

# تحلیل اتصال مرکزگرای پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده در سازه‌های فولادی

محمد رضا بهاری، دانشیار مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
سیدحسین امام، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
محبوبه میرزایی علی‌آبادی، دانشجوی دکترای زلزله، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

## چکیده

**کلیدواژه‌ها:** اتصال پای ستون، میلگرد پس کشیده، میراگر  
انرژی، سازه‌های فولادی

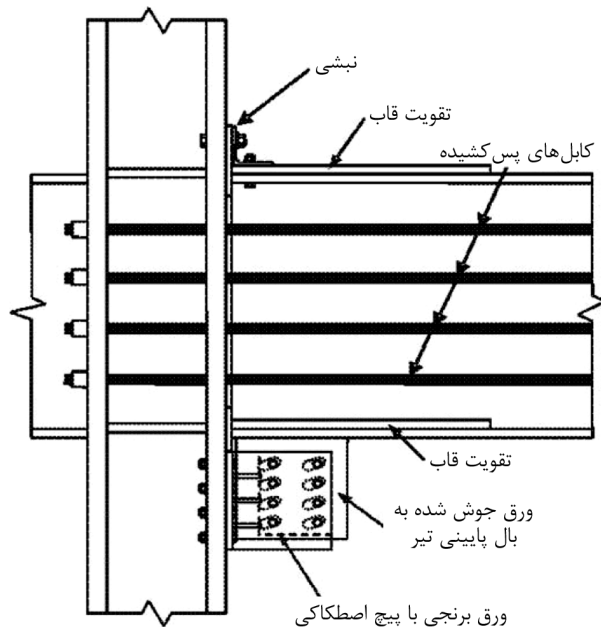
### ۱- مقدمه

اتصال پای ستون مرکزگرا با استفاده از میلگرد پس کشیده<sup>۱</sup> در قابهای خمشی و به منظور بهسازی سازه‌های آسیب دیده در زلزله‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده، ستون وارد ناحیه غیرخطی نمی‌شود. همچنین این اتصال، رفتار قابهای خمشی مرکزگرا<sup>۲</sup> که تاکنون توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است را بهبود می‌بخشد [۱]. این اتصال از، میلگردهای پس کشیده با مقاومت بالا و ورقهای مقاوم در برابر کمانش<sup>۳</sup> (ورقهای *BRS*)، تشکیل شده است. در این اتصال تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای<sup>۴</sup>، مرز مشترک بین تیر و ستون باز شده و این بازشدگی باعث می‌شود ورقهای مقاوم در برابر کمانش وارد ناحیه غیرخطی گردند و مفصل پلاستیک در این ناحیه تشکیل شود. غیرخطی شدن ورقهای مقاوم در برابر کمانش باعث استهلاک انرژی وارده از سوی زلزله به اتصال می‌شوند. از این رو، این ورقها میراکننده انرژی نیز نامیده می‌شوند. میلگردهای پس کشیده نیز وظیفه بازگرداندن ستون به موقعیت قبلی خود و به اصطلاح مرکزگرا نمودن اتصال را بر عهده دارند [۱]. این مقاله به معرفی این اتصال و بررسی تحلیلی پارامترهای مختلف مؤثر بر روی رفتار لرزه‌ای این اتصال می‌پردازد.

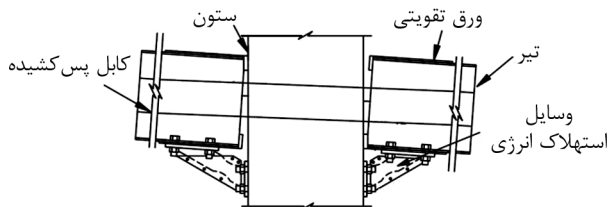
هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار لرزه‌ای اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده در سازه‌های فولادی می‌باشد. استفاده از این نوع اتصال در پای ستون سازه‌های فولادی باعث می‌شود، مفصل پلاستیک پای ستون که عامل مخربی برای سازه‌ی فولادی می‌باشد، حذف گردیده و تغییرشکل‌های پلاستیک در میراگر انرژی بوجود آید. میلگردهای مورد استفاده در این اتصال دارای مقاومت بالا بوده و نیروی پس کشیدگی اولیه در میلگردها می‌تواند سازه را به حالت قبل از زلزله بازگرداند. به منظور به دست آوردن رفتار اتصال، اتصال مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار مهندسی زلزله *OpenSees* مدل شده است. مدل ساخته شده در این نرم‌افزار تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای ذکر شده در آیین‌نامه‌ی *AISC* قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، که اتصال علاوه بر استهلاک مناسب انرژی زلزله، هیچ‌گونه تغییر مکان نسبی باقیمانده در سازه به جای نمی‌گذارد. در این تحقیق تأثیر قطر میلگرد پس کشیده، میزان نیروی پس کشیدگی میلگردها و همچنین ابعاد مختلف میراگر انرژی بر عملکرد اتصال مد نظر می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش قطر و نیروی پس کشیدگی میلگرد باعث افزایش نیروی مورد نیاز برای ایجاد بازشدگی می‌گردد. افزایش ابعاد میراکننده انرژی باعث افزایش نیروی مورد نیاز برای ایجاد بازشدگی و افزایش میزان استهلاک انرژی توسط اتصال می‌گردد. همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد مفصل پلاستیک پای ستون و خرابی ایجاد شده در اعضای اصلی سازه، می‌توان این نوع اتصال را جایگزین اتصالات متعارف پای ستون نمود.

## ۲- مرور ادبیات فنی

می‌دهد. میراگرهای انرژی بعد از پس کشیدگی کابلها، به ستون و تیر متصل می‌شوند. تسایی و همکاران [۱۰] و اینویو و همکاران [۱۱] نیز تحقیقات مشابهی در این زمینه انجام دادند.



شکل (۱): اتصال تیر به ستون با استفاده از میراگر اصطکاکی در زیر تیر [۶].



شکل (۲-الف): اتصال تیر به ستون با استفاده از وسایل استهلاک در زیر تیر [۹].



مقطع شماره ۲

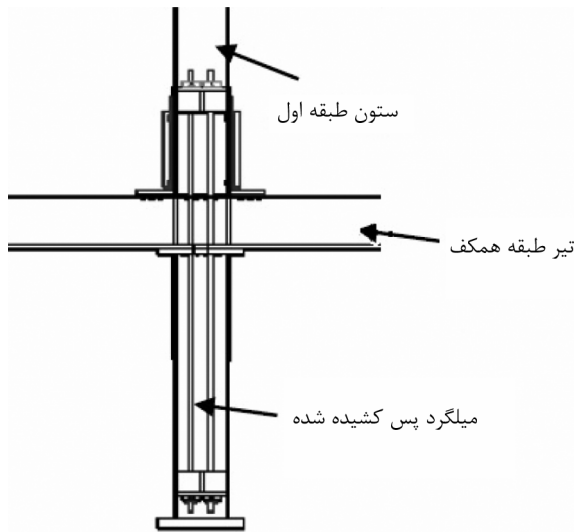
مقطع شماره ۱

شکل (۲-ب): انواع وسایل استهلاک در زیر تیر [۹].

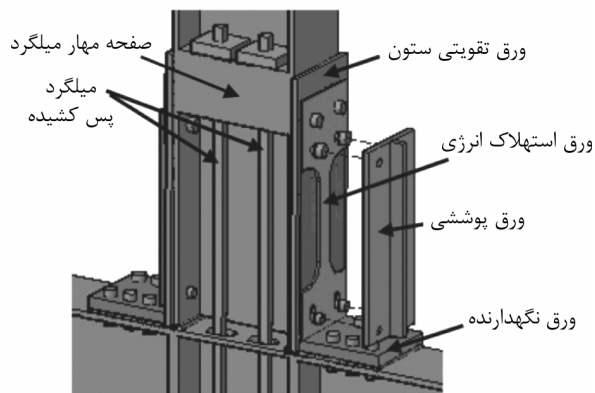
ممکن است پایه‌های ستون در سیستم‌های مرکز گرا به دلیل ایجاد مفاصل پلاستیک آسیب ببینند. این آسیبها به دلیل تغییرشکل‌های باقیمانده دائمی در سازه می‌باشد. برای حذف آسیب سازه‌ای در ستونها و ایجاد خاصیت مرکزگرایی

اولین بار سیستم‌های قاب خمشی فولادی با میلگردها یا کابل‌های پس کشیده توسط رایکلز و همکاران [۲] و گارلوک [۳] ارائه شد. به این نوع قابها در اصطلاح قابهای خمشی مرکزگرا گویند. خاصیت مرکزگرا بودن قاب به این معنی است که بعد از زلزله تغییرمکان نسبی<sup>۵</sup> ماندگار در سازه وجود ندارد و سازه بعد از زلزله به حالت اولیه خود باز می‌گردد. تیرها و ستونها در قابهای خمشی مرکزگرا توسط وسایل استهلاک انرژی و کابل‌های پس کشیده به یکدیگر متصل می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی توسط رایکلز و همکارانش [۴] و همچنین گارلوک و همکارانش [۵] روی اتصال تیر به ستون با استفاده از کابل پس کشیده نشان داد که این اتصال علاوه بر مرکزگرا بودن قاب، مقداری از انرژی زلزله وارده را نیز تلف می‌کند تا از آسیبهای محلی مانند کماتش بال و جان تیر و شکست در نواحی مختلف اتصال جلوگیری شود. همچنین مطالعات تحلیلی بر روی سیستم قاب خمشی مرکزگرا [۳] نشان داد که این سیستم‌ها سختی جانبی اولیه‌ای مشابه با قابهای خمشی فلزی با اتصالات جوشی متعارف دارند. با توجه به تحقیقات انجام گرفته، ولسکی [۶] اتصال تیر به ستون با استفاده از صفحه اصطکاکی برنجی قرار گرفته در زیر بال تیر را مورد بررسی قرارداد، شکل (۱). علت استفاده از صفحه اصطکاکی برنجی در زیر بال تیر، جلوگیری از تداخل صفحه استهلاک انرژی با دال مرکب قرار گرفته بر روی تیر می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان داد که میراگر اصطکاکی قرار گرفته در زیر بال تیر در اتصالات با استفاده از میله پس کشیده، استهلاک انرژی مناسبی دارند و پس از زمین‌لرزه تغییرمکان نسبی ماندگار در سازه وجود ندارد. لایی [۷] نیز به جای میراگر اصطکاکی برنجی، از قطعات فلزی که تحت اثر زلزله تسلیم می‌شوند، استفاده نمود. در این مورد نیز استهلاک انرژی با تسلیم این میراگر اصطکاکی فلزی در اتصال ایجاد گردید.

چو و چن [۸] و چو و همکاران [۹] دو صفحه عمود بر هم به صورت ضربدری قرار گرفته در پایین تیر را بررسی نمود. جزئیات این دو اتصال در شکل (۲-الف) آورده شده است. شکل (۲-ب) انواع میراگرهای ارائه شده توسط چو را نشان



شکل (۴): شمای کلی اتصال مورد نظر در یک اتصال پای ستون [۱].



شکل (۵): جزئیات اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده [۱].

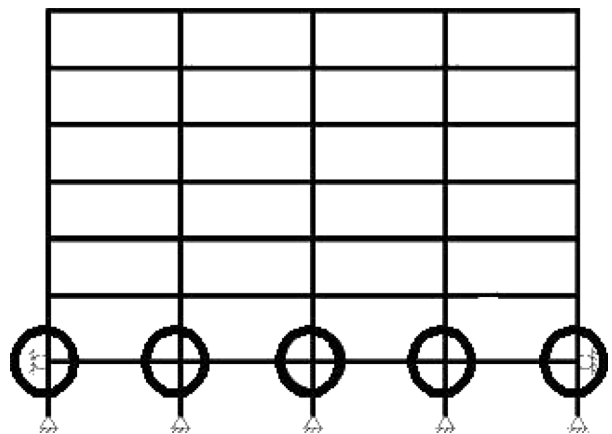
برش حاصل از این زمین لرزه در طبقه اول، بین ستونهای این طبقه توزیع می‌گردد. این برش در بالای هر ستون باعث دوران ستون و توزیع لنگر و برش در پای ستون می‌گردد. صفحات میراگر انرژی که به بال ستون متصل شده‌اند، انرژی ورودی از سوی زلزله را جذب و اتلاف می‌کنند. استهلاک انرژی توسط تسلیم مقطع *BRS* و از طریق بازشدگی ایجاد شده بین تیر و ستون رخ می‌دهد و در نهایت ظرفیت خمشی پای ستون افزایش می‌یابد. صفحات نگهدارنده نشان داده شده در شکل (۵) در برابر برش انتقالی مقاومت می‌نمایند.

مقاومت خمشی اتصال پای ستون پس کشیده با فاکتورهای ذیل تعیین می‌شود:

اتصال، اتصال پای ستون پس کشیده ارائه شده است [۱]. این مقاله، ابتدا به معرفی اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده می‌پردازد و سپس مطالعه تحلیلی این اتصال و تأثیر عوامل مختلف بر رفتار لرزه‌ای اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده توسط نرم‌افزار *OpenSees* را ارائه می‌نماید.

### ۳- معرفی اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده

دلیل اصلی کاربرد اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده، حذف مفصل پلاستیک پای ستون می‌باشد. حذف مفصل پلاستیک پای ستون بوسیله ایجاد بازشدگی در محل اتصال ستون طبقه اول با تیر طبقه همکف انجام می‌شود. محل اجرای این اتصال در قاب در شکل (۳) و شمای کلی اتصال در شکل (۴) ارائه شده است. اجزای این اتصال، شامل میلگرد پس کشیده با مقاومت بالا، صفحات با مقطع کاهش یافته جهت اتلاف انرژی و المانهای نگهدارنده مقاوم در برابر برش در شکل (۵) نشان داده شده است [۱].

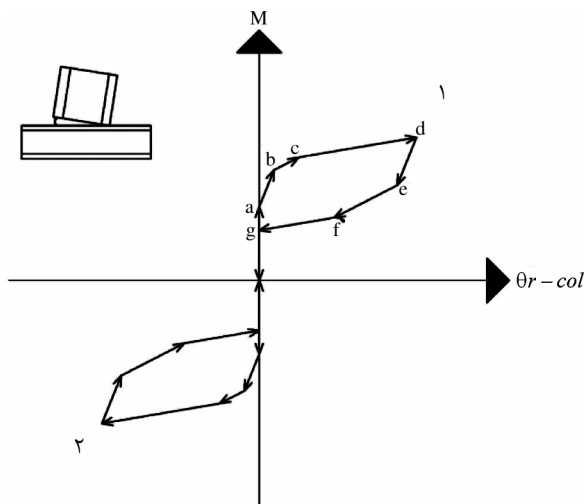


شکل (۳): محل اتصال مورد نظر در قاب [۱].

میلگردهای پس کشیده به صورت قائم و موازی ستون قرار داده شده‌اند و از وسط ارتفاع ستونهای طبقه اول تا انتهای ستونهای پایه نصب گردیده‌اند. جهت انتقال نیروی پس کشیدگی میلگردها به ستون، از صفحاتی که به بال و جان ستون جوش داده می‌شوند، استفاده می‌گردد، شکل (۵). در اثر اعمال زلزله، نیروی برشی بین طبقات سازه تقسیم می‌شود.

دوران اتصال پای ستون توسط باز و بسته شدن سطح مشترک بین تیر طبقه همکف و ستون قرار گرفته بر روی آن مشخص می‌گردد.

در اثر اعمال بار جانبی در بالای ستون، لنگر خمشی در پای ستون افزایش می‌یابد. این روند افزایش لنگر تا جایی ادامه می‌یابد که لنگر خمشی پای ستون از مقاومت خمشی ناشی از پس کشیدگی میلگرد و نیروی محوری ستون بیشتر می‌شود. در این لحظه فشار وارد بر اتصال از بین رفته و یا بازشدگی در مرز مشترک بین تیر و ستون به وجود می‌آید. لنگر خمشی که باعث به وجود آمدن این بازشدگی می‌گردد، به عنوان لنگر خمشی معادل فشار وارد بر پای ستون در نظر گرفته می‌شود. نقطه  $a$  در نمودار شکل (۷) مربوط به لنگر خمشی معادل فشار وارد بر پای ستون می‌باشد. سختی اولیه اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده قبل از ایجاد بازشدگی مشابه سختی اتصال صلب می‌باشد.



شکل (۷): نمودار لنگر- دوران اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده.

بعد از غلبه بر مقاومت خمشی اتصال ناشی از بارهای ثقلی و نیروی پس کشیدگی اولیه میلگرد، با افزایش بار جانبی، ستون نسبت به سطح تماسش با تیر دوران می‌کند و زاویه چرخش نسبی بین ستون و تیر طبقه اول در اثر بازشدگی به وجود می‌آید. با به وجود آمدن بازشدگی بین تیر و ستون به دلیل بار جانبی اعمالی، میلگردهای پس کشیده و ورقهای

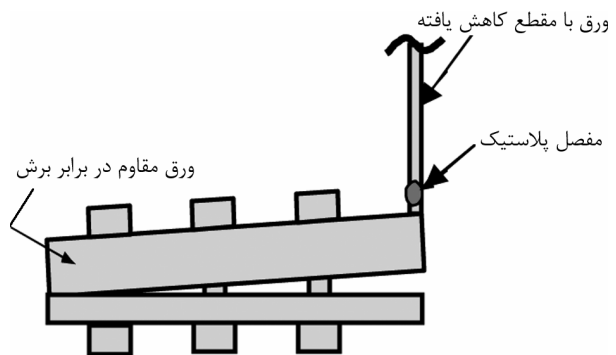
۱. نیروی پس کشیدگی اولیه در میلگردهای با مقاومت بالا؛

۲. نیروی محوری ثقلی اولیه ناشی از بارهای مرده و زنده؛

۳. مقاومت و سختی صفحات اتلاف‌کننده انرژی؛

۴. سختی محوری میلگردهای پس کشیده.

نیروی پس کشیدگی اولیه در میلگردهای این اتصال باید طوری تعیین شود که این میلگردها برای سطح خطرهای زلزله حداکثر مورد انتظار و زلزله طرح، الاستیک باقی بمانند. همچنین میلگردهای با مقاومت بالا، برای تأمین مرکزگرایی و بازگرداندن ستون به حالت قبلی خود طراحی می‌شوند. استهلاک انرژی زلزله با استفاده از تغییرشکل‌های غیرارتجاعی ورقهای  $BRS$  انجام می‌گردد. تغییرشکل غیرارتجاعی این ورقها به وسیله ایجاد مفصل پلاستیک در آنها بوجود می‌آید، شکل (۶).



شکل (۶): محل تشکیل مفصل پلاستیک در ورق با سطح مقطع کاهش یافته [۱].

نیاز برشی در ستون عموماً بیشتر از نیروی اصطکاک به وجود آمده بین مقطع ستون و بال تیر طبقه است. بنابراین به یک المان مقاوم برشی (که به باز شدن سطح تماس بین ستون و تیر کمک می‌کند) در پایه‌های ستون نیاز می‌باشد. برای این منظور صفحه‌های نگهدارنده که مقاومت برشی اضافی را تحمل می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۴- بررسی رفتار اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده

در شکل (۷)، نمودار لنگر- دوران اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده ارائه شده است. رفتار لنگر-

جدول (۱): المانهای مورد استفاده در نرم‌افزار OpenSees [۱۲].

المان در نرم‌افزار	المان سازه‌ای
تیر- ستون خطی	تیرها
تیر- ستون خطی	ستونها
خرپا	میلگردهای پس کشیده
خرپا	وسيله استهلاك انرژی
خرپا	صفحه برشی
المان با طول صفر	بازشدگی

جدول (۲): مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل.

مصالح در نرم‌افزار	مصالح المانهای سازه‌ای
Elastic	تیرها
Elastic	ستونها
Elastic-Perfectly Plastic	میلگردهای پس کشیده
Steel02	صفحه استهلاك انرژی
Steel02	صفحه برشی
Elastic-No Tension	بازشدگی

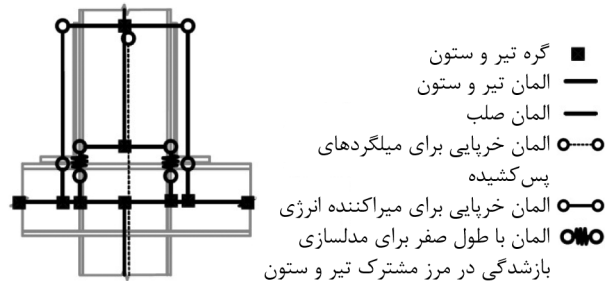
برای مدلسازی بازشدگی به وجود آمده در بین تیر و ستون اتصال از المانهای با طول صفر استفاده شده است که تنها تنشهای فشاری را تحمل می‌کنند و در مقابل کشش عکس‌العملی از خود نشان نمی‌دهند. از المان خرپا نیز برای مدلسازی صفحات استهلاك انرژی و میلگرد پس کشیده استفاده شده است، شکل (۸). برای مدلسازی نیروی پیش کشیدگی در میلگرد از اعمال کرنش اولیه در مصالح آن استفاده می‌شود. به دلیل این که تیرها و ستونها می‌بایست الاستیک باقی بمانند و نیازی به رفتار ناحیه پلاستیک فولاد نمی‌باشد، از مصالح *Elastic* استفاده شده است. نمودار تنش- کرنش برای مصالح مورد استفاده در مدلسازی در اشکال (۹) تا (۱۲) ارائه شده است.

در این قسمت، اتصال تیر به ستون ساخته شده ابتدا تحت اثر بارگذاری ثقلی قرار گرفته و پس از آن تحت بار *Cyclic* بر اساس آیین‌نامه *AISC* قرار می‌گیرد. دامنه تغییر مکانهای اعمالی معادل شده آن در جدول (۳) ارائه شده است.

*BRS* تغییر شکل می‌یابند. در این حالت میلگردهای پس کشیده افزایش طول می‌دهند، این در حالی است که یکی از ورقهای *BRS* افزایش طول داشته و دیگری تحت کاهش طول قرار می‌گیرد. بعد از ایجاد بازشدگی، نیروی محوری اضافی ناشی از افزایش طول میلگردهای پس کشیده و تسلیم ورقهای *BRS* به اتصال پای ستون رسیده و مقاومت خمشی اضافی ایجاد می‌نماید. با ادامه بارگذاری ورقهای *BRS* در نقطه (b) به تسلیم می‌رسند. سختی اتصال پای ستون دارای میلگرد پس کشیده بعد از به وجود آمدن بازشدگی، به سختی محوری میلگردهای پس کشیده و همچنین سختی محوری ورقهای *BRS* وابسته می‌باشد. وقتی که ورقهای *BRS* وارد ناحیه پلاستیک شدند (نقطه c)، این ورقها، سختی خود را از دست می‌دهند و از این پس سختی اتصال وابسته به سختی محوری میلگردهای پس کشیده می‌باشد. باربرداری از نقطه *d* تا نقطه *e*، ورق *BRS* روی شکل (۷) نشان داده شده است. شیب باربرداری با شیب تسلیم ورق *RBS* از *d* تا *f* برابر می‌باشد. در نقطه (g) بازشدگی بین تیر و ستون بسته شده و ستون به موقعیت اولیه خود بدون هیچ‌گونه تغییر شکل ماندگار باز می‌گردد. در حالتی که بار جانبی در جهت معکوس افزایش یابد، رفتار لنگر- دوران مشابه به مراحل *a* تا *g* در ناحیه شماره ۲ که در شکل (۷) نشان داده شده، به وجود می‌آید.

## ۵- مشخصات مدل ساخته شده

اتصال پای ستون پس کشیده توسط نرم‌افزار *OpenSees* مدل شده است، شکل (۸). المانهای مورد استفاده برای مدلسازی، در جدول (۱) و مصالح مورد استفاده در این مدل نیز در جدول (۲) ارائه شده است [۱۲].



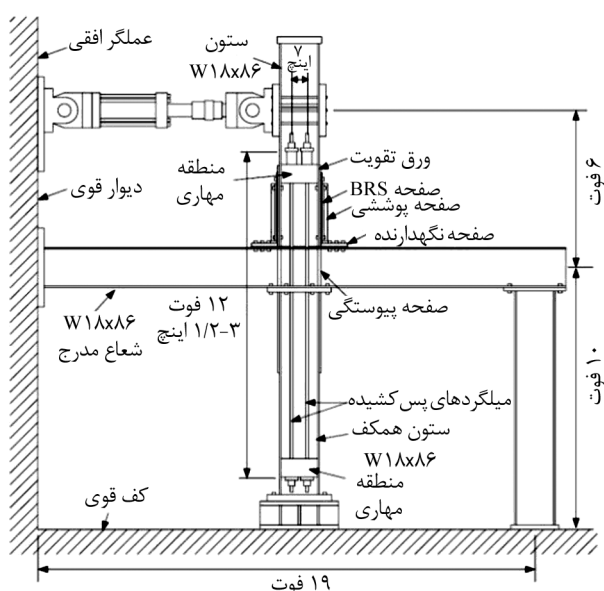
شکل (۸): مدلسازی اتصال با استفاده از نرم‌افزار *OpenSees* به همراه اعضای به کار رفته.

جدول (۳): دامنه تغییر مکانهای اعمالی به بالای ستون [۱۳].

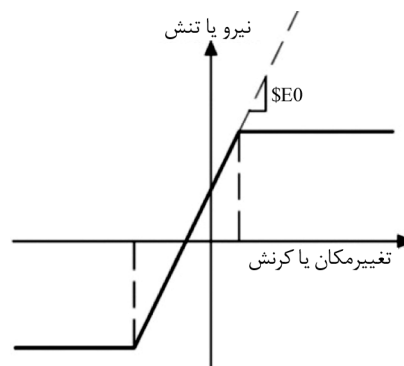
تعداد سیکل	تغییر شکل ستون (میلیمتر)	تغییر مکان نسبی درون طبقه (درصد)
۶	۶۱۸۵۸	۰/۳۷۵
۶	۹/۱۴۴	۰/۵
۶	۱۳/۷۱۶	۰/۷۵
۴	۱۸/۲۸۸	۱/۰
۲	۲۷/۴۳۲	۱/۵
۲	۳۶/۵۷۶	۲/۰
۲	۵۴/۸۶۴	۳/۰
۲	۷۳/۱۵۲	۴/۰
۲	۹۱/۴۴	۵/۰

### ۶- کالیبره نمودن مدل‌سازی

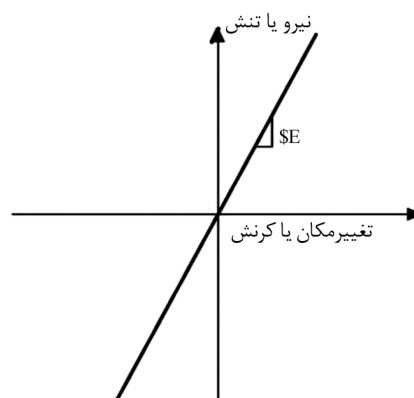
در این مطالعه، جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی رفتار هیستریتیک اتصال پای ستون مدل ساخته شده با نتایج آزمایشات به دست آمده توسط چی و لیو [۱] مقایسه گردیده است. ستاپ آزمایش در شکل (۱۳)، ارائه شده است. این اتصال که شامل چهار عدد میلگرد پس کشیده هر کدام به قطر ۳۰ میلیمتر و نیروی پس کشیدگی اولیه در مجموع آنها برابر ۶۱۳/۸۵ کیلونیوتن می‌باشد، تحت اثر بارگذاری *AISC* در بالای ستون طبقه اول قرار گرفته است. در شکل (۱۴)، منحنی هیستریتیک به دست آمده از تحلیل *OpenSees* با نتایج آزمایش مقایسه شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود،



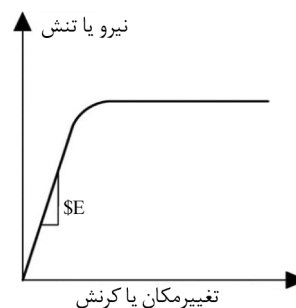
شکل (۱۳): ستاپ آزمایش انجام شده توسط چی و لیو [۱].



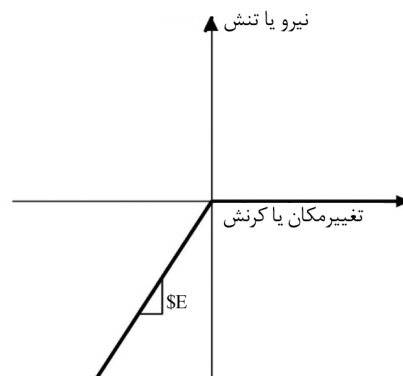
شکل (۹): نمودار تنش-کرنش مصالح Elastic-Perfectly Plastic برای میلگرد پس کشیده.



شکل (۱۰): نمودار تنش-کرنش مصالح Elastic برای المانهای تیر و ستون.

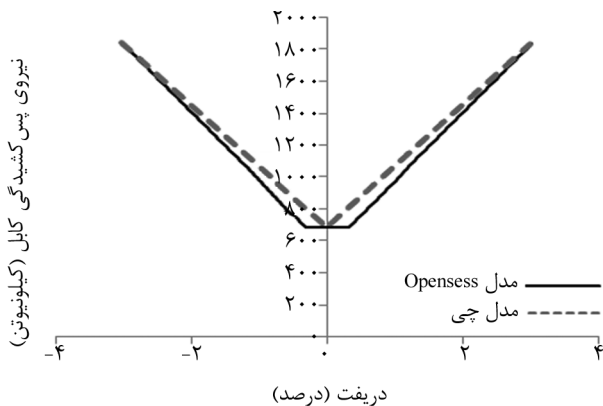


شکل (۱۱): نمودار تنش-کرنش مصالح Steel02 برای میراگرهای انرژی.



شکل (۱۲): نمودار تنش-کرنش مصالح Elastic-No Tension برای مدل‌سازی بازشدگی در مرز مشترک تیر و ستون.

کاملاً تطابق دارند. حداکثر نیرویی که این نوع میلگردها قادر به تحمل آن می‌باشند،  $2466/5$  کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل (۱۶): مقایسه نیروی پس کشیدگی میلگردها.

## ۷- نتایج تحلیل

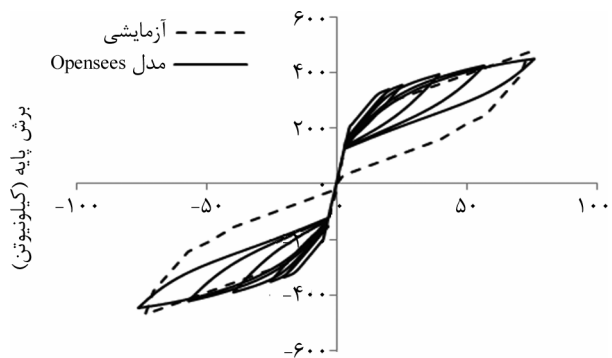
با توجه به صحت مدلسازی ارائه شده که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نتیجه شد، این قسمت به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار اتصال می‌پردازد. پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال پس کشیده پای ستون شامل، مقدار نیروی پس کشیدگی اولیه، ابعاد میلگرد پس کشیده و ابعاد میراکننده انرژی می‌باشند. جزئیات اتصالهای مورد تحلیل در جدول (۴) ارائه شده است. برای مقایسه مقدار نیروی پس کشیدگی بر رفتار اتصال، ابتدا مدلسازی بدون وجود ورقهای میراگر انرژی BRS انجام گرفته است. نتایج

جدول (۴): جزئیات اتصالهای مورد بررسی.

شماره نمونه	نیروی پس-کشیدگی اولیه	قطر میلگرد پس کشیده	مساحت ورق مستهلک کننده انرژی
۱	۶۱۳/۸۵	۳۰	---
۲	۶۱۳/۸۵	۴۰	---
۳	۶۱۳/۸۵	۴۵	---
۴	۶۱۳/۸۵	۵۰	---
۵	۶۱۳/۸۵	۳۰	---
۶	۸۸۹/۶۴	۳۰	---
۷	۱۳۳۴/۴۶	۳۰	---
۸	۱۷۷۹/۲۸	۳۰	---
۹	۶۱۳/۸۵	۳۰	۶۰۰
۱۰	۶۱۳/۸۵	۳۰	۹۰۰
۱۱	۶۱۳/۸۵	۵۰	۶۰۰
۱۲	۱۷۷۹/۲۸	۳۰	۶۰۰

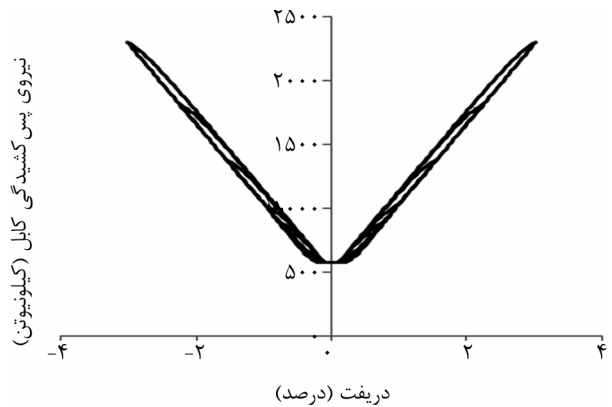
ابعاد تیر و ستون:  $W18 \times 86$

شیب اولیه نمودار که نشاندهنده سختی اولیه اتصال، شیب قسمت غیرخطی که همان سختی میلگردهای پس کشیده می‌باشد و شیب باربرداری در دو منحنی کاملاً با یکدیگر مطابقت داشته و می‌توان از این مدل برای بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال استفاده نمود. همچنین نمودار نیروی میلگرد نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با افزایش تغییرمکان بالای ستون، نیروی درون میلگردها نیز افزایش می‌یابد.



تغییرمکان (میلیمتر)

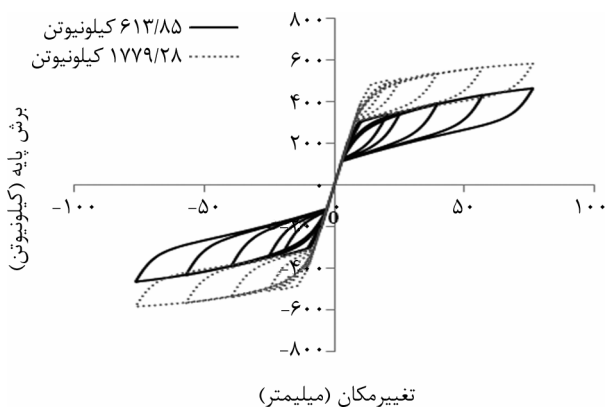
شکل (۱۴): نمودار مقایسه‌ای نیرو-تغییرمکان اتصال پای ستون با استفاده از میلگرد پس کشیده.



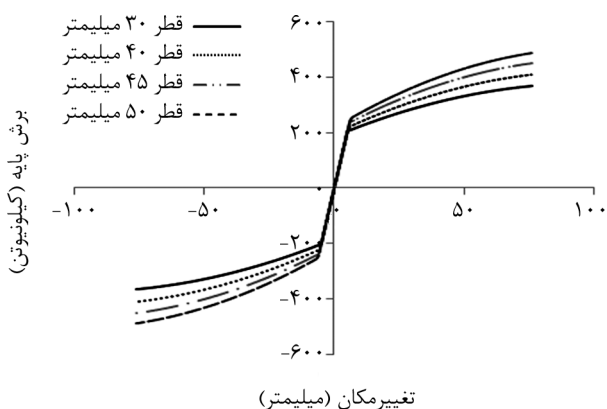
شکل (۱۵): نمودار تغییرات نیروی پس کشیدگی میلگرد.

در شکل (۱۶)، نیروی به وجود آمده در میلگرد پس کشیده در اثر بارگذاری سیکلیک با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که انتظار می‌رود، با افزایش تغییرمکان نسبی، میلگرد افزایش طول داشته و کرنش در میلگردها هم افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش کرنش، نیروی پس کشیدگی درون میلگردها نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۶)، نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی

سختی میلگرد، شیب قسمت غیرخطی اتصال یا شیب خط بین  $c$  تا  $d$  در شکل (۷) افزایش پیدا می‌نماید.



شکل (۱۷): نمودار مقایسه‌ای تأثیر نیروی پس کشیدگی میلگرد بر رفتار هیسترتیک اتصال.



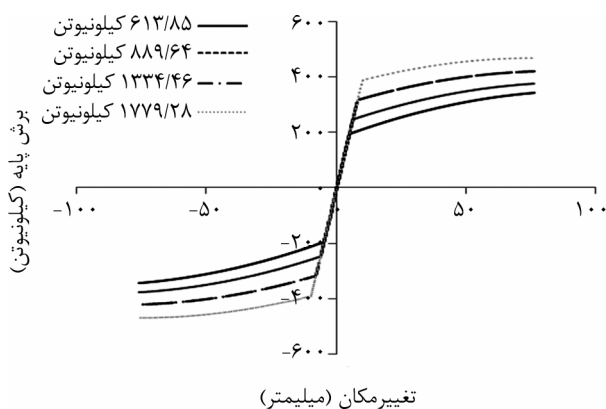
شکل (۱۸): نمودار مقایسه‌ای تأثیر قطر میلگرد بر عملکرد اتصال.

در شکل (۲۰)، منحنی هیسترتیک اتصال برای میلگردهای به قطر ۳۰ و ۵۰ میلیمتر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، که تغییر در ابعاد میلگردهای پس کشیده هیچ تغییری در میزان استهلاک انرژی نداشته و همان‌گونه که انتظار می‌رود، با تغییر قطر میلگرد، سختی میلگردها افزایش یافته و با توجه به شکل شیب ثانویه نمودار افزایش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر ابعاد مختلف صفحه  $BRS$  در رفتار سازه، از صفحه  $BRS$  با مساحت ۶۰۰ میلی‌متر مربع که در مطالعه چی و لیو [۱] آمده و در نمودار با سطح مقطع شماره ۱ نشان داده شده و همچنین صفحه‌ای با مساحت ۹۰۰ میلی‌متر مربع، سطح مقطع شماره ۲ استفاده شده است.

تحلیل‌ها به ازای مقادیر نیروی پس کشیدگی اولیه به ترتیب برابر ۶۱۳/۸۵، ۸۸۹/۶۴، ۱۳۳۴/۴۶ و ۱۷۷۹/۲۸ کیلونیوتن می‌باشد.

با توجه به شکل (۱۷) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نیروی پس کشیدگی در میلگردهای اتصال، مقاومت اتصال در برابر بازشدگی افزایش می‌یابد. طبیعتاً همان‌گونه که در شکل فوق مشخص می‌باشد، تغییر در نیروی پس کشیدگی اولیه تأثیری بر سختی اتصال چه در قسمت خطی و چه در ناحیه غیرخطی نخواهد داشت.



شکل (۱۹): نمودار مقایسه‌ای تأثیر نیروی پس کشیدگی میلگرد بر عملکرد اتصال.

در شکل (۱۸)، مقایسه منحنی هیسترتیک برای اتصال با نیروی پس کشیدگی مختلف ارائه شده است. در این مدل‌سازی میراگرهای انرژی نیز مدل شده‌اند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که میزان استهلاک انرژی در هر دو نمونه یکسان بوده ولی نیروی اولیه مورد نیاز برای ایجاد بازشدگی در مرز مشترک تیر و ستون متفاوت می‌باشد. همچنین سختی اولیه اتصال در هر دو مورد یکسان می‌باشد.

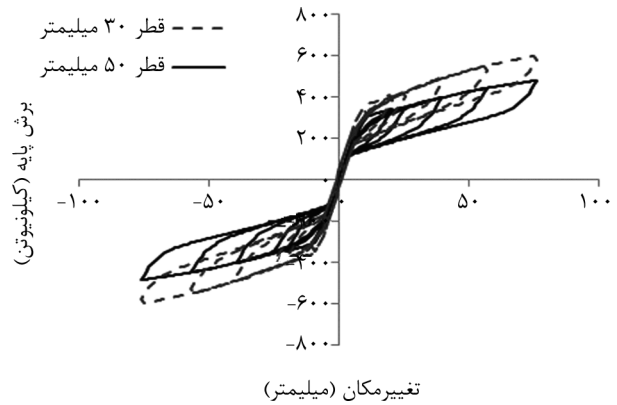
برای بررسی تأثیر قطر میلگرد پس کشیده بر رفتار اتصال، از چهار میلگرد که هر کدام قطری برابر ۳۰، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ میلیمتر دارند، استفاده گردیده است. همان‌گونه که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، با افزایش قطر میلگرد، مقاومت اتصال در برابر بازشدگی افزایش چشمگیری نداشته و با افزایش قطر میلگرد، سختی ناحیه غیرخطی اتصال افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش قطر میلگرد، سختی میلگرد که وابسته به هندسه میلگرد می‌باشد، افزایش یافته و با افزایش



*BRS* می‌باشند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد افزایش نیروی پس کشیدگی اولیه میلگرد باعث افزایش مقاومت اتصال برای ایجاد بازشدگی می‌گردد. همچنین افزایش قطر میلگرد پس کشیده، سختی قسمت غیرخطی اتصال را نیز افزایش می‌دهد. با افزایش ابعاد ورق *BRS*، علاوه بر افزایش نیروی لازم برای ایجاد بازشدگی، میزان استهلاک انرژی (سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان)، افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سختی اولیه این اتصال همانند اتصال گیردار متعارف می‌باشد. سختی اولیه اتصال در حالت‌های مختلف تغییر در قطر، نیروی پس کشیدگی میلگرد و ابعاد ورق استهلاک انرژی یکسان می‌باشد.

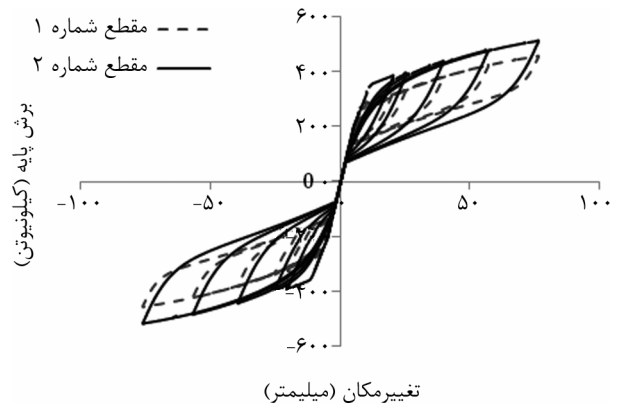
## ۹- مراجع

1. Chi, H. and Liu, J. (2009). Development of post-tensioned column base connection for self-centering seismic resistant steel frame, Thesis For the degree of Doctor of Philosophy, Purdue University, United States.
2. Ricles, J.M., Sause, R., and Garlock, M.M. (2001). Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames, *Journal of Structural Engineering*, **127**(2), 113-121.
3. Garlock, M.M. (2002). Design, analysis, and experimental behavior of seismic resistant posttensioned steel moment resisting frames, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Lehigh Univ., Bethlehem, Pennsylvania.
4. Ricles, J.M., Sause, R., Peng, S.W., and Lu, L.W. (2002). Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections, *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, **128**(7), 850-859.
5. Garlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2005). Experimental studies on full-scale post-tensioned steel connections, *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, **131**(3), 438-448.
6. Wolski, M. (2006). Experimental evaluation of a bottom flange friction device for a self centering seismic moment resistant frame with post-tensioned steel moment connections, M.A. Thesis,



شکل (۲۰): نمودار مقایسه‌ای تأثیر قطر میلگرد بر رفتار هیستریتیک اتصال.

نتایج تحلیل این دو نمونه در شکل (۲۱) قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش ابعاد ورق استهلاک انرژی، شیب اولیه نمودار همچنان ثابت باقی مانده است. اما شیب ناحیه بین *c* تا *d* در شکل (۷) به علت افزایش سختی ورق استهلاک انرژی، افزایش یافته است. مقاومت اتصال در برابر تغییر مکان‌های اعمالی نیز افزایش یافته و ورق‌ها دیرتر به تسلیم می‌رسند. با توجه به اینکه سطح زیر نمودار اتصال با سطح مقطع شماره ۲، بیشتر از اتصال با سطح مقطع شماره ۱، می‌باشد، بنابراین افزایش ابعاد ورق استهلاک انرژی باعث بالارفتن میزان استهلاک انرژی اتصال می‌شود، شکل (۲۱).



شکل (۲۱): نمودار مقایسه‌ای تأثیر ابعاد ورق *BRS* بر عملکرد اتصال.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی پارامترهای مختلف بر روی رفتار اتصال پای ستون پس کشیده پرداخته شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل قطر میلگرد، نیروی پس کشیدگی اولیه میلگرد و ابعاد ورق مستهلک‌کننده انرژی

11. Inoue, K., Suita, K., Takeuchi, I., Chusilp, P., Nakashima, M., and Zhou, F. (2006). Seismic-resistant weld-free steel frame buildings with mechanical joints and hysteretic dampers, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **132**(6), 864-72.
12. McKenna, F., Fenves, G.L., and Scott, M.H. (2000). Open system for earthquake engineering simulation, Berkeley, CA: Univ. of California, Available from: <http://OpenSees.berkeley.edu>.
13. AISC Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (2010). ANSI/AISC 341-10, AISC, Chicago, Illinois.
7. Lai, Y.J. (2006). Seismic performance of post-tensioned moment connections with buckling-restrained energy dissipater, Thesis advisor: Chou C.C. Hsinchu (Taiwan): Ational Chiao Tung University.
8. Chou, C.C. and Chen, J.H. (2008). Column restraining effects in post-tensioned self-centering moment frames, *14<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering*, 12-01-0150.
9. Chou, C.C., Chen, J.H., Chen, Y.C., and Tsai, K.C. (2006). Evaluating performance of post-tensioned steel connections with strands and reduced flange plates, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **35**(9), 1167-85.
10. Tsai, K.C., Chou, C.C., Lin, C.L., Chen, P.C., and Jhang, S.J. (2008). Seismic self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **37**, 627-45.

#### ۱۰- پانویست

۱- Post-Tensioned Rod

۲- Self-Centering

۳- Buckling Restrained Steel

۴- Cyclic

۵- Drift