



## عملکرد لرزه‌ای اتصالات خودمحور با ابزار اصطکاکی بال پایین (BFFD)

محمد سهیل قبادی<sup>۱</sup>، معصومه کارگرنجفی<sup>۲</sup>، روح... احمدی جزنی<sup>۳</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵)

### چکیده

قاب‌های خمشی پس‌کشیده خود محور اخیراً به عنوان جایگزین قاب‌های خمشی با اتصال جوشی در ساختمان‌های فلزی مطرح شده‌اند. اتصال این قاب‌ها شامل دو قسمت اصلی کابل‌های پس کشیده و ابزار اتلاف انرژی می‌باشد. در این اتصال کابل‌های پر مقاومت پس کشیده می‌شوند و به دلیل نیروی پس کشیدگی که در این کابل‌ها وجود دارد در هنگام زمین لرزه نیروی بازگرداننده‌ای ایجاد می‌شود، که سازه را با آسیب کمی در اعضای اصلی سازه، به موقعیت اولیه قبل از زلزله باز می‌گرداند. یکی از ابزار اتلاف انرژی برای قاب‌های خود محور که توسط محققین معرفی شده‌اند ابزار اصطکاکی بال پایین BFFD می‌باشد. در مقاله پیش‌رو ابتدا رفتار اتصال با ابزار اصطکاکی BFFD در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه نسبت به نتایج آزمایشگاهی موجود مورد تطبیق و بررسی قرار گرفته است که در برنامه OpenSEES مدل‌سازی آن انجام شده است. تحلیل استاتیکی و دینامیکی این قاب در برنامه فوق انجام شده و اثر تعداد کابل‌های پس کشیده، نیروی پس کشیدگی بهینه، آرایش پس کشیدگی‌ها در طبقات و اثر مشارکت آلیاژهای حافظه شکل در مصالح کابل‌ها در رفتار لرزه‌ای قاب خمشی خود محور بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد کابل‌های پس کشیده تا تعداد ۴۰ عدد عملکرد اتصال بهبود می‌یابد و افزایش نیروی پس کشیدگی نیز تا یک مقدار مشخص باعث بهتر شدن رفتار اتصال می‌شود.

### کلمات کلیدی

قاب خمشی فولادی، اتصال خود محور، چشمه اتصال، کابل‌های پس کشیده، آلیاژ حافظه شکل

## Seismic Performance of Self-Centering Moment Resisting Connections with Bottom Flange Friction Devices (BFFD)

M.S. Ghobadi, M. Karnajafi, R. Ahmadijazani

### ABSTRACT

Recently self-centric moment resisting connections have been introduced as alternative welded moment resisting connections. These connections are comparing of post tensioned strands and energy dissipater parts. In construction of connection the high strength strands have been post tensioned and because of the post tensioned forces during earthquake period, the structure returns to the pre earthquake condition with less damage in comparison with usual moment resisting structures. One of the energy dissipater devices of these systems is bottom flange friction device (BFFD). In this paper, firstly the behavior of connection in 6 story 4 bay building have been verified with literature which OPENSEES software is used for this purpose. Then nonlinear dynamic and static analyses have been performed. In this study the number of post-tensioned strands, optimum force of strands, arrangement of strands in stories and shape memory alloy materials effect on strand's behavior have been evaluated. The results shows increment of strands to 40 improves the behavior of connection and the increasing of post-tensioned forces up to determined value causes the improvement of connection behavior.

### KEYWORDS

Steel moment frame, Self-centring connection, Panel zone, Post-tensioned strands, Shape memory alloy

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی، msghobadi@eng.ikiu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- کارشناس ارشد سازه، فارغ التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، mknajafi@gmail.com

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، roohollah\_ahmady@yahoo.co.uk

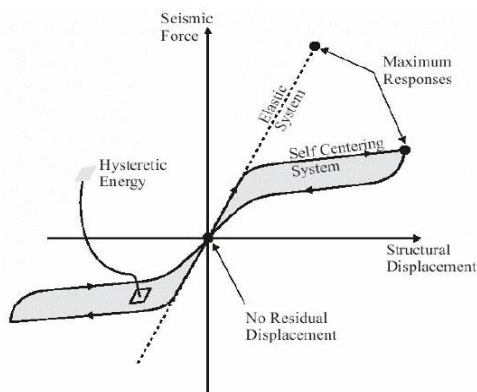


## ۱- مقدمه

پیامد مهم دیگر که در طرح لرزه‌ای مطرح می‌شود مسائل عملکرد اجتماعی مورد انتظار است که در جهت کم کردن تلفات جانی بر کلیه مسائل غالب است.

این پیامد منجر به استفاده از سیستم‌های خود محور در سیستم‌های مقاوم جانبی شده است. این سیستم جدید سازه‌ای مشخصات غیر خطی مرحله تسلیم را با مشخصات محصور شده خود ترکیب می‌کند و اجازه چرخش سازه به جایگاه قبلی‌اش بعد از وقوع زلزله را می‌دهد. سیستم‌های خود محور می‌توانند سطح ایمنی جانی قاب‌های رایج را تامین کنند در حالیکه کوچکترین آسیبی نبینند.

شکل (۲) مشخصات پاسخ لرزه‌ای پرچم شکل را نشان می‌دهد که نوعی از سیستم خود محور است. مقدار اتلاف انرژی در مقایسه با سیستم تسلیم شده در شکل (۱) کاهش یافته است اما اهمیت بیشتر، برگشت سیستم به نقطه تغییر مکان-نیروی صفر است که در هر سیکل و در پایان هر بارگذاری لرزه‌ای اتفاق می‌افتد.



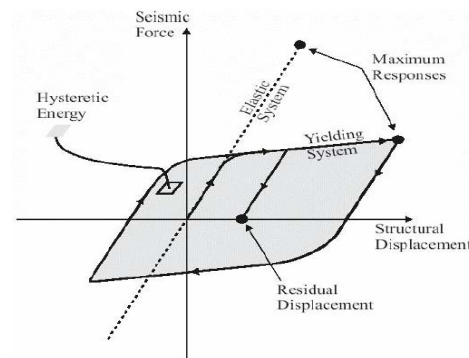
شکل (۲): ساختار تسلیم پاسخ لرزه‌ای ایده آل [۱]

شکل (۳) نمونه‌ای از اتصال خود محور با نبشی بالا و نشیمن را نشان می‌دهد.

در این اتصالات نیاز است برای حفظ خاصیت خود محوری کابل‌های پس کشیده و اجزای اصلی (تیر و ستون) به صورت الاستیک باقی بمانند.

قاب‌های خمشی رایج برای اتلاف انرژی زلزله از طریق آسیب به سازه طرح می‌شوند. هدف طراحی این قاب‌ها به سادگی، پایدار نگه داشتن ساختمان بعد از زلزله و جلوگیری از صدمه به انسان‌ها داخل و اطراف ساختمان می‌باشد. این قاب‌ها پس از زلزله بلافاصله قابل استفاده نیستند. با وجود اینگونه ضعف‌ها و با رویکرد طرح لرزه‌ای اخیراً بیشتر سیستم‌های ساختمانی به سمت طراحی برای پاسخ فراتر از حد الاستیک و نهایتاً برای توسعه مکانیسم پاسخ غیر الاستیک شکل پذیر سوق داده می‌شوند. هدف سیستم سازه‌ای با اتصال خود محور مخصوصاً از نظر اقتصادی قابل توجه است زیرا نواحی مقاوم در برابر زلزله معمولاً بعد از زلزله‌های متوسط احتیاج به تعمیر دارند در پاره‌ای از موارد نیز کار از تعمیر گذشته و نیاز به تعویض دارند و این تعمیر و تعویض در بعضی موارد هزینه‌ای برابر یا بیشتر از خود ساختمان را باعث خواهند شد.

شکل (۱) پاسخ ایده آل شده نیرو-تغییر مکان سیستم الاستیک خطی و سیستم تسلیم شده را نشان می‌دهد.



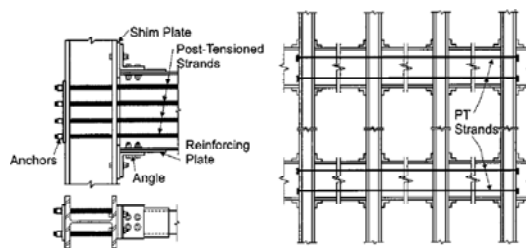
شکل (۱): ساختار تسلیم پاسخ لرزه‌ای ایده آل [۱]

سطح سایه خورده در شکل (۱) انرژی تلف شده در یک سیکل را از طریق تسلیم رفت و برگشتی نشان می‌دهد.

اتفاق مهمی که برای سیستم‌های مقاوم بار جانبی در یک سیکل رفت و برگشت می‌افتد، تغییر شکل پسماند است. تغییر شکل پسماند بزرگ می‌تواند باعث خسارت بزرگ به ساختمان شود در صورتیکه اثر ثانویه (p-Δ) نیز به وسیله بارهای ثقلی سیستم را به فروپاشی نزدیک کند.



غیر خطی برای قاب‌های فلزی با اتصال جوشی و قاب‌های فلزی پس‌کشیده بودند. نتایج این مطالعات نشان داد که اتلاف انرژی خوب، مقاومت و انعطاف‌پذیری در قاب پس‌کشیده می‌تواند از قاب‌های با اتصال صلب بیشتر باشد. اتصال مطرح شده توسط Tsai در سال ۲۰۰۷ [۵] شامل کابل‌های فولادی با مقاومت بالا و میراگر اصطکاکی پیچ شده به جان بود.



شکل (۳): اتصال خود محور با نبشی بالا و پایین [۲]

اتصال جدیدی توسط Mirzaee در سال ۲۰۱۳ [۶] تحت نام PTED با میراگر سپری پیچی ارائه شد که طی تحقیقات انجام شده این اتصال دارای اتلاف انرژی در حد اتصالات متعارف خود محور می‌باشد.

Wolski در سال ۲۰۰۶ [۷] اتصالی ارائه نمود که شبیه اتصال Rojas بود با این تفاوت که شامل میراگر اصطکاکی واقع در زیر بال تیر بود. این سیستم به منظور جلوگیری از اندرکنش دال و کف و میراگر اصطکاکی ارائه شد.

در سال ۲۰۱۱ مطالعه عددی توسط Guo و همکارانش انجام شد [۸] که رفتار این اتصال را با کارهای آزمایشگاهی Wolski مقایسه شد. مقاله پیش‌رو ادامه همین کار می‌باشد.

### ۳- بررسی رفتار اتصال

عملکرد اتصال BFFD در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطور که قبلاً گفته شد اتصال دارای BFFD فقط یک ابزار اصطکاکی دربال زیرین دارد و این ابزار شامل ورق سوراخدار اصطکاکی عمودی است که به بال پایین جوش می‌شود و دو نبشی خارجی است که به رخ ستون پیچ شده است.

ورق‌های واشر برنجی به صورت ساندویچی ما بین نبشی ستون و ورق سوراخدار در دو طرف قرار می‌گیرد. نبشی ستون‌ها و ورق‌های سوراخدار و واشرهای صفحه‌ای برنجی به یکدیگر با پیچ‌های پر مقاومت به منظور تامین نیروی اصطکاکی پیچ می‌شوند. این ورق‌های واشر ما بین بال‌های تیر و ستون نیز قرار می‌گیرد.

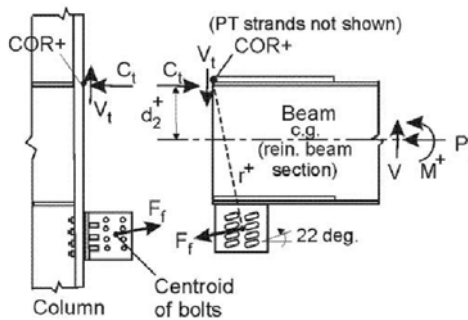
### ۲- مروری بر ادبیات فنی

Ricles در سال ۲۰۰۲ [۲] و Garlock در سال ۲۰۰۵ [۳] یک سیستم اتصال تیر به ستون را مورد مطالعه قرار دادند که در آن سیستم، خود محوری بر پایه یک سری کابل‌های فولادی با مقاومت بالا بود، در حالیکه سیستم میراگر از نبشی نشیمن و بالا سری پیچی مانند شکل (۳) تشکیل شده بود. هنگامی که فاصله بین تیر و ستون باز می‌شود، کابل‌های فولادی در ناحیه الاستیک کشیده می‌شوند و نبشی‌ها تغییر شکل می‌دهند. مکانیزم اتلاف انرژی در این اتصال، بر پایه تشکیل سه مفصل پلاستیک در هر نبشی می‌باشد. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که، لقمه‌ها و ورق‌های تقویتی برای کنترل تغییر شکل غیرالاستیک تیرها ضروری هستند و اندازه و هندسه نبشی‌ها بر روی ظرفیت خمشی اتصال و ظرفیت اتلاف انرژی تاثیر می‌گذارد و کابل‌ها باید برای باقی ماندن در محدوده الاستیک و اطمینان داشتن از خاصیت خودمحوری طراحی شوند.

Filiatrault و همکارانش در سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳ [۱] مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی یک اتصال فولادی با کابل‌های پس‌کشیده انجام دادند. اتصال شامل میلگرد فولادی پس‌کشیده با مقاومت بالا بود و میلگردهای اتلاف کننده انرژی برای تسلیم در کشش و فشار طراحی شدند. نتایج نشان داد که سیستم با وجود تغییر مکان‌های نسبی بزرگ در طبقات بدون آسیب در تیرها و ستون‌ها، سازه را به موقعیت اولیه خود (قبل از زمین‌لرزه) باز می‌گرداند [۱].

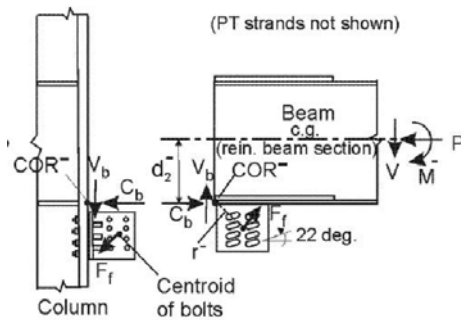
Rojas در سال ۲۰۰۵ [۴] به مطالعه یک اتصال پس‌کشیده با میراگر اصطکاکی در بال‌های تیر برای اتلاف انرژی پرداخت. این مطالعات شامل تحلیل‌های تاریخچه زمانی

پس از به وجود آمدن IGO ظرفیت لنگر به خاطر افزایش طول کابل‌های پیش تنیده افزایش می‌یابد. تحت بار برداری در مرحله ۲،  $\theta_r$  ثابت می‌ماند ما بین مرحله ۲ و ۴ لنگر مشارکتی از ابزار اصطکاکی تغییر جهت می‌دهد مابین مرحله ۴ و ۵،  $\theta_r$  کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد جائیکه بال تیر به حالت اولیه بر می‌گردد در حالیکه به ستون فشاری وارد نمی‌کند در مرحله ما بین ۵ و ۶ لنگر کاهش می‌یابد طوری‌که بال تیر کاملاً به صورت فشاری در مقابل ورق واشر در وجه ستون قرار می‌گیرد.



(a) Positive moment

الف) گشتاور مثبت



(b) Negative moment

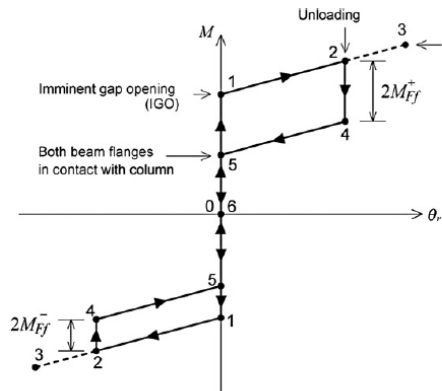
ب) گشتاور منفی

شکل (۵): دیاگرام آزاد اتصال BFFD [۲]

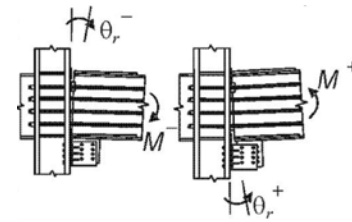
این اتصال همانطور گفته شد توسط Wolski در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات پیشین بر روی مقایسه منحنی‌های لنگر-چرخش اتصال و تغییر مکان-جابجایی و مقدار نیروی پس کشیدگی در مطالعه عددی و آزمایشگاهی انجام شده است در مقاله پیش‌رو پس از صحت سنجی مدل ساخته شده با مطالعات قبلی، اثر تعداد کابل‌های

ورق تقویتی بال تیر و و نبشی نگه دارنده در بال‌های بالای تیر به منظور جلوگیری از حرکت جانبی و عرضی در رخ ستون قرار می‌گیرد.

رابطه مفهومی ما بین لنگر در تیر در رخ ستون و چرخش مربوطه ما بین تیر و ستون در اتصالات BFFD در شکل (۴) نشان داده شده است. رابطه  $M-\theta$  برای اتصال BFFD تحت بارگذاری اعمال شده دارای رفتار غیر متقارن می‌باشد، اتصال دارای سختی ابتدایی مشابه به اتصال خمشی گیردار می‌باشد جائیکه  $\theta_r$  برابر صفر است.



BFFD connection.



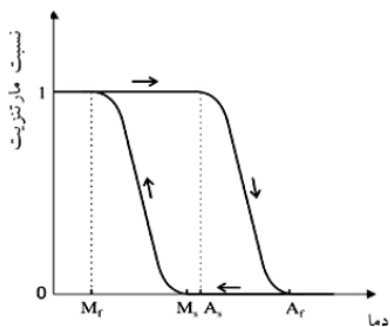
شکل (۴): رابطه  $M-\theta$  برای اتصال BFFD [۲]

در یک لحظه لنگر اعمالی بر نیروی پیش‌تنیدگی غلبه می‌کند و کاهش فشار در بال تیر در وجه ستون و ورق واشر رخ می‌دهد. اگرچه باز شدگی در ابتدا مشاهده نمی‌شود و این به خاطر این است که ابزار اصطکاکی هنوز شروع به لغزیدن نکرده است.

لنگر اعمالی ذکر شده پیوسته افزایش می‌یابد و چرخش اتصال در مقابل اصطکاک مقابله می‌کند زمانیکه لنگر اعمالی برابر مجموع ظرفیت لنگر ناشی از پیش‌تنیدگی و اصطکاک می‌شود فاصله نا بهنگام (IGO) به وجود می‌آید.

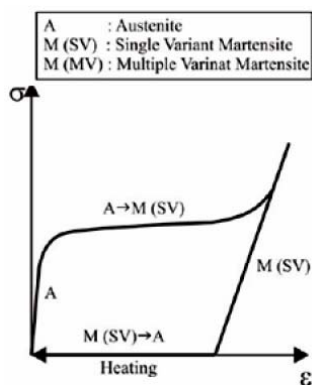


$M_f$  می‌رسد، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل معکوس، در دمای بین  $M_s$  و  $M_f$  ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. حالت مارتنزیت می‌توانند هم توسط دما و هم توسط تنش ایجاد شود [۹].



شکل (۶): نسبت مارتنزیت در برابر دما برای یک ماده حافظه شکلی در حالت بدون تنش [۹]

زمانی که دمای ماده کمتر از  $A_s$  باشد، بدلیل پایداربودن مارتنزیت در دماهای پایین، پس از باربرداری به آستنیت تبدیل نمی‌شود که موجب بر جای گذاشتن کرنش پسماند می‌شود. این کرنش پسماند نیز با اعمال دمای بالاتر از  $A_f$  به طور کامل حذف می‌شود (شکل (۷)) از آنجا که این مواد شکل اولیه خود را به خاطر داشته و قادرند پس از اعمال دما به شکل اولیه خود بازگردند، مواد حافظه‌دار شکلی نام‌گذاری شده‌اند.



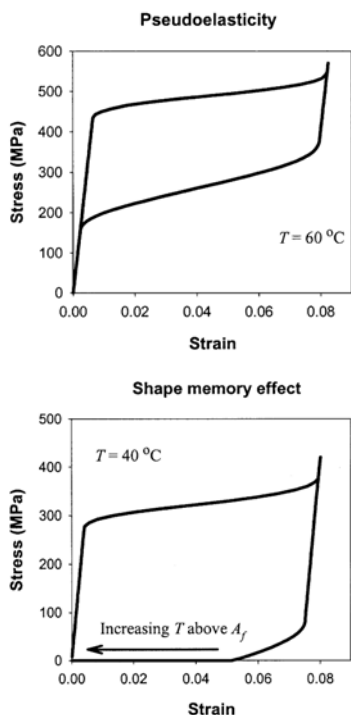
شکل (۷): رفتار حافظه شکلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۹]

پس‌کشیده و اثر استفاده از آلیاژهای حافظه شکل به جای فولاد در کابل‌های پس‌کشیده بررسی شده است.

#### ۴- آلیاژهای حافظه‌شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هوشمند در دو حالت کریستالی مارتنزیت و آستنیت وجود دارند. حالت آستنیت در دماهای بالا و تنش‌های پایین پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار فوق‌الاستیک است؛ در حالیکه مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار حافظه شکلی است. از آنجا که این مواد دارای طبیعت ترمودینامیکی هستند، رفتار آن‌ها به دما و تنش‌های اعمال شده بر آن‌ها بستگی داشته و می‌توانند با اعمال گرادیان حرارتی یا تنش، تغییر فاز دهند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر می‌باشد. در حالت بدون تنش، یک آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای چهار دمای مشخصه می‌باشد،  $A_s$  دمای آغاز حالت آستنیت،  $A_f$  دمای پایان حالت آستنیت،  $M_s$  دمای آغاز حالت مارتنزیت،  $M_f$  دمای پایان حالت مارتنزیت [۹].

اگر دمای محیط بالاتر از  $A_f$  باشد، ماده اصطلاحاً در حالت آستنیت قرار می‌گیرد و رفتار فوق‌الاستیک از خود بروز خواهد داد و اگر دمای محیط کمتر از  $M_f$  باشد، ماده اصطلاحاً در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه شکلی از خود بروز خواهد داد. شکل (۶) زمانی را نشان می‌دهد که ماده تحت حالت بدون تنش قرار دارد و تحت بار گرمایی قرار می‌گیرد. تا زمانی که ماده به دمای  $A_s$  نرسیده است، به صورت کاملاً مارتنزیت است. زمانی که به  $A_s$  می‌رسد، تبدیل از مارتنزیت به آستنیت آغاز شده تا به دمای بالاتر از  $A_s$  و به سمت  $A_f$  برود. سرانجام زمانی که به دمای  $A_f$  می‌رسد، تبدیل فاز پایان پذیرفته و ماده به حالت کاملاً آستنیت در می‌آید. در تبدیل معکوس، زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار می‌گیرد، تا زمانی که ماده به دمای  $M_s$  نرسیده است، در حالت کاملاً آستنیت قرار دارد. وقتی به دمای  $M_s$  می‌رسد، کریستال‌های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می‌کنند و زمانی که ماده به دمای

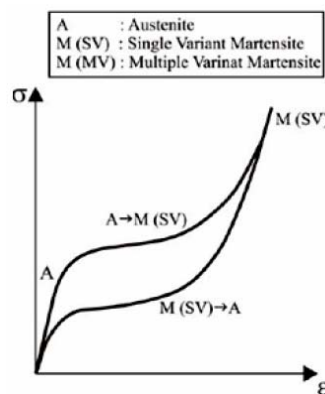


شکل (۹): رفتار فوق الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۱۰]

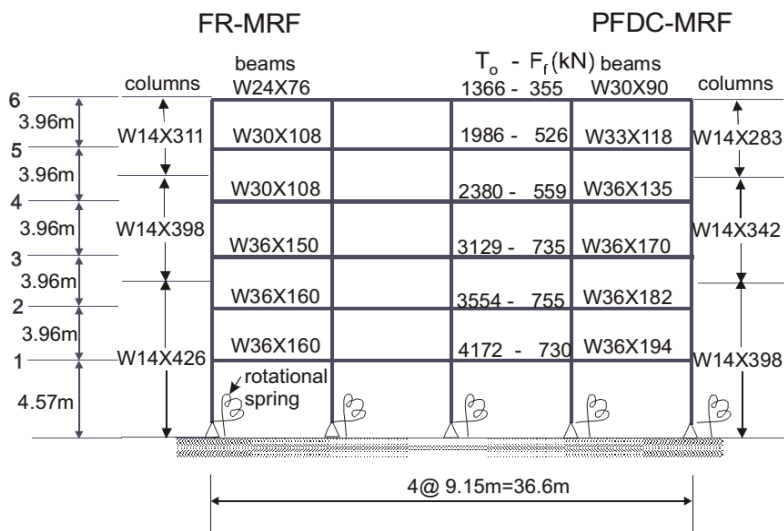
۵- ساخت مدل

مدل اتصال و قاب مورد بررسی در نرم افزار اجزای محدود OpenSEES [۱۱] ساخته شده است. مشخصات هندسی قاب و اتصال مدل شده در شکل (۱۰) آمده است.

اعمال تنش به یک ماده حافظه‌دار شکلی که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از نقطه  $A$  می‌باشد، موجب می‌شود که آستنیت به مارتنزیت ایجاد شده توسط تنش تبدیل شود، چرا که آستنیت در تنش‌های بالا پایدار نمی‌باشد. این تبدیل منحنی تنش- کرنش ماده را به صورت غیر خطی در می‌آورد. در انتها تمام آستنیت‌ها به مارتنزیت تبدیل خواهد شد و تبدیل معکوس رخ می‌دهد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به یک مکان می‌رساند (شکل (۸) و (۹)).



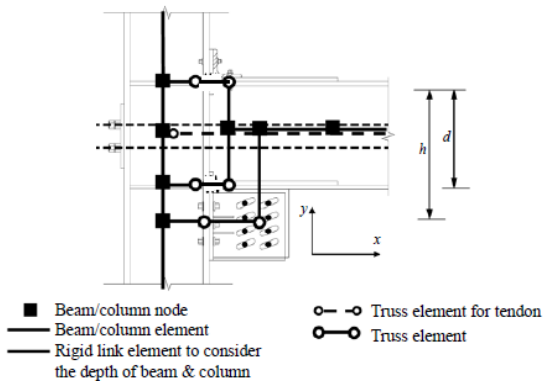
شکل (۸): رفتار فوق الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۹]



شکل (۱۰): قاب مدل شده در OpenSEES



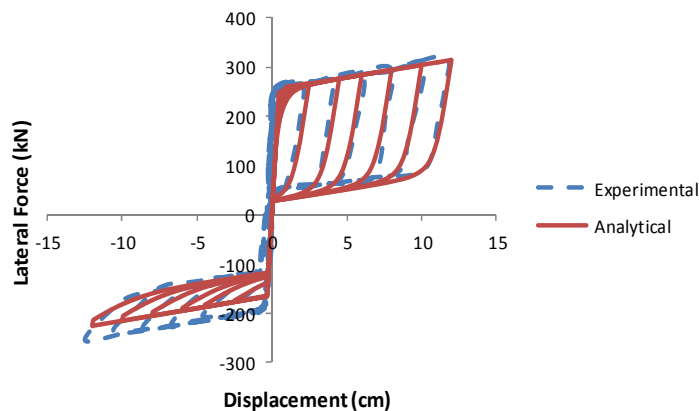
دهانه‌ها مدل شده است با مصالحی که کرنش اولیه ناشی از نیروی پس کشیدگی را بیان کند (ElasticPP).



شکل (۱۱): مدل اتصال با ابزار اصطکاکی بال پایین BFFD

### ۶- صحت سنجی و نتایج مدل‌سازی

صحت سنجی مدل‌سازی فوق در اتصال تنها، با مطالعه آزمایشگاهی که توسط Wolski که در سال ۲۰۰۶ [۷] انجام شده صورت گرفته است که در شکل (۱۲) می‌توان دید.



شکل (۱۲): مقایسه رفتاری مدل انجام شده با مدل مشابه که در آزمایشگاه انجام شده است [۷] Wolski

تعداد ۲۰ عدد این کاهش چشمگیر است. در تعداد بالا نظیر ۷۰ و ۶۰ و ۵۰ عدد، کرنش پسماند در اتصال ایجاد می‌شود و این بدین معناست که افزایش تعداد کابل‌های پس کشیده همواره باعث بهبود رفتار اتصال نخواهد شد از طرفی کاهش این تعداد نیز تا حدود ۳۰ عدد در اتصال

جزئیات مدل اتصال در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. همانطور که در شکل آمده است المان‌های ابزار اصطکاکی توسط المان خرپا یا Truss element مدل شده است که این المان تنها می‌تواند نیروی محوری را تحمل کند، از المان‌های تیر صلب (Rigid link) برای نمایش عمق تیر و ستون استفاده شده است المان تیرها و ستون‌ها المان غیر خطی بر پایه جابجایی با سطح مقطع Fiber می‌باشد (DispBeamColumn). برای مدل‌سازی باز و بسته شدن سطح تماس تیر و ستون از المان‌های خرپایی استفاده شده است این المان‌ها تنها قادر به تحمل نیروی فشاری در جهت موازی با محور تیر هستند با تعریف مصالح این خاصیت را به المان نسبت می‌دهیم. در بال تیر ورق تقویتی وجود دارد بدین منظور در تیر در قسمت‌های تقویت شده با ورق ضخامت بال برابر مجموع ضخامت بال و ورق تقویتی در نظر گرفته شده است.

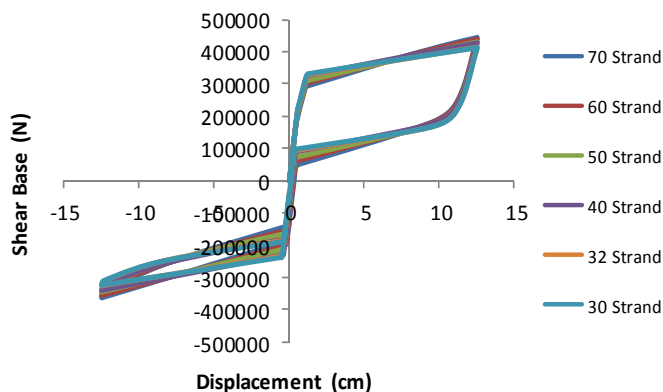
مصالح مورد استفاده برای المان‌های تیر و ستون Steel02 و المان بازشدگی Elastic No Tension می‌باشد. المان‌های میراگر اصطکاکی با مصالح Steel01 معرفی شده‌اند. کابل‌های پس کشیده توسط المان خرپایی به موازات تیر در

### ۶-۱- بررسی اثر تعداد کابل‌های پس کشیده

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود در اتصال با کاهش تعداد کابل‌های پس کشیده مقاومت آستانه بازشدگی زیاد می‌شود البته تا تعداد ۱۰ عدد. در حالیکه در اثر کاهش تعداد کابل‌های پس کشیده مقاومت نهایی کم می‌شود که در

سوراخی که در بال ستون برای عبور در ستون‌های میانی و مهار کردن در ستون‌های خارجی باید ایجاد کرد اجرایی نخواهد بود. پس عملاً در بازه ۲۰ تا ۳۲ که در تحقیقات گذشته استفاده شده است بسته به تعداد طبقات و نیروی پس کشیدگی می‌توان از این کابل‌ها استفاده کرد.

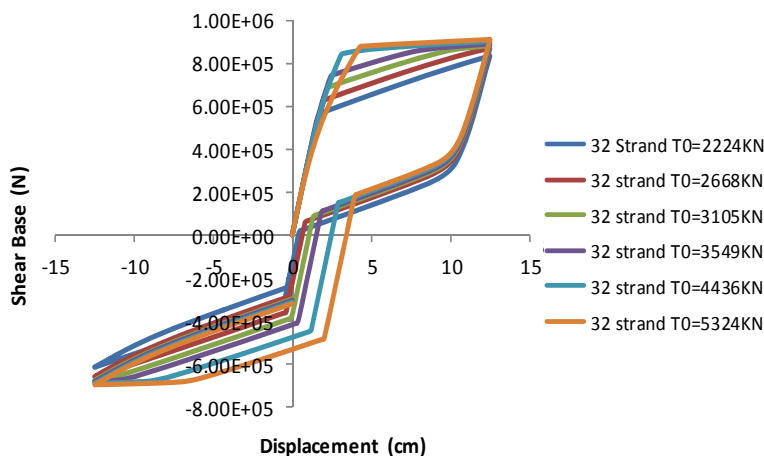
رفتار مناسبی ایجاد خواهد کرد. باید توجه شود که همزمان با تغییر تعداد کابل‌ها، کرنش اولیه که معرف نیروی پس کشیدگی در کابل‌ها می‌باشد، ثابت می‌ماند. اگر تعداد کابل‌ها از ۱۰ عدد کمتر شود کاهش زیادی در مقاومت مشاهده می‌شود و تعداد بیشتر از ۴۰ عدد از نظر تئوری بررسی شده است ولی از لحاظ عملی بدلیل



شکل (۱۳): اثر تعداد کابل‌های پس کشیده در اتصال BFFD

در حالیکه در اتصال در نیروهای بزرگ تغییر شکل پسماند ایجاد خواهد شد که هدف اصلی این سیستم که حذف تغییر شکل ماندگار است را مخدوش می‌کند. چون افزایش بیش از حد نیروی پس کشیدگی منجر به تسلیم بال‌های تیر (حتی با وجود ورق تقویتی) می‌گردد.

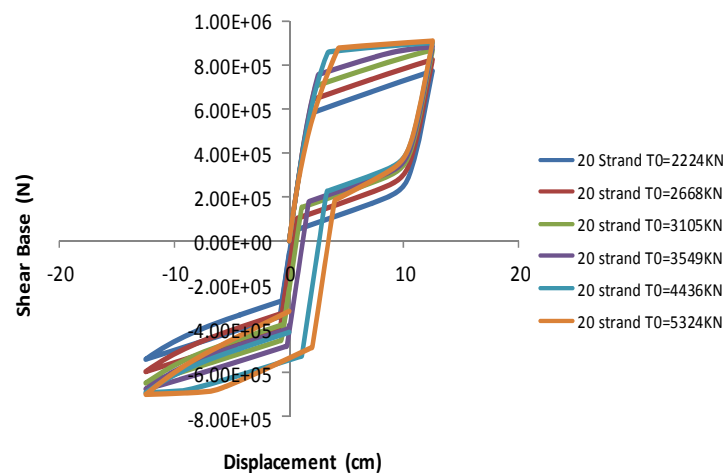
۲-۶- بررسی اثر نیروی پس کشیدگی کابل‌های پس کشیده  
بر اساس شکل (۱۴) و (۱۵) برای ۲۰ و ۳۲ عدد کابل پس کشیده افزایش نیروی پس کشیدگی سبب افزایش نیروی آستانه جداشدگی و مقاومت نهایی اتصال می‌گردد



شکل (۱۴): اثر افزایش نیروی پس کشیدگی کابل‌ها در تعداد ۳۲ کابل





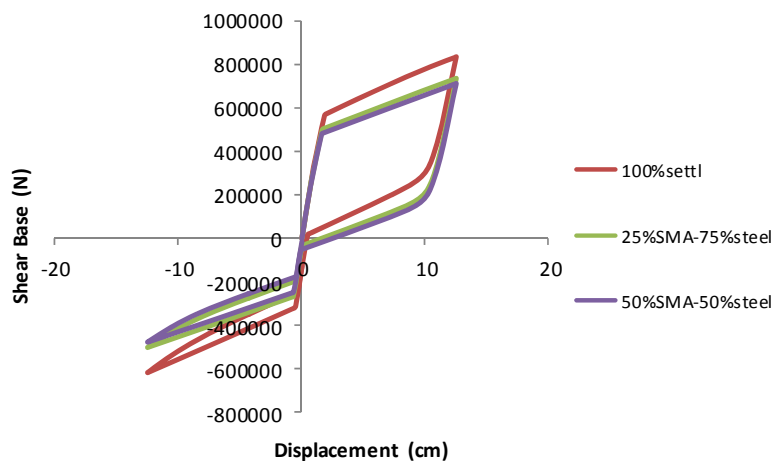


شکل (۱۵): اثر افزایش نیروی پس کشیدگی کابل‌ها در تعداد ۲۰ کابل

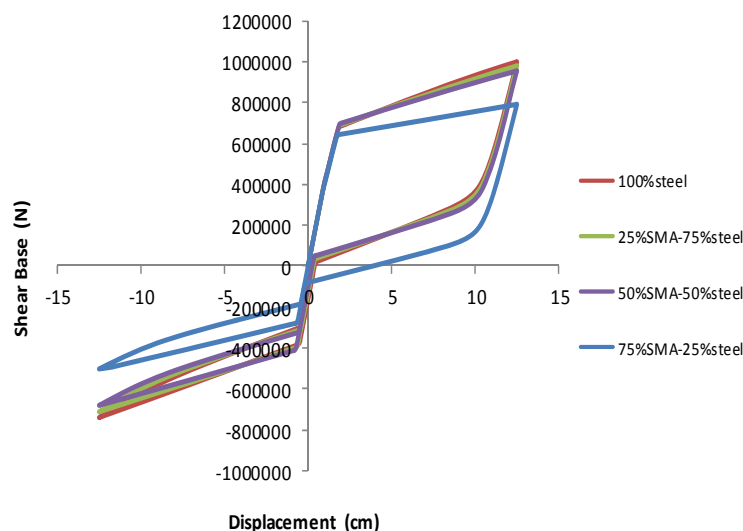
بررسی قرار داده شده به نحوی که از مصالح ElasticPPGap برای معرفی رفتار حافظه‌شکلی و مصالح SelfCentering برای معرفی رفتار فوق الاستیک در برنامه OpenSEES استفاده شده است. نتایج در شکل (۱۶) و (۱۷) قابل مشاهده است.

### ۳-۶- بررسی اثر استفاده از آلیاژهای حافظه شکل در اتصال

همانطور که قبلاً ذکر شد این نوع از آلیاژها با شرایط دمایی مختلف رفتار متفاوتی را از خود بروز می‌دهند که در این تحقیق اثر مارتنیزیت‌ها و آستنیت‌ها را در درصد‌های مختلف با فولاد مصرفی در کابل‌های پس کشیده مورد



شکل (۱۶): اثر آلیاژهای حافظه شکل با خاصیت حافظه شکلی در اتصال BFFD



شکل (۱۷): اثر آلیاژهای حافظه شکل با خاصیت فوق الاستیک در اتصال BFFD

از طرفی با وجود اینکه استفاده از این آلیاژ کمی به شکل پذیری اتصال می‌افزاید در درصد SMA ۷۵٪ و فولاد ۲۵٪ کمی کرنش پسماند در رفتار چرخه ای ایجاد کرده است و این در حالی است که بر اساس شکل (۹) از ویژگی‌های بارز این آلیاژ با رفتار فوق الاستیک حذف کرنش پسماند است که در این اتصال برعکس عمل کرده است. همچنین با توجه به صرفه اقتصادی نیز استفاده از این درصد توصیه نمی‌شود.

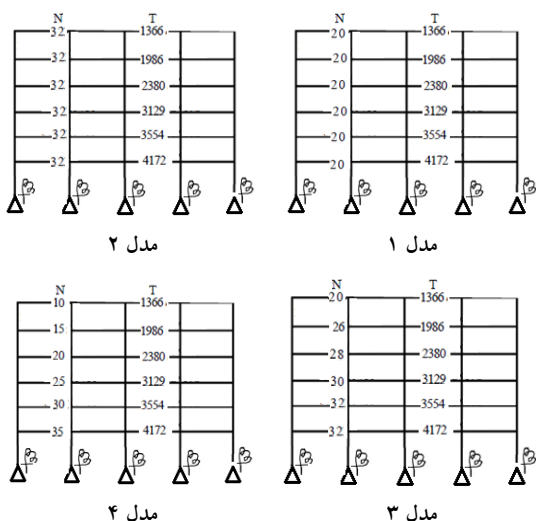
#### ۴-۶- بررسی اثر آرایش کابل‌های پس کشیده بر تغییر مکان قاب شش طبقه

در شکل (۱۸) آرایش و مقدار نیروی پس کشیدگی به صورت چهار مدل مختلف نمایش داده شده است اثر این چهار نوع در مدل ساخته شده در OpenSEES بررسی شده است که در شکل (۱۹) نتایج را می‌توان مشاهده نمود. مطابق شکل مذکور همه مدل‌ها در بارگذاری مشابه، دارای تغییر مکان یکسانی هستند که در مدل شماره ۳ بارگذاری پوش‌آور را تا تغییر مکان هدف ۳۵ سانتیمتر تحمل کرده است و بیش از این تغییر مکان را نمی‌تواند تحمل کند. این در حالی است که در منحنی پوش‌آور مقاومت چشمگیری از این مدل دیده می‌شود (شکل (۲۰)) و این موضوع را می‌توان در شکل (۲۱) که مقادیر لنگر

شکل (۱۶) بیانگر این مطلب است که هر چه درصد استفاده از آلیاژهای حافظه شکل با خاصیت حافظه‌شکلی بیشتر شود مقاومت اتصال پایین‌تر می‌آید در حالیکه کمی به شکل پذیری اتصال BFFD اضافه می‌گردد. در صورت ایجاد شرایط دمایی ۶۰ درجه این آلیاژ به نوع استنیت تبدیل می‌شود که دارای خاصیت فوق الاستیک است و معمولاً در سازه‌هایی که تغییر مکان نسبی کمتر از چهار درصد را دارا هستند استفاده از این آلیاژ، تا این تغییر مکان رفتار آن‌ها را بهبود می‌بخشد اما در قاب با رفتار خود محور، سیستم قاب بگونه‌ای است که در حدود تغییر مکان نسبی پنج در صد کابل‌های فولادی به تسلیم می‌رسند استفاده از این نوع آلیاژ (با رفتار فوق الاستیک) نه تنها تاثیر مثبتی در مقاومت ندارد بلکه در درصدهای بالا از مقاومت اتصال مانند رفتار حافظه شکلی می‌کاهد، نتیجه این بررسی در شکل (۱۷) قابل مشاهده است.

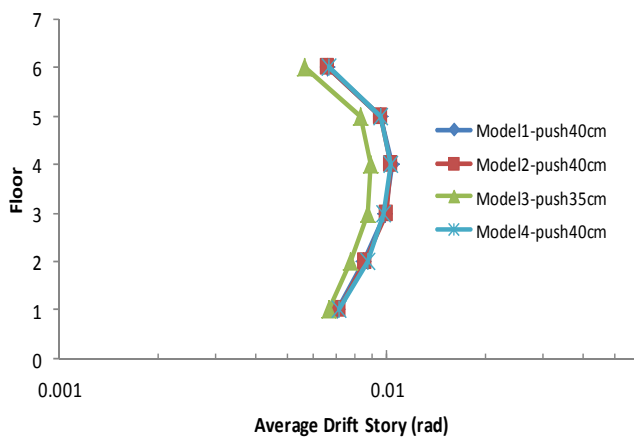
همانطور که در شکل دیده می‌شود در درصدهای ۲۵٪ SMA و ۷۵٪ فولاد و ۵۰٪ SMA و ۵۰٪ فولاد استفاده از این آلیاژ تاثیر چندانی بر کاهش و یا افزایش مقاومت و شکل پذیری ندارد پس در صورت صرفه اقتصادی می‌توان بجای فولاد از این آلیاژ استفاده کرد در غیر اینصورت استفاده از این آلیاژ توصیه نمی‌شود.



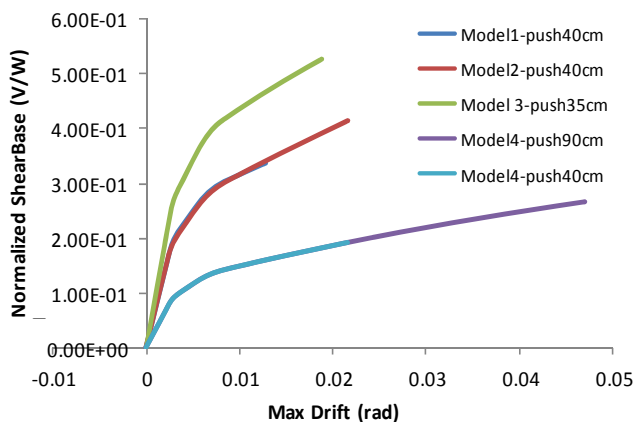


شکل (۱۸): مدل‌های مختلف برای بررسی اثر نوع آرایش کابل‌ها در طبقات در قاب ۶ طبقه

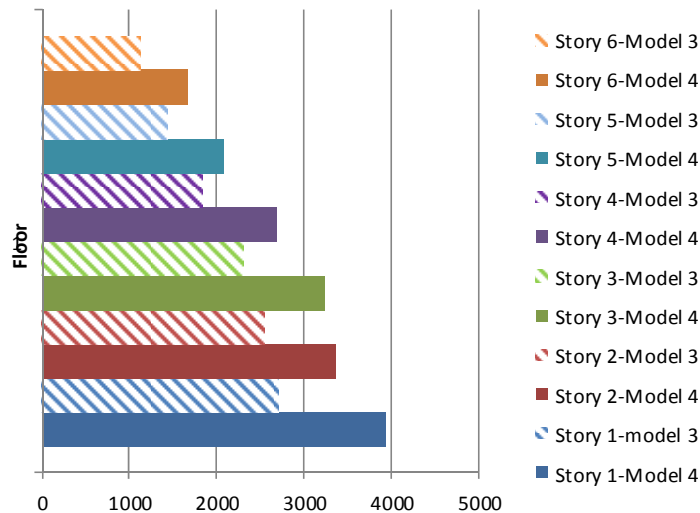
وارده را نشان می‌دهد نیز مشاهده نمود که در مقایسه با مدل ۴ که در مقالات استفاده شده است [۸] این مدل ارجحیت دارد البته در ساختمان‌هایی که انتظار تغییر مکان زیاد نداریم این مدل می‌تواند کارساز باشد مدل‌های ۱ و ۲ نیز مقاومت بیشتر و لنگر کمتری نسبت به مدل ۴ دارند هستند. مدل شماره ۱ در این بارگذاری شیب سخت‌شدگی کمتری را داراست. با توجه به اینکه مقدار دوران در زلزله مبنای طرح (DBE) در بام ۱/۷۶٪ و در زلزله ماکزیمم (MCE) ۳/۱۱٪ است [۳]. پس مدل شماره ۱ این دوران‌ها را نمی‌تواند تامین کند و مدل شماره ۳ و ۲ نیز دوران مربوط به زلزله ماکزیمم را نمی‌توانند ایجاد کنند در صورتیکه مدل شماره ۴ دوران مربوط به هر دو سطح زلزله را می‌تواند تامین کند پس بسته به محل احداث سازه می‌توان از مدل‌های ۲ و ۳ و ۴ بهره برد.



شکل (۱۹): نمودار میانگین تغییر مکان نسبی طبقات در اثر تغییر آرایش آرماتورها در طبقات در قاب ۶ طبقه



شکل (۲۰): نمودار تغییر مکان نسبی - برش پایه قاب در اثر تغییر آرایش کابل‌ها در طبقات در قاب ۶ طبقه



شکل (۲۱): نمودار لنگر حداکثر در اثر تغییر آرایش کابل‌ها در طبقات در قاب ۶ طبقه (مربوط به مدل شماره ۳ و ۴)

می‌کند و کرنش ورق تقویتی را نیز افزایش می‌دهد و در نهایت به تسلیم بال بالا در اتصال منجر خواهد شد لذا افزایش نیروی پس کشیدگی نیز تا حدود ۶۰ درصد در این اتصال توصیه می‌شود نسبت به آنچه در مطالعات قبلی صورت گرفته است.

استفاده از آلیاژهای حافظه‌شکل در سازه‌های با شکل‌پذیری کم باعث بهبود رفتار سازه می‌شود در حالیکه در سازه مورد بررسی و اتصال خود محور که خود دارای شکل‌پذیری بالایی است نه تنها تاثیر مثبتی ندارد بلکه در درصدهای بالا از مقاومت بازشدگی و نهایی اتصال می‌کاهد، مگر از لحاظ اقتصادی قابل توجیه باشد و آن هم نوع آستنیت که در دمای ۶۰ درجه دارای خاصیت فوق الاستیک است می‌تواند در درصدهای ۲۵ و ۵۰ با فولاد ترکیب شود که رفتار اتصال را با افزایش مقاومت کمی بهبود می‌بخشد.

در مورد قاب نیز می‌توان گفت، ابزار اصطکاکی در طبقات پایین موثرتر از طبقات بالا است و در واقع تغییر مکان قاب را با این ابزار اصطکاکی در طبقات مختلف می‌توانیم کنترل کنیم.

در مورد قاب شش طبقه از مدل‌های ذکر شده مدل شماره ۳ دارای بیشترین مقاومت و شکل‌پذیری کمی را دارد. مدل شماره ۴ مقاومت کمتر دارد ولی شکل‌پذیرتر است. در

#### ۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مطالعات غیر خطی صورت گرفته در این سیستم افزایش تعداد کابل‌های پس کشیده همزمان با کرنش نظیر نیروی پس کشیدگی ثابت، لزوماً باعث بهبود رفتار اتصال نمی‌شود این تعداد در بازه ۳۰ تا ۴۰ برای اتصال رفتار مناسبی را رقم می‌زنند در تعداد بالا شاهد کرنش پسماند در اتصال خواهیم بود و شکل منحنی چرخه‌ای اتصال را نیز از حالت پرچم شکل خارج می‌کند. در مورد قاب بازه ۳۰ عدد تا ۴۰ عدد با توجه به محدودیت‌های اجرایی مناسب می‌باشد. با افزایش تعداد کابل‌ها برای داشتن رفتار مشابه در اتصال می‌بایست نیروی پس کشیدگی کاهش یابد.

افزایش نیروی پس کشیدگی در اتصال با ۳۲ عدد کابل تا حدود ۶۰ درصد، باعث بهبود رفتار اتصال هم از لحاظ شکل‌پذیری و هم از لحاظ مقاومت می‌شود در صورتیکه این افزایش (تا حدود ۶۰ درصد) به صورت مشابه در اتصال با ۲۰ عدد کابل فقط باعث افزایش مقاومت می‌گردد و تاثیری بر شکل‌پذیری اتصال ندارد (سطح محصور شده در تمامی سیکل‌ها مشابه است) همچنین در دو نوع اتصال مورد بررسی افزایش ۹۰ درصدی و ۱۴۰ درصدی نیروی پس کشیدگی باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری اتصال می‌شود ولی همزمان کرنش پسماند نیز در اتصال ایجاد



هوشمند"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

[10] Brocca, M., Brinson, L.C. and Bazant, Z.P. (2002), "Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys Based on Microplane Model", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, No. 5, pp. 1051-1077.

[11] Mazzoni, S., et al. (2004), "OpenSees User's Manual", Berkeley: University of California, PEER, [2013-04-01].

زمانی که شکل‌پذیری مورد انتظار ما نباشد و مقاومت بالا مد نظر است می‌توانیم از مدل شماره ۳ با مجموع تعداد کابل ۱۳۵ عدد بجای مدل ۴ با تعداد ۱۶۸ عدد استفاده نمود که هم مقاومت بالاتری را دارد و هم از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. دو مدل شماره یک و دو با آرایش یکنواخت بدلیل اینکه نه شکل‌پذیری را تامین می‌کند و نه مقاومت را، توصیه نمی‌شود.

#### ۸- مراجع

[1] Filiatrault, A., Jose, R. and Constantin, C. (2004), "Development of Self-Centering Earthquake Resisting Systems", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering.

[2] Ricles, J., Sause, R., Peng, S. and Lu, L. (2002), "Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Posttensioned Steel Connections", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 7, pp. 850-859.

[3] Garlock, M. (2003), "Design, Analysis, and Experimental Behavior of Seismic Resistant Post-Tensioned Steel Moment Resisting Frames", Diss. Lehigh University.

[4] Rojas, P., Ricles, J.M. and Sause, R. (2005), "Seismic Performance of Post-Tensioned Steel Moment Resisting Frames with Friction Devices", *Journal of structural engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 529-540.

[5] 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", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 4, pp. 627-645.

[۶] بهاری، م.ر.، میرزایی علی آبادی، م. و ترابیان، ش. (۱۳۹۰)، "بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال خمشی فولادی جدید با کابل‌های پس کشیده و سپری پیچی"، دومین کنفرانس ملی سازه و فولاد، تهران، انجمن سازه‌های فولادی ایران.

[7] Wolski, M., Ricles, M. and Sause, R. (2009), "Experimental Study of a Self-Centering Beam-Column Connection with Bottom Flange Friction Device", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 5, pp. 479-488.

[8] Guo, T., Lianglong, S. and Guodong, Z. (2011), "Numerical Simulation of the Seismic Behavior of Self-Centering Steel Beam-Column Connections with Bottom Flange Friction Devices", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 10, No. 2, pp. 229-238.

[۹] صابر دل ساده، م.، مصطفی زاده، م. و قاسمیه، م. (۱۳۸۹)، "تقویت و بهسازی سازه‌های بتنی با استفاده از آلیاژهای"

