



# تأثیر سخت‌کننده جان تیر بر رفتار اتصال تیر فولادی به ستون CFT توسط صفحه انتهایی و میل‌مهاری عبور کننده از درون ستون

سالار شیراسب<sup>۱</sup>، فرزانه حامدی<sup>۲</sup>  
(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۵)

## چکیده

در این تحقیق، رفتار اتصال محدود در لغزش تیر فولادی به ستون CFT با استفاده و یا عدم استفاده از سخت‌کننده در جان تیر، تحت مطالعه‌ای تحلیلی قرار گرفته است. در اتصال مطالعه شده، تیر فولادی و سخت‌کننده‌های مثلثی متصل شده روی بال‌های آن، توسط ورق انتهایی و میل‌مهاری عبور کننده از درون ستون در طرفین آن نصب می‌گردد. در مطالعه حاضر، ۵ نمونه با تعداد و آرایشی متفاوت از سخت‌کننده در جان تیر، پس از طراحی مطابق با ضوابط پیشنهاد شده در آئین نامه AISC2011، در محیط نرم افزار المان محدود ABAQUS تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت قرار گرفته‌اند. در ابتدای مطالعه، جهت دستیابی به روند صحیح مدل‌سازی تحلیلی در نرم افزار، نتایج حاصل از بارگذاری نمونه‌ای آزمایشگاهی (به عنوان مرجعی قابل اطمینان) با نمونه تحلیلی مدل‌سازی شده مقایسه و ارزیابی شده است. بررسی تحلیلی نمونه‌های طراحی شده، علاوه بر اثبات رفتار مناسب اتصال موجود تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت، تاثیر چشمگیر سخت‌کننده‌های جان تیر بر عملکرد اتصال مطالعه شده را تایید می‌نماید.

## کلمات کلیدی

ستون CFT، سخت‌کننده جان تیر، میل‌مهاری عبوری از درون ستون، اتصال خمشی، سخت‌کننده مثلثی

## Effects of Beam Web Stiffener on the Behavior of Through Bolted Steel Beam to CFT Column End-Plate Connection

S. Shirasb, F. Hamedi

### ABSTRACT

In this study, the behavior of slip-critical connection of steel beam to CFT column has been analytically studied by using and not using web stiffeners in beam. In the studied connections, steel beam and triangular stiffeners attached on its flanges are installed on both sides of connection by the end-plate and passing rods through the column. In this study, 5 specimens with different number and arrangement of beam web stiffeners have been designed by AISC 2011 specifications and modeled with the finite element software of ABAQUS and subjected to static and cyclic loadings. To achieve correct trend of analytical modeling in software, the results obtained from a tested experimental specimen have been compared with stimulated analytical one and have been evaluated. In addition to proving the appropriate behavior of the connection under cyclic and static loading, the analytical study of the designed specimens confirm the significant effect of beam web stiffeners on the performance of studied connection.

### KEYWORDS

CFT column, Beam web stiffener, Passing rods through Column, Moment Connection, Triangular stiffener

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین، salar.shirasb@gmail.com (نویسنده مسئول)

۲- استادیار گروه مهندسی عمران-سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین، hamedi@eng.ikiu.ac.ir



عملکرد لرزه‌ای اتصال نداشت. پس از بارگذاری نمونه‌هایی مجهز به سخت‌کننده T شکل توسط Kang و همکارانش [۵]، رفتار لرزه‌ای نامناسب اتصال با ایجاد گسیختگی ترد در محل جوش مشاهده شد. Zhang [۶] و Wang [۷] با استفاده از یک دیافراگم خارجی، از اتصال مستقیم تیر به پوشش فولادی ستون جلوگیری نمودند. پس از بارگذاری گره‌ای میانی شامل اتصال مذکور، تغییر شکل‌های غیر الاستیک در ناحیه چشمه اتصال بعنوان مکانیزم خرابی معرفی شد. با بکارگیری سیستم‌هایی مرکب از پیچ و جوش، رفتار خمشی اتصال تیر فولادی به ستون CFT برای عملکردی شکل‌پذیر، بهبود یافت [۸ و ۹]. در این اتصالات، با نصب تیر روی یک سپری و یا صفحه انتهایی، از اتصال مستقیم تیر به ستون جلوگیری شده است. از دیگر مزایای این سیستم اتصالی، امکان کنترل کیفیت بالای جوشکاری محل اتصال تیر به صفحه انتهایی در کارخانه می‌باشد. این در حالیست که اجرای این اتصالات، هزینه‌ای مشابه با اتصالات خمشی معمول را دارا می‌باشد [۱۰]. Sheet و همکارانش [۱۱] با بارگذاری اتصالی شامل صفحه انتهایی، سخت‌کننده مثلثی و میل‌مهارهای عبور کننده از درون ستون، رفتاری متمایز از اتصالات پیشنهاد شده قبلی را نمایش دادند. این نوع اتصال، با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و ایجاد تغییر شکل‌های فرار تجمعی، از عملکردی مناسب جهت استفاده در مناطق لرزه‌خیز برخوردار بود. Azizinamini [۱۲] نمونه‌هایی شامل اتصال تیر فولادی به ستون دایروی CFT را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داد. اتصالات بارگذاری شده شامل شش ورق جداساز در محل صفحه انتهایی بودند. استفاده از این ورق‌ها علاوه بر تقویت ستون از صفحه انتهایی، سختی اتصال را نیز افزایش می‌داد. نمونه‌های بارگذاری شده توسط Azizinamini، با تامین شکل‌پذیری و قابلیت بالای استهلاک انرژی، بعلت تشکیل مفصل پلاستیک در تیر به مرحله گسیختگی رسیدند.

هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر بکارگیری سخت‌کننده جان تیر بر رفتار اتصال محدود در لغزش تیر فولادی به ستون CFT توسط میل‌مهارهای عبورکننده از درون ستون

با بررسی و مطالعه زلزله‌های بزرگ گذشته و تخمین خسارات وارده در این زمین‌لرزه‌ها، گسیختگی ترد در محل اتصال تیر به ستون بعنوان مکانیزم تخریب در اکثر قاب‌های خمشی معرفی شده است. بنابراین، مطالعه تحلیلی و ارائه اتصالاتی با عملکرد مناسب در مناطق لرزه‌خیز، در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱].

سازه‌های مرکب با بکارگیری همزمان ویژگی‌های فولاد و بتن و ترکیب خواص منحصر بفرد هریک در کنار هم، در سراسر دنیا در حال توسعه می‌باشند. بکارگیری ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT)<sup>۱</sup> در قاب‌های خمشی فولادی، ضمن سهولت در اجرا و منطق اقتصادی، بسیار رایج می‌باشد. در ستون‌های CFT با ایجاد محصور شدگی کامل برای هسته بتنی، علاوه بر افزایش میزان سختی و مقاومت برای هسته، احتمال وقوع کمناش موضعی رو به داخل برای پوشش فولادی نیز کاهش یافته است. از دیگر مزایای جایگزینی ستون‌های CFT در قاب‌های خمشی فولادی، میتوان به کاهش قابل توجه فولاد مصرفی در سازه‌های بلند مرتبه اشاره نمود [۲].

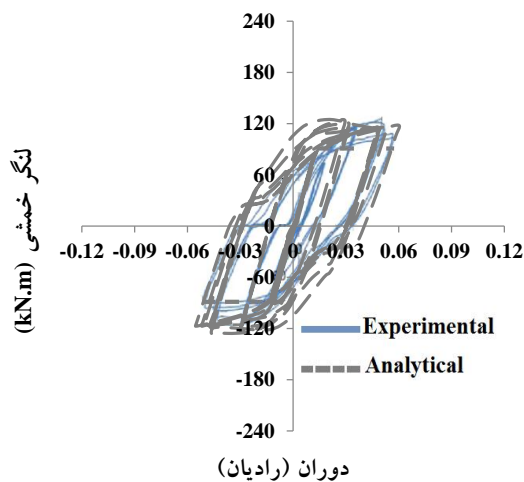
روش‌های متفاوتی از اتصال خمشی تیر فولادی به ستون CFT با هدف بکارگیری در مناطق با لرزه‌خیزی بالا در طی تحقیقات گذشته معرفی شده است. اتصال مستقیم تیر به پوشش فولادی ستون توسط جوش، از ابتدایی‌ترین سیستم‌های مطالعه شده بود. این سیستم اتصالی با وجود عملکردی مناسب در قالب اتصال ساده، از ظرفیت کافی جهت بکارگیری در قاب‌های خمشی برخوردار نبود [۳]. با تجهیز اتصال مذکور به دو ورق موازی روی بال‌های تیر، ظرفیت خمشی به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرد. نمونه‌های مجهز به این سیستم اتصالی، با تسلیم پوشش فولادی ستون در محل اتصال به بال‌های تیر، به مرحله گسیختگی رسیدند [۴]. استفاده از سخت‌کننده T شکل در محل اتصال مستقیم تیر به ستون، تاثیر چشمگیری بر بهبود

<sup>1</sup> Concrete filled tube



بر معیار تسلیم فون میسر برای مصالح فولادی و پلاستیسیته تخریبی برای بتن در نظر گرفته شد. جهت صحت‌سنجی، مشخصات الاستیک و غیر الاستیک مصالح در نمونه شبیه سازی شده تحلیلی، مشابه با نمونه آزمایشگاهی مرجع در نظر گرفته شد. پس از مدل‌سازی و اعمال بار چرخه‌ای به صورت تغییر مکان قائم در انتهای تیرهای طرفین ستون، نمونه مدل‌سازی شده با استفاده از روش استاتیکی عمومی در نرم‌افزار ABAQUS، تحلیل شد.

پس از بارگذاری نمونه تحلیلی مدل‌سازی شده و مقایسه آن با مرجع آزمایشگاهی، روند خرابی هر دو نمونه تحت مکانیزمی مشابه مشاهده شد. این مکانیزم، با تسلیم اولین تار از مقطع تیر در دوران  $0/048$  رادیان از بارگذاری چرخه‌ای آغاز، و پس از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و در دوران  $0/054$  رادیان متوقف شد. با رسم نمودار هیسترسیز (لنگر خمشی-دوران) مطابق با شکل (۱)، نتایج حاصل از بارگذاری هر دو نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. اختلاف ناچیز در نتایج، شیوه قابل اطمینان و صحیح مدل‌سازی تحلیلی را تایید می‌نماید.



شکل (۱): مقایسه نمودار هیسترسیز (لنگر خمشی-دوران) در نمونه آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی مدل‌سازی شده

## ۲-۲- نمونه‌های تحت مطالعه

در این مطالعه، به منظور بررسی عملکرد اتصال تیر فولادی به ستون CFT، ۵ نمونه در محیط نرم‌افزار المان محدود

و صفحه انتهایی می‌باشد. در این راستا، ۵ نمونه سه بعدی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شده و تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفتند. در نهایت، رفتار عمومی اتصال، حداکثر میزان نیروهای انتقال یافته، استهلاک انرژی، سختی دورانی و رفتار ناحیه چشمه اتصال برای ۵ نمونه مذکور با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲- شرح مطالعه

مطالعه و بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی، تنها با تکیه بر مطالعات تحلیلی قابل اطمینان نمی‌باشد. بنابراین، به منظور دستیابی به نتایج قابل اطمینان از مدل‌سازی و تحلیل، انجام آزمایشات تجربی ضروری و اجتناب‌ناپذیر است [۱۳]. در این مطالعه، ضمن مقایسه یکی از مدل‌های آزمایش شده توسط Sheet [۱۱] با نمونه مدل‌سازی شده تحلیلی و مشاهده اختلاف ناچیز در نتایج، گام‌های تحلیل و شیوه صحیح مدل‌سازی استخراج شده است. در ادامه، اصول مطالعه تحلیلی، مراحل صحت‌سنجی و روند مدل‌سازی تشریح شده است.

## ۲-۱- مطالعه تحلیلی

تمامی نمونه‌های مورد نظر در این مطالعه، به صورت سه بعدی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. در این راستا، از المان جامد<sup>۱</sup> جهت مدل‌سازی میل‌پهارها و هسته بتنی، و از المان پوسته<sup>۲</sup> در ساختار سایر اعضا استفاده گردید. تمامی سطوح جوش شونده، با استفاده از قید Tie و بدون امکان هیچگونه لغزش روی یکدیگر قرار گرفتند. با لحاظ ضرایب اصطکاک در راستای مماسی، امکان لغزشی محدود برای سطوح دارای تماس با یکدیگر فراهم شد. لازم بذکر است که با در نظر گرفتن حالت تماس سخت در جهت عمودی، از تداخل سطوح مماس به یکدیگر نیز جلوگیری گردید.

مشخصات مکانیکی تمامی مصالح در حالت الاستیک با لحاظ مدول الاستیسیته و در حالت غیر الاستیک با تکیه

<sup>1</sup> Solid

<sup>2</sup> Shell

## ۲-۳- مشخصات مکانیکی مصالح

از مشخصات مکانیکی فولاد A490 جهت تعریف رفتار الاستیک و پلاستیک میل مهارهای عبور کننده از درون ستون استفاده شده است. سایر اعضای فولادی بکار گرفته شده در نمونه‌ها مشخصاتی مطابق با فولاد ساختمانی ST37 را دارا می‌باشند. المان‌های تشکیل دهنده بتن دارای مقاومت فشاری نهایی ۳۰ مگاپاسکال بوده و با در نظر گرفتن معیار تخریب، در حالت غیر الاستیک تعریف گردیدند. مشخصات مکانیکی مصالح بتنی بکارگرفته شده، در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی بتن

کرنش	تنش (kg/cm <sup>2</sup> )
۰	۰
۰/۵ E - ۵	۱۵۲/۶
۶/۷ E - ۵	۱۷۷/۸
۰/۰۰۰۲۰۳	۲۰۹/۳
۰/۰۰۰۵۰۴	۲۴۷/۸
۰/۰۰۰۸۰۴	۲۶۶/۷
۰/۰۰۱۰۶	۲۷۵/۱
۰/۰۰۱۷۳۳	۳۰۰
۰/۰۱۸۷۵۹	۲۶۸/۱
۰/۰۳۱۹۸۵	۱۹۳/۹

## ۲-۴- شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها

بررسی رفتار اتصالات خمشی با جداسازی هر گره اتصالی از محل تشکیل نقاط عطف که در وسط طول تیرها و ارتفاع ستون‌ها در نظر گرفته میشود و اعمال قیود تکیه‌گاهی مناسب ممکن می‌گردد.

سه الگوی متفاوت از بارگذاری، تحت سه مرحله متوالی از تحلیل استاتیکی عمومی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS به نمونه‌های مدل‌سازی شده اعمال گردید. در گام اول از بارگذاری، با اعمال نیروی پیش‌تندگی بر تمامی میل‌مهارها، سیستم اتصالی به صورت محدود در لغزش وارد مرحله بعد از بارگذاری شد. مطابق با آیین

ABAQUS مدل‌سازی شده است. نمونه‌های مورد بررسی، در تعداد و چیدمان سخت‌کننده جان تیر از یکدیگر متمایز شده و تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۲ تا ۵ (S-2, S-3, S-4 و S-5) بترتیب دارای تک سخت‌کننده در یک طرف جان، یک جفت سخت‌کننده در طرفین جان، دو تک سخت‌کننده در یکطرف جان و دو جفت سخت‌کننده در طرفین جان می‌باشند. در نمونه اول (S-1)، از سخت‌کننده‌ای در جان تیر استفاده نشده است. تمامی نمونه‌ها بر اساس ضوابط آیین نامه AISC [۱۴] برای قاب‌های خمشی ویژه طراحی شده‌اند. با رعایت مفهوم (ستون قوی-تیر ضعیف) برای تمامی نمونه‌ها، از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون و ناحیه اتصالی جلوگیری شده است. در تمامی نمونه‌های طراحی شده، از پروفیل ساختمانی IPE240 به عنوان تیرهای طرفین گره اتصالی استفاده شد. هر ۵ نمونه تحت مطالعه دارای چیدمانی ۸ تایی و مشابه از میل‌مهارهایی با قطر ۲۰ میلیمتر می‌باشند. تمامی میل‌مهارها با عبور از درون ستون، در طرفین گره اتصالی مقید شده‌اند. سخت‌کننده‌های مثلثی دارای ارتفاع، عرض و ضخامتی برابر با ۱۴۰، ۲۵۰ و ۱۵ میلیمتر بوده و روی هر دو بال تیر قرار گرفتند. کلیه ستون‌های CFT معادل با ستون‌های بتن آرمه معمول و با فرض محصورشدگی کامل برای هسته بتنی طراحی شده‌اند [۱۵]. پوشش فولادی ستون‌ها دارای مقطعی به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰×۸ میلیمتر بوده و با توجه به آیین نامه AISC341-2010 [۱۶]، با ارضای رابطه (۱) به صورت فشرده طراحی گردیدند.

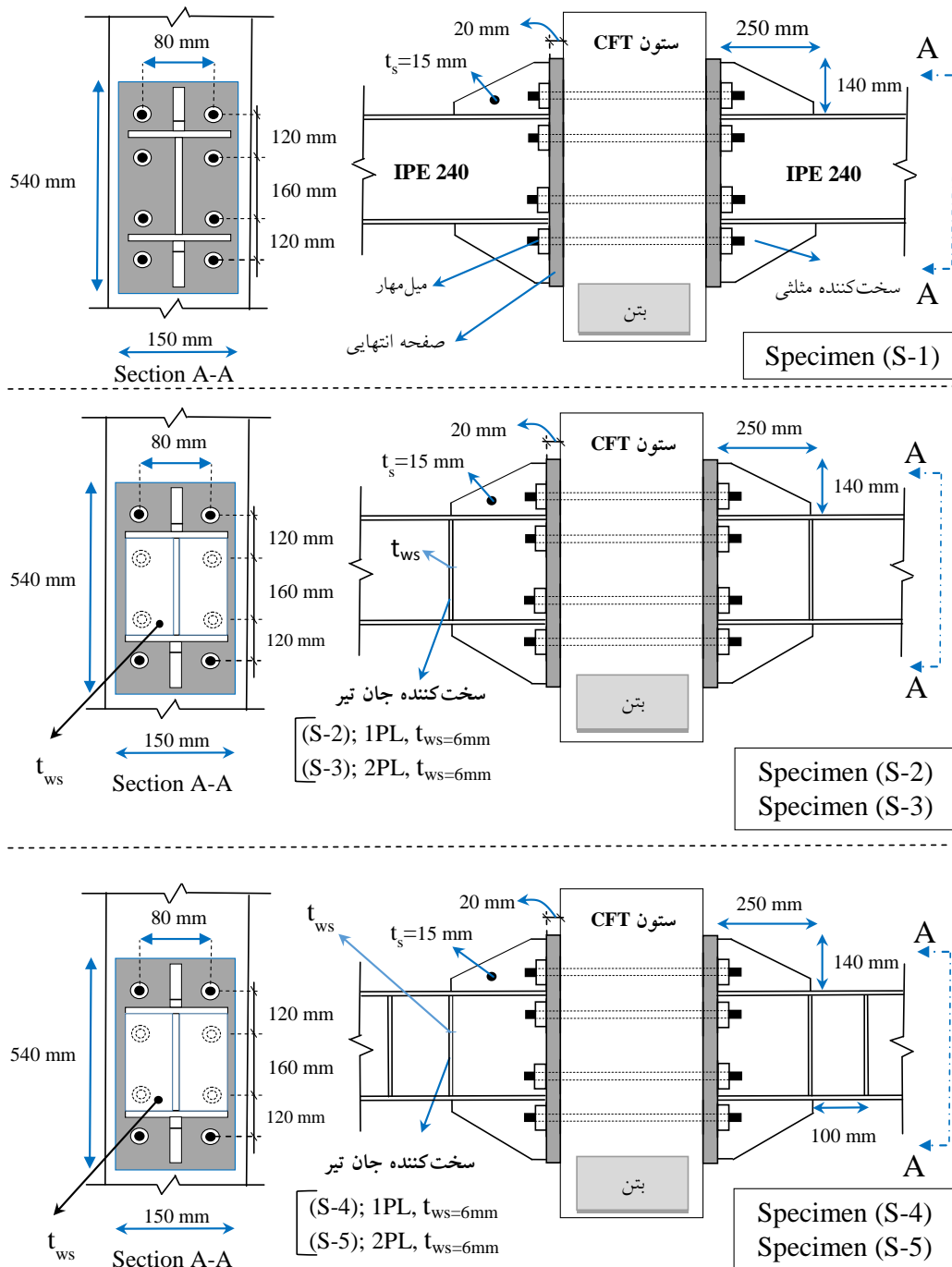
$$\frac{h_c}{t_c} \leq 1.4 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1)$$

که در آن  $h_c$ : ارتفاع مقطع پوشش فولادی ستون؛  $t_c$ : ضخامت مقطع پوشش فولادی ستون؛  $E$ : مدول الاستیسیته مصالح پوشش فولادی ستون؛  $F_y$ : تنش تسلیم مصالح پوشش فولادی ستون می‌باشد.

شکل (۲) مشخصات هندسی ۵ نمونه مورد نظر را نمایش می‌دهد.



نامه AISC [۱۴]، بزرگای نیروی پیش تنیدگی معادل با ۵۵ درصد از مقاومت کششی نهایی میل مهارها لحاظ گردید.



شکل (۲): مشخصات هندسی نمونه‌های تحت مطالعه

و معادل با ۱۵ درصد از ظرفیت محوری خالص ستون در نظر گرفته شد. مطابق با شکل (۳-الف و ب)، با اعمال تغییر مکان قائم در انتهای تیرهای طرفین در مرحله سوم،

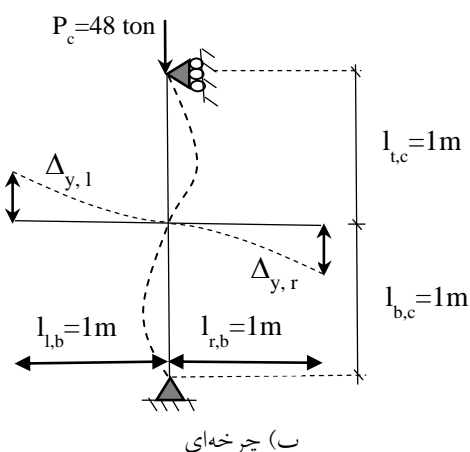
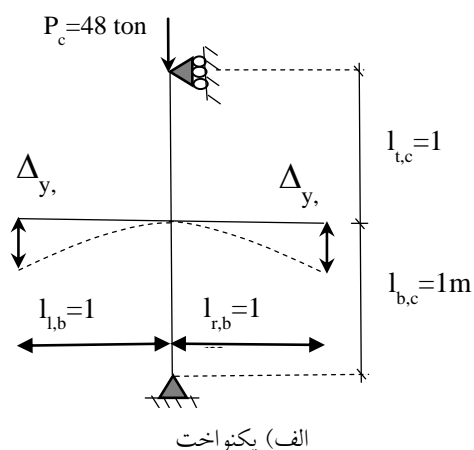
در مرحله دوم از بارگذاری، اثرات بار زنده و مرده انتقالی از طبقه‌های فوقانی، به صورت نیرویی متمرکز در گره بالای ستون اعمال گردید. بزرگای این نیرو برابر با ۴۸ تن

به مکانیزم خرابی رسیدند. روند تشکیل مفصل پلاستیک، با تسلیم اولین تار از مقطع تیر تحت اعمال دورانی معادل با  $0/01$  رادیان برای تمامی نمونه‌ها آغاز شد. در ادامه، با تسلیم کامل مقاطع در دوران  $0/04$ ،  $0/05$ ،  $0/05$  و  $0/06$  رادیان از بارگذاری برای نمونه‌های (S-1) تا (S-5)، مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شد. در نهایت، با نزول میزان لنگر خمشی منتقل شده از اتصالات به  $80\%$  از حداکثر مقدار منتقل شده، نمونه‌های (S-1) تا (S-5) بترتیب در دوران‌های  $0/06$ ،  $0/06$ ،  $0/07$ ،  $0/08$  و  $0/09$  رادیان از بارگذاری گسیخته شدند. با توجه به نمودارهای (لنگر خمشی-دوران) در شکل (5)، عملکرد مناسب، رفتار لرزه‌ای پایدار و تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی برای تمامی نمونه‌های بارگذاری شده قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به مطالب مذکور، با افزایش قدرت باربری از نمونه (S-1) تا (S-5) در سیکل‌هایی بالاتر از بارگذاری چرخه‌ای (از  $0/06$  به  $0/09$  رادیان)، نقش مثبت استفاده از سخت‌کننده جان تیر بر عملکرد اتصال تایید گردید.

با رسم نمودار پوش (لنگر خمشی-دوران) برای تمامی نمونه‌ها مطابق با شکل (6)، میزان حداکثر لنگر خمشی منتقل شده در هر گام از بارگذاری چرخه‌ای مقایسه شده است. با توجه به شکل (6)، عملکرد مناسبتر اتصال در حالت قرارگیری جفت سخت‌کننده در طرفین جان نسبت به حالت تک سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده قابل مشاهده می‌باشد.

برخلاف بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات با قرارگیری سخت‌کننده‌های یکطرفه و دو طرفه در جان تیر، استفاده از سخت‌کننده در یکطرف جان، قدرت باربری اتصال را نسبت به سایر حالات تحت بارگذاری یکنواخت کاهش داده است. با توجه به نمودار (لنگر خمشی-دوران) تحت بارگذاری یکنواخت مطابق با شکل (7)، نمونه‌های دارای سخت‌کننده در یکطرف جان (نمونه S-2 و S-4) در حالتی نامناسب و به صورتی ترد گسیخته شدند. این در حالیست که با بکارگیری تک و دو سخت‌کننده در طرفین جان نسبت به حالت بدون سخت‌کننده، باربری اتصال تحت بارگذاری یکنواخت به  $1/15$  و  $1/5$  برابر افزایش یافت.

نمونه‌ها در دو حالت جداگانه تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت قرار گرفتند. جهت اعمال بار چرخه‌ای، از الگوی پیشنهاد شده برای قاب‌های خمشی ویژه در آیین نامه [17]، و جهت اعمال بار یکنواخت از روندی خطی و صعودی پیروی شد. لازم بذکر است که روند بارگذاری و تحلیل در مرحله سوم، تا رسیدن به مکانیزم گسیختگی ادامه داشت.



شکل (3): اعمال بارگذاری

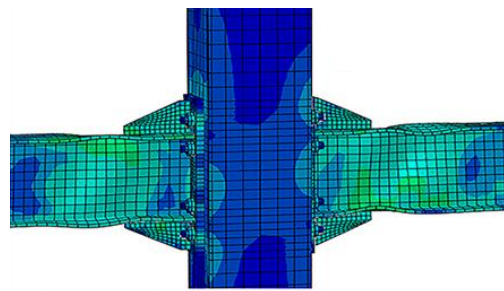
## ۲-۵- نتایج مطالعه تحلیلی

شکل (8)، چگونگی توزیع تنش در نمونه‌های تحت مطالعه را نمایش می‌دهد. توصیف نتایج در ادامه آورده شده است.

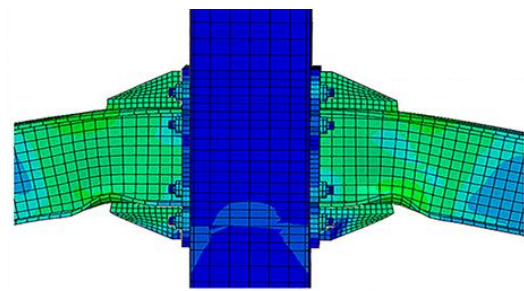
## ۲-۵-۱- رفتار عمومی اتصال و مکانیزم گسیختگی

پس از اعمال بار چرخه‌ای، تمامی نمونه‌های تحت مطالعه با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و خارج از ناحیه اتصال،

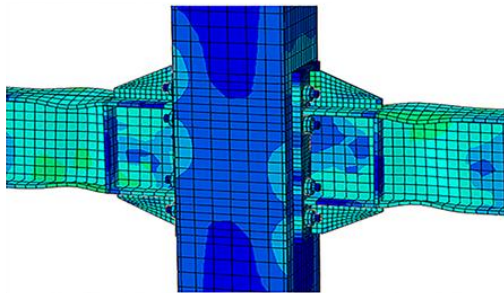




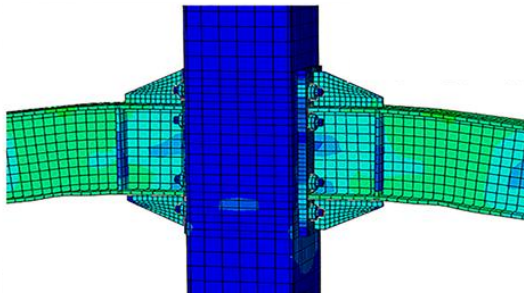
نمونه S-1



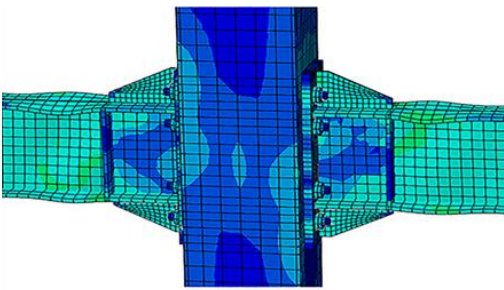
نمونه S-1



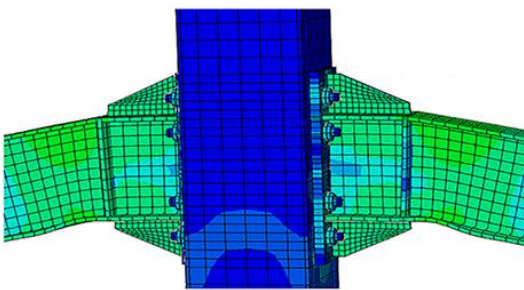
نمونه S-2



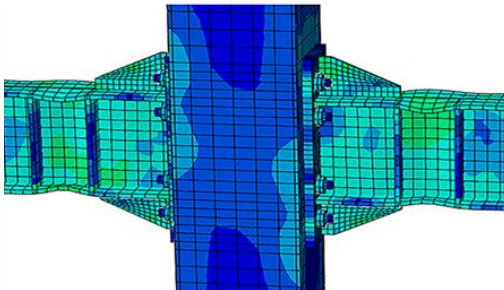
نمونه S-2



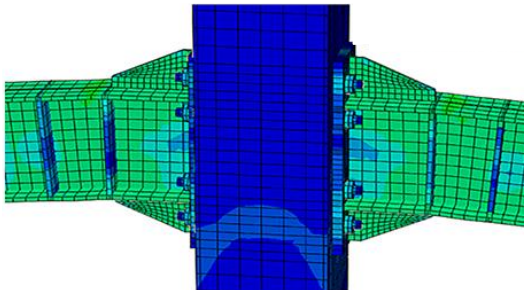
نمونه S-3



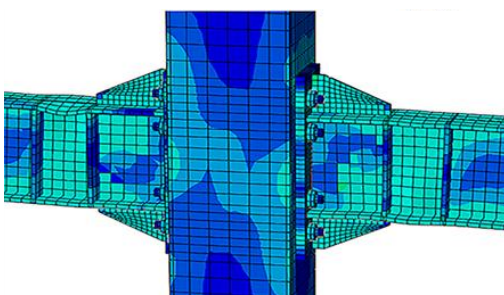
نمونه S-3



نمونه S-4

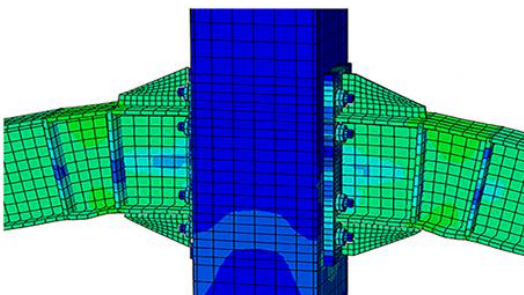


نمونه S-4



نمونه S-5

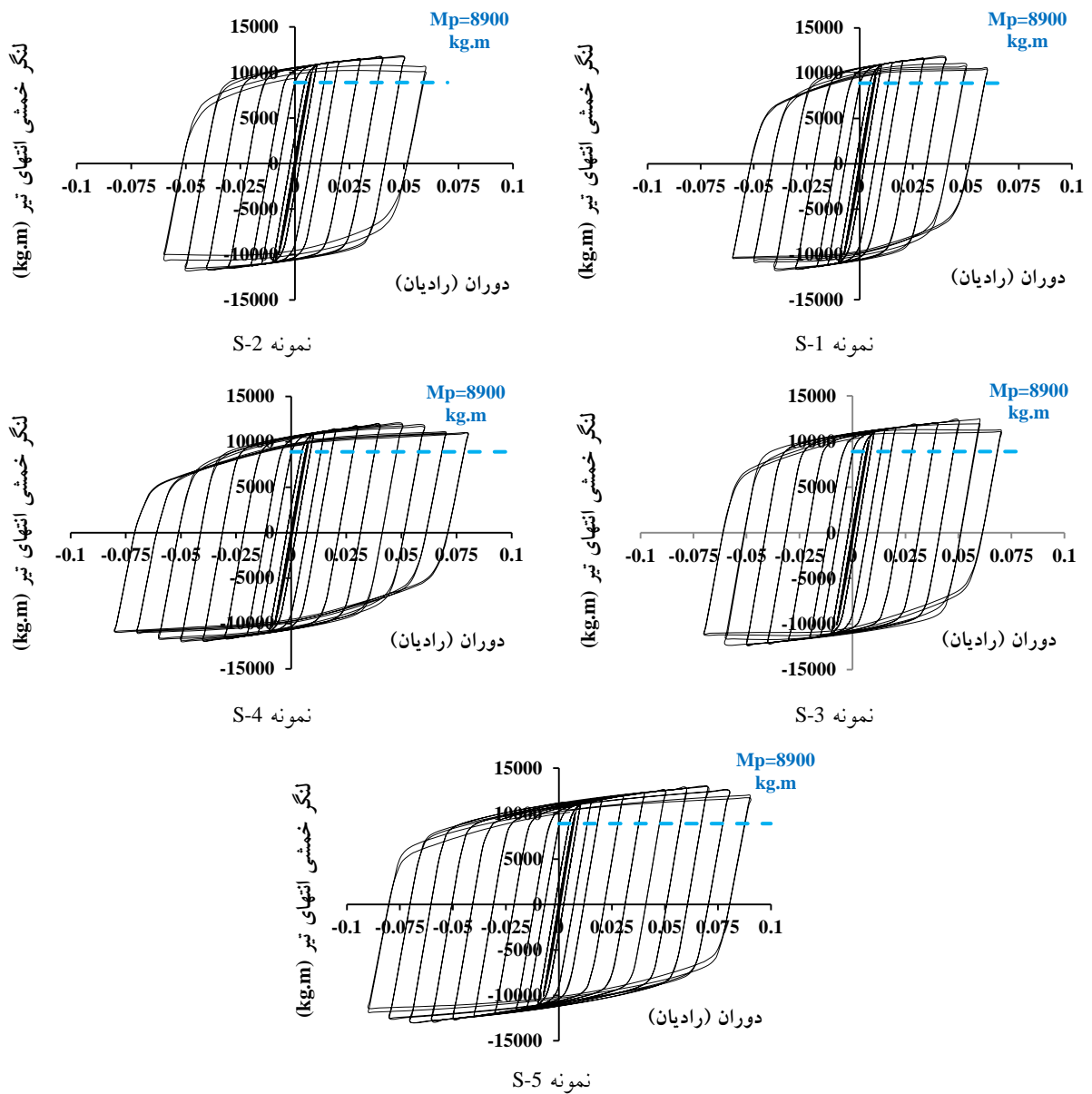
(ب) بارگذاری چرخه‌ای



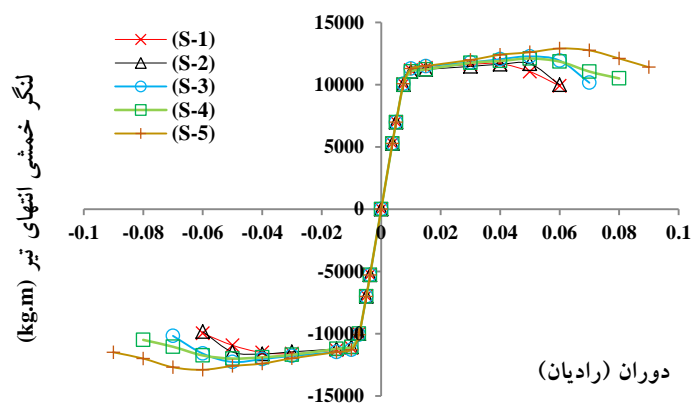
نمونه S-5

(الف) بارگذاری یکنواخت

شکل (۴): توزیع تنش تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت در نمونه‌ها



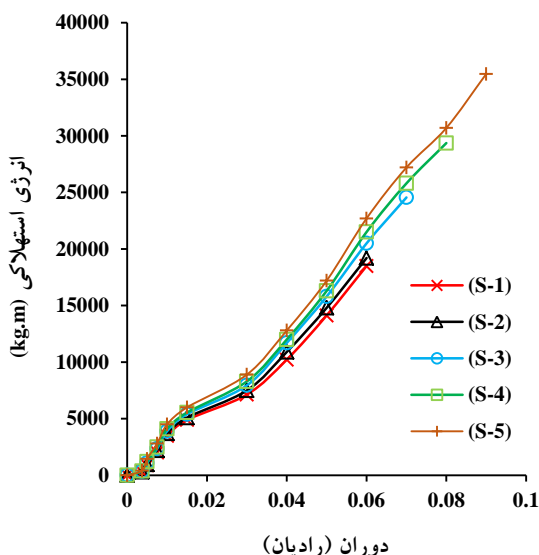
شکل (۵): نمودار هیسترسیز (لنگر خمشی-دوران)



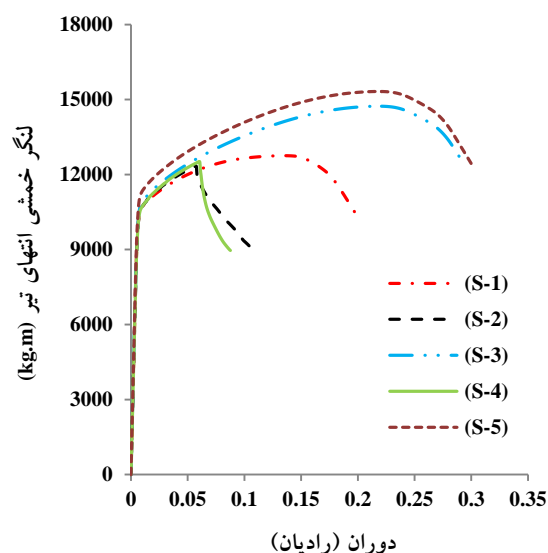
شکل (۶): نمودار پوش (لنگر خمشی-دوران) تحت بارگذاری چرخه‌ای







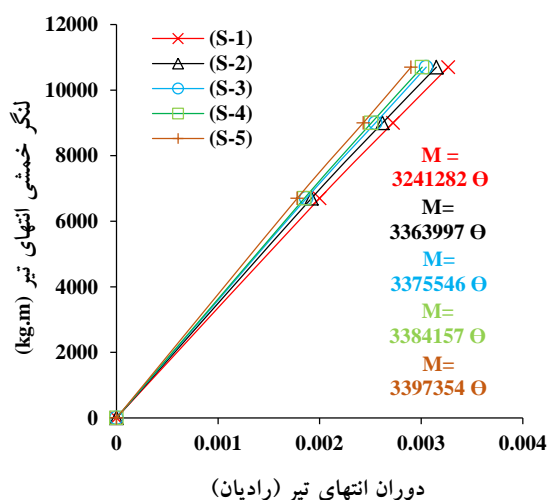
شکل (۸): مقایسه انرژی استهلاکی



شکل (۷): نمودار (لنگر خمشی-دوران) در بارگذاری یکنواخت

### ۲-۵-۳- سختی دورانی

عملکرد اتصالات خمشی در حالت الاستیک، با بررسی و مقایسه میزان سختی دورانی قابل تشخیص و ارزیابی می‌باشد. با مقایسه نمودار (لنگر خمشی-دوران) در ناحیه الاستیک برای تمامی نمونه‌ها و استخراج معادلات مربوطه مطابق با شکل (۹)، میزان سختی دورانی با تغییری ناچیز در میان اتصالات بارگذاری شده مشاهده شد. مطالب مذکور، تاثیر ناچیز سخت‌کننده جان تیر بر رفتار الاستیک اتصال را تایید می‌نماید.



شکل (۹): نمودار (لنگر خمشی-دوران) در ناحیه الاستیک

### ۲-۵-۲- انرژی استهلاکی

عملکرد لرزه‌ای، شکل پذیری و مقاومت جانبی قاب‌های خمشی، با تعیین و مقایسه میزان استهلاک انرژی قابل ارزیابی می‌باشد. به عبارت دیگر، سازه‌هایی با توانایی استهلاک میزان بیشتری از انرژی اعمال شده، ضمن شکل‌پذیری بالا، از رفتار لرزه‌ای مناسب‌تری برخوردار می‌باشند.

در بارگذاری چرخه‌ای، با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و خارج از ناحیه اتصالی، قابلیت استهلاک میزان چشمگیر انرژی برای تمامی نمونه‌های تحت مطالعه فراهم شد. با توجه به سطح زیر نمودار هیسترسیز (لنگر خمشی-دوران) برای هر نمونه، میزان استهلاک انرژی در هر دامنه از بارگذاری چرخه‌ای در شکل (۸) مقایسه شده است. مطابق با شکل ۸، با بکارگیری سخت‌کننده در جان تیر، میزان استهلاک انرژی در نمونه‌های (S-2)، (S-3)، (S-4) و (S-5) نسبت به نمونه (S-1) به ترتیب تا ۱/۰۴، ۱/۳۲، ۱/۵۸ و ۱/۹ برابر افزایش یافت. نتیجه مذکور، تاثیر غیر قابل اغماض بکارگیری سخت‌کننده جان تیر بر رفتار غیر الاستیک اتصال را تایید می‌نماید.

## ۲-۵-۴- چشمه اتصال

ستون و  $V_{PZ}$ : نیروی برشی در ناحیه چشمه اتصال بوده و در شکل (۱۱-ب)؛  $M_{Ic}$  و  $M_{Ibc}$ : لنگر خمشی منتقل شده از ستون فوقانی و تحتانی،  $M_{Ib}$  و  $M_{Ib}$ : لنگر خمشی منتقل شده از تیر سمت راست و چپ ستون و  $V_{Ib}$  و  $V_{Ib}$ : نیروی برشی منتقل شده از تیر سمت راست و چپ ستون می‌باشند.

## ۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضمن مطالعه‌ای تحلیلی، تاثیر بکارگیری سخت‌کننده جان تیر بر رفتار اتصال تیر فولادی به ستون CFT توسط صفحه انتهایی و میل‌مهارهای عبور کننده از درون ستون مطالعه شد. با تکیه بر هدف اصلی تحقیق، ۵ نمونه با تعداد و چیدمانی مختلف از سخت‌کننده جان تیر، در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفتند. لازم بذکر است که سخت‌کننده‌های جان، در محل انتهایی صفحه لچکی و نیز در فاصله ۱۰ سانتیمتری از آن در یک و دو طرف تیر نصب گردیدند. نتایج حاصل از تحلیل، تاثیر قابل ملاحظه بکارگیری سخت‌کننده جان بر رفتار اتصال تحت مطالعه را اثبات نمود. خلاصه‌ای از جزئیات نتایج به صورت زیر تشریح شده است:

۱- با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و خارج از ناحیه اتصال، رفتار لرزه‌ای مناسب و امکان تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی برای تمامی نمونه‌ها فراهم شد.

۲- با بکارگیری سخت‌کننده در جان تیر، باربری لرزه‌ای اتصال مطالعه شده افزایش یافت. این در حالیست که استفاده از سخت‌کننده در طرفین جان، امکان عملکرد لرزه‌ای مناسبتری نسبت به سایر حالات را فراهم نمود.

۳- میزان استهلاک انرژی در حالات استفاده از تک سخت‌کننده در یکطرف جان، تک سخت‌کننده در دو طرف جان، جفت سخت‌کننده در یکطرف جان و جفت سخت‌کننده در دو طرف جان نسبت به حالت بدون سخت‌کننده به ترتیب تا ۱/۰۴، ۱/۳۲، ۱/۵۸ و ۱/۹ برابر افزایش یافت. موارد مذکور تاثیر قابل ملاحظه بکارگیری

نمودار هیسترسیز (نیروی برشی- کرنش برشی) در ناحیه چشمه اتصال برای نمونه‌های (S-1) تا (S-5) در شکل (۱۰) رسم شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده، عملکرد پایدار و رفتار الاستیک ناحیه چشمه اتصال برای هر ۵ نمونه بارگذاری شده، قابل مشاهده می‌باشد.

لازم بذکر است که با توجه به مرجع [۱۸]، مقادیر مربوط به محورهای افقی (کرنش برشی) و قائم (نیروی برشی) نمودارهای رسم شده، به صورت زیر محاسبه شده است؛ با در نظر گرفتن شکل (۱۱-الف) بعنوان ناحیه چشمه اتصال و با فرض نقطه C به عنوان مبدا سیستم مختصات محلی، پارامترهای  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$  به ترتیب از روابط (۲) و (۳) استخراج می‌گردد؛

$$\Delta_1 = \sqrt{(D_x - A_x)^2 + (D_y - A_y)^2} \quad (2)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{(B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2} \quad (3)$$

با توجه به معادلات (۳) و (۴)، مقادیر کرنش برشی در هر گام از بارگذاری چرخه‌ای به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد؛

$$\theta_{PZ} = 0.5 \times \left[ \text{Arcsin} \left( \frac{\Delta_2 (2d + \Delta_2)}{2 \times d_b \times b_c} \right) + \text{Arcsin} \left( \frac{-\Delta_1 (2d - \Delta_1)}{2 \times d_b \times b_c} \right) \right] \quad (4)$$

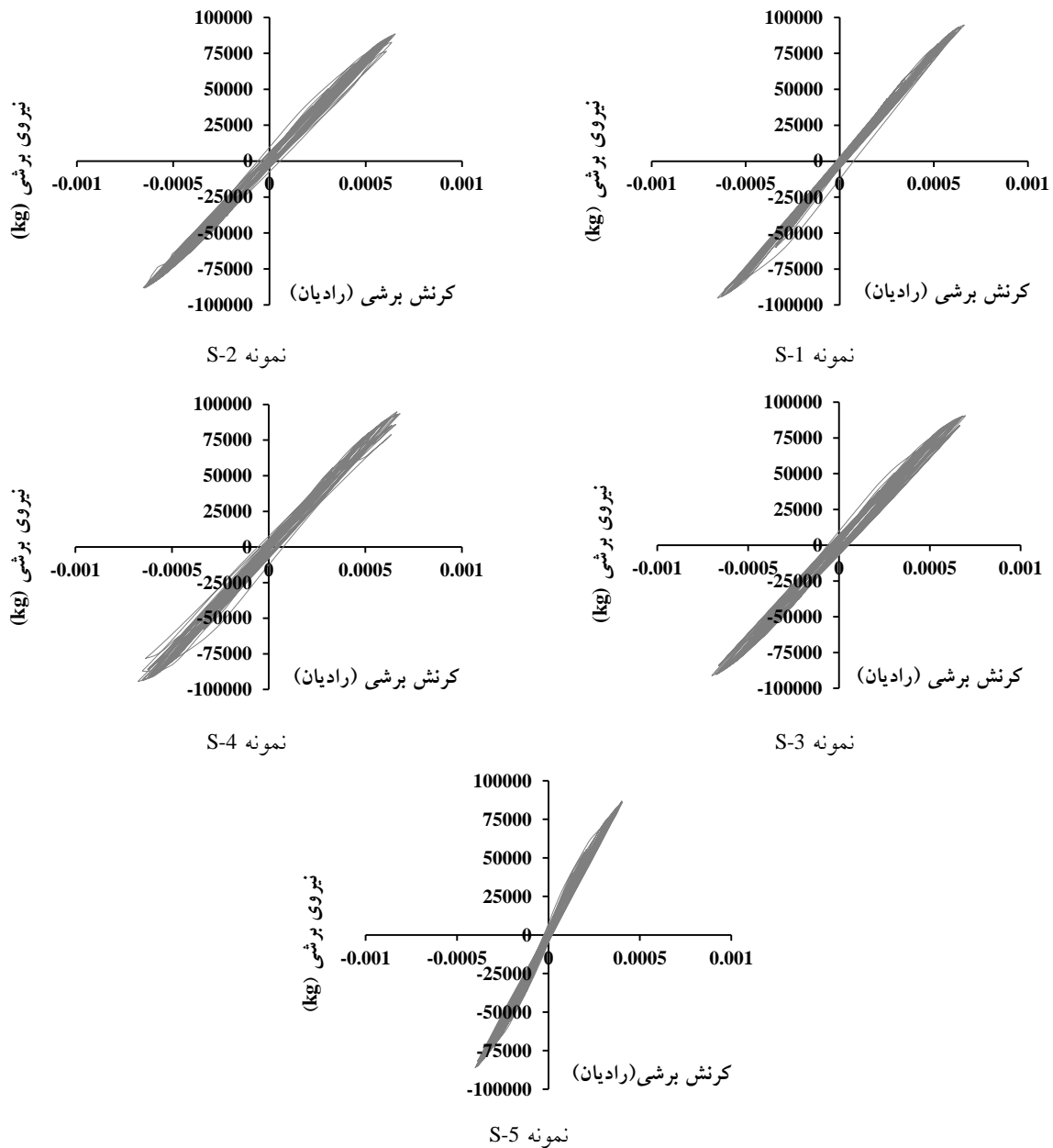
در این رابطه؛  $\theta_{PZ}$ : کرنش برشی چشمه اتصال، d: قطر ناحیه چشمه اتصال،  $d_b$ : ارتفاع تیرهای متصل شده و  $b_c$ : عرض ستون می‌باشند.

با فرض انتقال کامل لنگر خمشی تنها از بال‌های تیر، دیگرام جسم آزاد ناحیه چشمه اتصال مطابق با شکل (۱۱-ب) در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل نیروی برشی مربوط به ناحیه چشمه اتصال با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

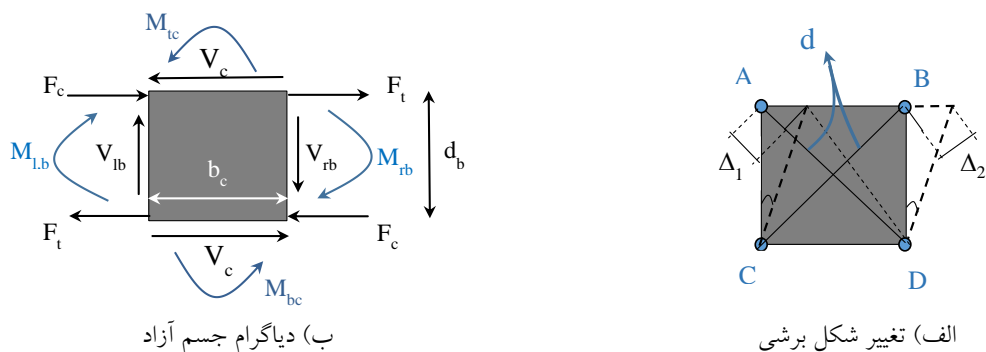
$$V_{PZ} = F_t + F_c - V_c \quad (5)$$

در رابطه ۵؛  $F_t$ : نیروی کششی منتقل شده از بال تیر،  $F_c$ : نیروی فشاری منتقل شده از بال تیر،  $V_c$ : نیروی برشی





شکل (۱۰): نمودار هیسترسیز (کرنش برشی-نیروی برشی) در چشمه اتصال



شکل (۱۱): نمایش تغییر شکل برشی و دیاگرام جسم آزاد در ناحیه چشمه اتصال

[8] Swanson, J.A. and Leon, R.T. (2000), "Bolted Steel Connections: Tests on T-Stub Components", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, pp. 50-56.

[9] Swanson, J.A. and Leon, R.T. (2001), "Stiffness Modeling of Bolted T-Stub Connection Components", Journal of Structural Engineering, Vol. 127, pp. 498-505.

[10] Li, X., Xiao, Y. and Wu, Y. (2009), "Seismic Behavior of Exterior Connections with Steel Beams Bolted to CFT Columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 1438-1446.

[11] Sheet, I.S., Gunasekaran, U. and MacRae, G.A. (2013), "Experimental Investigation of CFT Column to Steel Beam Connections under Cyclic Loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 86, pp. 167-182.

[12] Azizinamini, A. and Schneider, S.P. (2004), "Moment Connections to Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns", Journal of Structural Engineering, Vol. 130, pp. 213-222.

[13] Kataoka, M.N. and El Debs, A.L.H.C. (2014), "Parametric Study of Composite Beam-Column Connections using 3D Finite Element Modelling", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 102, pp. 136-149.

[14] AISC.(2010), "prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications", ANSI/AISC 358-10, Chicago: American Institute of Steel Construction.

[15] Hu, J.-W., Kang, Y.-S., Choi, D.-H. and Park, T. (2010), "Seismic Design, Performance, and Behavior of Composite-Moment Frames with Steel Beam-to-Concrete Filled Tube Column connections", International Journal of Steel Structures, Vol. 10, pp. 177-191.

[16] AISC 341-10 . (2010), "Seismic Provision for Structural Steel Buildings", Chicago: American Institute of Steel Construction.

[17] Applied Technology Council. (1992), "Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures", ATC-24, Redwood City, CA.

[18] Hashemi, B.H. and Jazany, R.A. (2012), "Study of Connection Detailing on SMRF Seismic Behavior for Unequal Beam Depths", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 68, pp. 150-164.

سخت‌کننده جان تیر بر رفتار غیر الاستیک اتصال مطالعه شده را تایید می‌نماید.

۴- وجود و عدم وجود سخت‌کننده در جان تیر و تغییر در چینش آن، تاثیر قابل توجهی بر میزان سختی دورانی و در نتیجه رفتار اتصال در حالت الاستیک نداشت.

۵- ضمن عدم مشاهده تغییر شکل‌های غیر الاستیک، ناحیه چشمه اتصال برای تمامی نمونه‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای پایدار باقی ماند.

۶- استفاده از تک و دو سخت‌کننده در طرفین جان تیر نسبت به حالت بدون سخت‌کننده، باربری اتصال مطالعه شده را تحت بارگذاری یکنواخت به  $1/5$  و  $1/15$  برابر افزایش داد. این در حالیست که بکارگیری سخت‌کننده در یکطرف جان، عملکرد سیستم اتصالی را تحت شیوه‌ای ترد تضعیف نمود.

#### ۵- مراجع

[1] Wilkinson, S., Hurdman, G. and Crowther, A. (2006), "A Moment Resisting Connection for Earthquake Resistant Structures", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 295-302.

[2] Tao, Z. and Han, L.-H. (2006), "Behaviour of Concrete-Filled Double Skin Rectangular Steel Tubular Beam-Columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 631-646.

[3] Shin, K.-J., Kim, Y.-J. and Oh, Y.-S. (2008), "Seismic Behaviour of Composite Concrete-Filled Tube Column-to-Beam Moment Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, pp. 118-127.

[4] Alostaz, Y.M. and Schneider, S.P. (1996), "Analytical Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 40, pp. 95-127.

[5] Kang, C.-H., Shin, K.-J., Oh, Y.-S. and Moon, T.-S. (2001), "Hysteresis Behavior of CFT Column to H-Beam Connections with External T-Stiffeners and Penetrated Elements", Engineering structures, Vol. 23, pp. 1194-1201.

[6] Zhang, D., Gao, S. and Gong, J. (2012), "Seismic Behaviour of Steel Beam to Circular CFST Column Assemblies with External Diaphragms", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 76, pp. 155-66.

[7] Wang, W., Chen, Y., Li, W. and Leon, R.T. (2011), "Bidirectional Seismic Performance of Steel Beam to Circular Tubular Column Connections with Outer Diaphragm", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 40, pp. 1063-1081.

