

ارزیابی و مقایسه رفتار سازه‌های اتصال نوین تیر-ستون خودمرکزگرای دارای میراگر اصطکاکی با اتصالات موجود

مهسا سعیدزاده^۱، محمدرضا چناقلو^۲، آرش اکبری حامد^{۳*}

^۱ دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۴/۳، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۶/۲۹

چکیده

با توجه به تجربیات خرابی‌های گسترده اتصالات در دو زلزله Northridge و Kobe، می‌بایست توجه ویژه‌ای به طراحی ستون‌ها و اتصالات تیر-ستون (Beam-Column Connection) نمود. در این راستا عمدتاً در قاب‌های خمشی با تضعیف تیر در فاصله‌ای مشخص از بر ستون و یا تقویت اتصال تیر-ستون، در دو انتهای تیر به‌عنوان یکی از اعضای اصلی سازه، مفاصل پلاستیک خمشی تشکیل می‌شود که این امر مستلزم تأمین شکل‌پذیری لازم بوده و باعث به‌وجود آمدن تغییرشکل‌های ماندگار در این سیستم می‌شود. بنابراین تغییرشکل‌های ماندگار باعث آسیب دیدن اجزای اصلی اتصال شده و با توجه به حساسیت اتصالات جوشی تیر-ستون نسبت به بارهای لرزه‌ای، امکان ایجاد خرابی‌های ترد شامل ترک‌های بسیار ریز و شکست‌های بزرگ در مجاورت ستون وجود دارد. لذا برای رفع این نقایص و بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات، نوع جدیدی از اتصالات تیر-ستون خودمرکزگرای دارای میراگر پیشنهاد شده است که به بهبود شکل‌پذیری و خاصیت خودمرکزگرایی اتصال منجر می‌شود. در این مقاله رفتار سازه‌ای این اتصال نوین نسبت به سایر اتصالات موجود (اعم از اتصال خمشی جوشی، اتصال دارای کابل پس‌کشیده، اتصال دارای میراگر اصطکاکی و اتصال دارای میراگر فلزی تسلیم‌شونده) پس از انجام صحت‌سنجی‌های مورد نیاز، توسط نرم‌افزار ABAQUS مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده شد که این اتصال ضمن تأمین جزئیات اجرایی ساده، موجب حذف دررفت ماندگار و افزایش شکل‌پذیری شده و از رفتار فرار تجمعی اعضای اصلی جلوگیری کرده و اتلاف انرژی صرفاً توسط صفحات اصطکاکی قابل تعویض انجام می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: اتصال خودمرکزگرا، میراگر اصطکاکی، میراگر فلزی تسلیم‌شونده، اتصال خمشی جوشی، دررفت ماندگار.

۱- مقدمه

ستون‌ها، جاری شدن چشمه اتصال و شکست‌های ترد زود هنگام در ناحیه اتصال مستقیم بال تیر (یا صفحه انتقال نیرو) به‌وسیله جوش نفوذی به بال ستون I شکل بال پهن یا دیواره ستون قوطی بوده است. اتصال مستقیم بال تیر (یا صفحه انتقال نیرو) به بال ستون سبب تمرکز شدید تنش در ناحیه اتصال شده و عملاً محل تشکیل مفصل پلاستیک را از تیر به مجاورت ستون انتقال می‌دهد. این وضعیت باعث کاهش بسیار زیاد ظرفیت شکل‌پذیری اتصال شده و همچنین تمرکز تنش‌ها در جوش نفوذی بال تیر به بال ستون، موجب تردشکنی در اتصال می‌شود. با توجه به مشکلات مشاهده شده در اتصالات رایج خمشی در زلزله‌های مزبور، روش‌های اصلاحی متنوعی برای اتصالات خمشی توسط محققین با تکیه بر دو اصل تقویت اتصال (مانند استفاده از

قاب‌های خمشی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان سیستم‌های شکل‌پذیر و مقاوم در برابر زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند. رفتار شکل‌پذیر قابل قبول از یک اتصال گیردار در قاب خمشی تحت اثر بار لرزه‌ای، تسلیم خمشی در تیرها و یا تسلیم برشی در چشمه اتصال ستون‌ها بدون شکست ترد می‌باشد. وقوع زلزله‌های Northridge و Kobe، نشان داد که علی‌رغم آنچه انتظار می‌رفت طیف وسیعی از اتصالات تیرهای I شکل به ستون‌های بال پهن و یا قوطی دچار شکست ترد شدند؛ در حالی که این اتصالات توسط اکثر آیین‌نامه‌های رایج به‌عنوان اتصالات شکل‌پذیر و گیردار معرفی شده بودند. تحقیقات گسترده پس از این زلزله‌ها، نشان می‌دهند که شایع‌ترین نوع گسیختگی در اتصالات خمشی تیر به

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۹۶

در زمینه میراگرهای تسلیم‌شونده (Deng و همکاران، ۲۰۱۳؛ Akbari Lor و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bayat و Shekasteband، ۲۰۱۹؛ Rezaei و همکاران، ۲۰۲۰) انجام شده که نشان‌دهنده اتلاف انرژی توسط تغییرشکل غیرالاستیک میراگرهای تسلیم‌شونده بود. همچنین استفاده از میراگرهای اصطکاکی در اتصالات نیز به‌منظور تأمین جذب انرژی مورد نیاز توسط محققین مورد بررسی قرار گرفت (Latour و همکاران، ۲۰۱۵؛ Tong و همکاران، ۲۰۱۶؛ D'Aniello و همکاران، ۲۰۱۷؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۸).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر و پیشنهاد اتصالات تیر به ستون با عملکرد لرزه‌ای بهبود یافته توسط پژوهشگران مختلف، اتصالی نوین توسط Saeidzadeh و همکاران (۲۰۲۲) با مزایایی نظیر حذف تغییرمکان ماندگار توسط کابل‌های پس‌کشیده الاستیک، افزایش اتلاف انرژی توسط میراگرهای اصطکاکی به جهت تأمین رفتار چرخه‌ای پایدار، قابلیت تعویض‌پذیری اجزای جذب‌کننده انرژی، تأمین رفتار متقارن در برابر لنگرهای خمشی مثبت و منفی، تأمین شکل‌پذیری بیشتر از مقادیر حاصل از اتصالات موجود، دارای جزئیات اجرایی کمتر و سادگی ساخت اتصال تیر به ستون معرفی شد. با توجه به رفتار چرخه‌ای پایدار و مزایای اتصال پیشنهادی توسط Saeidzadeh و همکاران (۲۰۲۲)، در این مقاله سعی بر آن است که رفتار این اتصال نوین در مقایسه با اتصالات موجود بررسی شود. برای این منظور، ابتدا روش مدل‌سازی اجزای محدود اتصالات تیر-ستون موجود و اتصال پیشنهادی نوین بر اساس نتایج آزمایشگاهی انجام شده، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS صحت‌سنجی شد. سپس رفتار چرخه‌ای این اتصالات بر اساس پروتکل بارگذاری شبه‌استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت و منحنی هیستریزیک به‌دست آمده و وضعیت تسلیم اعضای اتصال به‌همراه پارامترهایی نظیر مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری مورد مقایسه قرار گرفت.

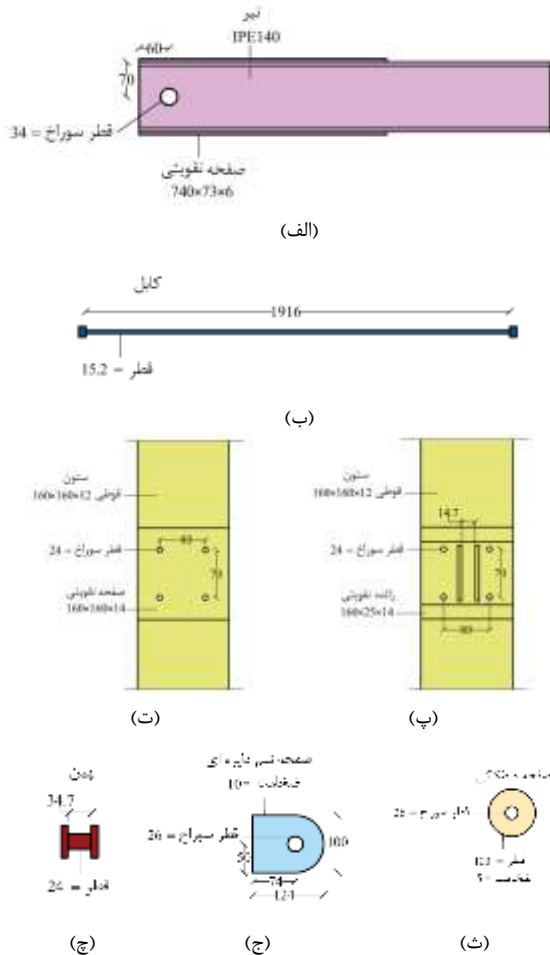
۲- اتصال خودمرکزگرای دارای میراگر

در مقاله حاضر، رفتار اتصال نوین خودمرکزگرای دارای میراگر (Saeidzadeh و همکاران، ۲۰۲۲) نسبت به اتصالات موجود مقایسه می‌شود. لذا در این بخش به معرفی اتصال مذکور پرداخته شده است که بر اساس روش‌های طبقه‌بندی موجود در Eurocode3 (Eurocode3، ۲۰۰۵؛ Chenaghlu و Akbari، ۲۰۱۷) Hamed، در دسته اتصالات با مقاومت جزئی و نیمه‌صلب قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۱) که نشان‌دهنده جزئیات اتصال پیشنهادی می‌باشد، دو قطعه نیم‌دایره‌ای شکل توسط جوش به بال ستون متصل شده و بین جان تیر و صفحات نیم‌دایره‌ای

ورق‌های پوششی) و یا تضعیف تیر (مانند تیر با مقطع کاهش یافته) در فاصله‌ای مشخص از اتصال پیشنهاد شده است (AISC358، ۲۰۲۰) که هدف اصلی هر دو روش، دستیابی به عملکرد شکل‌پذیر مناسب با توجه به جنبه‌های اجرایی و اقتصادی طرح می‌باشد. لازم به‌ذکر است که اتصالات دارای مقطع کاهش‌یافته (Akbari Hamed و Basim، ۲۰۲۰؛ اکبری حامد و بافنده نویری، ۱۴۰۰) ضمن انتقال مفصل پلاستیک از بر ستون به تیر و تأمین شکل‌پذیری مطلوب، به‌دلیل استفاده از رفتار غیرالاستیک اجزای اصلی اتصال (تیر)، دارای معایبی نظیر وقوع کماتش پیچشی-جانبی تیر و تغییرمکان نسبی ماندگار قابل توجه، بالا رفتن هزینه بهسازی و تعمیر و همچنین غیرقابل استفاده شدن سازه می‌باشند. در ادامه اتصالات جوشی، انواع اتصالات پیچی نظیر اتصال دارای ورق‌های روسری و زیرسری، اتصالات پیچی دارای نشیمن نشی و یا سپری و اتصالات گیردار پیچی با ورق انتهایی به منظور عدم اتصال مستقیم تیر به ستون معرفی شدند که دارای مزایایی نظیر سرعت نصب و مونتاژ بالا، کم هزینه بودن کارهای نصب و اجرا و دارای معایب و مشکلاتی نظیر وجود تغییرمکان نسبی ماندگار بعد از زلزله، امکان اجرای غلط و نامناسب سوراخ‌ها، عدم رعایت میزان نیروی پیش‌تنیدگی لازم برای پیچ‌ها، عدم انطباق پیچ‌ها هنگام اجرا و نصب، تحت کشش قرار گرفتن پیچ‌ها و ایجاد نیروی اهرمی شدن در آن‌ها می‌باشد. لذا نوع جدیدی از اتصالات دارای کابل پس‌کشیده و اتصالات دارای میراگر به‌منظور تأمین خاصیت خودمرکزگرایی اتصال و افزایش جذب انرژی معرفی شدند.

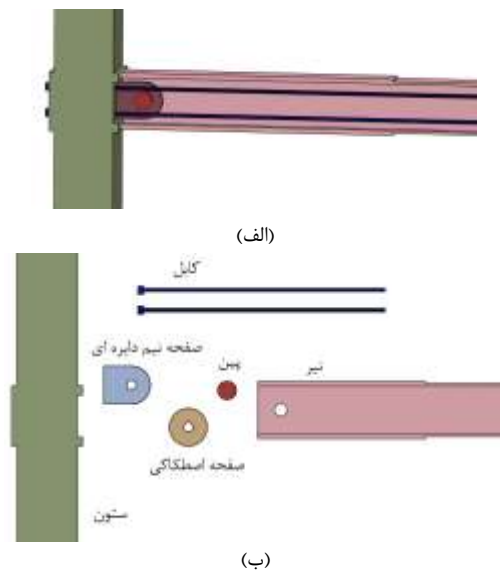
ایده استفاده از اتصالات دارای کابل پس‌کشیده به‌عنوان جایگزینی برای اتصالات خمشی جوشی و پیچی رایج به‌منظور کاهش تغییرمکان نسبی ماندگار، اولین بار توسط Ricles و همکارانش (۲۰۰۱) مطرح گردید و توسط Rojas و همکاران (۲۰۰۵) توسعه یافت. همچنین مطالعات انجام‌شده دیگر در زمینه اتصالات دارای کابل پس‌کشیده و یا میله‌های پس‌کشیده آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA)^۱ توسط سایر محققان نشان‌دهنده کاهش تغییرشکل ماندگار و عملکرد بهتر از نظر مقاومت، سختی و شکل‌پذیری قاب‌های پس‌کشیده نسبت به قاب با اتصالات جوشی معمولی بود (Wang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Saberi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Farmani و Ghassemieh، ۲۰۱۷؛ Lu و همکاران، ۲۰۱۸؛ Xu و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین به‌منظور بهبود رفتار اتصالات خمشی، انواع دیگری از اتصالات که تنها دارای میراگر می‌باشند، پیشنهاد شده است که در آن‌ها رفتار پلاستیک در اجزای غیراصلی قابل تعویض رخ داده و باعث افزایش جذب انرژی می‌شود. تحقیقات گوناگونی

کمانش فشاری جان ستون در مقابل یک جفت نیروی متمرکز فشاری (بند ۱۰-۲-۹-۱۰-۵) و مقررات تکمیلی برای سخت‌کننده‌ها در مقابل نیروهای متمرکز (بند ۱۰-۲-۹-۱۰-۷) تعیین گردیده است. همچنین در طراحی اتصالات SC-PC-FD می‌بایست شرایط $P_{st}/P_{u,st} < 0.7$ ، $P_{Tpin}/P_{U,Pin} < 0.55$ و $0.25 < M/M_{pb} < 1$ بر اساس آیین‌نامه‌های ACI318-19 (۲۰۱۹)، AISC360 (۲۰۱۶) و Eurocode3 تأمین می‌گردید. لازم به ذکر است که P_{st} نیروی نیاز کابل پس‌کشیده، $P_{U,Pin}$ مقاومت کششی نهایی کابل، P_{Tpin} نیروی پیش‌تنیدگی پین، M لنگر نیاز اتصال و M_{pb} لنگر پلاستیک تیر می‌باشد.



شکل ۲- جزئیات اتصال SC-PC-FD: الف) تیر، ب) کابل، ج) صفحه نیم‌دایره‌ای، د) پشت ستون، ه) صفحه اصطکاکی، و) جلوی ستون، ز) پین (تمام ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

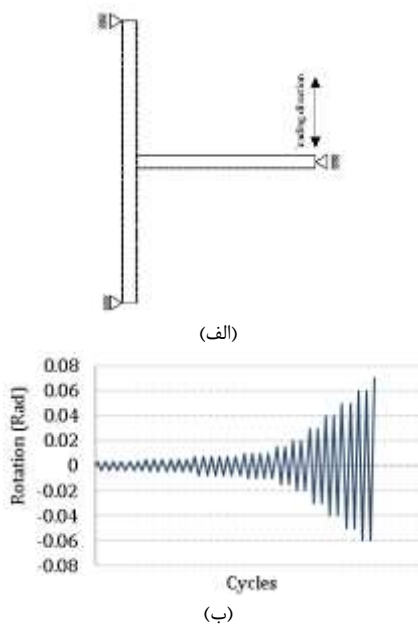
متصل به بال ستون، از دو صفحه اصطکاکی حلقوی شکل قابل تعویض به منظور جذب انرژی استفاده شده است و انتهای تیر توسط پین پیش‌تنیده به دو صفحه نیم‌دایره‌ای شکل متصل شده است. کابل‌ها به موازات جان تیر قرار گرفته و تأمین‌کننده خاصیت خودمركزگرایی اتصال می‌باشند. علاوه بر این، در این اتصال در تراز بال‌های تیر زائده‌هایی به بر ستون جوش شده‌اند تا به هنگام دوران، بال‌های تیر بر این زائده‌ها تکیه کرده و مرکز دوران اتصال به آن نقاط انتقال یابد. همچنین لازم به ذکر است که صفحات تقویتی در بال‌های تیر به منظور جلوگیری از حالت حدی کمانش موضعی و تسلیم در بال‌های تیر استفاده شده است.



شکل ۱- اتصال خودمركزگرایی دارای میراگر: الف) شکل سه‌بعدی، ب) جزئیات اتصال

جزئیات هندسی اتصال SC-PC-FD در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن ستون‌های مورد استفاده به صورت تیرورق قوطی شکل دارای ابعاد $160 \times 160 \times 12$ mm و طول 3m و تیرها دارای مقطع IPE140 و طول 1.7m در نظر گرفته شده است. همچنین قطر کابل‌ها و پیچ دو سر رزوه مورد استفاده به ترتیب برابر با 15.2mm و 24mm بوده و نقاط انتهایی طول تیر و ستون در موقعیت نقاط عطف اعضای قاب خمشی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که تمامی ابعاد بر اساس ضوابط طراحی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان نظیر مقاومت خمشی اسمی اعضای تیر با مقطع I شکل فشرده با دو محور تقارن تحت خمش حول محور قوی (بند ۱۰-۲-۵-۲)، خمش موضعی بال ستون در مقابل نیروی کششی و تسلیم موضعی جان ستون در مقابل نیروی متمرکز فشاری و کششی (بند‌های ۱۰-۲-۹-۱۰-۱ و ۱۰-۲-۹-۱۰-۲)، لهیدگی و کمانش جانبی جان ستون در مقابل نیروی متمرکز فشاری (بند‌های ۱۰-۲-۹-۱۰-۳ و ۱۰-۲-۹-۱۰-۴)،

نمونه‌ها مشاهده نگردید، بنابراین، نواحی جوش شده در نرم‌افزار ABAQUS توسط قید Tie شبیه‌سازی شده است تا تمامی درجات آزادی انتقالی و دورانی را مقید کند. شکل (۳) نشان‌دهنده شرایط تکیه‌گاهی و مرزی و بارگذاری مدل‌ها می‌باشد. در مدل‌سازی عددی تکیه‌گاه مفصلی به دو انتهای ستون اختصاص داده شده و بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای به صورت قائم به انتهای تیر اعمال شد. مقدار نیروی پیش‌تنیدگی پین و نیروی پس‌کشیدگی کابل‌ها از قسمت Bolt load در نرم‌افزار ABAQUS به سطح مقطع میانی پین و کابل مطابق شکل (۴) اعمال شد.



شکل ۳- الف) شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری در مدل‌های عددی، ب) پروتکل بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای مطابق AISC341 (۲۰۱۶)



شکل ۴- نحوه اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به پین

تمامی اعضا با استفاده از اجزای سه‌بعدی C3D8R که المان هشت‌گره‌ی مکعبی (هشت نقطه‌ی انتگرال‌گیری) و دارای انتگرال‌گیری (فرمول‌بندی) کاهش‌یافته و قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی (Hourglass) می‌باشد، مش‌بندی شده و جهت دقت بیشتر تحلیل، مش‌های کوچکتری در اطراف چشمه اتصال و کابل‌ها که تغییرات بیشتری در تنش و کرنش را تجربه می‌کنند، تعریف شد. شکل (۵- الف) نتایج تحلیل‌های حساسیت مش را

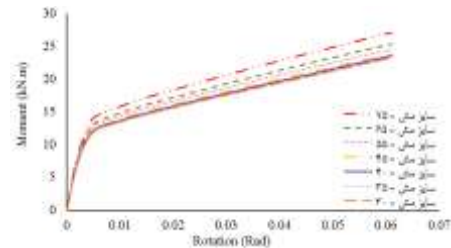
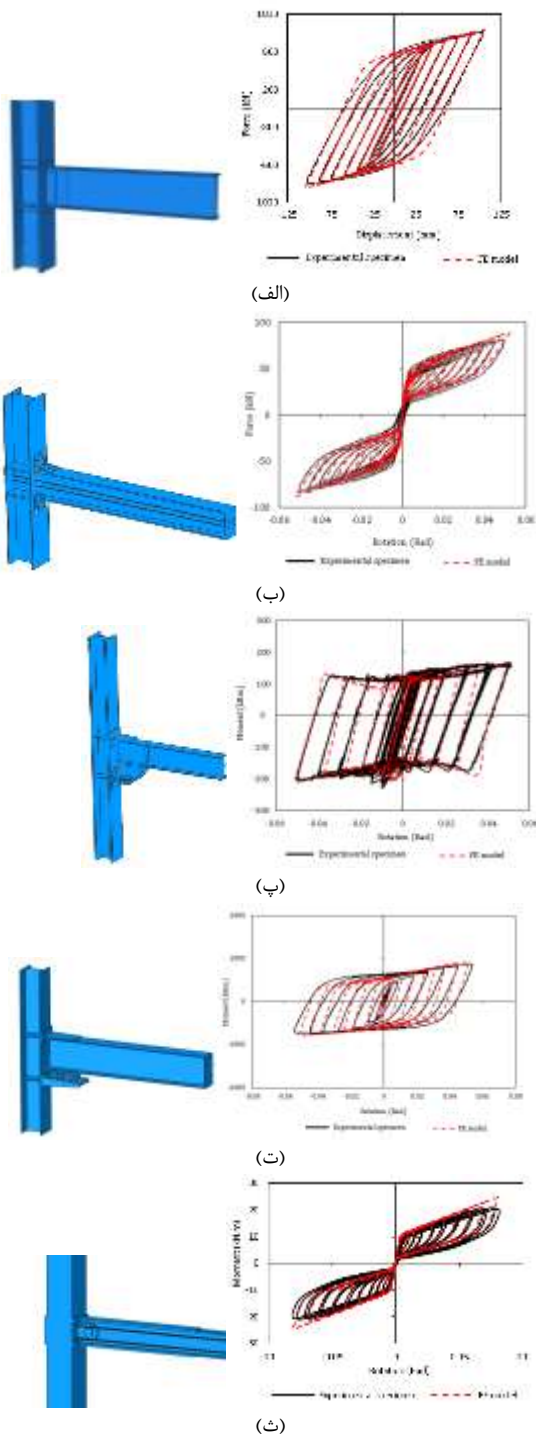
بر اساس مطالعات پارامتریک انجام شده توسط نویسندگان (Saeidzadeh و همکاران، ۲۰۲۲)، برای حصول بهترین عملکرد اتصال SC-PC-FD می‌بایست نسبت‌های زیر رعایت گردند:
 $A_{st}/A_b=4.52\%$, $PT_{st}/P_{U,st}=21.73\%$, $PT_{pin}/P_{U,pin} = 17\%$, $S'_{st}/H_b = 50\%$
 که در آن PT_{st} نیروی پس‌کشیدگی کابل، PT_{pin} نیروی پیش‌تنیدگی پین، A_{st} مساحت واقعی هر کابل، S'_{st} فاصله مرکز تا مرکز کابل‌ها نسبت به هم، A_b مساحت مقطع عرضی تیر و H_b ارتفاع تیر می‌باشد.

۳- مدل‌سازی

۳-۱- نحوه مدل‌سازی

در این مقاله از المان‌های 3D deformable Solid برای مدل‌سازی تمامی مدل‌ها استفاده شده است. المان Solid قابلیت استفاده در تحلیل‌های پیچیده غیرخطی شامل تغییرشکل‌های بزرگ و پلاستیک و سطوح تماس گوناگون را دارد. از تحلیل‌گر Static/General برای تحلیل‌ها استفاده شده و غیرخطی‌نگی‌های هندسی و مصالح در تمامی تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. در خصوص نرم‌همگرایی^۱ تحلیل‌های مورد نظر می‌توان به این نکته اشاره کرد که تمامی تنظیمات پیش‌فرض از بخش General solution controls ماژول Steps مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این با توجه به این که تحلیل مورد نظر به صورت استاتیکی با بارگذاری چرخه‌ای (شبه استاتیکی) اعمال خواهد شد، نیازی به تعریف میرایی نبوده و تنها جهت حصول همگرایی در تحلیل‌ها میرایی مجازی با استفاده از گزینه Automatic stabilization اعمال گردید. همچنین از سخت‌شوندگی Kinematic چندخطی (Combined) برای رفتار غیرخطی فولاد به‌منظور در نظر گرفتن اثر Bauschinger استفاده شده است. لازم به‌ذکر است که فولاد مورد استفاده از نوع St37 و کابل‌ها از نوع strand هفت رشته و رده 270 با تنش نهایی 1860MPa و پین مورد استفاده از جنس CK45 با تنش تسلیم 355MPa و تنش نهایی 585MPa بودند. تماس میان اعضای مختلف در مدل ABAQUS، با استفاده از الگوریتم General Contact با مشخصات رفتار مماسی و عمودی تعریف شد. رفتار عمودی سطوح به‌صورت Hard Contact تعریف شد تا از نفوذ دو سطح مجاور در یکدیگر جلوگیری شود و ضریب اصطکاک رفتار مماسی بین سطح دو فولاد و بین سطح فولاد و صفحه اصطکاکی، به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۳۷ در نظر گرفته شد. با توجه به این که بر اساس مشاهدات حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط نویسندگان (Saeidzadeh و همکاران، ۲۰۲۲)، هیچ‌گونه خرابی و شکست در نواحی جوش

نشان می‌دهد که بر اساس اندازه میانگین مش استفاده شده در مدل اجزای محدود می‌باشد. با توجه به این که کوچکتر کردن اندازه مش‌ها بعد از اندازه مش 40mm تأثیری بر رفتار و نتایج مدل ندارد، در نهایت اندازه مش‌ها مطابق شکل (۵-ب) به طور میانگین برابر 40mm انتخاب شد.



شکل ۵-الف) نتایج تحلیل حساسیت مش، ب) مش بندی

۳-۲- مدل‌های مورد مطالعه

مطابق شکل (۶)، مدل‌های در نظر گرفته شده به منظور مقایسه رفتار سازه‌ای اتصال خودمرکزگرای دارای میراگر نسبت به اتصالات موجود، شامل اتصال خمشی جوشی (WMC)^۱، اتصال دارای کابل پس کشیده (PTSC)^۲، اتصال دارای میراگر اصطکاکی (FDC)^۳، اتصال دارای میراگر فلزی تسلیم‌شونده (MYDC)^۴ و اتصال خودمرکزگرای دارای میراگر (SCPCFD)^۵ می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌ها از مقطع IPE140 برای تیرها و از مقطع Box160×160×12 برای ستون‌ها استفاده شده و طول تیرها و ارتفاع ستون‌ها به ترتیب برابر 1.7m و 3m در نظر گرفته شد. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مطابق شکل (۳) بوده و پروتکل بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای به صورت قائم به انتهای تیر اعمال شد.

شکل ۶- صحت‌سنجی نتایج عددی بر اساس نتایج آزمایشگاهی: الف) اتصال خمشی جوشی (Chen و همکاران، ۲۰۰۵)، ب) اتصال دارای کابل پس کشیده (Kailai و همکاران، ۲۰۱۳)، پ) اتصال دارای میراگر اصطکاکی (Latour و همکاران، ۲۰۱۸)، ت) اتصال دارای میراگر فلزی تسلیم‌شونده (Oh و همکاران، ۲۰۰۹)، ث) اتصال خودمرکزگرای دارای میراگر (Saeidzadeh و همکاران، ۲۰۲۲)

4. Metallic Yielding Damper Connection
5. Self-Centering Pinned Connection with Friction Damper

1. Welded Moment Connection
2. Post-Tensioned Strand Connection
3. Friction Damper Connection

۳-۳- صحت‌سنجی

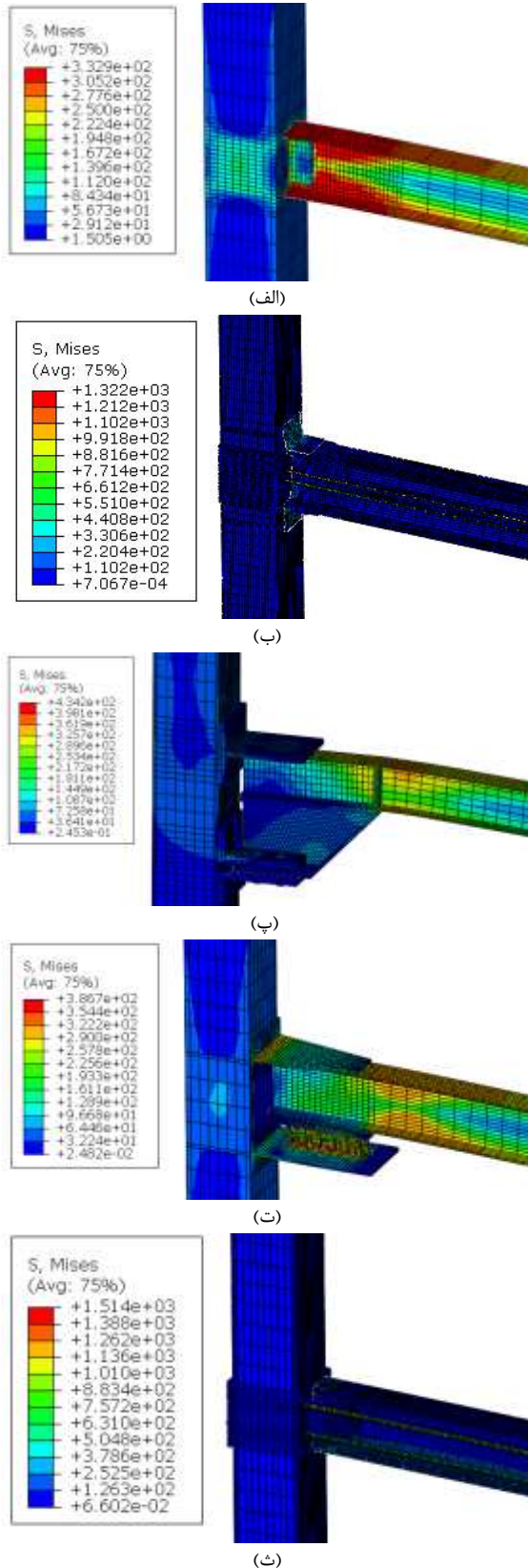
جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی اجزای محدود مورد استفاده در این مقاله، نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای اتصال تیر-ستون خمشی جوشی (Chen و همکاران، ۲۰۰۵)، اتصال دارای کابل پس‌کشیده (Kailai و همکاران، ۲۰۱۳)، اتصال دارای میراگر اصطکاکی (Latour و همکاران، ۲۰۱۸)، اتصال دارای میراگر فلزی تسلیم‌شونده (Oh و همکاران، ۲۰۰۹) و اتصال خودمركزگرای دارای میراگر (Saeidzadeh و همکاران، ۲۰۲۲) با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS به‌روش مشابه توضیح داده شده در بخش (۳-۱) مقایسه شد (شکل ۶). انطباق مطلوب نتایج حاصل از تحلیل به‌روش اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط دیگر محققان از نظر شکل منحنی هیسترتیک، سختی و مقاومت نهایی، مؤید دقت روش‌های استفاده شده برای مدل‌سازی می‌باشد. لازم به‌ذکر است که اختلاف سختی و مقاومت نهایی نتایج عددی و آزمایشگاهی به‌طور میانگین به‌ترتیب برابر با ۴/۵ و ۶ درصد می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌ها شامل توزیع تنش وون میزس^۱، وضعیت تسلیم و کرنش پلاستیک معادل مدل‌های WMC، PTSC، FDC، MYDC و SCPCFD برای دوران 0.06 رادیان و همچنین منحنی‌های چرخه‌ای و پارامترهای سازه‌ای مدل‌ها بررسی شده است.

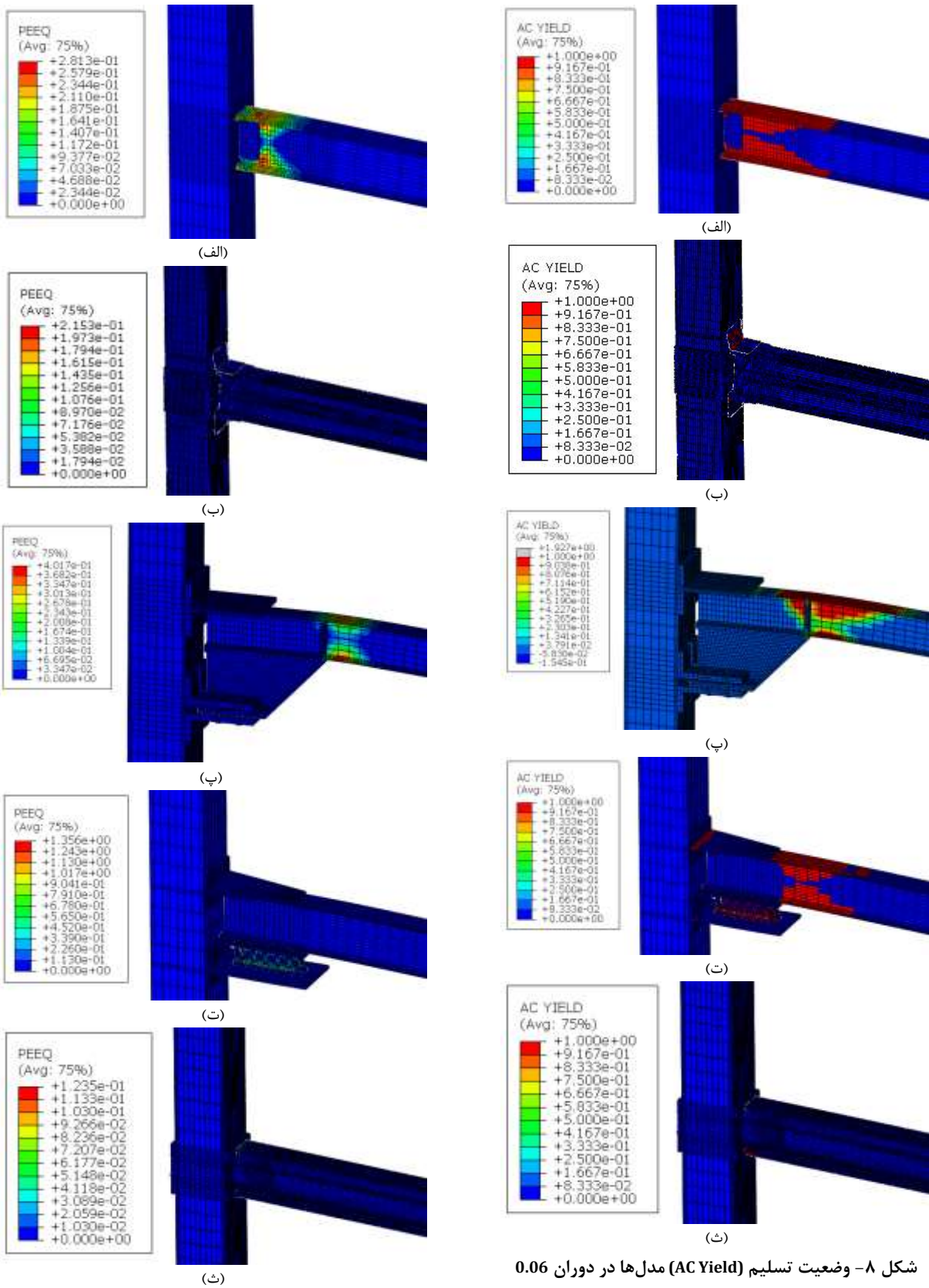
۴-۱- تنش وون میزس و وضعیت تسلیم

در شکل (۷) توزیع تنش وون میزس برای مدل‌های WMC، PTSC، FDC، MYDC و SCPCFD برای دوران 0.06 رادیان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل WMC، تنش در ناحیه اتصال بیشتر از حد الاستیک بوده و در مدل PTSC، نبشی‌ها وارد ناحیه فرارترجاعي شده و در مدل FDC، ناحیه اطراف سخت‌کننده بالای ورق لچکی تیر به دور از ستون از محدوده ارتجاعی فراتر رفته و در مدل MYDC، علاوه بر ناحیه میراگر فلزی تسلیم‌شونده، بخشی از تیر نیز وارد محدوده فرارترجاعي شده است. با توجه به نتایج تنش وون میزس مدل SCPCFD مشاهده می‌شود که در این مدل ناحیه اتصال و کابل‌ها در محدوده ارتجاعی باقی‌مانده است و در نتیجه از تسلیم اعضای اصلی جلوگیری شده است.



شکل ۷- تنش وون میزس مدل‌ها در دوران 0.06 رادیان:

الف) WMC، ب) PTSC، پ) FDC، ت) MYDC، ث) SCPCFD



شکل ۸- وضعیت تسلیم (AC Yield) مدل‌ها در دوران 0.06 رادیان: الف) WMC، ب) PTSC، پ) FDC، ت) MYDC، ث) SCPCFD

شکل ۹- انرژی کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) مدل‌ها در دوران 0.06 رادیان: الف) WMC، ب) PTSC، پ) FDC، ت) MYDC، ث) SCPCFD

لازم به ذکر است که با توجه به این که مساحت داخل منحنی چرخه‌ای نشان‌دهنده میزان اتلاف انرژی می‌باشد، مشاهده می‌شود که اتلاف انرژی اتصال SCPCFD کمی بیشتر از اتصال PTSC است. همچنین مشاهده می‌شود که میزان اتلاف انرژی اتصالات WMC، FDC و MYDC نسبت به اتصال SCPCFD بیشتر است، اما این اتلاف انرژی ناشی از رفتار فرارترجعی اعضای اصلی می‌باشد که منجر به دریافت ماندگار بسیار زیاد گشته است. به منظور مقایسه بهتر، پارامترهای سازه‌ای اعم از مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری اتصالات مورد بررسی در جدول (۱) به صورت کمی بیان شده است. همچنین نسبت پارامترهای مدل‌ها به پارامترهای مدل SCPCFD در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به جدول (۱) و جدول (۲) مشاهده می‌شود که سختی اولیه و مقاومت اتصالات مورد بررسی، اندکی بیشتر از اتصال SCPCFD می‌باشد. اما این اتصالات دارای دریافت ماندگار قابل توجه و جزئیات اجرایی بسیار پیچیده‌ای می‌باشند.

جدول ۱- پارامترهای سازه‌ای مدل‌ها

مدل	مقاومت (kN)	سختی اولیه (kN.m/Rad)	شکل‌پذیری
WMC	۲۲/۶۲	۲۶۱۷/۹۵	۴/۱۳
PTSC	۲۰/۶۴	۲۵۹۹/۸۵	۱۱/۷۶
FDC	۲۲/۷۹	۲۶۶۹/۹۳	۵/۱۷
MYDC	۲۳/۹۰	۲۶۸۱/۳۰	۴/۶۱
SCPCFD	۲۰/۴۱	۲۵۸۵/۸۹	۱۴/۶۷

جدول ۲- نسبت پارامترهای سازه‌ای مدل‌ها به مدل SCPCFD

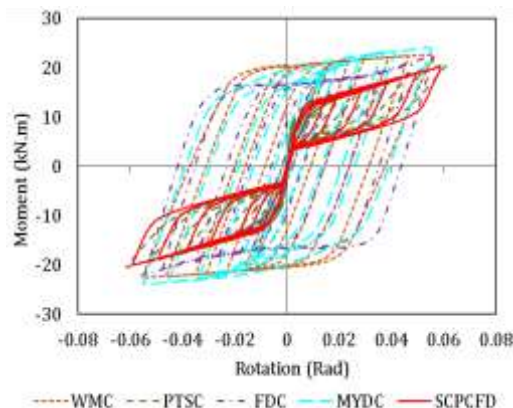
مدل	مقاومت (kN)	سختی اولیه (kN.m/Rad)	شکل‌پذیری
WMC	۱/۱۰۸	۱/۰۱۲	۰/۲۸۲
PTSC	۱/۰۱۱	۱/۰۰۵	۰/۸۰۱
FDC	۱/۱۱۶	۱/۰۳۲	۰/۳۵۲
MYDC	۱/۱۷۱	۱/۰۳۶	۰/۳۱۴

با توجه به نتایج حاصل برای شکل‌پذیری، مشاهده می‌شود که اتصال پیشنهادی دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر اتصالات مورد بررسی بوده و قابلیت حذف کامل دریافت ماندگار و دارای خاصیت خودمرکزگرایی کامل می‌باشد. در نهایت با توجه به جزئیات اجرایی کمتر اتصال SCPCFD، خودمرکزگرایی کامل و حذف دریافت ماندگار، افزایش شکل‌پذیری، رفتار ارتجاعی اعضای اصلی، تأمین خودمرکزگرایی توسط کابل‌های پس‌کشیده و جذب انرژی توسط صفحات اصطکاکی قابل تعویض، قابلیت تنظیم مقاومت و سختی و شکل‌پذیری اتصال با تغییر مقادیر پیش‌تنیدگی پین و پس‌کشیدگی کابل‌ها می‌توان نتیجه گرفت

با توجه به وضعیت تسلیم (شکل (۸)) و کرنش پلاستیک معادل مدل‌های WMC، PTSC، FDC، MYDC و SCPCFD برای دوران 0.06 رادیان (شکل (۹))، همانند توزیع تنش، مشاهده می‌شود در مدل WMC، تسلیم و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در ناحیه اتصال رخ داده و در مدل PTSC، تسلیم در نبشی‌ها و در مدل FDC، تسلیم و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در تیر و با فاصله از ستون رخ داده است. همچنین در مدل MYDC، بخش عظیمی از تسلیم در ناحیه‌ای از تیر و میراگر فلزی تسلیم‌شونده بوده و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در میراگر فلزی تسلیم‌شونده متمرکز شده است. نتایج وضعیت تسلیم و کرنش و کرنش پلاستیک معادل حداکثر مدل SCPCFD نشان می‌دهد که در این مدل، به جز ناحیه بسیار محدود در محل تکیه بال تیر به زائده روی ستون، اتصال تسلیم قابل توجهی تجربه نکرده و در محدوده ارتجاعی باقی‌مانده است. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از وضعیت تسلیم، تنش وون میزس و کرنش پلاستیک معادل مدل‌ها در دوران 0.06 رادیان مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از اتصال SCPCFD، از تسلیم ناحیه اتصال جلوگیری شده و اعضای اصلی در ناحیه ارتجاعی باقی می‌مانند.

۴-۴- منحنی چرخه‌ای

شکل (۱۰) نشان‌دهنده منحنی‌های چرخه‌ای مدل‌های WMC، PTSC، FDC، MYDC و SCPCFD می‌باشد. با توجه به شکل مذکور مشاهده می‌شود که اتصال SCPCFD دارای دریافت ماندگار بسیار ناچیز بوده و ضمن تأمین جزئیات اجرایی ساده‌تر نسبت به سایر اتصالات، رفتار پرچمی شکل و کاملاً خودمرکزگرا دارد. اتصالات WMC، FDC و MYDC دارای دریافت ماندگار بسیار بالا بوده و به خصوص در اتصال WMC، رفتار فرارترجعی در عضو اصلی رخ می‌دهد.



شکل ۱۰- منحنی چرخه‌ای مدل‌ها

۶- مراجع

اکبری حامد آ، بافنده نوبری ح، "بررسی عددی رفتار لرزه‌ای اتصالات نوین خمشی با مقطع حرارت داده شده"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۰، ۵۱ (۱)، ۱-۱۳.

حسین‌زاده اصل م، سعیدزاده م، "بررسی تأثیر انحراف تیر در اتصال گیردار فلنجی تیر به ستون بر افت مقاومت اتصال"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۱۳۹۸، ۵۱ (۲)، ۲۰۵-۲۲۰.

حسین‌زاده اصل م، سعیدزاده م، "بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال گیردار فلنجی تیر مورب به ستون تحت زوایای مختلف با ورق انتهایی"، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ۱۳۹۶.

ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete: (ACI 318-19); and commentary (ACI 318R-19)", Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.

AISC 358, "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications", Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 2020.

AISC360, "Specification for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, AISC, 2016.

Akbari Hamed A, Basim M C, "Experimental-numerical study on weakened HSS-to-HSS connections using HBS and RBS approaches", Structures, 2020, 28, 1449-1465.

AkbariLor H, Izadinia, M, Memarzadeh P, "Experimental and numerical study of I-shape slit dampers in connections", Latin American Journal of Solids and Structures, 2018, 15.

American Institute of Steel Construction (AISC 341), "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, 2016.

Bayat K, Shekastehband B, "Seismic performance of beam to column connections with T-shaped slit dampers", Thin-Walled Structures, 2019, 141, 28-46.

Chen CC, Chen SW, Chung MD, Lin MC, "Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections", Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61 (1), 1-21.

Chenaghloou MR, Akbari Hamed A, "Connection classification for a space structure jointing system", ce/papers, 1 (2-3), 746-755, 2017.

D'Aniello M, Zimbru M, Latour M, Francavilla A, Landolfo R, Piluso V, Rizzano G, "Development and validation of design criteria for free from damage steel joints", ce/papers, 2017, 1 (2-3), 263-271.

Deng K, Pan P, Wang C, "Development of crawler steel damper for bridges", Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85, 140-150.

Deng K, Wang T, Kurata M, Zhao C, Wang K, "Numerical study on a fully-prefabricated damage-tolerant beam to column connection for an earthquake-

که اتصال پیشنهادی دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر اتصالات دارد. با این حال به دلیل شرایط بحرانی تر و شدید بودن اثر پیچش در اتصال تیر مورب به ستون (Hoseinzadeh Asl و همکاران، ۲۰۱۹؛ حسین‌زاده اصل و سعیدزاده، ۱۳۹۶؛ ۱۳۹۸)، نیاز است بررسی‌های بیشتر در این زمینه صورت گیرد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به مقایسه رفتار اتصال خودمرکزگرای دارای میراگر (SCPCFD) نسبت به اتصالات موجود (WMC، PTSC، MYDC و FDC) پرداخته شده است. با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، نتیجه‌گیری‌های کلی زیر قابل بیان است:

۱- در مدل اتصال خمشی جوشی (WMC)، تنش در ناحیه اتصال بیشتر از حد الاستیک بوده و تسلیم و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در ناحیه اتصال رخ داده است.

۲- نبشی‌ها در مدل دارای کابل پس‌کشیده (PTSC) وارد ناحیه فراررتجاعی شده و تسلیم در نبشی‌ها رخ داده است.

۳- در مدل دارای میراگر اصطکاکی (FDC) ناحیه‌ای از تیر به دور از ستون از محدوده ارتجاعی فراتر رفته و تسلیم و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در تیر و با فاصله از ستون رخ داده است.

۴- علاوه بر ناحیه میراگر فلزی تسلیم‌شونده، بخشی از تیر نیز در مدل دارای میراگر فلزی تسلیم‌شونده (MYDC) وارد محدوده فراررتجاعی شده و بخش عظیمی از تسلیم در ناحیه‌ای از تیر و میراگر فلزی تسلیم‌شونده بوده و کرنش پلاستیک معادل حداکثر در میراگر فلزی تسلیم‌شونده متمرکز شده است.

۵- مطابق نتایج تنش وون میزس، وضعیت تسلیم و کرنش پلاستیک معادل مشاهده می‌شود که در مدل پیشنهادی خودمرکزگرای دارای میراگر (SCPCFD)، ناحیه اتصال در محدوده ارتجاعی باقی مانده و از تسلیم اعضای اصلی جلوگیری شده است. در این مدل، به جز ناحیه بسیار محدود در محل تکیه بال تیر به زائده روی ستون، اتصال تسلیم قابل توجهی تجربه نکرده و اعضای اصلی در محدوده ارتجاعی باقی مانده است.

۶- نتایج نشان‌دهنده مزایای اتصال پیشنهادی از جمله جزئیات اجرایی کمتر، خودمرکزگرایی کامل و حذف دریافت ماندگار، افزایش شکل‌پذیری، رفتار ارتجاعی اعضای اصلی، تأمین خودمرکزگرایی توسط کابل‌های پس‌کشیده و جذب انرژی توسط صفحات اصطکاکی قابل تعویض، قابلیت تنظیم مقاومت و سختی و شکل‌پذیری اتصال با تغییر مقادیر پیش‌تنیدگی پین و پس‌کشیدگی کابل‌ها می‌باشد.

- strengthened by steel angles”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 109, 61-71.
- Xu X, Tu J, Cheng G, Zheng J, Luo Y, “Experimental study on self-centering link beams using post-tensioned steel-SMA composite tendons”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155, 121-128.
- Zhang Al, Zhang YX, Li R, Wang ZY, “Cyclic behavior of a prefabricated self-centering beam-column connection with a bolted web friction device”, 2016, *Engineering Structures*, 111, 185-198.
- resilient frame 2018, *Engineering Structures*, 2018, 159, 320-331.
- Eurocode3, “Design of steel structures-Part1-8: Design of joints”, 2005.
- Farmani MA, Ghassemieh M, “Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 135, 30-48.
- Hoseinzadeh Asl M, Saeidzadeh M, Momenzadeh S, “Evaluation of Friction Strength Loss in Endplate Moment Connections with Skewed Beam”, *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19 (6), 1767-1784.
- Kilali D, Peng P, Alexandre L, Zhenhua P, Lieping Y, “Test and simulation of full-scale self-centering beam-to-column connection”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12 (4), 599-607.
- Latour M, D’Aniello M, Zimbru M, Rizzano G, Piluso V, Landolfo R, “Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115, 66-81.
- Latour M, Piluso V, Rizzano G, “Free from damage beam-to-column joints: Testing and design of DST connections with friction pads”, *Engineering Structures*, 2015, 85, 219-233.
- Lu X, Zhang L, Cui Y, Li Y, Ye L, “Experimental and theoretical study on a novel dual-functional replaceable stiffening angle steel component”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 114, 378-391.
- Oh SH, Kim YJ, Ryu HS, “Seismic performance of steel structures with slit dampers”, *Engineering Structures*, 2009, 31, 1997-2008.
- Rezaei S, Akbari Hamed A, Basim MC, “Seismic performance evaluation of steel structures equipped with dissipative columns”, *Journal of Building Engineering*, 2020, 29, 101227.
- Ricles JM, Sause R, Garlock MM, Zhao C, “Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames”, *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127 (2), 113-121.
- Rojas P, Ricles JM, Sause R, “Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices”, *Journal of structural engineering*, 2005, 131 (4), 529-540.
- Saberi V, Gerami M, Kheyroddin A, “Seismic rehabilitation of bolted end plate connections using post-tensioned tendons”, *Engineering Structures*, 2016, 129, 18-30.
- Saeidzadeh M, Chenaghloou MR, Akbari Hamed A, “Experimental and numerical study on the performance of a novel self-centering beam-column connection equipped with friction dampers”, *Journal of Building Engineering*, 2022, 52, 104338.
- Tong L, Chen Y, Chen Y, Fang C, “Cyclic behaviour of beam-to-column joints with cast steel connectors”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 116, 114-130.
- Wang W, Chan TM, Shao H, “Seismic performance of beam-column joints with SMA tendons

EXTENDED ABSTRACTS

Evaluation of the Structural Behavior of a Novel Self-Centering Beam-Column Connection with Friction Damper In Comparison To Existing Connections

Mahsa Saeidzadeh, Mohammad Reza Chenaghlou, Arash Akbari Hamed *

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 24 June 2022; **Review:** 16 September 2022; **Accepted:** 20 September 2022

Keywords:

Self-centering connection, Friction damper, Metallic yielding damper, Welded moment connection, Residual drift.

1. Introduction

Due to the disadvantages of some existing connections such as the lateral-torsional buckling of RBS connections (Akbari Hamed and Basim, 2020; Akbari Hamed and Bafandeh Nobari, 2021), Saeidzadeh et al. (2022) proposed a novel partial-strength and semi-rigid (Chenaghlou and Akbari Hamed, 2017; Eurocode3, 2005) self-centering connection which eliminates residual drifts and provides more ductility in comparison with existing connections. Considering the stable cycle behavior and the advantages of this connection, in this paper, the structural cyclic behavior of this novel connection was compared with existing connections under the applied quasi-static loading. To this aim, the verified finite element models of four connections including welded moment connection (WMC), post-tensioned strand connection (PTSC), friction damper connection (FDC) and metallic yielding damper connection (MYDC) were considered.

2. Methodology

To ensure the accuracy of the modeling procedure used in this paper, the results of numerical modeling by ABAQUS software were compared with the results of experimental studies performed for WMC (Chen et al., 2005), PTSC (Kailai et al., 2013), FDC (Latour et al., 2018), MYDC (Oh et al., 2009) and the novel beam-column connection which is called self-centering pinned connection with friction damper (SCPCFD) (Saeidzadeh et al., 2022).

In order to investigate the behavior of SCPCFD connection with existing connections, the aforementioned four types of beam-column connections with 3D deformable solid elements were considered which had a beam length of 1.7m and a column height of 3m. It should be noted that in all models, IPE140 and Box160×160×12 were assigned to the beams and columns, respectively and they were kept constant to have a better comparison. Then, the considered quasi-static cyclic loading protocol was applied to the beam end of models using the Static/General approach.

3. Results and discussion

Fig. 1. shows the yielding status for the WMC, PTSC, FDC, MYDC and SCPCFD models at the rotation of 0.06 Rad. According to Fig. 1. the connection area at the vicinity of column (i.e. the protected zone) in the WMC model, and the angles in the PTSC model exceeded the elastic range. In the FDC and MYDC models, a significant

* Corresponding Author

E-mail addresses: m_saeidzadeh97@sut.ac.ir (Mahsa Saeidzadeh), mrchenaghlou@sut.ac.ir (Mohammad Reza Chenaghlou), akbarihamed.a@sut.ac.ir (Arash Akbari Hamed).

part of the beam as a main member showed inelastic behavior. According to the results of Von Mises stress of the SCPCFD model, the protected zone of the connection and strands remained in the elastic range, and as a result, the yield of the main members was prevented.

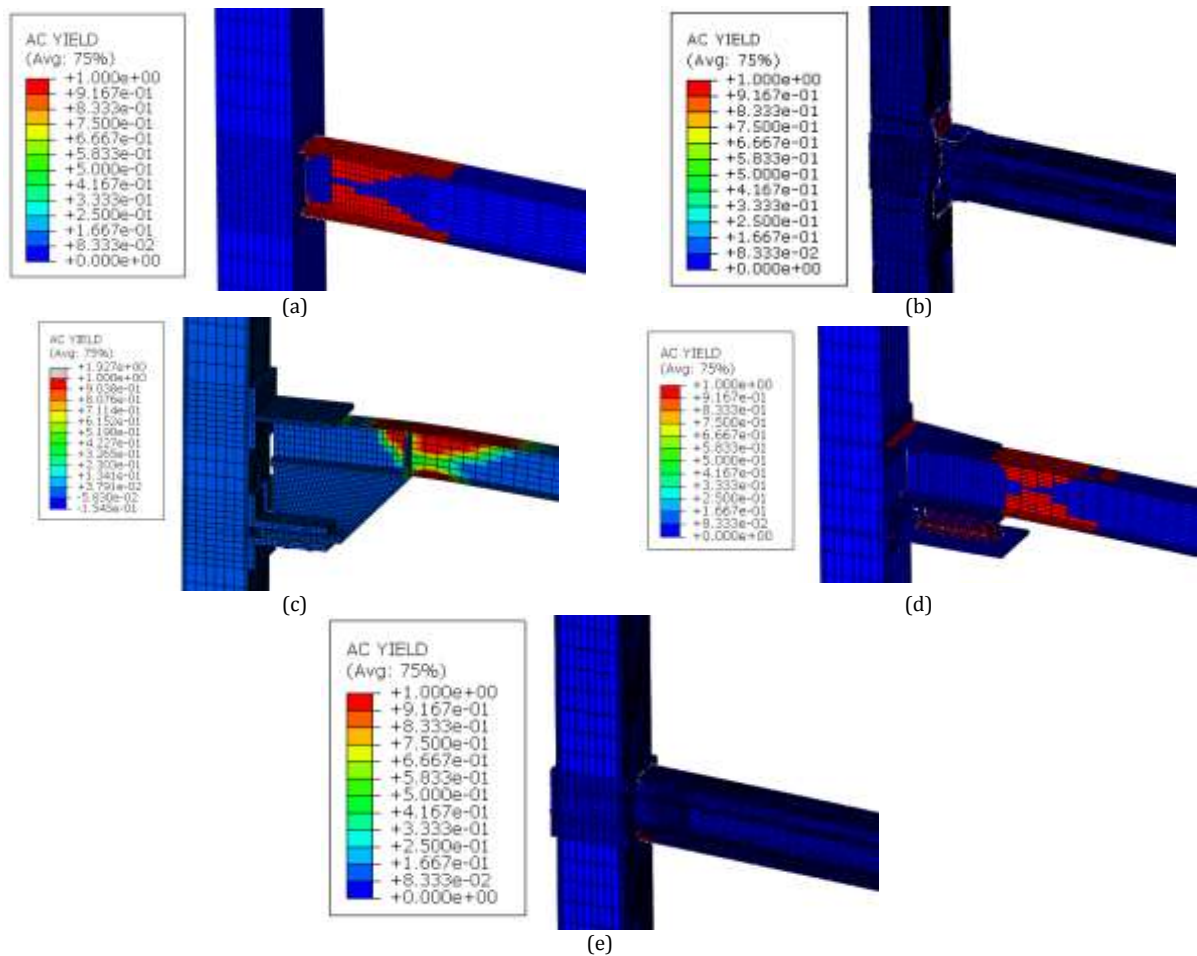


Fig. 1. Yielding status of the models at the rotation of 0.06 Rad: a) WMC, b) PTSC, c) FDC, d) MYDC, e) SCPCFD

Fig. 2. shows the cyclic curves of the WMC, PTSC, FDC, MYDC and SCPCFD models. According to Fig. 2. it can be seen that the SCPCFD connection has a negligible residual drift and while providing simpler constructional details than other connections, it has a flag-shaped and completely stable self-centering behavior. Moreover, WMC, FDC and MYDC connections have a remarkable yielding in the beam as a main member, especially in WMC connection, which results in the residual drift and damage of the connection.

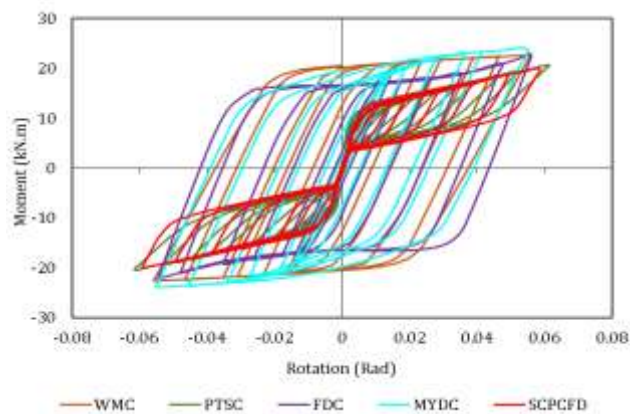


Fig. 2. Cyclic behavior of the considered models

Table 1 shows the estimated values for some of the structural parameters including strength, initial stiffness and ductility of the considered connections. Also, the ratio of these parameters for WMC, PTSC, FDC and MYDC models with respect to the corresponding values of the SCPCFD model is given in Table 2. According to Tables 1 and 2, despite the slightly higher initial stiffness and strength of the considered existing connections, they have significant residual drift as a result of experiencing severe nonlinearity along with complex constructional details which is associated with higher required cost. Moreover, it is observed that the proposed connection can provide more ductility comparing to the other connections in addition to its ability to completely eliminate the residual drift; therefore, it is required to further study the performance of this novel connection in more critical situations such as the skewed beam-column connections (Hoseinzadeh and Saeidzadeh, 2019; Hoseinzadeh et al, 2019).

Table 1. The calculated structural parameters of the models

Model	Strength (kN)	Initial stiffness (kN.m/Rad)	Ductility
WMC	22.62	2617.95	4.13
PTSC	20.64	2599.85	11.76
FDC	22.79	2669.93	5.17
MYDC	23.90	2681.30	4.61
SCPCFD	20.41	2585.89	14.67

Table 2. The ratio of the calculated parameters of the existing connection models with respect to the SCPCFD model

Model	Strength (kN)	Initial stiffness (kN.m/Rad)	Ductility
WMC	1.108	1.012	0.282
PTSC	1.011	1.005	0.801
FDC	1.116	1.032	0.352
MYDC	1.171	1.036	0.314

4. Conclusions

The obtained results show that the SCPCFD connection provides full self-centering action and elastic behavior of the main members which results in elimination of the residual drifts. These desirable performance characteristics along with the considerable reduced constructional details, higher ductility, and providing energy dissipation by replaceable friction pads approve the superiority of the SCPCFD connection with respect to the considered existing connections.

5. References

- Akbari Hamed A, Bafandeh Nobari H, "Numerical Investigation on Seismic Behavior of Novel Moment Connections with Heat-Treated Beam Sections", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021 May 22, 51 (102), 1-3.
- Akbari Hamed A, Basim M C, "Experimental-numerical study on weakened HSS-to-HSS connections using HBS and RBS approaches", *Structures*, 2020, 28, 1449-1465.
- Chen CC, Chen SW, Chung MD, Lin MC, "Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61 (1), 1-21.
- Chenaghloou MR, Akbari Hamed A, "Connection classification for a space structure jointing system", *ce/papers*, 1 (2-3), 746-755, 2017.
- Eurocode3, "Design of steel structures-Part1-8: Design of joints", 2005.
- Hoseinzadeh AM, Saeidzadeh M, "Study of the effect of skewed beam-to-column connections on loss of strength in endplate moment connections", 2018, 205-219.
- Hoseinzadeh Asl M, Saeidzadeh M, Momenzadeh S, "Evaluation of Friction Strength Loss in Endplate Moment Connections with Skewed Beam", *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19 (6), 1767-1784.
- Kailai D, Peng P, Alexandre L, Zhenhua P, Lieping Y, "Test and simulation of full-scale self-centering beam-to-column connection", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12 (4), 599-607.
- Latour M, D'Aniello M, Zimbru M, Rizzano G, Piluso V, Landolfo R, "Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115, 66-81.
- Oh SH, Kim YJ, Ryu HS, "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering Structures*, 2009, 31, 1997-2008.

Saeidzadeh M, Chenaghlou MR, Akbari Hamed A, “Experimental and numerical study on the performance of a novel self-centering beam-column connection equipped with friction dampers”, *Journal of Building Engineering*, 2022, 52, 104338.