

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال پنجم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳، (پیاپی ۱۷): صص ۳۱-۳۲

## رفتار قاب خمشی فولادی تقویت شده با کابل پس کشیده در برابر خرابی پیش رونده

مهدی وطنی<sup>۱</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲</sup>، عبدالرضا سروقدمقدم<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۶

### چکیده

با در نظر گرفتن تهدیدات تروریستی و خصمانه علیه کشور، بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر انفجار و پدیده خرابی پیش-رونده، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از این رو مقاومت‌سازی سازه‌ها در مقابل انفجار و پدیده انهدام پیش‌رونده از موضوعات مهم پدافند غیرعامل است. در این مقاله، رفتار سازه‌های فولادی با قاب خمشی معمولی (SMRF) و قاب-خمشی تقویت شده با کابل پس کشیده (PTED) در مقابل خرابی پیش‌رونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بین، روش مسیر بار جایگزین (APM) بر مبنای آئین‌نامه GSA و DOD مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق این روش، قاب سازه پس از حذف یکی از ستون‌های طبقه اول، باید به‌گونه‌ای رفتار کند که خرابی اولیه گسترش نیابد. برای این منظور در نرم‌افزار SAP2000 V15 مدل‌سازی انجام گردید. برای آنالیز سازه‌ها از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی نرم‌افزار در خصوص سازه سه طبقه با نتایج تجربی انجام شده محققین مقایسه شده و تطابق خوبی نشان داده است. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که هرچند منحنی پوش عمودی قاب خمشی معمولی در مقابل انهدام پیش‌رونده مقاومت بیشتری دارد، ولی عملکرد قاب خمشی PTED در مقابل تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از انهدام پیش‌رونده بهتر است. قاب خمشی PTED با کمک کابل‌ها و میراگرهای انرژی مانع از تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر و ستون‌ها و همچنین مانع از فروریزش سازه می‌گردد. به علاوه، انرژی در میراگرها مستهلک می‌گردد و در صورت لزوم قابل تعویض می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: خرابی پیش‌رونده، قاب خمشی، کابل پس کشیده، مسیر بار جایگزین، آنالیز استاتیکی غیرخطی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع) - نویسنده مسئول

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- دانشیار پژوهشگاه زلزله و عضو هیئت علمی دانشگاه تهران

## مقدمه

ساختمان‌های ایران مطرح گردند.

در این تحقیق بررسی خواهیم کرد که آیا استفاده از اتصال PTED راهکار مناسبی برای مقابله با انهدام پیش‌رونده هست یا خیر؟ آیا استفاده از قاب خمشی مرکزگرا (استفاده از کابل‌های پس‌کشیده شده) توجیه اقتصادی دارد یا خیر؟ تفاوت اتصال PTED نسبت به اتصال گیردار در چیست؟ نحوه عملکرد، مدل‌سازی و مزیت‌های این اتصال چگونه است؟

در این مقاله سعی می‌شود تا رفتار این نوع اتصال در مقابل حذف ستون میانی در قاب خمشی (انهدام پیش‌رونده) بررسی شود.



شکل ۱- انهدام بخش‌هایی از ساختمان فدرال، شهر اوکلاهما، امریکا، ۱۹۹۵

## ۳- ادبیات تحقیق

در سال ۱۹۹۰ برای اولین بار، مفهوم اتصالات پس‌کشیده در سیستم‌های بتنی پیش‌ساخته مورد استفاده قرار گرفت [۱].

یکی از بزرگترین خطراتی که امروزه اکثر ساختمان‌های مهم و مراکز حساس را تهدید می‌کند، احتمال وقوع حملات تروریستی به چنین مراکز مهمی می‌باشد. از این رو مقاومت‌سازی سازه‌ها در مقابل انفجار، به عبارتی پیشگیری از این حوادث، از وظایف پدافند غیرعامل است. عموماً وقتی در اثر انفجار، یکی از اعضای باربر اصلی ساختمان تخریب می‌گردد، این تخریب به نوبه خود منجر به آسیب به سایر قسمت‌های سازه می‌گردد. چنانچه در طراحی و ساخت سازه، روش جلوگیری از توالی این تخریب‌ها مورد توجه قرار نگرفته باشد، نتیجه این امر، تخریب کلی سازه یا تخریب بخش بزرگی از سازه و ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در المان‌های آن خواهد بود. فرآیندی که شرح داده شد در ادبیات مهندسی عمران به عنوان خرابی پیش‌رونده<sup>۱</sup> نامیده می‌شود (شکل ۱).

امروزه در صنعت ساختمان‌سازی، قاب‌های خمشی جوشی یا پیچی فولادی (SMRF)<sup>۲</sup> به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معایب قاب‌های فولادی، تشکیل مفاصل پلاستیک و کمناش موضعی در اعضای سازه‌ای در تغییر شکل‌های بزرگ است. این موضوع می‌تواند منجر به از دست دادن عملکرد سازه گردد. در مقابل، سازه‌های مرکزگرا<sup>۳</sup> وجود دارند که با کمک کابل‌های با مقاومت بالا و باز شدن گپ‌ها در اتصالات، تغییر شکل‌های غیر الاستیک قابل توجه در تیر و ستون‌ها را حذف می‌کنند. در این مقاله، عملکرد استفاده از کابل‌های پس‌کشیده در قاب خمشی فولادی (PTED)<sup>۴</sup> در مقابل سناریوی حذف ستون طبقه اول (به هر علتی) بررسی می‌گردد.

## ۲- طرح تحقیق

در این تحقیق، تمرکز اصلی بر روی بررسی عملکرد اتصال با کابل‌های پس‌کشیده می‌باشد. با توجه به اینکه در کشور در این زمینه تحقیقات جدی صورت نگرفته است، همچنین به دلیل اینکه کابل‌های پس‌کشیده کاربردهای گوناگونی در صنعت ساختمان دارند و می‌تواند به عنوان راهکاری برای مقابله با انهدام پیش‌رونده مطرح باشد لذا این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به دلیل خصوصیات سیستم‌های مرکزگرا (SC)، این اتصالات می‌توانند در آینده به عنوان یکی از انواع اتصالات مورد استفاده در

- 1- Progressive Collapse
- 2- Steel Moment Resisting Frame
- 3- Self Centering
- 4- Post Tension Energy Dissipation

در سال ۲۰۰۸، تیسای<sup>۴</sup> مطالعه آزمایشگاهی را با مقیاس کامل بر روی چهار اتصال پس کشیده با میراگر اصطکاکی جان تیر انجام داد. با توجه به شکل (۳)، ابزارهای اصطکاکی در جان تیر قرار دارد. نتایج آزمایشات نشان داد در صورتی که تیرها و ستون‌ها الاستیک باقی بمانند، این اتصال می‌تواند چرخش‌های بزرگ را بدون کاهش مقاومت تحمل کند. همچنین این اتصال دارای حلقه هیسترتیک پایدار می‌باشد [۸].



شکل ۳- اتصال پس کشیده با میراگر اصطکاکی جان تیر [۸].

در سال ۲۰۰۷ ونک<sup>۵</sup> مطالعه آزمایشگاهی بر روی اتصال با کابل‌های پس کشیده و میلگرد به‌عنوان میراگر بر روی میز لرزان انجام داد.

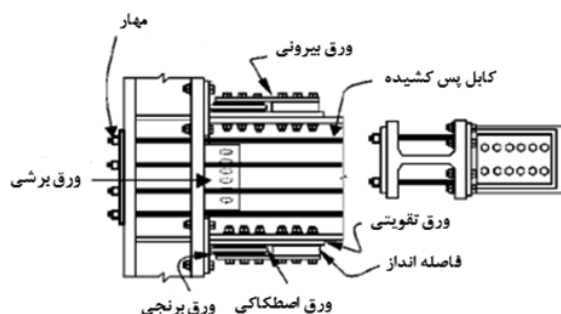
با توجه به تغییر شکل قائم غیرمنتظره انتهای تیر در مدل تحت بارهای لرزه‌ای شدید پیشنهاد می‌شود که سطوح انتهایی تیر متصل به ستون به منظور افزایش اصطکاک سندبلاست شود و یا صفحه برشی اضافی در اتصال تیر به ستون برای تامین مقاومت برشی بیشتر قرار داده شود. پاسخ‌های کرنش دلالت بر این موضوع دارد که بعد از زلزله‌های شدید، اتصال قاب خمشی با تسلیم تیر آسیب می‌بیند در صورتی که در اتصال پس کشیده، فقط میلگردهای میراکننده انرژی آسیب می‌بینند و تیرها بدون هیچگونه آسیب باقی می‌مانند. همچنین هزینه تعمیر تیر در اتصال قاب خمشی متعارف در صورت امکان، بسیار بیشتر از تعمیر سازه پس کشیده می‌باشد (شکل ۴) [۱۰].

سپس این اتصالات مورد توسعه قرار گرفتند و در سال ۱۹۹۳ این سیستم، در انجمن بین‌المللی استاندارد و تکنولوژی (NIST)<sup>۱</sup> مورد آزمایش قرار گرفت.

به طور کلی نتیجه گرفته شد که این اتصال یک اتصال مناسب برای کاهش آسیب و کاهش دررفت ماندگار در سازه در مقایسه با سازه‌های متداول است. همچنین تحقیق روی یک سیستم دیوار بتنی با استفاده از مفهوم پس کشیدگی توسط کوراما<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۴ انجام شده است. نتایج تحقیقات وی نشان داد که این سیستم دیوار می‌تواند تغییر شکل‌های بزرگ را بدون آسیب جدی تحمل نماید [۲].

طی یک دهه گذشته، اتصالات فولادی PT و سیستم‌های SC-MRF توسط محققان در کشورهای آمریکا، تایوان و ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت سیستم‌های مورد مطالعه، در ابزار میرایی آنها می‌باشد (اتصالات پس کشیده با نبشی‌های نشیمن و بالاسری به عنوان میراگر، اتصالات پس کشیده با میراگر اصطکاکی، اتصالات پس کشیده با میلگرد به عنوان میراگر). [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹]

در سال ۲۰۰۳، رجاس<sup>۳</sup> یک اتصال پس کشیده با میراگر اصطکاکی مطابق شکل (۲) ارائه نمود. در این اتصال، میراگر اصطکاکی در بال‌های تیر قرار دارد. این میراگر، شامل یک ورق اصطکاکی و دو لقمه برنجی است که منجر به میرایی اصطکاک و اتلاف انرژی می‌شود. در این اتصال کابل‌های فولادی با مقاومت بالا، بعد از نصب میراگر اصطکاکی، پس کشیده شده‌اند. کابل‌های پس کشیده به موازات تیر قرار دارند و خارج از ناحیه اتصال مهار شده‌اند. به واسطه نیروی پس کشیدگی اولیه کابل‌ها، بال‌های تیر در مقابل بال‌های ستون فشرده شده‌اند [۵].



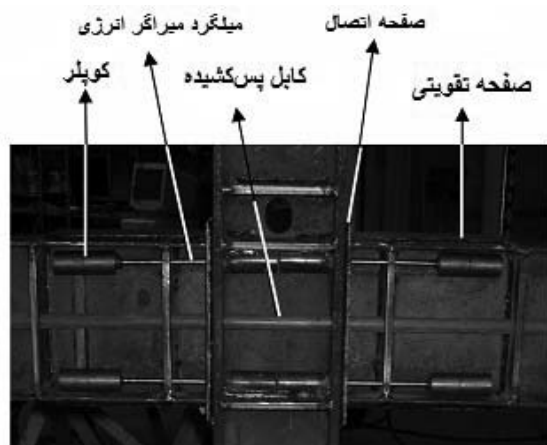
شکل ۲- اتصال پیشنهادی رجاس [۵]

4- Tsai  
5- Wank

1- National Institute of Standards and Technology  
2- Kurama  
3- Rojas

### ۳-۱- معرفی اتصال پس کشیده (PTED)<sup>۱</sup>

میراکننده‌های انرژی استفاده می‌شود. در این سازه‌ها اعضای میراکننده انرژی، المان‌هایی شبیه نبشی، میلگردهای فولادی، المان‌های اصطکاکی یا ویسکوالاستیک می‌باشند. اتصال PTED به معنی استفاده همزمان از کابل‌ها یا میلگردهای با مقاومت بالا (Post Tensioned) و استفاده از میراگرهای مختلف انرژی به عنوان (Energy Dissipation) می‌باشد. بنابراین اتصال PTED در واقع همان اتصال SC می‌باشد که در آن میراگر انرژی وجود دارد. در شکل (۴)، اتصال با کابل‌های پس کشیده و میلگرد به عنوان میراگر ارائه شده است.



شکل ۴- اتصال درونی تیر به ستون با کابل‌های پس کشیده [۱۰].

### ۴- روش‌های مدل‌سازی اتصال (PTED)

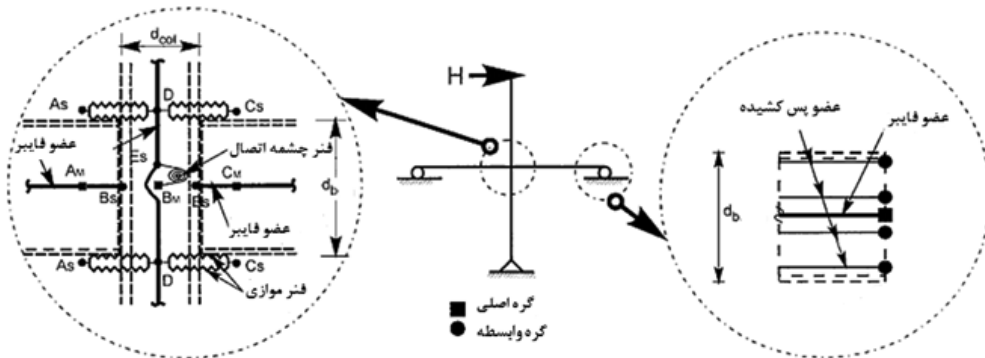
اتصال PTED در سال ۲۰۰۱ توسط رایسلز به کمک برنامه DRAIN مطابق شکل (۵) مدل‌سازی گردید. در این مدل برای یک سازه فولادی شش طبقه تحت بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله، آنالیز استاتیکی و تاریخچه زمانی انجام گرفت. در طی این تحلیل‌ها حداکثر دررفت طبقه، حداکثر تغییر مکان بام و حداکثر برش پایه در حالت اتصال پس کشیده کمتر از قاب خمشی بود. نتایج مطالعات عددی تاریخچه زمانی نشان داد که این قاب دارای اتلاف انرژی، مقاومت و شکل‌پذیری مناسب می‌باشد. همچنین پاسخ قاب پس کشیده از قاب با اتصالات صلب بهتر می‌باشد [۳].

چریستوپولاس<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۲ با برنامه RUAUMOKO اتصال پس کشیده با میلگرد مقاومت بالا به عنوان میراگر را مدل‌سازی نمود و نتایج نشان داد که دررفت‌های ماندگار در تمام سیستم‌های الاستوپلاستیک وجود دارد؛ در صورتی که در سیستم پس کشیده

قاب‌های خمشی جوشی یا پیچی به صورت گسترده به عنوان سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی در نواحی با خطر لرزه‌ای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قاب‌ها با اتصالات مناسب جوشی و پیچی بدون کاهش قابل توجه در مقاومت و سختی تحت بارهای زلزله، رفتار شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهند. برای به دست آمدن یک ظرفیت چرخشی بزرگ در نزدیکی اتصال تیر به ستون، بر مبنای AISC 2005، استفاده از اتصالات تیر با مقاطع کاهش یافته یا اتصالات با ورق انتهایی پیشنهاد شده است. در این اتصالات تغییر شکل غیرالاستیک در تیرها و در خارج از ناحیه بحرانی رخ می‌دهد و قاب خمشی فقط در ناحیه آسیب‌دیده انرژی را اتلاف می‌کند. امروزه از قاب‌های خمشی با اتصالات جدید انتظار می‌رود تغییر شکل‌های غیرالاستیک بزرگ را در تیرها و ستون‌ها برای زلزله‌های بزرگ تحمل نمایند. از معایب قاب‌های فولادی طراحی شده با آیین‌نامه جدید، تشکیل مفصل پلاستیک و کماتش موضعی در اعضای سازه‌ای در زلزله‌های بزرگ می‌باشد. تغییر شکل‌های دائمی غیرالاستیک در تیرها و ستون‌ها، دررفت‌های ماندگار بزرگی ایجاد می‌کند که این موضوع می‌تواند منجر به از دست دادن عملکرد سازه بعد از زلزله شود و سازه نیاز به تعمیر خواهد داشت.

در مقابل، در سازه‌های SC (مرکزگرا)، تغییر شکل‌های غیرالاستیک بزرگ و دررفت ماندگار در تیرها و ستون می‌تواند با باز شدن فاصله در اتصال حذف شود. بنابراین سازه‌های مرکزگرا می‌توانند بدون آسیب در اعضای اصلی سازه، بعد از زلزله به وضعیت اولیه خود باز گردند. برخلاف قاب‌های فولادی متعارف که بر شکل‌پذیری و طاقت مصالح اعضای سازه‌ای استوار است، رفتار سازه‌های مرکزگرا بر رفتار کابل یا میلگردهای پس کشیده با مقاومت بالا استوار است. در این اتصالات قبل از بارگذاری سیکلیک، کابل‌ها یا میلگردهای پر مقاومت پس کشیده می‌شوند. به دلیل نیروی پس کشیدگی که در کابل وجود دارد، در هنگام زمین‌لرزه، این کابل‌ها تمایل دارند تا سازه را به موقعیت اولیه خود (قبل از رخداد زلزله) بازگردانند. در این اتصال برای اینکه سازه خاصیت مرکزگرایی خود را حفظ نماید، باید کابل‌های پس کشیده و اجزای اصلی اتصال (تیر و ستون‌ها)، به صورت الاستیک باقی بمانند.

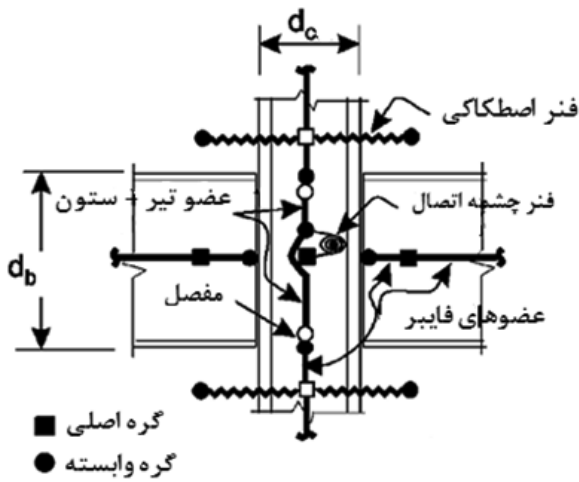
در اتصالات SC به منظور بهبود خصوصیات اتصال، از



شکل ۵- مدل تحلیلی اتصال [۳]

در این مقاله سه روش انجام شده برای مدل‌سازی اتصال PTED

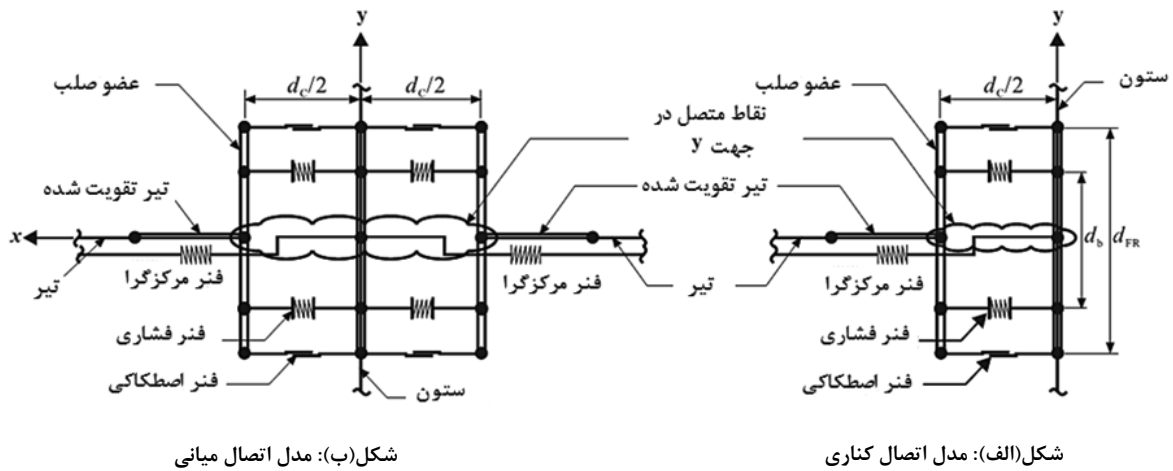
دریافت ماندگار برابر صفر می‌باشد [۴].



شکل ۶- مدل تحلیلی اتصال پس کشیده [۵]

در سال ۲۰۰۳ مطابق شکل (۶) اتصال پس کشیده با میراگر اصطکاکی در برنامه DRAIN توسط رجاس<sup>۱</sup> مدل‌سازی و تحلیل گردید. در این تحلیل‌ها اندرکنش بین سیستم دیافراگم کف و سیستم اتصال پس کشیده لحاظ شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که سختی الاستیک قاب پس کشیده بزرگتر از قاب خمشی متعارف می‌باشد [۵].

کیم<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۷ با استفاده از برنامه تجاری RUAUMOKO مطابق شکل (۷) اتصالات PTED را مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی غیر خطی انجام داد. در این مدل، فنرهای فشاری برای مدل‌سازی باز و بسته شدن فاصله در سطح مشترک تیر به ستون، و فنرهای اصطکاکی برای مدل‌سازی میراگر اصطکاکی و فنرهای مرکزگرا برای بازگرداندن سازه به وضعیت اولیه می‌باشند.



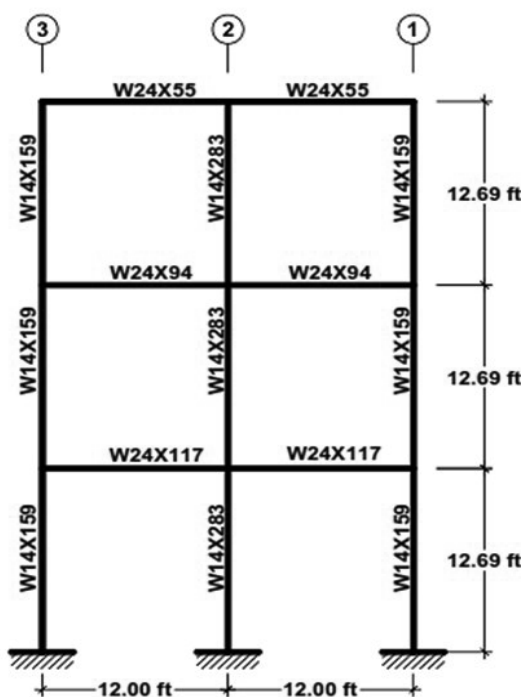
شکل ۷- مدل عددی اتصال پس کشیده [۶]

## ۶- مدل سازی و آنالیز نتایج قاب خمشی فولادی

### PTED و SMRF

Tsitos و همکارانش در آزمایشگاه Seesl در شهر بوفالو آمریکا شمالی، یک قاب فلزی دو دهانه سه طبقه را مطابق شکل (۹) مورد آزمایش قرار دادند [۷].

Tsitos جهت انجام آزمایش، یک نمونه آزمایشگاهی با مقیاس  $\frac{1}{3}$  طی سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ ساخت که مشخصات آن در جدول (۱) نشان داده شده است. فولاد مصرفی از نوع ASTM A572 Grade50 می‌باشد.



شکل ۹- قاب خمشی مورد آزمایش [۷]

جدول ۱- مقاطع تیر و ستون نمونه اصلی و مدل آزمایشگاهی [۷]

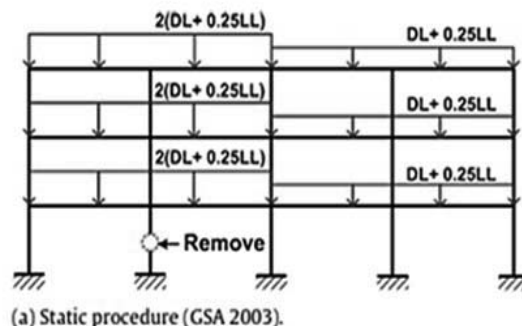
Member Description:	Prototype Section:	Moment of Inertia $I_{x,prot}$ (in <sup>4</sup> )	Plastic Modulus $Z_{p,prot}$ (in <sup>3</sup> )	Model Section:	Moment of Inertia $I_{x,model}$ (in <sup>4</sup> )	Plastic Modulus $Z_{p,model}$ (in <sup>3</sup> )	Ratio $Z_{p,prot}/Z_{p,model}$	Ratio $I_{x,prot}/I_{x,model}$
Exterior Column	W14x159	1900	287	W5x19	26.3	11.6	24.74	72.24
Interior Column	W14x283	3840	542	W6x25	53.4	18.9	28.68	71.91
1 <sup>st</sup> Floor Beam	W24x117	3540	327	W8x13	39.6	11.4	28.68	89.39
2 <sup>nd</sup> Floor Beam	W24x94	2700	254	W8x10	30.8	8.87	28.64	87.66
3 <sup>rd</sup> Floor Beam	W24x55	1350	134	W6x8.5	14.9	5.73	23.39	90.60

ارائه گردید. مدل سازی اتصال PTED در نرم افزار SAP2000 مشابه الگوی شکل (۷) قابل اجرا می‌باشد. بجای فنر مرکزگرا<sup>۱</sup> می‌توان کابل با پس کشیدگی لازم را جایگزین کرد.

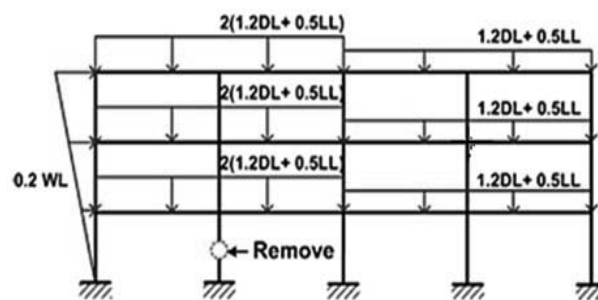
به منظور صحت سنجی، یک نمونه قاب خمشی با دو دهانه و سه طبقه که در آزمایشگاه Seesl<sup>۲</sup> واقع در دانشگاه بوفالو آمریکای شمالی مورد آزمایش قرار گرفته است، مدل سازی گردید. نتایج ارائه شده در بند ۶ همین مقاله، گواه بر صحت مدل سازی انجام شده می‌باشد.

## ۵- روش بارگذاری

در آنالیز استاتیکی غیرخطی مبتنی بر آئین نامه GSA ترکیب بار  $2(DL + 0.25LL)$  و طبق آئین نامه DOD مطابق شکل (۸) ترکیب بار  $2(DL + 0.5LL) + 0.2WL$  بر دهانه‌هایی که جنب ستون حذف شده واقع اند وارد می‌شود و برای سایر دهانه‌ها ضریب بزرگنمایی از ۲ به ۱ تبدیل می‌شود (WL: بار باد).



(a) Static procedure (GSA 2003).

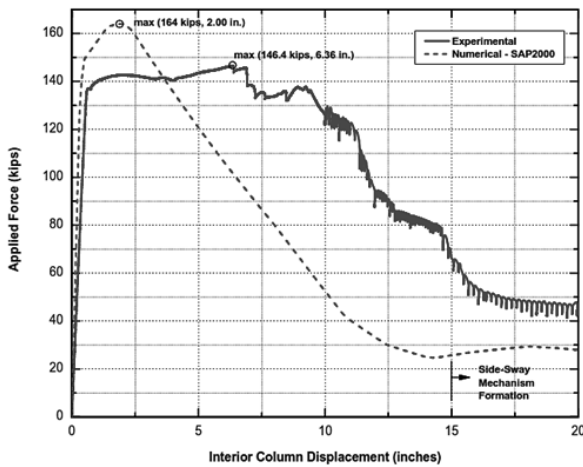


(b) Static procedure (DoD 2005).

شکل ۸- بارگذاری در روش استاتیکی [۱۱] و [۱۲]

1- SC Spring

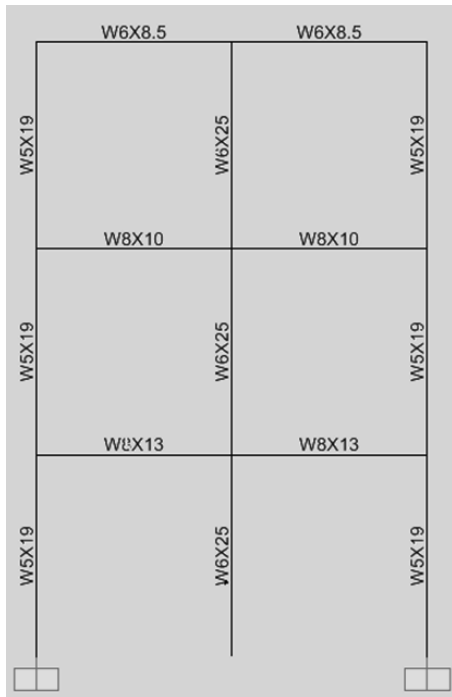
2- SEESL, (2008). Online Lab Manual of the Structural Engineering and Earthquake Simulation Laboratory



شکل ۱۱- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی دیگرام بار - جابجایی ستون میانی [۷]

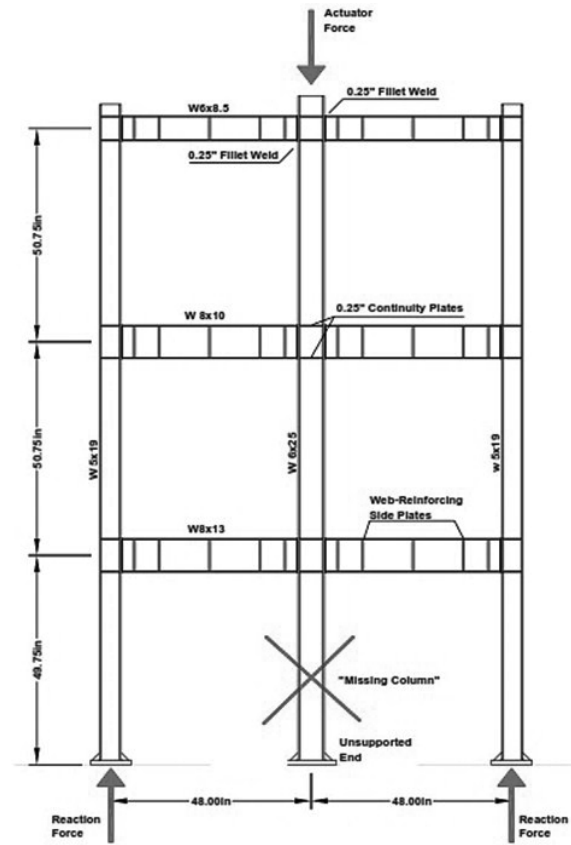
بالای ستون میانی وارد می‌گردد.

آنالیز استاتیکی غیرخطی به صورت کنترل با تغییر مکان انجام می‌شود و جابجایی قائم به صورت مرحله‌مرحله افزوده شده است تا جایی که سازه دیگر قابلیت باربری نداشته باشد (مثلاً مفاصل دچار گسیختگی گردند). در شکل (۱۳) تغییر شکل و وضعیت مفاصل در قاب خمشی SMRF نشان داده شده است. نقطه B شروع مفاصل پلاستیک و نقطه IO قابلیت استفاده بی‌وقفه، نقطه LS ایمنی



شکل ۱۲- مدل قاب خمشی SMRF

سپس بر اساس مشخصات مدل آزمایشگاهی که در جدول (۱) بیان گردید، نمونه‌ای در آزمایشگاه طبق ابعاد نشان داده شده در شکل (۱۰) تهیه کرد تا مقاومت این سازه در مقابل انهدام پیش‌رونده بررسی گردد.



شکل ۱۰- ابعاد مدل آزمایشگاهی [۷]

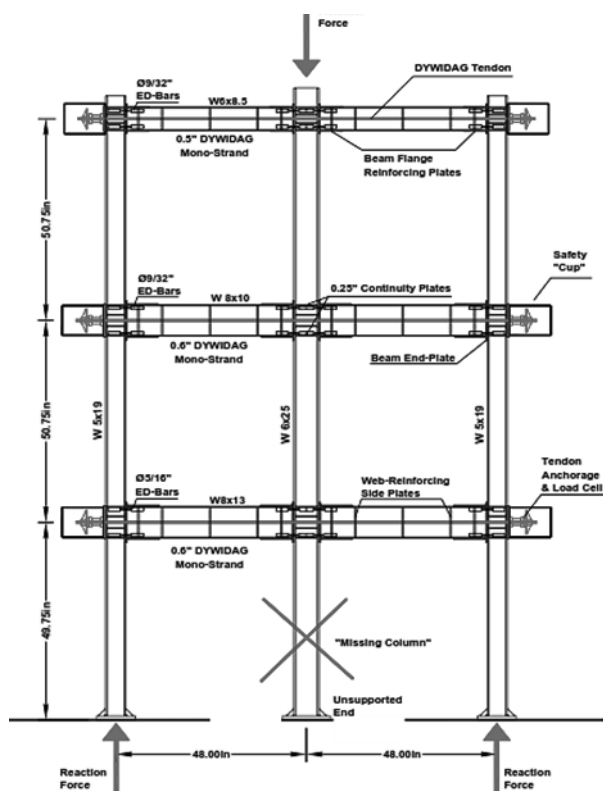
برای این منظور، بار به صورت نقطه‌ای به کمک جک‌های هیدرولیکی به بالای ستون میانی وارد می‌گردد. ستون‌های کناری دارای تکیه‌گاه بوده و آزادی این قاب در جهت عمود بر صفحه قاب، مهار گردیده است. همچنین قاب خمشی مورد نظر را توسط نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ v ۱۱ مدل‌سازی نمودند که نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در شکل (۱۱) ارائه گردیده است [۷].

اکنون طبق مشخصات نمونه آزمایشگاهی Tsitos، در نرم‌افزار sap ۲۰۰۰ v ۱۵ [۱۰] قاب خمشی دوبعدی SMRF مطابق شکل (۱۲) مدل‌سازی می‌گردد. ستون میانی طبقه اول آن حذف می‌گردد (با کمک حذف تکیه‌گاه). مطابق مدل آزمایشگاهی بار ۳۰ kips (معادل بار توصیه شده در آئین‌نامه) به صورت نقطه‌ای به

در شکل (۱۴) انطباق دیاگرام بار جابجایی قاب خمشی SMRF با مدل سازی عددی Tsitos مبین این مطلب است که مدل ساخته شده از دقت مناسبی برخوردار بوده و می توان مدل سازی انجام گرفته در نرم افزار ۲۰۰۰ v۱۵ SAP [۱۰] را به عنوان یک مدل قابل اعتماد پذیرفت.

باتوجه به نادر بودن آزمایشات انجام گرفته درخصوص قاب خمشی با اتصال PTED درمقابل انهدام پیش رونده، به مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط تسی توس و همکارانش اکتفا می کنیم (شکل ۱۵).

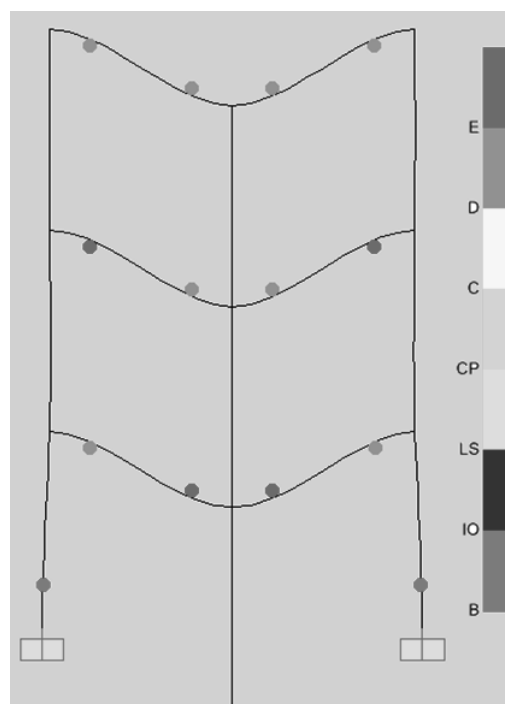
در آزمایشگاه seesl به طور مشابه با مقیاس  $1/3$ ، یک نمونه آزمایشگاهی از قاب خمشی با اتصال PTED با ابعاد نشان داده شده در شکل (۱۵) تهیه شد تا مکانیزم رفتار این قاب در مقابل تغییر شکل های بزرگ بررسی گردد.



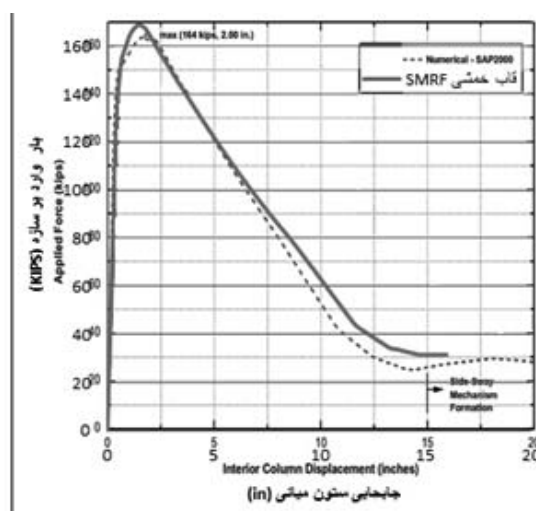
شکل ۱۵- ابعاد مدل آزمایشگاهی [۷]

مشخصات کابل های به کار برده شده و میلگردهای میراگر انرژی در جدول (۲) بیان شده است. مشابه قاب خمشی SMRF به کمک جک های هیدرولیکی، این قاب خمشی تحت بار نقطه ای افزایشنده

جانی، CP آستانه فروریزش و بعد از نقطه C اجزای سازه قابلیت باربری خود را از دست می دهند. از نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی قاب خمشی SMRF، دیاگرام بار-خیز قائم (منحنی بار افزون قائم) می باشد.

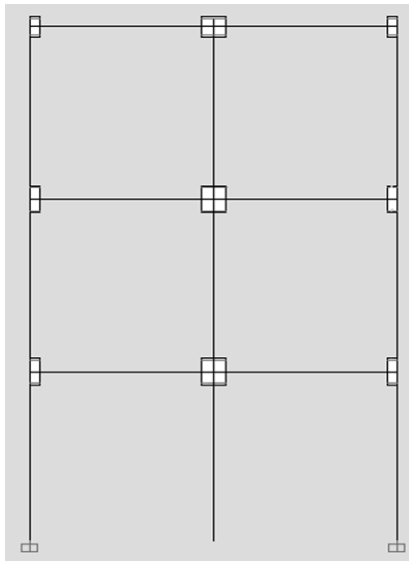


شکل ۱۳- تغییر شکل و خیز قائم قاب خمشی SMRF

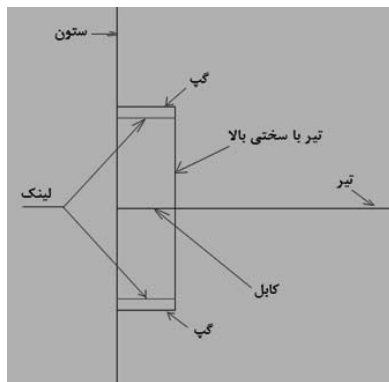


شکل ۱۴- مقایسه دیاگرام بار جابجایی قاب خمشی SMRF با مدل سازی عددی Tsitos

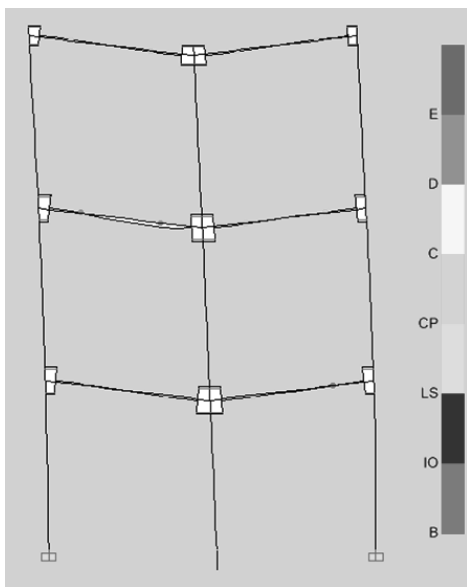




شکل ۱۷- مدل قاب خمشی PTED



شکل ۱۸- مدل اتصال PTED کناری

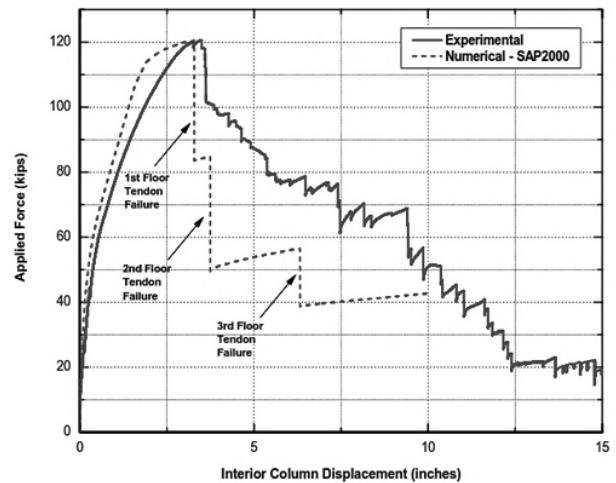


شکل ۱۹- تغییر شکل و خیز قائم قاب خمشی PTED

در بالای ستون میانی طبقه سوم قرار گرفته است. همچنین این قاب در نرم افزار SAP2000 v11 مدل سازی گردید که نتایج به دست آمده در شکل (۱۶) ارائه گردیده است.

جدول ۲- مشخصات کابل های پس کشیده و میراگرهای انرژی در طبقات [۷]

Component	1 <sup>st</sup> Floor	2 <sup>nd</sup> Floor	3 <sup>rd</sup> Floor
Beam Section	W8x13	W8x10	W6x8.5
Initial Force in PT Tendons (kips)	37	30	20
Area of PT Mono-Strands (in <sup>2</sup> )	0.434 (2Φ0.6" DYWIDAG)	0.434 (2Φ0.6" DYWIDAG)	0.306 (2Φ0.5" DYWIDAG)
Area of ED Bars (pair) (in <sup>2</sup> )	0.153 (2 Φ 5/16)	0.124 (2 Φ 9/32)	0.124 (2 Φ 9/32)
Thickness of Reinforcing Plates (in)	5/16	1/4	3/16



شکل ۱۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی دیگرام بار - جابجایی ستون میانی [۷]

بر اساس نمونه آزمایشگاهی Tsitos در نرم افزار SAP2000 v15، یک قاب خمشی دو بعدی مدل سازی گردید (شکل ۱۷).

جهت مدل کردن اتصال PTED همانند شکل (۱۸) از کابل های پس کشیده، گپ ها و فنرها (لینک ها) که خاصیت میراگرهای انرژی برای آنها تعریف شده است، استفاده می گردد.

در شکل (۱۹) تغییر شکل قاب خمشی PTED نشان داده شده است. از نتایج آنالیز استاتیکی غیر خطی قاب خمشی PTED، دیگرام بار- خیز قائم (منحنی بار افزون قائم) می باشد که در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

منحنی بار افزون قائم قاب خمشی معمولی در مقابل انهدام پیش‌رونده نسبت به قاب خمشی PTED، مقاومت بیشتری را نشان می‌دهد؛ ولی عملکرد قاب خمشی PTED در مقابل تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از انهدام پیش‌رونده بهتر است.

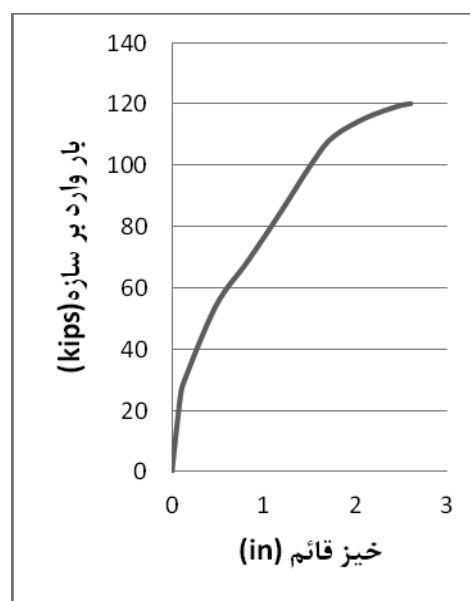
- در قاب خمشی PTED انرژی در میراگرها مستهلک می‌گردد و در صورت لزوم قابل تعویض می‌باشند.

- براساس مدل آزمایشگاهی تسی‌توس در قاب خمشی معمولی در تغییر شکل‌های بزرگ، سازه متحمل تغییر شکل‌های ماندگار و تیرها در ناحیه کشش دچار پارگی می‌گردد، در صورتی که در قاب خمشی PTED با پاره شدن میلگردها این انرژی آزاد می‌گردد و کابل‌ها، سازه را نگهداری می‌کنند.

- در سیستم‌های مرکزگرای ارائه شده توسط محققان بجای اتصالات گیردار معمولی، نیاز به میراگرها و ورق‌های تقویتی و کابل‌های با مقاومت بالا و تجهیزات مورد نیاز جهت پس کشیدگی می‌باشد؛ ولی در مقابل، تیر و ستون‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ، الاستیک باقی مانده و خسارت جانی و مالی بعد از حادثه را کاهش می‌دهد. بنابراین در مراکز مهم و حساس که احتمال حملات تروریستی و انفجار وجود دارد و همچنین در مکان‌هایی که احتمال وقوع تغییر شکل‌های بزرگ (به هر علتی از جمله زلزله) وجود دارد، استفاده از این سیستم می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.

## مراجع

1. Cheok, G. and Lew, H. "Performance of 1/3-Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads," *NISTIR 4433*, National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, MD, October (1990).
2. Morgen, B. and Kurama, Y.C. "A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames," *PCI Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 112-132 (2004).
3. Ricles, J. M., Sause, R., Garlock, M. M., and Zhao, C. "Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames." *ASCE Journal of Structural Engineering*. Vol. 127, No. 2, p.113-121 (2001).
4. Christopoulos, C. Self-Centering Post tensioned Energy Dissipat Dissipating (PTED) Steel Frames for Seismic Region. Ph.D. Dissertation. University of California (2002).



شکل ۲۰- دیاگرام بار جابجایی ستون میانی قاب خمشی PTED

منحنی بار افزون قائم قاب خمشی PTED در شکل (۲۰) نشان می‌دهد که بیشترین باربری این قاب ۱۲۰ kips و در خیز حدود ۳ inch می‌باشد که این موضوع با نمودار شکل (۱۶) مطابقت دارد و بعد از آن به دلیل عدم همگرایی آنالیز متوقف گردیده است.

## ۷- نتیجه گیری

- قاب خمشی معمولی در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ v ۱۵ مدل سازی گردید تا عملکرد آن با حذف ستون میانی طبقه اول (به هر دلیلی) در مقابل پدیده انهدام پیش‌رونده بررسی گردد. مدل ساخته شده از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌توان مدل سازی انجام گرفته را به عنوان یک مدل قابل اعتماد پذیرفت.

- سه روش مدل سازی اتصال PTED مورد بررسی قرار گرفته و یک روش دیگر ارائه گردید که براساس نتایج، مدل ارائه شده جهت مدل سازی و آنالیز قاب‌های خمشی PTED مناسب ارزیابی می‌گردد.

- هر دو قاب SMRF و PTED، بارهای سه برابر بیشترین ترکیب بار مرده و زنده (۹۰ kips) را بدون هیچگونه آسیبی (در محدوده رفتار الاستیک سازه) تحمل می‌کنند.

- قاب خمشی PTED با کمک کابل‌ها و میراگرهای انرژی، تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر و ستون‌ها را به تاخیر می‌اندازد. همچنین مانع از فروریزش سازه می‌گردد. بنابراین هر چند که

5. [Δ]Rojas, P. Seismic Analysis, Design and Evaluation of Post Tensioned Friction Damped Connections for Steel Moment Resisting Frame. Ph.D. Dissertation, Lehigh University (2003).
6. Kim, H. Self-Centerin Steel Moment – Resisting Frames With Energy Dissipating Systems .Ph.D. University of Toronto (2007).
7. Tsitos, A. Experimental and Numerical Investigation of the Progressive Collapse of Steel Frames .Ph.D. Dissertation, University at Buffalo, the State University of New York (2009).
8. Tsai, K.-C., Chou, C.-C., Lin, C.-L., Chen, P.-C. and Jhang, S.-J. connections using bolted friction devices”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics (2008).
9. Chou, C.-C., Chen, J.-H., Chen, Y.-C. and Tsai, K.-C. “Evaluating performance of post-tensioned steel connections with strands and reduced flange plates” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, p. 1167-1185 (2006).
10. Wang, D. (2007). Numerical and Experimental Studies of Self-Centering Post-Tensioned Steel Frames Ph.D. Dissertation, The State University of New York at Buffalo, NY 14260.
11. General Services Administration (GSA), Progressive Collapse Analysis and design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, June 2003, Washington, D.C (2003).
12. Department of Defense, (DOD), Design of Building to Resist Progressive Collapse, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03, 25 January, 2005, Washington, D.C (2005).
13. Computers and Structures Inc. (CSI), SAP 2000 Advanced Structural Analysis Program, Version 15.1.0, Berkeley, CA, U.S.A (2011).

---

## The Attitude of Bending Reinforced Steel Frame with Back Pulled Cable versus Advancing Failure

M. Vatani <sup>1</sup>

H. Khoda Rahmi <sup>2</sup>

A. R. Sarve Ghad Moghaddam <sup>3</sup>

### Abstract

Considering terrorist and hostile attacks against our homeland, investigating the structure performance against explosions and the phenomenon of advancing failure is of utmost importance. Therefore; structure hardening against explosions and the phenomenon of advancing destruction is one of the important issues in passive defense. This article deals with the attitude of steel structures with ordinary bending frame (SMRF) and the reinforced bending frame with back pulled cable (PTED) against advancing failure. In this regard, the alternate load path method (APM) has been used based on the DOD and GSA Directive. According to this method, the structure frame, after the elimination of the pillars of the first floor, should behave in such a manner that the first failure does not expand. Therefore; modeling is performed in the SAP2000 V15 software. To analyze the structures, non-linear static method is employed. The non-linear static analysis results of the software regarding the three-storey structure are compared with those of the experimental results of researchers showing a good compatibility. The performed analysis indicates that although the vertical envelope curve of the ordinary bending frame has more resistance against advancing destruction, the performance of the bending frame PTED performs better against big deformities caused by advancing destruction. The bending frame PTED, with the help of cables and energy dampers, prevents plastic deformities in pillars and shores and the structure collapse, as well. Moreover, the energy in the dampers is consumed and if necessary, will be replaced.

**Key Words:** *Advancing Failure, Bending Frame, Back Pulled Cable, Alternate load path, Non-linear Static Analysis*

---

1- MS Candidate of Imam Hussein Comprehensive University - Writer in Charge

2- Associate Professor and Academic Member of Imam Hussein Comprehensive University

3- Associate Professor of Research Center of Earth Quake and Academic Member of Tehran University