریستو پلوس [۵] یک اتصال میراشده اصطکاکی پس کشیده برای قاب های خمشی فولادی مقاوم در برابر زلزله معرفی کردند. علاوه بر این، آنها یک قاب خمشی با استفاده از اتصال پیشنهادی طراحی کردند و پاسخ آنرا به رکوردهای زلزله قوی مطالعه کردند. همچنین گارلاک و همکاران [۶ و ۷ و ۸] به بررسی رفتار و طراحی سیستم های قاب پس کشیده پرداختند. آنها یک فرآیند طراحی مرحله به مرحله پیشنهاد دادند و تاثیر اندرکنش سیستم طبقه و قاب، مقاومت اتصال، مقاومت چشمه ی اتصال و افزایش مقاومت اتصال در طبقات فوقانی را روی رفتار قاب های پس کشیده، مورد بررسی قرار دادند. یک قاب خمشی فولادی با اتصالات پس کشیده که بطور مناسب طراحی شده، چندین مزیت از جمله سختی، مقاومت و شکل پذیری مناسب دارد و سازه قادر است تا به حالت تغییرشکل نیافته اولیه خود، حتی بعد از تجربه تغییر مکانهای نسبی غیرالاستیک بزرگ، برگردد (خودمرکزی). همچنین با استفاده از اتلاف کننده های انرژی مناسب در ناحیه اتصال، این قاب ها توانایی اتلاف انرژی بالایی نیز خواهند داشت. اتصالات خمشی پس کشیده سختی اولیه مشابه اتصالات خمشی جوشی صلب دارند، درحالیکه نیاز به استفاده از جوش و گسیختگی های ترد مرتبط با آن، نیست.

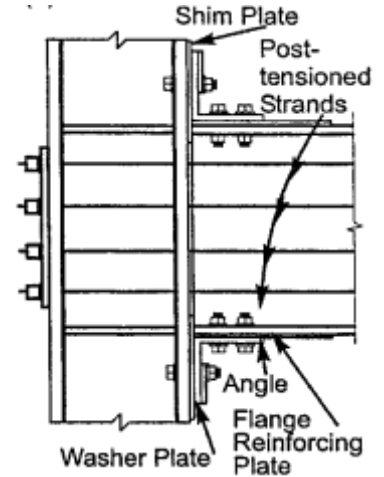
در این مقاله هدف بررسی رفتار لرزه ای اتصالات پس کشیده است. برای رسیدن به این هدف، نمونه اتصال مورد نظرا استفاده از المانهای حجمی در نرم افزار المان محدود آباکوس [9] شبیه سازی شده است. این نرم افزار به دلیل توانایی بالا در شبیه سازی رفتارهای غیرخطی و آسانی تعریف اندرکنش مناسب بین اجزای مختلف اتصال، استفاده شده است. تحلیل های رانشی با در نظر گرفتن تغییرشکل های بزرگ انجام گرفته است. خصوصیات هندسی و مکانیکی نمونه اتصال شبیه سازی شده در نرم افزار، مطابق با نمونه PC4 از مجموعه نمونه های آزمایش شده توسط ریکلز و همکاران [۲] است. نتایج گرفته شده توسط نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از تایید راستی آزمایشی شبیه سازی، با استفاده از نتایج شبیه سازی عددی، تاثیر نبشی ها در کنترل تغییرشکل های غیر ارتجاعی اعضای اصلی و چگونگی توزیع تنش و کرنش خمیری در اعضای اصلی اتصال، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- رفتار اتصالات پس کشیده

قبلا بیان شد که در اتصالات معمولی جوشی و پیچی، ایجاد تغییر شکل های غیر الاستیک در اعضای اصلی سازه ای و کماتش موضعی در بال و جان تیر ((شکل (a) ۱)، باعث ایجاد خسارت عمده به سازه و تغییر شکل های نسبی غیرارتجاعی در طبقات می شود که هزینه های زیادی برای بازسازی بعد از زلزله های سنگین در پی دارد. بعد از تحقیقات گسترده روی قاب های بتنی پیش ساخته و پس کشیده کردن آنها بمنظور افزایش شکل پذیری و ایجاد توانایی خودمرکزی در سازه (برگشت به موقعیت تغییرشکل نیافته)، ریکلز و همکاران [۱] به فکر استفاده از این سیستم و قابلیت های آن در سازه های فولادی افتادند. آنها از سیستم پس کشیدگی در اتصالات قاب های خمشی فولادی استفاده کردند (شکل (b) ۱).



a)

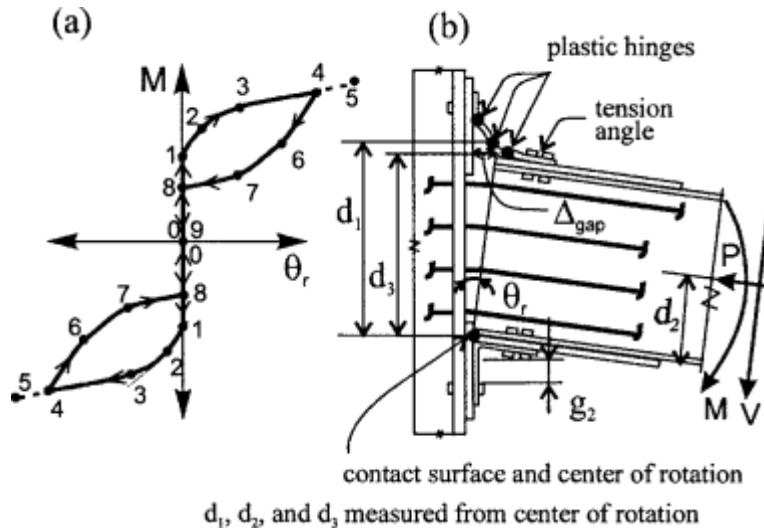


b)

شکل ۱: (a) اتصال خمشی صلب بهبود یافته (کمانش موضعی تیر) (b) اتصال خمشی فولادی پس کشیده (پیشنهادی ریکلز و همکاران[۱])

آنها با استفاده از هشت کابل با مقاومت بالا در دو طرف جان تیر و موازی با آن، تیرها را به ستونها پس کشیده کردند. این کابل ها با ایجاد نیروی بازگرداننده، سازه را به موقعیت اولیه برمی گرداند. نبشی های بالا و پایین پیچ شده به تیر و ستون، ظرفیت اتلاف انرژی مناسب برای اتصال فراهم کردند. آنها با استفاده از مدل تحلیلی (بر اساس المانهای فایبر) و نمونه های تست شده در آزمایشگاه به این نتایج رسیدند: (۱) جوش نیاز نیست (۲) سختی اولیه اتصال مشابه با اتصالات جوش شده است (۳) اتصال خود مرکز و بدون تغییرشکل باقیمانده است (۴) خسارت عمده به قاب، منحصر به نبشی های اتصال می شود (که باید بعد از زلزله شدید تعویض شوند).

کابل های پس کشیده، بال های تیر را به بال ستون فشار می دهند تا خمش را تحمل کنند، در حالیکه اصطکاک در سطح مشترک تیر- ستون همراه با نبشی ها، نیروی برشی عرضی را تحمل می کنند. انتقال برش می تواند بطور مناسب، از طریق اصطکاک نوع کولمب در سطح مشترک تیر و ستون فراهم شود. طرز عمل خاص سطوح تماسی، از قبیل سمباده زدن، ضریب اصطکاک بزرگتری می دهد. نبشی ها علاوه بر تحمل برش عرضی تیر، مقاومت خمشی هم ایجاد می کنند، اما هدف اولیه استقرار نبشی ها، اتلاف انرژی است. ورق های تقویتی به بال های تیر جوش می شوند تا تسلیم و کمانش موضعی بال تیر را کنترل کنند. کمانش موضعی بالها و جان تیر، که تحت ترکیب بارهای محوری و لنگر خمشی بیش از اندازه رخ می دهد، باعث از دست رفتن ناگهانی سختی و مقاومت می شود. همچنین ورق های پیشانی مابین بال های تیر و ستون قرار می گیرند بطوریکه فقط بال های تیر و ورق های تقویتی در تماس با ستون هستند که این عمل تماس خوبی مابین بال های تیر و ستون برقرار می کند. علاوه بر این ورقهای پیشانی از تسلیم جان تیر تحت تنش های تماسی، جلوگیری می کنند. شکل (۲) رفتار لنگر- دوران نسبی ایده آل شده یک اتصال فولادی را نمایش می دهد. مشخصه اصلی رفتار لنگر- دوران اتصال پس کشیده، باز و بسته شدن شکاف در سطح مشترک تیر و ستون تحت بارگذاری سیکلی است.

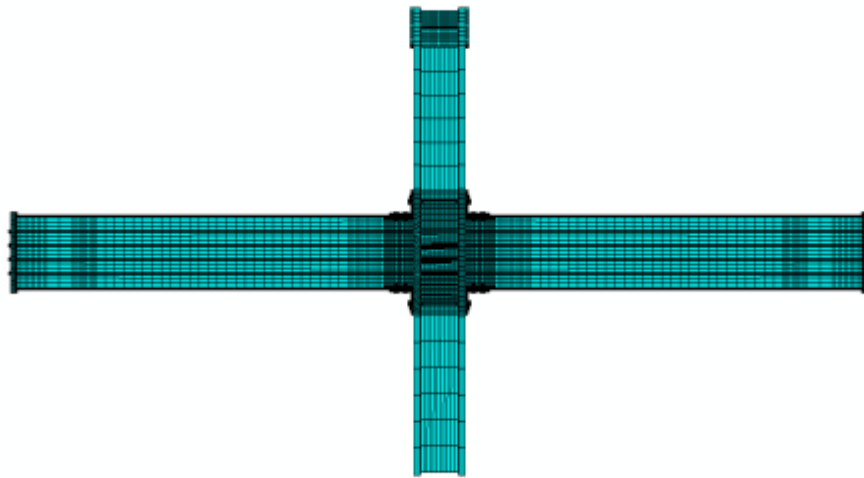


شکل ۲: (a) رفتار لنگر-دوران نسبی (b) تغییر شکل اتصال پس کشیده فشار برداری شده

لنگری که باعث آغاز جدا شدن بال کششی تیر از بال ستون می شود، لنگر فشاربرداری نامیده می شود. رفتار و سختی اتصال در ابتدا شبیه اتصالات خمشی جوش شده صلب است، اما بدنبال جدا شدن بال کششی تیر(فشار برداری)، رفتار شبیه اتصالات نیمه گیردار می شود (نقطه ۱). سختی اتصال پس از فشاربرداری، ترکیبی از سختی نبشی ها و سختی محوری الاستیک کابل های پس کشیدگی است. نیروی کابل پس کشیدگی، ناشی از تغییر شکل اتصال و باز شدن شکاف، افزایش می یابد. گرچه کوتاه شدن تیر ناشی از افزایش نیروی محوری فشاری در آن، اندکی از افزایش نیروی کابل می کاهد. با ادامه بارگذاری، نبشی کششی اتصال در نقطه ۲ تسلیم می شود. در نقطه ۳ این نبشی به طور کامل تسلیم می گردد. در نهایت با ادامه بارگذاری تا نقطه ۵، کابل های پس کشیده شده نیز تسلیم می شوند. بین نقاط ۳ و ۵ رابطه لنگر- دوران تقریباً خطی بوده و سختی اتصال ناشی از سختی محوری کابل های پس کشیده است. در حین باربرداری (نقطه ۴)، نبشی ها تا هنگامی که شکاف بین بال های تیر و بال ستون در نقطه ۸ بسته شده و دوران نسبی برابر با صفر شود، به اتلاف انرژی ادامه می دهند. رفتار مشابه رفتار فوق در بارگذاری با جهت معکوس مشاهده می شود. رفتار خمشی یک اتصال پس کشیده، وابسته به عمق تیر، مجموع نیروی کابل ها، مقاومت نبشی ها، سختی الاستیک و مقاومت کابل های پس کشیدگی است. تا زمانی که کابل ها به حالت الاستیک باقی بمانند و تسلیم قابل توجهی در تیرها ایجاد نشود، نیروی پس کشیدگی حفظ می شود و اتصال در باربرداری به موقعیت اولیه خود بر می گردد. به منظور اطمینان یافتن از الاستیک باقی ماندن کابل ها، آنها با سطح تنشی، که به اندازه کافی زیر تنش تسلیم آنهاست، پس کشیده می شوند. اگر المان های پس کشیدگی بیش از حد بارگذاری شوند، باعث از دست رفتن ناگهانی سختی و مقاومت می شود. اتلاف انرژی اتصال با رفتار نبشی ها تناسب دارد. گارلاک و همکاران [۸] نشان دادند که نبشی کششی با شکل گیری ۳ مفصل پلاستیک، یک مکانیزم ایجاد می کند. یکی از مفاصل پلاستیک روی ماهیچه هر ساق نبشی و دیگری نزدیک پیچ های اتصال نبشی به ستون تشکیل می یابند. بعد از زلزله نیاز به جایگزین کردن نبشی های خسارت دیده می باشد که به سادگی این کار انجام می شود.

۳- مدل عددی اتصالات پس کشیده

در اینجا عملکرد سیکلی اتصالات پس کشیده که به شکل صلیبی با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل شده، بیان می شود. اتصال مدل شده شامل دو تیر در دو طرف یک ستون، چهار کابل با مقاومت بالا در هر طرف جان تیر، ورقهای تقویت کننده بال تیر و ورقهای پیشانی است که کلیه اجزاء بصورت جسم سه بعدی حجمی مدل شده اند (شکل ۳). نمونه اتصال شبیه سازی شده، مطابق با نمونه PC4 تحلیل شده در آزمایشگاه توسط ریکلز و همکاران [۲] است. تیرها در انتهای آزاد، دارای تکیه گاه غلطکی و ستون در پایین دارای تکیه گاه مفصلی است که این شرایط تکیه گاهی منطبق بر نقاط میانی (عطف) اعضا در قاب (تحت بارگذاری جانبی) است. بار بصورت کنترل شونده جابجایی به انتهای بالای ستون وارد می شود. تیرها از پروفیل W24*62 و ستون از پروفیل W14*113 که از نوع بال پهن می باشند. از ورقهای پیشانی به ابعاد (mm) 275*254*9.5 استفاده شده است. همچنین ورقهای تقویت کننده بال تیر به ابعاد (mm) 254*57*12.7 برای محدود کردن کرنش پلاستیک بال تیر به وجه داخلی بالهای تیر جوش شده اند. خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی استفاده شده در اتصال در جدول ۱ بیان شده است. این خصوصیات با استفاده از تست های کششی A505 در تطابق با استانداردهای ASTM توسط ریکلز و همکاران [۲] بدست آورده شده است. برای کلیه اجزاء بجز نبشی، تست های کششی در جهت طولی گرفته شده، اما برای نبشی در جهت عرضی گرفته شده است. ارتفاع ستون استفاده شده در آنالیز (mm) 3658 و طول کل نمونه شامل تیرهای دو طرف ستون و عمق ستون برابر (mm) 6098 است. برای کاهش حجم محاسبات و زمان آنالیز در نرم افزار، از تقارن حول صفحه جان تیر و ستون استفاده شده است. اتصال صلیبی رفتار متقارن حول این صفحه دارد، به همین دلیل، مدل عددی شامل نصف نمونه اتصال آزمایش شده است.

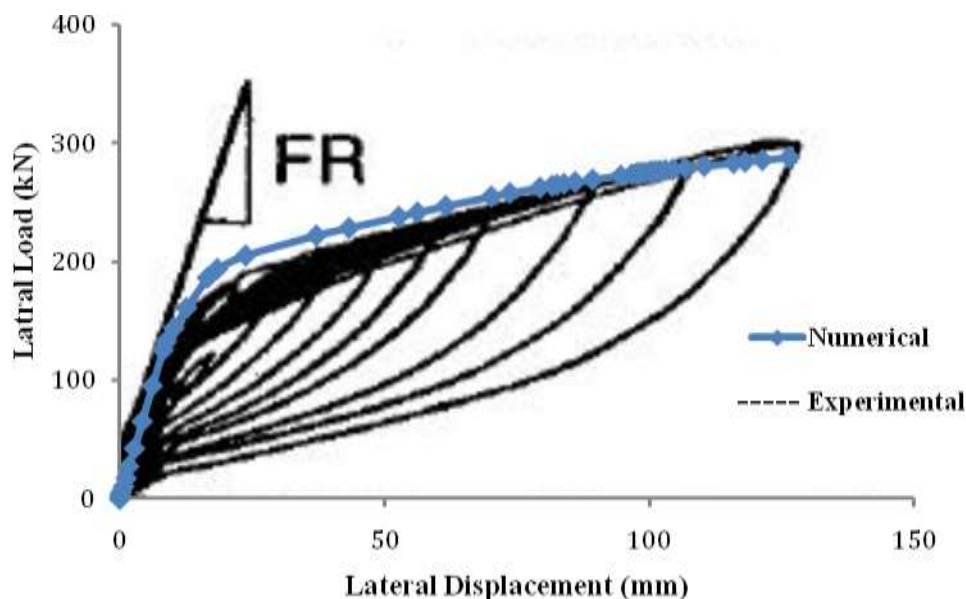


شکل (۳) : اتصال مدل شده در نرم افزار

جدول (۱) : خصوصیات مصالح فولادی (ریکلز و همکاران [۲])

کابل	ورق پیشانی	ورق تقویتی	نبشی	ستون	جان تیر	بال تیر	تنش
۱۳۰۵	۸۴۳	۸۴۳	۲۶۳	۳۵۲	۲۶۶	۲۳۰	تنش تسلیم (MPa)
۱۸۶۴	۸۹۵	۸۹۵	۴۶۵	۵۵۰	۴۵۰	۴۲۱	تنش نهایی (MPa)

در این قسمت، راستی شبیه سازی عددی ارزیابی می شود. شکل (۴)، پاسخ رانشی شبیه سازی عددی را با پوش چرخه های آزمایشگاهی ریکلز و همکاران [۲] مقایسه می کند. منظور از پاسخ اتصال، رابطه نیرو- تغییرمکان جانبی است. همانطور که مشاهده می شود، پاسخ رانشی شبیه سازی عددی، تطابق بسیار خوبی با پوش چرخه های آزمایشگاهی دارد. جدول (۲)، نتایج تحلیل های اجزای محدود و آزمایشگاهی را بصورت عددی مقایسه می کند. نتایج آزمایشگاهی، از جدول ۳ ریکلز و همکاران [۲] استخراج شده است. در این جدول، K_0 سختی اولیه اتصال (قبل از فشاربرداری)، K_{FR} سختی اتصال صلب با ابعاد تیر و ستون مشابه (برابر ۱۱۸۰۹ کیلو نیوتن بر متر)، M_d لنگر مسبب فشاربرداری (بازشدن شکاف)، M_{max} ظرفیت خمشی اتصال (در تغییرمکان نسبی ۳/۵٪)، M_p ظرفیت خمشی خمیری تیر (برابر ۵۷۶ کیلو نیوتن-متر)، T_{max} حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل، T_u ظرفیت کششی کابل (برابر ۲۶۱ کیلو نیوتن) و $\theta_{r,max}$ دوران نسبی اتصال در تغییرمکان نسبی ۳/۵٪ است.



شکل (۴) مقایسه پاسخ نیرو- تغییرمکان جانبی رانشی تحلیل عددی با پوش چرخه ای تحلیل آزمایشگاهی ریکلز و همکاران [۲]، نمونه اتصال PC4

جدول (۲) مقایسه نتایج تحلیل های عددی و آزمایشگاهی ریکلز و همکاران [۲]، نمونه اتصال PC4

مقایسه نتایج تحلیل نمونه PC4	K_0 (KN/m)	$\frac{K_0}{K_{FR}}$	$\frac{M_d}{M_p}$	$\frac{M_{max}}{M_p}$	$\frac{T_{max}}{T_u}$	$\theta_{r,max}$ (rad)
مدل آزمایشگاهی	۱۲۱۶۳	۱/۰۳	۰/۳۷	۰/۸۹	۰/۵۱	۰/۰۲۵
مدل عددی	۱۳۳۳۸	۱/۱۵	۰/۳۸۱	۰/۸۷	۰/۴۹۴	۰/۰۲۵۴
درصد خطا	٪۱۲	٪۱۲	٪۳	٪۲	٪۳	٪۱/۵

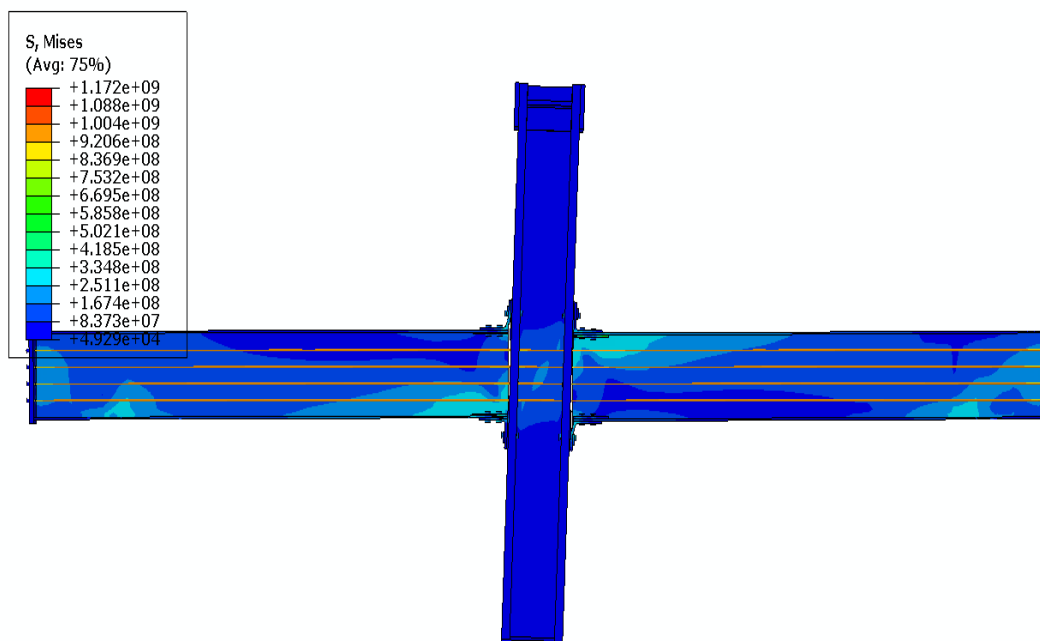
همانطور که اشاره شد، سختی اتصالات پس کشیده تا قبل از فشاربرداری، مشابه اتصالات صلب است. همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود، سختی اولیه اتصالات پس کشیده (ستون دوم جدول (۲))، حتی بیشتر از اتصالات صلب است. بنابراین زیر بارهای وزنی و باد، قاب های پس کشیده

سختی مناسبی دارند و همانند قابهای صلب عمل می کنند. نتایج تحلیل آزمایشگاهی نشان داد که در جابجایی جانبی ۹/۱۴۵ میلیمتر، فشاربرداری رخ می دهد، درحالیکه در تحلیل عددی، در جابجایی جانبی ۸/۸۲ میلیمتر، فشاربرداری رخ می دهد که این مقادیر ۳٪ اختلاف دارند. لنگر مسبب فشاربرداری در دو نمونه آزمایشگاهی و عددی به ترتیب برابر ۲۱۳/۱۲، ۲۱۹/۴۳ (کیلو نیوتن- متر) می باشد که ۳٪ خطا در نتیجه تحلیل عددی وجود دارد. نیروی جانبی مسبب تغییرمکان نسبی ۳/۵٪ و ظرفیت خمشی، حاصل از تحلیل آزمایشگاهی، به ترتیب ۳۰۲/۸ (کیلو نیوتن) و ۵۱۲/۶۴ (کیلو نیوتن- متر) هستند، درحالیکه در تحلیل عددی، این مقادیر برابر ۲۹۶/۰۳۱ و ۵۰۱/۱۷۵ هستند که ۲٪ اختلاف وجود دارد. تا زمانیکه فشاربرداری رخ نداده است و دوران نسبی صفر است، نیروی کابل ثابت می ماند (طول کابل و نمونه اتصال ثابت می ماند). بعد از فشاربرداری، با افزایش دوران نسبی، نیروی کابل، افزایش می یابد که ناشی از دراز شدگی کابل است (طول کابل و نمونه اتصال افزایش می یابد). نیروی کابل در تغییرمکان نسبی ۳/۵٪، در تحلیل آزمایشگاهی و عددی به ترتیب برابر ۱۳۳/۱۱ و ۱۲۸/۸۶ (کیلو نیوتن) است که حدود ۳٪ اختلاف دارند. دوران نسبی در تغییرمکان جانبی حداکثر، در تحلیل آزمایشگاهی برابر ۲/۵٪ و در تحلیل عددی برابر ۲/۵۴٪ است که اختلاف ۱/۵٪ وجود دارد. همانطور که مشاهده می شود، حداکثر خطا، بجز در مورد سختی اولیه، به ۳٪ محدود می شود. دلیل اختلاف زیاد سختی اولیه تحلیل عددی و آزمایشگاهی، ممکن است ناشی از این حقیقت باشد که در شبیه سازی عددی هر کابل بصورت استوانه ای (شبییه میلگرد) در نظر گرفته می شود، درحالیکه در آزمایشگاه (در واقعیت) هرکابل از هفت سیم مجزا ساخته شده که با غلاف لاستیکی احاطه شده اند. بنابراین انعطاف پذیری کابل واقعی بیشتر از انعطاف پذیری کابل شبیه سازی شده است. از مقایسه های صورت گرفته در بالا می توان نتیجه گرفت که با وجود اینکه اطلاعات ارائه شده در ریکلز و همکاران [۲] برای ایجاد شبیه سازی عددی کاملاً منطبق با نمونه PC4 ساخته شده در آزمایشگاه، از نظر خصوصیات هندسی و مصالح، ناکافی است، دقت شبیه سازی عددی با فرضیات در نظر گرفته شده، بالاست و به خوبی نتایج آزمایشگاهی را بازسازی می کند. این اتصال قادر است تا به ۸۹٪ ظرفیت خمشی خمیری تیر برسد، بدون اینکه خسارت عمده به تیر و ستون وارد شود. کابل ها و ستونها کاملاً ارتجاعی باقی می مانند و تیرها بجز تسلیم اندک در انتهای ورق های تقویت کننده، ارتجاعی باقی می مانند. همچنین دوران نسبی حداکثر ایجاد شده برابر ۰/۲۵ رادیان است، بنابراین تغییرشکل مناسبی در نبشی ایجاد می شود، بطوریکه نبشی وارد مرحله خمیری می شود و انرژی را تلف می کند. رفتار اتصال تا تغییرمکان نسبی حدود ۰/۲۵٪ (تا قبل از فشاربرداری)، خطی و ارتجاعی است و مشابه اتصالات صلب عمل می کند. این نتایج تایید می کند که اتصال PTED بررسی شده، زیر زلزله های تکرار شونده (رخداد زیاد اما شدت کم)، شبیه اتصالات جوش شده مرسوم رفتار می کند. بعد از باز شدن شکاف (فشاربرداری)، سختی اتصال به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد، که از پاسخ نیرو- تغییرمکان جانبی حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی هم مشخص است. بعد از اینکه نتایج تحلیل عددی با تحلیل آزمایشگاهی مقایسه شد و راستی شبیه سازی عددی تایید گردید، این شبیه سازی، شبیه سازی کالیبره شده* نامیده می شود.

۴- تغییرشکل و توزیع تنش در اتصال

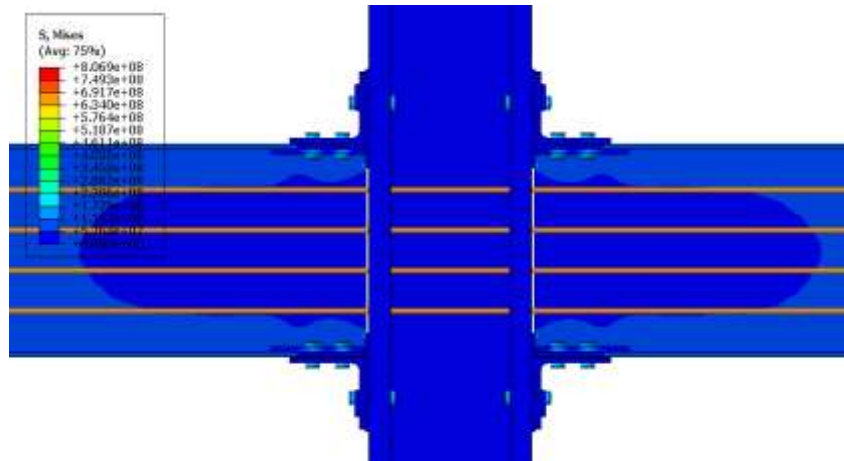
بعد از تایید راستی شبیه سازی عددی، با استفاده از نتایج آن می توان به درک مناسبی از رفتار اتصال رسید. شکل (۵) نمای جانبی نمونه اتصال شبیه سازی شده را در تغییرمکان نسبی ۳/۵٪ نمایش می دهد. در این شکل، باز شدن شکاف در سطح مشترک تیر- ستون واضح است. با اعمال

تغییرمکان جانبی از سمت چپ به راست، بال پایینی تیر سمت راست و بال بالایی تیر سمت چپ از بال ستون جدا می شوند. ابتدا موقعیت تغییرشکل یافته ناحیه اتصال، همراه با توزیع تنش مربوطه، در تغییرمکان های نسبی ذکر شده در بالا، نشان داده می شود. همانطور که در شکل (۶a) مشاهده می شود، بعد از اعمال نیروی پس کشیدگی اولیه و پیش تنیده کردن پیچ های نبشی، ناشی از فشار محوری ایجاد شده در تیرها (به اندازه نیروی کل کابل ها)، بال و قسمتی از جان تیر که در تماس با ورق پیشانی هستند، تحت فشار قرار دارند، اما ناحیه میانی جان تیر تنش فشاری کمی دارد.

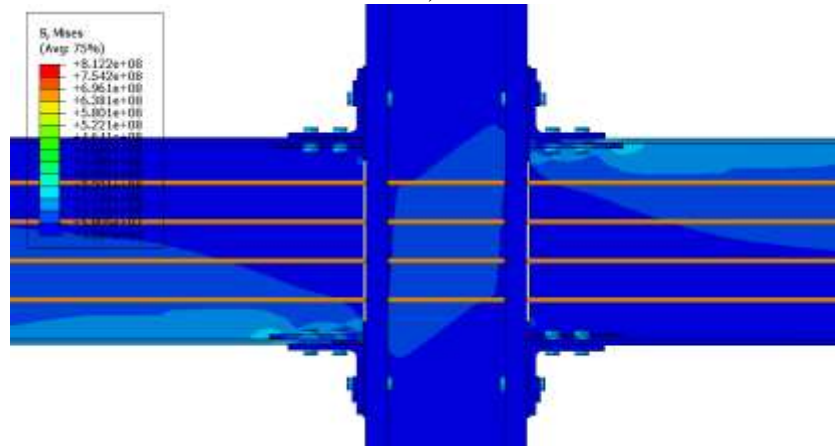


شکل (۵) - وضعیت تغییرشکل یافته و توزیع تنش در تغییرمکان نسبی ۳/۵، نمونه اتصال PC4

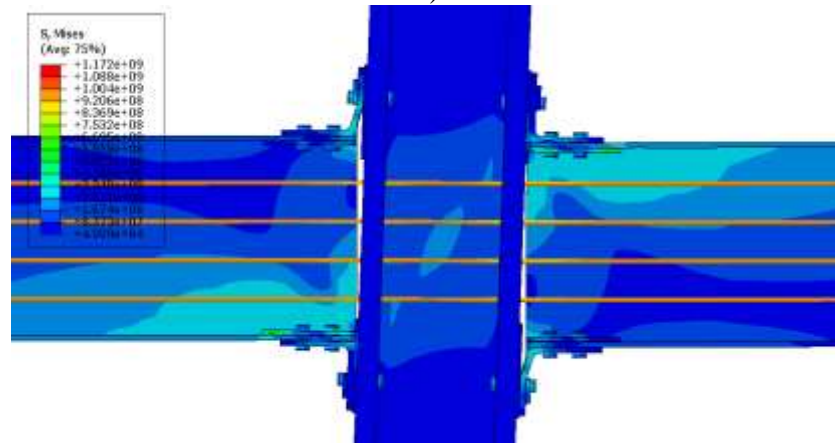
در لحظه فشاربرداری (تغییرمکان نسبی ۰/۲۵)، مشاهده می شود که تنش فشاری در بال بالایی تیر سمت چپ و بال پایینی تیر سمت راست (شکل (۶b)) صفر می شود و این بالها در آستانه جدا شدن از بال ستون قرار می گیرند که آغاز بازشدن شکاف است. در همین لحظه، بال فشرده شده تیرها، تنش فشار بالایی را تحمل می کند. درحداکثر تغییرمکان نسبی، همانطور که در شکل (6c) مشخص است، بالهای فشاری تیرها تنش بالایی دارند که در تغییرمکان های نسبی بزرگتر از این حد، احتمال کماتش وجود دارد، اما بالهای جدا شده از سطح مشترک تیر-ستون، تنش پایینی دارند. این مقدار تنش کم در بال های کششی تیر، ناشی از انتقال تنش از نبشی کششی به آنهاست، درغیراینصورت باید صفر می بود. نمونه اتصال طراحی شده برای تحلیل در آزمایشگاه، ابعاد ستون قوی تر از حد مورد نیاز دارد تا از طرفی معیار طراحی ستون قوی آیین نامه برآورده شود، همچنین از تسلیم و کماتش جان ستون، در برابر نیروهای فشاری وارده از طرف بال فشاری تیر به بال ستون، جلوگیری شود. تنش های بسیار پایین تر از حد تسلیم، در جان ستون ایجاد می شود که ناشی از ضخامت زیاد جان ستون (۳۵/۸ میلیمتر)، است، بنابراین نیاز به استفاده از سخت کننده در جان ستون، در راستای بالهای تیر، نمی باشد که در طراحی اتصال توسط ریکلز و همکاران [۲] هم به آن اشاره شده است. جریان تنش فشاری قطری در ناحیه چشمه اتصال، از بال بالایی تیر سمت راست به سمت بال پایینی تیر سمت چپ (بالهای فشاری) وجود دارد که ناشی از تنش برشی افقی در چشمه اتصال است. سایر نقاط ستون تنش بسیار پایینی دارند.



a)



b)



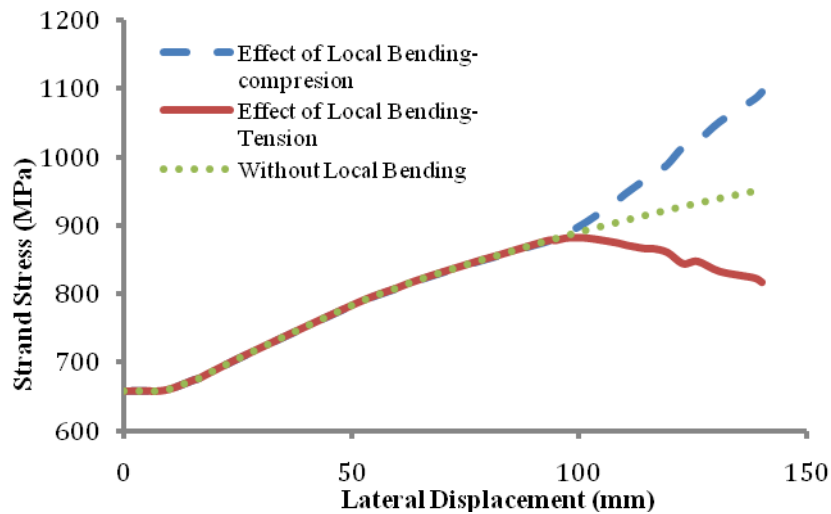
c)

شکل (۶) - وضعیت تغییرشکل یافته و توزیع تنش در ناحیه اتصال نمونه PC4، نمای جانبی (a) بعد از پس کشیدگی (b) در لحظه فشاربرداری (c) در تغییر مکان نسبی

۳/۴/۵

۵- تغییر شکل و توزیع تنش در کابل پس کشیده

کابل های پس کشیده (PT)، یکی از مهمترین اجزای اتصالات PTED هستند، به این دلیل که اساس سیستم پس کشیدگی، بر مبنای حضور کابل هاست. وظیفه اصلی کابل ها در این اتصالات: ۱- تامین ظرفیت انتقال نیروی برشی و ممان خمشی در این اتصالات و ۲- تامین توانایی خودمرکزی برای اتصال و یا در مقیاس بزرگتر، تامین توانایی خودمرکزی برای سازه (با ایجاد نیروی بازگرداننده توسط کابل ها) است. کابل های PT، باید همیشه ارتجاعی باقی بمانند، بخاطر اینکه تسلیم کابل، منجر به از دست رفتن توانایی خودمرکزی، و مهمتر از همه، باعث از دست رفتن ظرفیت برشی اتصال می شود. به همین خاطر در این بخش، بطور گسترده در مورد کابل و سیستم PT بحث می شود و تمام جوانب پیرامون آن سنجیده می شود. برای شبیه سازی کابل، برخلاف سایر اجزای اتصال، از تقریب استفاده شده است. کابل ها بصورت استوانه ای (شبیه میلگرد) شبیه سازی شده اند، درحالیکه در واقعیت، هر کابل از به هم پیوستن چندین سیم ساخته شده است. بنابراین، سختی خمشی کابل های شبیه سازی شده، بزرگتر از کابل های واقعی است و این ممکن است روی نتایج تحلیل عددی، در مواقعی که کابل با دیواره سوراخ بال ستون برخورد می کند و دچار خمش موضعی می شود، تاثیر بگذارد. یکی از مسائلی که ممکن است در هنگام تحلیل به آن برخورد شود، کاهش تنش در کابل، در تغییر مکان های جانبی بزرگ است. این کاهش می تواند ناشی از تسلیم جزئی یا کلی تیر باشد. تسلیم تیر، کوتاه شدگی تیر (بدلیل اینکه تسلیم از نوع فشاری است) و بدنال آن، کوتاه شدگی کابل را به همراه دارد. بنابراین می توان به اهمیت این موضوع پی برد که چرا باید اعضای اصلی سازه ای، در قابهای خمشی PTED، ارتجاعی باقی بمانند. تسلیم اعضای اصلی، منجر به عدم کارایی سیستم PT و در مقیاس بزرگتر، منجر به عدم کارایی قاب خمشی PTED (عدم تحمل نیروهای لرزه ای) می شود. یکی از پدیده های خطرناکی که در نتایج آزمایشگاهی به آن اشاره نشده، اما از شبیه سازی عددی استنباط می شود، برخورد کابل با دیواره سوراخ بال ستون است. برخورد کابل، باعث ایجاد خمش موضعی در ناحیه کابل مجاور سوراخ می شود. به همین دلیل، از طرف دیواره سوراخ، به نقاط کابل در تماس با دیواره (ناحیه تماسی) فشار وارد می شود. در تحلیل عددی نمونه اتصال PC4، بعد از برخورد کابل با دیواره (در جابجایی جانبی ۹۵ میلیمتر)، با افزایش جابجایی جانبی، تنش کششی در نقاط مجاور دیواره سوراخ (برعکس سایر نقاط) کاهش می یابد، که در شکل (۷) مشاهده می شود (شاخه کاهش نمودار). نقاطی از کابل که در طرف دیگر ناحیه تماسی قرار دارند، تحت کشش ناشی از خمش موضعی، علاوه بر افزایش کشش ناشی از دراز شدگی کابل، قرار دارند که باعث می شود تنش کششی در این نقاط، با شیب بسیار بیشتر از نقاط دور از دیواره افزایش یابد (شاخه با شیب تند افزایشی). تنش در نقاط دور از دیواره سوراخ، تنها ناشی از دراز شدگی کابل افزایش می یابد که شیب افزایشی ملایمی دارند. این پدیده خطرناک است و احتمال رسیدن به حد تسلیم در این نقاط، بسیار زودتر از حد انتظار، وجود دارد. در شکل (۷) مشاهده می شود که تنش در سه نقطه، تا قبل از جابجایی ۹۵ میلیمتر، برابر است، به این دلیل که هنوز کابل با دیواره سوراخ برخورد نکرده است، اما بعد از آن، تنش در نقاط متفاوت می شود. در شکل (۸)، تغییر شکل و تفاوت تنش در کابل، در اثر برخورد با دیواره سوراخ بال ستون، بصورت چشمی قابل مشاهده است. در طراحی باید به برخورد کابل با دیواره سوراخ بال ستون، توجه ویژه شود و تمهیدات لازم بعمل آید، بدلیل اینکه تسلیم کابل، مرحله فروریزش محسوب می شود و باعث از دست رفتن مقاومت، سختی و توانایی خود مرکزی می شود. در تحلیل عددی، در طی اعمال تغییر مکان جانبی، کابل ها معیار طراحی را ارضا کردند و ارتجاعی باقی ماندند. ریکلز و همکاران [۲] بعد از انجام تحلیل آزمایشگاهی، گزارش کردند که تسلیم در تیرها، کابل ها و ستون رخ نداده است. در نمونه PC4، زیر تغییر مکان جانبی ۳/۵٪، کابل با دیواره سوراخ برخورد می کند. اگرچه تنش در ناحیه تماسی کابل، پایین تر از حد تسلیم است، اما اگر تغییر مکان جانبی بزرگتر از ۳/۵٪ اعمال شود، امکان دارد نقاط کابل ناحیه تماسی، در تغییر مکان های بسیار کوچکتر از حد انتظار، تسلیم شوند و معیار طراحی نقض شود. بزرگتر کردن سوراخ بال ستون می تواند از این برخورد جلوگیری کند، اما باید به کاهش زیاد سطح مقطع بال ستون و پیامد های آن، توجه شود.



شکل (۷) - تاثیر خمش موضعی روی توزیع تنش در کابل (نمودار تنش محوری کابل - تغییر مکان جانبی در سه نقطه: تحت تاثیر فشار ناشی از خمش موضعی، تحت تاثیر کشش ناشی از خمش موضعی و دور از دیواره سوراخ (بدون تاثیر از خمش موضعی))

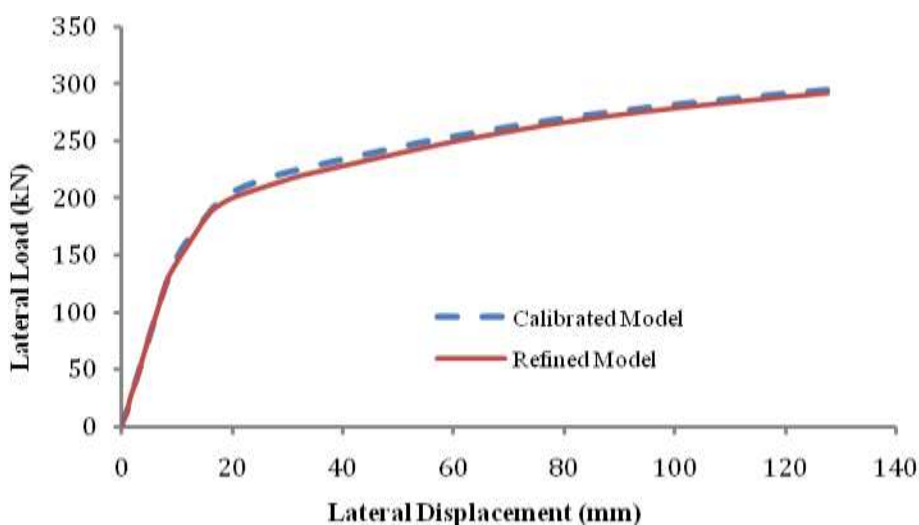


شکل (۸) - تاثیر خمش موضعی (ناشی از برخورد کابل با دیواره سوراخ) روی توزیع تنش در کابل (ایجاد انحنا در کابل، در اثر خمش موضعی)

۶- بررسی دقت شبکه اجزای محدود شبیه سازی عددی

در این بخش، ما به بررسی دقت شبکه اجزای محدود ایجاد شده برای شبیه سازی عددی نمونه اتصال PC4، می پردازیم. نیاز به ابعاد کوچکتر برای شبکه اجزای محدود (شبکه بندی ریزتر) در نواحی مجاور سطح مشترک تیر- ستون، بررسی می شود. شبیه سازی عددی نمونه اتصال PC4، که نتایج تحلیل آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و دقت مناسبی داشت، شبیه سازی کالیبره شده نامیده می شود که حداکثر خطای آن، بجز در مورد سختی اولیه، ۳٪ بود. در شبیه سازی کالیبره شده، تعداد کل شبکه ها و گره ها به ترتیب برابر ۸۴۱۸۳ و ۱۱۹۵۹۷ هستند. شبیه سازی دیگری از همین نوع اتصال، با استفاده از شبکه های اجزای محدود ریزتر در نواحی مورد نیاز (نواحی سطح مشترک تیر- ستون)، ایجاد می شود تا بررسی شود که آیا ابعاد و تعداد شبکه های نمونه کالیبره شده کافی بوده است (بعبارتی دیگر، آیا با افزایش تعداد شبکه ها و ریزتر شدن آنها، دقت نتایج تحلیل عددی بالاتر می رود و خطای شبیه سازی عددی کاهش می یابد یا تاثیری ندارد). شبیه سازی عددی نمونه اتصال PC4، این بار با استفاده از ۱۱۹۳۰۴ شبکه و ۱۶۵۲۵۴ گره، شبکه بندی شده است، که تعداد شبکه ها و گره ها به ترتیب ۴۲٪ و ۳۸٪، نسبت به نمونه کالیبره شده، افزایش یافته اند. تعداد شبکه ها، بیشتر در نواحی که انتقال نیرو بین اجزا صورت می گیرد، افزایش یافته اند. بعنوان مثال، ناحیه انتهای تیر در تماس با بال ستون، نبشی، ورق

تقویت کننده، ناحیه چشمه اتصال ستون، پیچ و قسمتی از طول کابل مجاور دیواره سوراخ بال ستون، ریزتر شبکه بندی شده اند. شبیه سازی عددی با استفاده از تعداد شبکه اجزای محدود بیشتر، شبیه سازی اصلاح شده نامیده می شود. شکل (۹)، پاسخ نیرو- تغییر مکان جانبی دو شبیه سازی کالیبره شده و اصلاح شده را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود پاسخ دو شبیه سازی، با تعداد و تراکم شبکه اجزای محدود متفاوت، تقریباً یکسان است و تفاوت ناچیزی دارند. بنابراین افزایش ۴۰٪ شبکه ها، تاثیری روی دقت شبیه سازی نداشت. بعبارتی تعداد و ابعاد شبکه های اجزای محدود شبیه سازی کالیبره شده، بهینه هستند و نیازی به افزایش تعداد شبکه ها و یا کاهش ابعاد شبکه ها نیست. شبیه سازی کالیبره شده ضمن اینکه دقت بالایی دارد و بخوبی نتایج آزمایشگاهی را بازگو می کند، تعداد شبکه اجزای محدود آن، بهینه است، بطوریکه زمان مورد نیاز برای تحلیل کامپیوتری و حجم خروجی را به حداقل می رساند. این معیارها (زمان تحلیل و حجم خروجی)، در کنار دقت، از مهمترین شاخص های شبیه سازی های عددی سه بعدی هستند.



شکل (۹)- مقایسه پاسخ نیرو- تغییر مکان جانبی شبیه سازی های عددی کالیبره شده و اصلاح شده

۷- نتیجه گیری

قاب های خمشی فولادی پس کشیده، نوع جدیدی از قابها هستند که برای دست یابی به اهداف عملکرد موردنظر در برابر بارهای لرزه ای متوسط و شدید، پیشنهاد شده اند. ایده پس کشیده کردن قاب های خمشی فولادی، از قاب های بتنی پیش ساخته گرفته شده است. در این قابها از کابل یا میلگرد فولادی با مقاومت بالا بعنوان سیستم پس کشیدگی، برای ایجاد نیروی بازگرداننده در قاب، استفاده می شود که تیر را به تماس با بال ستون با اتمام بار لرزه ای، برمی گرداند. همچنین اتلاف کننده ها در ناحیه اتصال، ظرفیت اتلاف انرژی قاب را بالا می برند و تغییر شکل های خمیری اعضای اصلی قاب را محدود می کنند. با استفاده از شبیه سازی های عددی و آزمایشگاهی، اتصالات قابهای پس کشیده مطالعه شده اند. نتایج بیانگر مقاومت، سختی و توانایی خود مرکزی مناسب این اتصالات، و ظرفیت اتلاف انرژی بالا با نصب اتلاف کننده در محل اتصال، می باشد. سختی اولیه اتصالات، مشابه اتصالات صلب است، بنابراین با ایجاد نیروی پس کشیدگی اولیه مناسب، این اتصالات در برابر بار های وزنی و باد، همانند اتصالات صلب

عمل می کنند. در تغییر مکان نسبی مبنای طراحی، تیرها و ستونها در این اتصالات ارتجاعی باقی می مانند و تغییر مکان نسبی باقیمانده صفر خواهد بود. در ماکزیمم تغییر مکان نسبی احتمالی، تسلیم اندکی در تیرها رخ می دهد و اتصال هنوز توانایی خودمرکزی مناسبی دارد. شبیه سازی عددی از نمونه اتصال تحلیل شده در آزمایشگاه، ایجاد شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده تطابق خوب نتایج شبیه سازی عددی با منحنی پوش پاسخ چرخه ای تحلیل آزمایشگاهی است. همچنین نتایج شبیه سازی عددی اتصال نشان می دهند که نبشی ها بخوبی قادر به کنترل تغییر شکل های پلاستیک در اعضای اصلی اتصال و دارای ظرفیت اتلاف انرژی مناسب هستند. ستون ها و کابل ها ارتجاعی باقی می مانند و تیرها بجز تسلیم اندک در انتهای ورقهای تقویت کننده، ارتجاعی باقی می مانند. این امر توانایی خودمرکزی اتصال در هنگام حذف بارهای لرزه ای را تضمین می کند. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که این اتصالات حتی در برابر حداکثر زلزله های احتمالی، توانایی خودمرکزی مناسبی دارند. ایجاد شبیه سازی های عددی بیشتر با تغییر مشخصات هندسی و مکانیکی اتلاف کننده و کابل، و تاثیر این تغییرات روی خود مرکزی، ظرفیت دوران، مقاومت و توانایی اتلاف انرژی اتصال، می تواند تکمیل کننده این تحقیقات باشد.

مراجع

1. Ricles J.M., Sause R., Garlock M.M., Zhao C. "Posttensioned Seismic Resistant Connections for Steel frames". Journal of Structural Engineering 2001; pp. 113-121.
2. Ricles J.M., Sause R., Garlock M.M. "Post Tensioned Moment Connections for Seismic Resistant Steel Frames". Journal of Structural Engineering 2002; 850-859
3. Christopoulos C, Filiatrault A, Uang C-M, Folz B. "Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames". ASCE Journal of Structural Engineering 2002; 128(9):1111-20.
4. Rojas P, Ricles J, Sause R. "Seismic performance of post-tensioned steel MRFs with friction devices". ASCE Journal of Structural Engineering 2005; 131(4):529-40.
5. Hyung-Joon Kim, Constantin Christopoulos. "Friction Damped Posttensioned Self-Centering Steel Moment-Resisting Frames. Journal of Structural Engineering 2008; 1768-1779.
6. Garlock M, Sause R, Ricles J. "Behavior and design of post-tensioned steel frames". ASCE Journal Structural Engineering 2007; 133(3):389-99.
7. Maria M. Garlock, James M. Ricles, Richard Sause. "Influence of design parameters on seismic Response of post-tensioned steel MRF systems". Engineering Structures 2008; 1037-1047.
8. Garlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R., (2003). Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 12, p. 1615-1625.
9. ABAQUS, Inc., (2010). ABAQUS User's Manual Version 6.10, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: Pawtucket, RI, 2010.