

## تحلیل عددی اتصالات خمشی فولادی پس کشیده همراه با نشی‌های فوقانی و تحتانی

روح الله احمدی جزینی

دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران

پیمان شادمان حیدری

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران،

ایران

مهدی امری

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، مراغه، ایران

mehdi\_amrii@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶

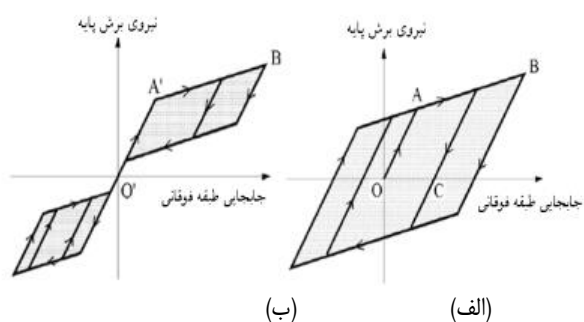
### چکیده:

به منظور کاهش یا حذف تغییرشکل‌های باقی‌مانده ایجاد شده در اعضای اصلی سازه پس از باربرداری زلزله، می‌توان از سیستم‌های خودمرکز استفاده نمود. یکی از روش‌های ایجاد خاصیت خودمرکزی در سازه‌ها، استفاده از اتصالات پس‌کشیده فولادی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل عددی به روش اجزا محدود، به مطالعه رفتار اتصال پس‌کشیده فولادی همراه با نشی‌های فوقانی و تحتانی پیچ شده به بال تیرو بال ستون، تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته و با استفاده از مقایسه مقادیر شاخص‌های خسارت گوناگون، نقش عوامل مختلف در عملکرد این اتصال بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد، با استفاده از روش پس‌کشیدگی، توان باربری اتصال افزایش قابل توجهی یافته درحالی‌که تغییر شکل‌های باقی‌مانده در اعضای اصلی اتصال ناچیز می‌باشد. در یک اتصال پس‌کشیده ناحیه ماکزیمم تنش ایجاد شده در تیر بر روی بال تیر بوده و استفاده از ورق تقویت با طول بزرگتر سبب کاهش مقادیر تنش‌های ایجاد شده در تیر و کاهش شاخص‌های خسارت و در نتیجه کاهش احتمال وقوع گسیختگی ترد در نشی‌های کششی اتصال می‌شود.

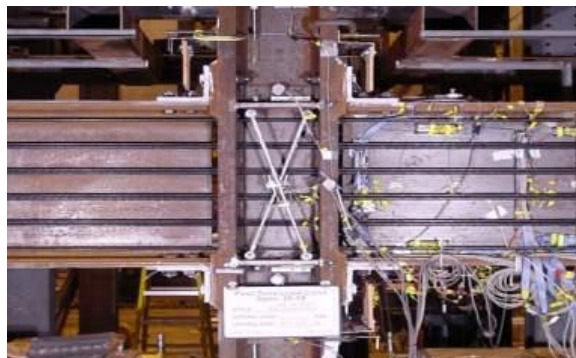
**کلید واژگان:** سیستم‌های خودمرکز، اتصالات پس‌کشیده فولادی، تحلیل عددی به روش اجزا محدود، شاخص‌های خسارت اتصالات

## ۱- مقدمه

می باشند. تاکنون ابزارهای مستهلک کننده انرژی گوناگونی نظیر میله های فولادی تسلیم شونده، صفحات فلزی با عملکرد اصطکاکی نصب شده بر روی بال و یا در جان تیر و نبشی های فوقانی و تحتانی، برای این اتصالات ارائه شده اند [۱،۳،۴]. در این تحقیق به بررسی رفتار اتصالات فولادی پس کشیده همراه با نبشی های فوقانی و تحتانی پرداخته شده است. در این اتصالات ابتدا تیر و ستون توسط نبشی های پیچ شده به بال تیر و بال ستون، به یکدیگر متصل شده، سپس کابل های پرمقاومت فولادی از درون ستون عبور کرده، در دو طرف جان تیر و به موازات آن قرار گرفته و در خارج از ناحیه اتصال مهار می شوند (شکل ۲). نیروی پس کشیدگی اولیه ایجاد شده در کابل های فولادی، ممان مقاومی را در اتصال ایجاد کرده و سبب بازگرداندن اعضای اتصال به وضعیت اولیه شان پس از باربرداری می شود. انرژی وارد شده به اتصال از طریق نبشی های فوقانی و تحتانی مستهلک شده بطوریکه در پایان بارگذاری، نبشی ها دچار تغییر شکل های پلاستیک بزرگی شده و می بایستی تعویض شوند. نبشی ها، علاوه بر استهلاک انرژی در تأمین مقاومت خمشی و برشی اتصال نیز مشارکت دارند.



شکل ۱- نمودار هیستریزس ایده آل نیرو-جابجایی، (الف) سیستم های سازه ای معمول، (ب) سیستم های خودمرکز [۳]



شکل ۲- نمونه آزمایشگاهی اتصالات فولادی پس کشیده همراه با نبشی های فوقانی و تحتانی [۲]

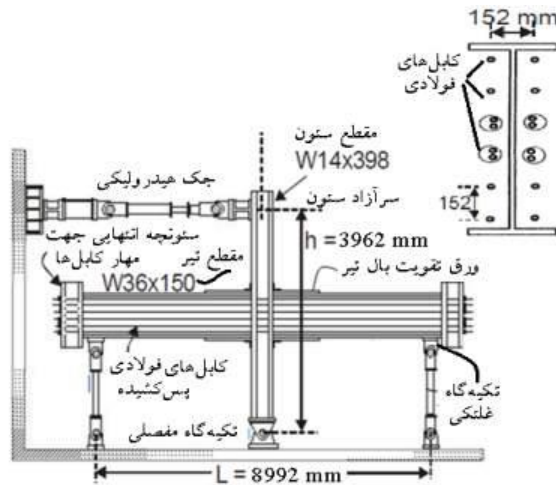
با وقوع زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴ میلادی، شکست های متعددی در ناحیه جوش نفوذی اتصالات قاب های خمشی فولادی مشاهده شد. پس از وقوع این زلزله، اتصالات فولادی جدیدی نظیر اتصال تیر با مقطع کاهش یافته، اتصال تیر با ورق تقویت پیچ یا جوش شده به بال تیر و اتصال تقویت شده با استفاده از ماهیچه های فولادی، جهت بهبود عملکرد لرزه ای اتصالات ارائه شدند. اگرچه این اتصالات با دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از ناحیه بحرانی نزدیک اتصال، احتمال وقوع شکست ترد در ناحیه جوش اتصال را کاهش داده و سبب بهبود عملکرد اتصالات جوشی تیر به ستون فولادی می شوند، اما همچنان پس از باربرداری زلزله، تغییر شکل های باقی مانده بزرگی در اعضای اصلی اتصال وجود داشته، که این امر، علاوه بر دشوار نمودن فرآیند بهسازی سازه آسیب دیده، سطح عملکرد سازه در مقابل زلزله های بعدی را کاهش می دهد [۲،۱]. یکی از راهکارهای کاهش و یا حذف تغییر شکل های باقیمانده ایجاد شده در اعضای اصلی سازه، استفاده از سیستم های سازه ای خودمرکزی باشد. سیستم خودمرکز<sup>۱</sup> به سیستمی اطلاق شده که پس از باربرداری توانایی بازگرداندن اعضای اصلی تشکیل دهنده اش به موقعیت اولیه خود را دارد. در شکل (۱) نمودار هیستریزس ایده آل نیرو-جابجایی دو سیستم خودمرکز و الاستو-پلاستیک نشان داده شده است. سطح سایه خورده میان حلقه ها معرف میزان انرژی مستهلک شده در این دو سیستم می باشد. در سیستم های الاستو-پلاستیک که سازه های متداول در این گروه قرار گرفته، انرژی رسیده به سازه در درون اعضای اصلی سازه جریان یافته و به طور عمده از طریق فرآیند تسلیم و ایجاد تغییر شکل های پلاستیک در این اعضا، مستهلک می شود.

مطابق شکل (۱-الف) استهلاک انرژی در سازه های معمول همراه با ایجاد تغییر شکل های باقی مانده بزرگ در اعضای سازه بوده بطوریکه هرچه انرژی مستهلک شده بیشتر باشد، طول OC که معرف میزان تغییر شکل های باقی مانده در اعضای سازه است نیز بزرگتر می باشد. این در حالی است که در یک سیستم سازه ای خودمرکز (شکل ۱-ب)، انرژی رسیده به سازه، به درون قطعات مخصوصی که به منظور استهلاک انرژی در این سیستم تعبیه شده است، جریان یافته و در آنجا مستهلک می شود. بنابراین خسارت اعضای اصلی سازه به حداقل مقدار ممکن رسیده و تغییر شکل های باقی مانده در این اعضا پس از باربرداری، بسیار ناچیز و یا در حد صفر می باشد [۳].

یکی از روش های ایجاد خاصیت خود مرکزی در سازه ها استفاده از اتصالات پس کشیده فولادی است. این دسته از اتصالات شامل دو جزء اصلی: (۱) کابل های پرمقاومت فولادی و (۲) وسیله مستهلک کننده انرژی

<sup>۱</sup>Self-Centering System

بوده که در شش ردیف، در عمق جان و دوطرف جان تیر قرار گرفته و در انتهای تیرها مهار می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳- جزئیات نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی [۲]

## ۲-۲- معرفی مدل‌های عددی

در جدول (۱) مشخصات پنج مدل اتصال پس کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی آورده شده است. در این جدول  $T_0$ ، معرف اندازه نیروی پس کشیدگی اولیه ایجاد شده در هر کابل فولادی و  $L$  طول ورق تقویت متصل شده به بال تیر می‌باشد. به غیر از مدل  $Sp2$  که تحت نیروی پس کشیدگی کل معادل ۱۶۰۰ کیلونیوتن قرار دارد بقیه مدل‌ها تحت نیروی کلی معادل ۳۲۰۰ کیلونیوتن پس کشیده شده‌اند. با استفاده از تحلیل عددی این پنج مدل، نقش عواملی چون تعداد کابل‌ها، نیروی پس کشیدگی اولیه در کابل‌ها، اثر توأم بارمحوری و بارچرخه‌ای و طول ورق تقویت بال تیر بر روی رفتار این دسته از اتصالات پس کشیده بررسی شده است. هندسه کلی، مقطع تیر، ستون و نبشی، ابعاد ورق‌های پیوستگی و مضاعف، مشخصات مصالح، شرایط مرزی و تکیه‌گاهی در تمام نمونه‌ها یکسان بوده و همگی تحت بارچرخه‌ای جانبی (اعمالی به صورت افقی به سرآزاد ستون) معادل دررفت ۴ درصد قرار گرفته‌اند.

## ۲-۳- مشخصات مصالح

مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد استفاده شده در ساخت قطعات مختلف تشکیل دهنده مدل در جدول (۲) آورده شده است. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فولاد مورد استفاده به ترتیب  $200 \text{ GPa}$  و  $0.3$  می‌باشد.

Garlock و همکاران [۲] نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی از اتصالات فولادی پس کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد مطالعه قرار داده و فقط با استفاده از مقایسه نمودارهای هیستریزیس نیرو-جابجایی و ممان-دوران این نمونه‌ها، نقش عواملی نظیر تعداد کابل‌های فولادی و اندازه نیروی پس کشیدگی را بر روی رفتار این دسته از اتصالات مورد بررسی قرار دادند. با توجه به محدودیت‌های تحلیل آزمایشگاهی، در این تحقیق با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل عددی مدل‌های مختلفی از اتصالات پس کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی، نقش عواملی نظیر تعداد کابل‌های فولادی پس کشیده، اندازه نیروی پس کشیدگی، اثر توأم بارمحوری و بارچرخه‌ای آورده به ستون و طول ورق تقویت بال تیر، بر روی رفتار این اتصالات بررسی شده است. بدین منظور پنج مدل مختلف از این اتصالات ساخته شده و نمودار هیستریزیس نیرو-جابجایی، چگونگی توزیع تنش در معیار میسز بر روی خط مرکزی بال تیر و ماکزیمم تنش ایجاد شده در تیرو ستون اتصال در دو حالت آخرین سیکل بارگذاری و مرحله باربرداری نهایی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از طرفی دیگر با توجه به ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ در نبشی‌ها و مستهلک شدن آنها در طول بارگذاری، مقادیر شاخص‌های خسارت در طول مقطع بحرانی نبشی مدل‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲-۱- مدل‌سازی اتصالات

### ۲-۱-۱- ابعاد و هندسه کلی مدل

در این تحقیق به منظور تحلیل و بررسی اتصالات تیر به ستون خمشی فولادی پس کشیده، از مدل‌سازی عددی به روش اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است [۵]. جهت ساخت مدل عددی اتصالات و همچنین صحت سنجی روند مدل‌سازی عددی، هندسه و مشخصات نمونه آزمایشگاهی [۲] نشان داده شده در شکل (۳) مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل مقطع تیر و ستون به ترتیب  $W14x398$  و  $W36x150$  بوده و از نبشی با ساق‌های مساوی به ابعاد مقطع  $203x203x19 \text{ mm}$  و به طول  $406 \text{ mm}$  استفاده شده است. جهت تقویت تیر، ورق‌هایی به ابعاد  $914x356x25 \text{ mm}$  توسط جوش گوشه به بعد  $13 \text{ mm}$  به بال‌های فوقانی و تحتانی تیر متصل شده‌اند. ناحیه چشمه اتصال توسط ورق‌های پیوستگی و مضاعف به ابعاد  $406x292x32 \text{ mm}$  جوش شده به جان ستون، تقویت شده است. هریک از نبشی‌های فوقانی و تحتانی توسط یک ردیف ۴ تایی و دو ردیف ۲ تایی پیچ  $A490$  به قطر  $32$  میلی‌متر به ترتیب به بال ستون و بال تیر متصل می‌شوند.

جهت ساخت قطعات تشکیل دهنده مدل عددی در نرم‌افزار ABAQUS، از المان Wire در کابل‌های فولادی و از المان Solid در سایر قطعات تشکیل دهنده مدل استفاده شده است. هر کابل پرمقاومت فولادی شامل ۷ رشته درهم تنیده فولادی به مساحت کل  $140$  میلی‌متر مربع

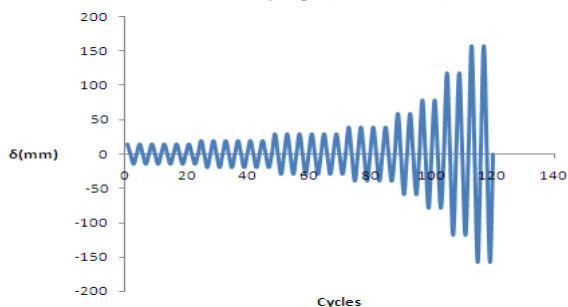
جدول ۱- مشخصات مدل‌های عددی مورد مطالعه

مدل	بار محوری (Mpa)	L(mm)	تعداد کابل	TO kN
SP1	-----	۹۱۴	۱۶	۲۰۰
SP2	-----	۹۱۴	۲۰	۸۰
SP3	-----	۹۱۴	۲۰	۱۶۰
SP4	۶۹	۹۱۴	۱۶	۲۰۰
SP5	-----	۱۲۱۹	۱۶	۲۰۰

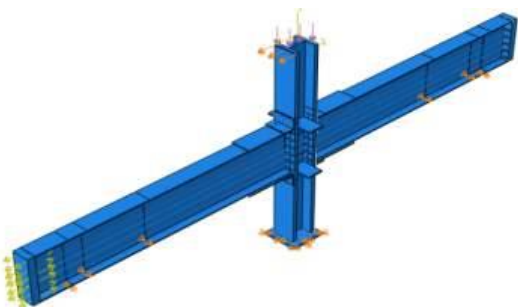
جدول ۲- مشخصات فولاد قطعات مختلف مدل آزمایشگاهی [۲]

قطعه	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)
بال تیر	۳۶۲	۴۹۸
جان تیر	۴۱۴	۵۲۷
بال ستون	۳۵۶	۴۹۹
جان ستون	۳۴۵	۴۹۶
ورق تقویتی	۳۹۷	۵۷۳
نبشی	۳۸۳	۵۴۵
کابل های پس کشیده	۱۶۲۰	۱۹۰۰

استاتیکی غیرخطی بوده که شامل تحلیل غیرخطی مصالح و هندسه می باشد. تحلیل هر مدل در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول، تحلیل مربوط به پس کشیدگی کابل‌ها و اعمال نیروی محوری و در مرحله دوم، تحلیل تحت بارچرخه ای انجام می شود.



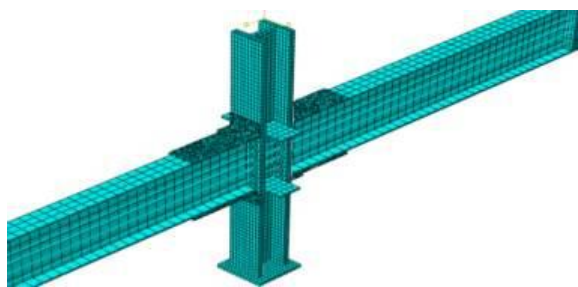
شکل ۴- نحوه اعمال بارچرخه ای به سرآزاد ستون



شکل ۵- نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مدل عددی

## ۲-۶- گسسته سازی مدل

المان تشکیل دهنده تمام قطعات، المان‌های ۶ وجهی ۸ گرهی بوده اما کابل‌های پس کشیده از المان‌های ۲ گرهی wire تشکیل شده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶- مدل حجمی مش بندی شده

## ۲-۴- شرایط تکیه گاهی

بر اساس نمونه آزمایشگاهی [۲]، تکیه‌گاه پای ستون از نوع مفصلی و تکیه-گاه‌های انتهایی تیرها از نوع غلتکی بوده که در فاصله ۴۲۶۷ میلی‌متر از وجه ستون قرار گرفته‌اند. جهت جلوگیری از کمانش جانبی هر تیر، در فواصل ۳۰۴۸ و ۴۱۶۹ میلی‌متر از وجه ستون، تکیه‌گاه جانبی قرار داده شده است. بنابراین در مدل عددی اتصال (شکل ۴)، جابجایی افقی و جانبی گره‌های کناری و جابجایی افقی، جانبی و قائم گره‌های میانی ورق ارتجاعی جوش شده به پای ستون و جابجایی قائم گره‌های تیر در محل تکیه‌گاه غلتکی، مقید می‌شوند. جهت مدل‌سازی تکیه‌گاه جانبی، جابجایی جانبی عمود بر صفحه گره‌های بال تیر در این فواصل مقید شده است.

## ۲-۵- بارگذاری و تحلیل

تمام مدل‌ها به جز مدل SP4، فقط تحت بارچرخه ای قرار گرفته و مدل SP4 علاوه بر بارچرخه‌ای تحت بار محوری نیز قرار گرفته است. بارچرخه ای به صورت تغییر مکانی در بالای ستون و بر اساس الگوی ارائه شده توسط SAC-97 [۷]، اعمال شده است (شکل ۴). بار محوری وارد شده به نمونه SP4 به صورت گسترده در سطح مقطع ستون اعمال می گردد (شکل ۵). نیروی محوری معادل بارگسترده وارده به سرآزاد ستون در مدل SP4، ۲۵۳۵ کیلو نیوتن می‌باشد. نوع تحلیل مدل‌ها به صورت

### ۳- معرفی شاخص های خسارت

جهت مقایسه رفتار اتصالات پس کشیده مورد مطالعه، از شاخص های خسارت شامل شاخص های فشار، میسز، کرنش پلاستیک معادل، سه محوره و گسیختگی استفاده شده که توسط El-Tawil [۶] پیشنهاد شده اند.

#### ۳-۱- شاخص فشار

شاخص فشار (PI) به صورت نسبت تنش هیدرواستاتیکی ( $\sigma_m$ ) تقسیم بر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) تعریف می شود. تنش هیدرواستاتیکی معادل منفی یک سوم مجموع درایه های روی قطار اصلی تانسور تنش بوده و از رابطه (۱) بدست می آید:

$$\sigma_m = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma_{ij}) = -\frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (1)$$

که در این رابطه ( $\sigma_{ij}$ ) معرف تانسور تنش و  $i, j$  بیانگر محورهای مختصاتی کلی بوده بطوریکه  $i, j = 1, 2, 3$  است.

مقادیر تنش های هیدرواستاتیکی کششی بزرگ معمولاً با تنش های اصلی بزرگ همراه بوده بطوریکه چنانچه در ماده ترک یا عیب دیگری وجود داشته باشد، وقوع این تنش های اصلی بزرگ منجر به افزایش ضریب تشدید تنش در نوک ترک شده و احتمال وقوع شکست ترد را افزایش می دهد. این شکست های ترد به صورت ناگهانی و بدون وقوع تغییر شکل های پلاستیک قابل توجه رخ داده و لذا مطلوب نمی باشند. از طرفی دیگر تنش هیدرواستاتیکی بزرگ سبب کاهش شکل پذیری عضو شده و بر پتانسیل شکست بیشتری دلالت دارد.

#### ۳-۲- شاخص میسز

شاخص میسز (MI) به صورت تنش در معیار فون میسز ( $\sigma_{vm}$ ) تقسیم بر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) محاسبه می شود. تنش در معیار فون میسز از رابطه (۲) بدست می آید:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $S_{ij}$  معرف درایه های تانسور تنش انحرافی بوده که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شوند:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \quad (3)$$

در رابطه بالا  $\sigma_{ij}$  درایه های تانسور تنش اولیه،  $\sigma_m$  مقدار تنش هیدرواستاتیکی و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیکر بوده که مقدارش برابر یک است هرگاه  $i=j$  بوده و برای  $i \neq j$  معادل صفر می باشد.

#### ۳-۳- شاخص کرنش پلاستیک معادل

شاخص کرنش پلاستیک معادل (PEEQI) از تقسیم مقدار کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) بر کرنش تسلیم ( $\epsilon_y$ ) تعریف شده و معیاری از

شکل پذیری موضعی می باشد. کرنش پلاستیک معادل با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p} \quad (4)$$

که در این رابطه  $\epsilon_{ij}^p$ ، مولفه های کرنش پلاستیک در امتداد محورهای  $i$  و  $j$  می باشد.

#### ۳-۴- شاخص سه محوره

شاخص سه محوره (TRI) به صورت حاصل تقسیم تنش هیدرواستاتیکی بر تنش میسز تعریف شده و از رابطه (۵) بدست می آید:

$$TRI = \frac{PI}{MI} \quad (5)$$

شاخص سه محوری کمیت مهمی جهت بررسی وقوع شکست شکل پذیر در فلزات می باشد. مقادیر TRI بین 0.75 و 1.5 معرف کاهش شدید مقدار کرنش نظیر گسیختگی فلزات است و چنانچه مقدار TRI از 1.5 نیز بیشتر باشد، نشانگر ایجاد گسیختگی ترد می باشد.

#### ۳-۵- شاخص گسیختگی

شاخص گسیختگی (RI) به عنوان معیاری از پتانسیل گسیختگی یک مقطع مورد بررسی با استفاده از رابطه (۶) تعریف می شود:

$$RI = \frac{PEEQ}{\epsilon_y} \frac{\sigma_m}{\exp(1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}})} \quad (6)$$

در رابطه (۶) عبارت صورت کسر شاخص کرنش پلاستیک معادل و عبارت  $\frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}$  همان شاخص سه محوری بوده که در قسمت های قبلی معرفی شدند.

#### ۴- صحت سنجی مدل سازی عددی

جهت اطمینان از درستی مدل سازی عددی انجام شده در این تحقیق دو نمودار نیروی جانبی-جابجایی ( $H-\Delta$ ) و ممان خمشی- زاویه شکاف در محل اتصال ( $M-\theta_r$ )، بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۲] و تحلیل عددی مدل SP1 بایکدیگر مقایسه شده اند (شکل های ۸ و ۹). H معادل نیروی جانبی است که در هر مرحله از آزمایش به سرآزاد ستون وارد شده و  $\Delta$ ، معادل جابجایی افقی سرآزاد ستون می باشد. M، ممان خمشی ایجاد شده در تیر در نزدیک وجه ستون است. با افزایش ممان خمشی وارده به اتصال به مرحله فشاربرداری رسیده که در این حالت، یکی از بال های تیر از بال ستون جدا شده و شکافی میان تیر و ستون در محل اتصال ایجاد می شود که در شکل (۷) نشان داده شده است.

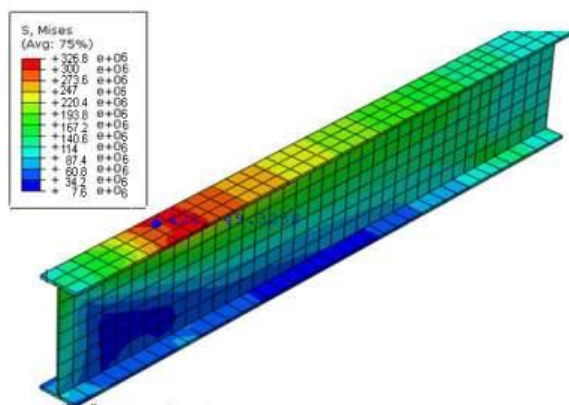
از مقایسه نمودارهای  $H-\Delta$  و  $M-\theta_r$  بدست آمده از تحلیل عددی مدل SP1 انجام شده در این تحقیق و نتایج آزمایشگاهی (شکل های ۸ و ۹)،



مقادیر حداکثر نیروی جانبی و ممان بدست آمده از تحلیل عددی انجام شده در این تحقیق به ترتیب معادل ۱۳۵۵ کیلو نیوتن و ۲۱۱۲ kN.m می باشد. مقادیر نیروی جانبی و ممان براساس نتایج تحلیل آزمایشگاهی انجام شده توسط Garlock و همکاران [۲] به ترتیب ۱۲۹۰ و ۲۲۶۰ kN.m بوده و در نتیجه اختلافی معادل ۵ درصد برای نتایج نیرویی و حدود ۶/۵ درصد برای نتایج ممان، بین دو تحلیل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. مطابقت مناسب نمودارها و درصد اختلاف کم میان مقادیر حداکثر بدست آمده از نتایج تحلیل عددی و تحلیل آزمایشگاهی، حاکی از رضایت بخش بودن مدل سازی عددی است.

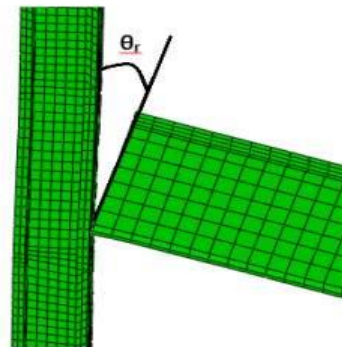
### ۵- نتایج تحلیل عددی

از آنجاییکه یکی از مزایای اتصالات پس کشیده توانایی اتصال در حذف یا کاهش تغییر شکل های پلاستیک ایجاد شده در اعضای اصلی اتصال می باشد، در شکل های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب چگونگی توزیع تنش در معیار میسز ایجاد شده در تیر و ستون مدل SP1 برحسب پاسکال در دو حالت (الف) آخرین مرحله بارگذاری و (ب) مرحله باربرداری نهایی (حذف بار چرخه ای) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می شود ناحیه ماکزیمم تنش ایجاد شده در تیر، بر روی بال تیر و از قسمت انتهایی محل اتصال ورق تقویت بال به تیر شروع می شود. با توجه به شکل (۱۰-ب) نواحی ماکزیمم تنش ایجاد شده در ستون، در جان و بر روی بال ستون و در مقاطع نزدیک به محل اتصال تیر به ستون می باشد. هر چند مقادیر تنش های ماکزیمم ایجاد شده در سایر مدل های اتصالات پس کشیده مورد بررسی متفاوت است ولی نحوه توزیع تنش و نواحی ماکزیمم تنش ایجاد شده در سایر مدل ها مشابهت زیادی با نتایج بدست آمده برای مدل SP1 دارد.

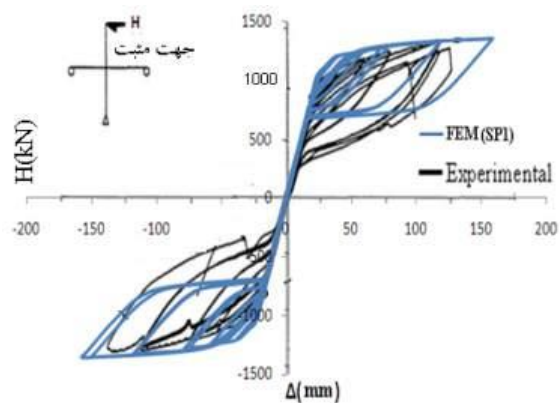


شکل ۱۰-الف- توزیع تنش در معیار میسز در تیر مدل SP1 در آخرین مرحله بارگذاری (در واحد پاسکال)

مشاهده کرده پوش نمودارها مطابقت مناسبی با یکدیگر داشته، هر چند طول مرحله باربرداری در نمودارهای بدست آمده از تحلیل عددی کوتاهتر است.

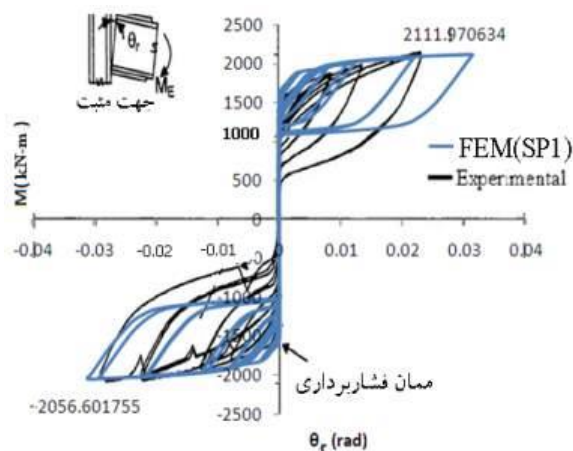


شکل ۷- تعریف شکاف ایجاد شده بین تیر و بال ستون در محل اتصال



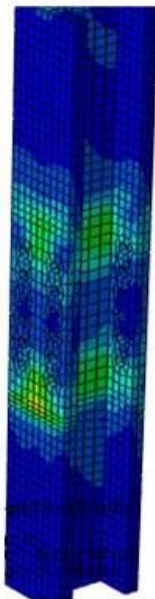
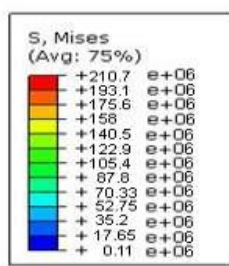
شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی بدست آمده از تحلیل عددی و نتایج

### آزمایشگاهی مدل SP1

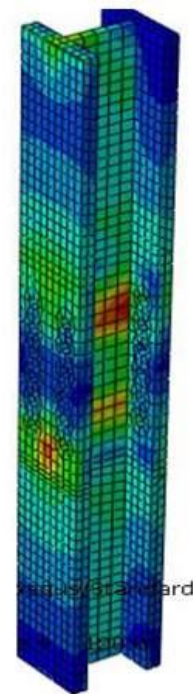
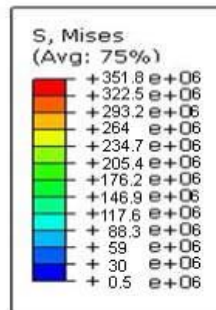


شکل ۹- مقایسه نمودار ممان خمشی- زاویه شکاف بدست آمده از تحلیل عددی

### و نتایج آزمایشگاهی مدل SP1

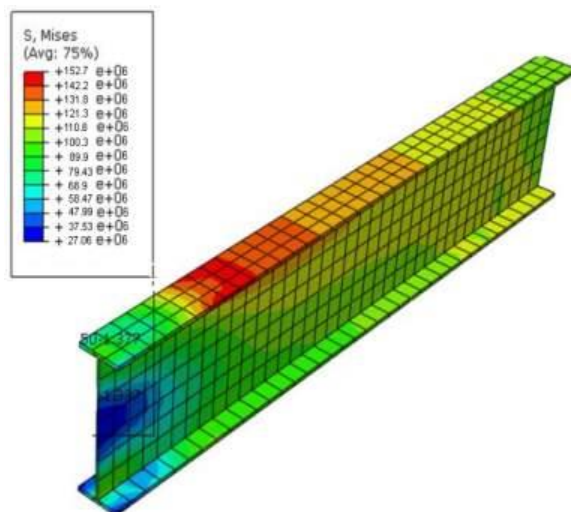


شکل ۱۱-ب- توزیع تنش در معیار میسز در ستون مدل SP1 در مرحله باربرداری نهایی (درواحد پاسکال)



شکل ۱۱-ب- توزیع تنش در معیار میسز در ستون مدل SP1 در آخرین مرحله بارگذاری (در واحد پاسکال)

در جدول (۳) مقادیر تنش ماکزیمم در تیر، ستون و ورق تقویت بال تیر مدل‌های مورد بررسی در معیار میسز، نظیر دو مرحله بارگذاری و باربرداری آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۳) مشاهده کرده در تمام مدل‌ها پس از باربرداری چرخه ای، کاهش قابل توجهی در مقدار تنش ایجاد شده در اعضا رخ داده هرچند در مدل SP2 که تحت نیروی پس کشیدگی کل کمتری نسبت به بقیه مدل‌ها قرار دارد، میزان کاهش تنش ایجاد شده بین مرحله بارگذاری و باربرداری نهایی کمتر است. بین دو مدل SP3 و SP1 که هر دو تحت نیروی کل ۳۲۰۰ کیلونیوتن پس کشیده شده اند، در مدل SP1 که دارای تعداد کابل‌های فولادی کمتری بوده ولی هرکابل تحت نیروی پس کشیدگی بزرگتری نسبت به مدل SP3 قرار دارد، میزان کاهش تنش در اعضای اصلی اتصال بین مرحله باربرداری و بارگذاری اندکی بیشتر می باشد. اعمال بارمحوری به سر آزاد ستون در مدل SP4 علاوه بر بارگذاری چرخه ای، هرچند سبب شده تنش ماکزیمم بزرگتری در ستون ایجاد شود ولی تنش باقی مانده کمتر و کاهش تنش بیشتری نسبت به مدل SP1، در تیر و ستون این مدل مشاهده می‌شود.

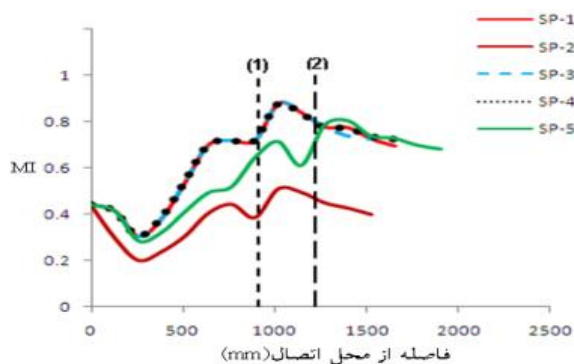


شکل ۱۱-الف- توزیع تنش در معیار میسز در تیر مدل SP1 در مرحله باربرداری نهایی (در واحد پاسکال)

جدول ۳- مقادیر ماکزیمم تنش میسز برحسب مگاپاسکال

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
(Smax)L تیر	۳۴۰/۰۸	۲۰۳/۲۷	۳۴۰/۲۲	۳۳۳/۰۴	۳۱۴/۷۷
(Smax)UnL تیر	۱۵۳/۵۶	۱۴۴/۴۶	۱۵۶/۳۹	۱۵۰/۲۵	۱۳۶/۴۶
درصد کاهش تنش	۵۴/۸	۲۸/۹	۵۴	۵۴/۹	۵۶/۶
(Smax)L ستون	۳۵۱/۸۰	۲۵۰/۰۹	۳۵۱/۶۶	۳۵۶/۴۹	۳۵۱/۷۳
(Smax)UnL ستون	۲۱۰/۳۱	۱۹۶/۱۰	۲۱۱/۳۴	۱۷۴/۴۵	۲۰۸/۶۵
درصد کاهش تنش	۴۰/۲	۲۱/۶	۳۹/۹	۵۱	۴۰/۷
(Smax)L ورق تقویت	۴۶۴/۴۰	۴۰۹/۶۵	۴۶۵/۰۹	۴۶۶/۱۲	۴۵۰/۷۵
(Smax)UnL ورق تقویت	۳۶۶/۴۲	۳۵۴/۰۸	۳۷۰/۹۷	۳۷۸/۶۲	۳۳۲/۳۹
درصد کاهش تنش	۲۱/۱	۱۳/۶	۲۰/۲	۱۸/۸	۲۶/۳

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌ها، ماکزیمم مقدار تنش در بال تیر، بعد از محل تماس انتهای ورق تقویت با تیر ایجاد می‌شود. در مدل‌های SP-1، SP-3 و SP-4 که همگی دارای هندسه مدل مشابهی بوده و تحت نیروی پس کشیدگی یکسانی قرار دارند، توزیع شاخص میسز در خط مرکزی بال تیر کاملاً مشابه می‌باشد. استفاده از ورق تقویت با طول بیشتر علاوه بر اینکه محل ماکزیمم تنش ایجاد شده بر روی بال تیر را از ناحیه بحرانی نزدیک اتصال دورتر می‌کند، مقادیر تنش و شاخص میسز کوچکتری نیز در تیر ایجاد می‌نماید.



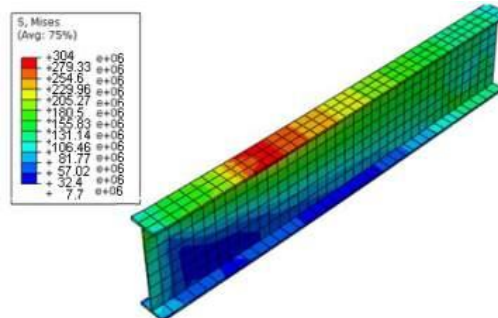
شکل ۱۳- چگونگی تغییرات شاخص میسز در طول خط مرکزی بال تیر پنج مدل مورد بررسی

در هر مرحله از بارگذاری چرخه‌ای همواره دو نبشی فشرده شده و دو نبشی دیگر تحت کشش قرار داشته و دارای وضعیت بحرانی می‌باشند (شکل ۱۴). در شکل (۱۵) نواحی ماکزیمم تنش ایجاد شده در نبشی‌های کششی نشان داده شده است. در این نواحی بحرانی مفاصل پلاستیک ایجاد شده که مطابق شکل (۱۴) دو ناحیه در ساق قائم و یک ناحیه در ساق افقی نبشی قرار دارد. در نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) چگونگی توزیع شاخص‌های خسارت در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی در آخرین مرحله بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده به پنج مدل اتصال نشان داده شده است.

(Smax)L = تنش ماکزیمم در آخرین مرحله بارگذاری چرخه‌ای

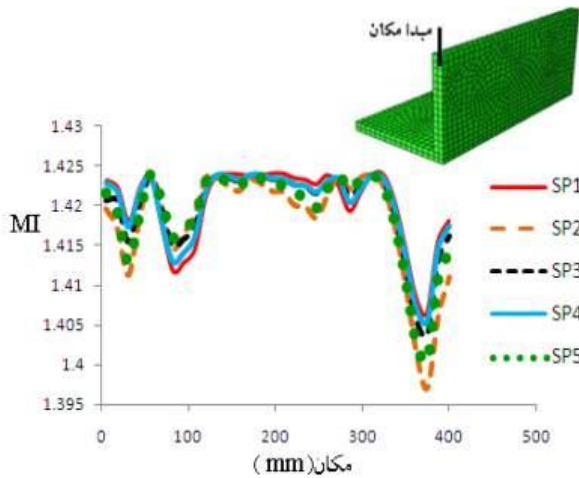
(Smax)UnL = تنش ماکزیمم در مرحله باربرداری نهایی

مقایسه نتایج مدل SP5 با مدل SP1 نشان می‌دهد، استفاده از ورق تقویت با طول بیشتر، سبب کاهش قابل توجهی در مقدار تنش ایجاد شده در تیر و ورق تقویت در هریک از مراحل بارگذاری و باربرداری، می‌شود. در شکل (۱۲) چگونگی توزیع تنش میسز در تیر مدل SP5 به صورت کنتموری نشان داده شده است. در این مدل هم مانند سایر مدل‌های مورد بررسی، ماکزیمم تنش در تیر، بر روی بال تیر ایجاد شده و ناحیه بحرانی تنش از ناحیه انتهایی تماس ورق تقویت با بال تیر شروع می‌شود هرچند محل ماکزیمم تنش بعد از انتهایی محل اتصال ورق تقویت با بال تیر قرار دارد. در شکل (۱۳) نمودار تغییرات شاخص میسز در طول خط مرکزی بال تیر برای پنج مدل نشان داده شده است. در این شکل خطوط شماره‌های (۱) و (۲) به ترتیب معرف محل تماس انتهای ورق‌های تقویت به طول ۹۱۴ و ۱۲۱۹ میلیمتری با بال تیر می‌باشند.

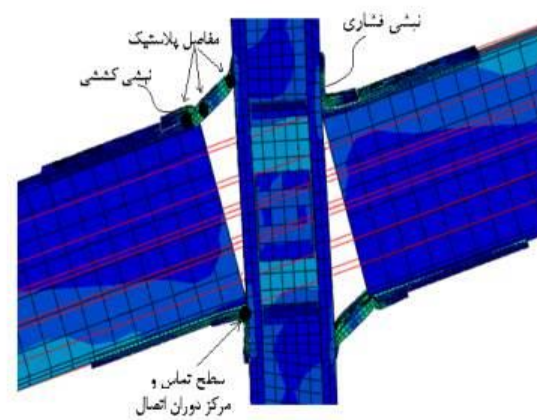


شکل ۱۲- توزیع کنتموری تنش میسز در تیر مدل SP-5 در آخرین مرحله بارگذاری چرخه‌ای (در واحد پاسکال)

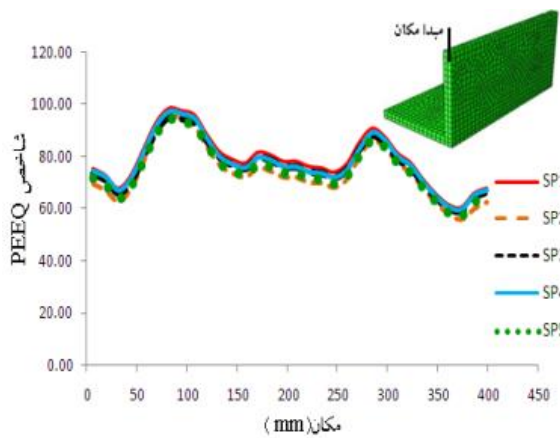




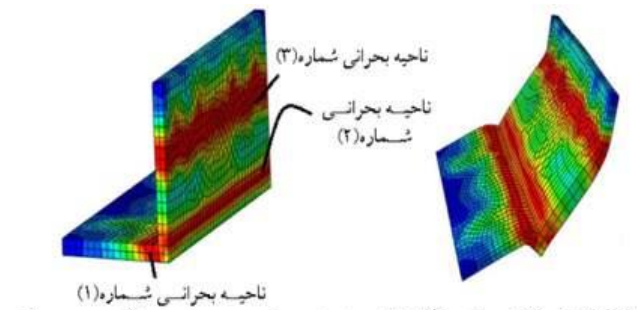
شکل ۱۷- تغییرات شاخص میسز در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده



شکل ۱۴- نحوه تغییر شکل اتصال پس کشیده و ایجاد مفصل پلاستیک در نبشی های کششی و فشاری

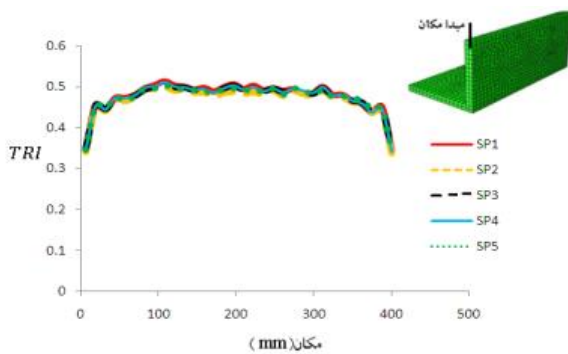


شکل ۱۸- تغییرات شاخص PEEQ در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده

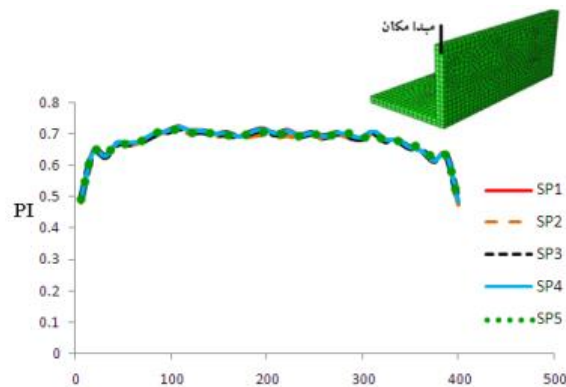


الف) نبشی کششی تغییر شکل یافته (ب) نبشی کششی بدون در نظر گرفتن تغییر شکل

شکل ۱۵- نواحی بحرانی نبشی کششی

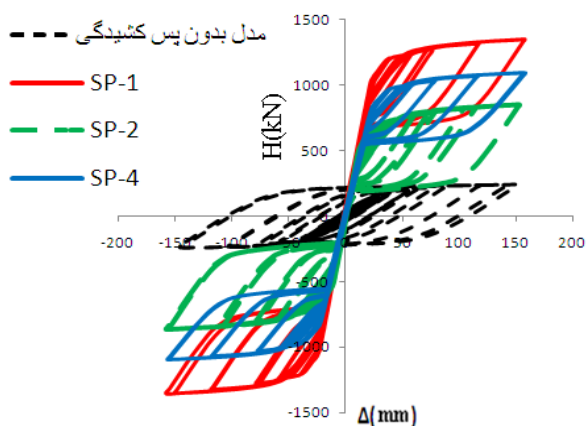


شکل ۱۹- تغییرات شاخص سه محوری در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده



شکل ۱۶- تغییرات شاخص فشار در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده

(۲۲) با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به این نمودارهای نتیجه گرفته شده، استفاده از کابل‌های فولادی و خاصیت پس کشیدگی چندین برابر ظرفیت باربری اتصال را افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر وجود بارمحموری سبب کاهش ظرفیت باربری جانبی اتصال شده و با کاهش نیروی پس کشیدگی کل اعمالی به اتصال، توان باربری اتصال نیز کاهش می‌یابد. مقادیر ماکزیمم ظرفیت باربری جانبی انواع مدل‌های اتصال پس کشیده و مدل بدون خاصیت پس کشیدگی تحت دریافت یکسان در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بین مدل اتصالات پس کشیده و مدل اتصال مشابه بدون خاصیت پس کشیدگی

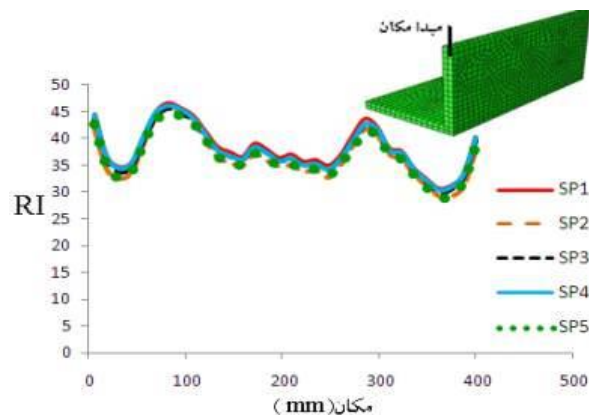
جدول ۴- مقادیر ماکزیمم نیروی جانبی نظیر دریافت ۴ درصد (برحسب کیلونیوتن)

مدل	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	بدون کابل فولادی
ماکزیمم نیروی جانبی	۱۳۵۴	۸۶۰	۱۳۵۲	۱۰۹۸	۱۳۵۴	۲۴۳

## ۶- نتیجه گیری

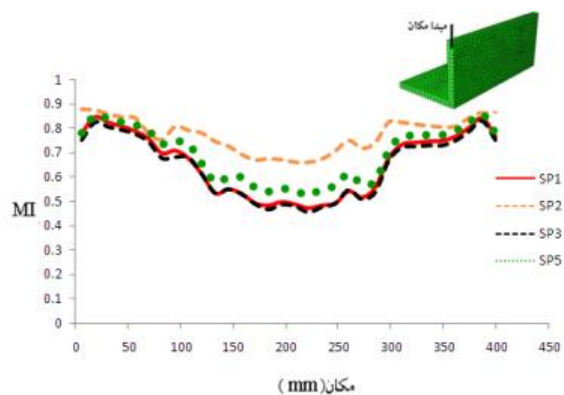
در این مقاله نقش عوامل مختلف بر روی رفتار اتصالات پس کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی بررسی گردید و نتایجی به شرح زیر بدست آمد:

این دسته از اتصالات ضمن داشتن ظرفیت باربری بسیار بالا، به دلیل خاصیت پس کشیدگی، تنش‌های ایجاد شده در تیر و ستون در طول مرحله بارگذاری چرخه‌ای درحالت الاستیک باقی مانده و با حذف بارچرخه‌ای،



شکل ۲۰- تغییرات شاخص گسیختگی در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده

در شکل (۲۱) تغییرات شاخص میسز در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل پس از مرحله باربرداری نهایی نشان داده شده است.



شکل ۲۱- تغییرات شاخص میسز در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده در مرحله باربرداری

با توجه به نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) نتیجه گرفته می‌شود، در مدل اتصال پس کشیده با ورق تقویت طولانی‌تر، احتمال وقوع گسیختگی در نبشی کششی کمتر می‌باشد. از سویی دیگر مطابق شکل (۲۱) با حذف بارچرخه‌ای، مدل SP-2 که با نیروی کل کمتری پس کشیده شده است توانایی کمتری در کاهش تنش و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در اعضای اتصال دارد.

جهت بررسی ظرفیت باربری اتصالات پس کشیده، نمودار نیروی جانبی-جابجایی افقی (H-Δ) مدل‌های SP-1، SP-2، SP-4، و مدلی مشابه این سه مدل بدون کابل‌های فولادی و اعمال نیروی پس کشیدگی در شکل

Engineering, Vancouver, B.C., Canada. (2004), Paper No. 2514.

[3]. Christopoulos C, Filiatrualt A, and Folz B. "Seismic Response of Self-centring Hysteretic SDOF Systems". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(5), 2002, 1131-1150.

[4]. Rojas P, Ricles J, and Sause R. "Seismic Response and Design of Post-tensioned Steel Moment Resisting Frames with Friction Components". 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. (2004), Paper No. 1603.

[5]. DassaultSystemes. Abaqus user's manual, version 6.13. Providence, RI, USA; 2013.

[6]. El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E., & Kunnath, K. "Strength and ductility of FR welded-bolted connections". Report No. SAC/BD-98/01. SAC Joint Venture. 1998.

[7]. Clark, P. "Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens." Rep. No. SAC/BD-97 2 (1997).

تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در اعضای اصلی اتصال به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

استفاده از ورق تقویت با طول بیشتر ضمن اینکه محل ماکزیمم تنش و مفصل پلاستیک ایجاد شده در تیر را از ناحیه بحرانی نزدیک اتصال دورتر میکند، سبب شده تا اندازه تنش‌های ایجاد شده در تیر نیز کاهش یافته و نبشی‌های کششی، شاخص خسارت کمتری داشته باشند. این امر بدان معنا است که احتمال وقوع گسیختگی ترد در نبشی اتصال پس کشیده همراه با ورق تقویت طولانی تر کمتر می‌باشد.

از آنجاییکه بخش عمده ای از استهلاک انرژی توسط نبشی‌های اتصال انجام شده، تنش‌ها و تغییر شکل‌های بزرگی در آنها ایجاد می‌شود. از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، سه ناحیه بحرانی تنش در نبشی‌ها مشاهده شد که مفاصل پلاستیک در این نواحی تشکیل می‌شوند. از این نواحی بحرانی، یک ناحیه در ابتدای ساق افقی نبشی و دو ناحیه در ساق قائم نبشی یکی در ابتدای ساق قائم نبشی و دیگری در حوالی محل سوراخ‌های ایجاد شده جهت پیچ کردن نبشی به بال ستون، ایجاد می‌شود. از بررسی تغییرات شاخص‌های خسارت در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی مدل‌ها، مشخص شد در فواصل ۱۰۰ میلیمتری از دو انتهای نبشی، احتمال وقوع گسیختگی بیشتر می‌باشد. از بررسی نمودار تغییرات شاخص سه محوری در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) در تمام مدل‌ها، در می‌یابیم که حداکثر مقدار شاخص سه محوری در این ناحیه ۰/۵ بوده و در نتیجه شکست ترد در این ناحیه رخ نمی‌دهد.

استفاده از سیستم پس کشیدگی سبب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری اتصال شده و این افزایش با نیروی پس کشیدگی کل اعمال شده به اتصال متناسب می‌باشد. به طوریکه حداکثر نیروی جانبی تحمل شده تحت میزان جابجایی جانبی نسبی مشابه، در سه مدل SP-1، SP-3، و SP-5 که همگی با نیروی کل یکسانی پس کشیده شده اند، تقریباً مساوی است. از طرفی دیگر، اعمال توام بار محوری و بار چرخه‌ای، سبب کاهش ظرفیت باربری جانبی اتصال به میزان ۱۹ درصد می‌شود. با کاهش نیروی پس کشیدگی کل اعمال شده به اتصال به میزان ۵۰ درصد، توان باربری جانبی اتصال به میزان تقریباً ۳۶ درصد کاهش می‌یابد.

## ۷- مراجع

[1]. Ricles J, Sause R, Garlock M, and Zhao C. "Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames". *Journal of Structural Engineering*. 127(2), (2001), 113-121.

[2]. Garlock M, Ricles J, and Sause R. "Experimental Studies on Full scale Post-Tensioned steel Moment connections". 13th World Conference on Earthquake

## Numerical Analysis of Post-Tensioned Steel Moment Connections with Top and Seat Angles

R. Ahmady Jazany

Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran

Peyman shademan heydari

Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran

Mehdi Amrii

Islamic Azad University, Maragheh Branch, Maragheh, Iran

### Abstract:

To reduce or eliminate residual deformations in the main members of the structures after an earthquake, researchers presented the idea of using self-centering systems. Several types of self-centering systems have been proposed. One of the strategies for created self centering in structures, using post-tensioned (PT) steel moment connections. Until now several types of PT steel connections is provided. In this paper, results of numerical analysis using finite element method in ABAQUS software for five full-scale model of interior PT steel connections with bolted top and seat angles has been studied. The results of numerical analysis in this research demonstrate the beams and columns remain essentially elastic while inelastic deformation of the top and seat angles provided energy dissipation and also using post-tensioning method, increase loading capacity significantly without residual deformation in main members of the connection. In a PT connection, maximum stresses in beam created at the flange of beam and using longer reinforcing plate, cause decrease stresses created in beam and reduce various damage index and risk of brittle fracture in tension angles. Cyclic behavior of numerical model of PT connection with combined axial load and drift demand shows that the axial load reduces bearing capacity of connection.

### Keywords:

Self centering systems, Post-Tensioned connections, Numerical analysis, Damage Index.