



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

حمید حجازی طلب<sup>۱</sup>، حسینعلی رحیمی بندرآبادی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی ۸۹۱۹۵۷۴۱، hejazi.t@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳)

## 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 نبشی‌های 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 درحالی که 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 نبشی‌های کششی اتصال می‌شود.

## واژگان کلیدی

سیستم‌های خودمرکز، اتصالات پس‌کشیده فولادی، تحلیل عددی به روش اجزا محدود، شاخص‌های خسارت اتصالات

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

H. Hejazitalab, H.A. Rahimi-Bondarabadi

### Abstract

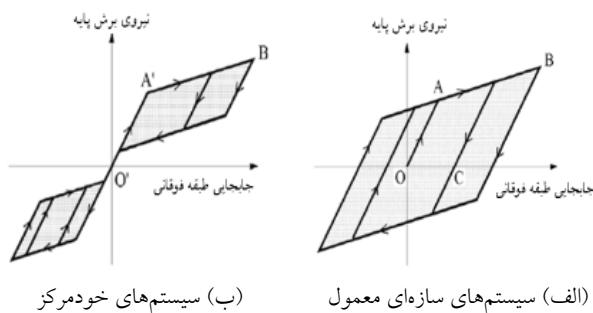
To reduce or eliminate residual deformations in the main members of the structures after an earthquake, researchers presented the idea of using self-centering systems. Several types of self-centering systems have been proposed. One of the strategies for created self-centering in structures, using post-tensioned (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



حداقل مقدار ممکن رسیده و تغییرشکل‌های باقی‌مانده در این اعضا پس از باربرداری، بسیار ناچیز و یا در حد صفر می‌باشد [۴].



شکل ۱- نمودار هیستریزس ایده آل نیرو-جابجایی [۴]

یکی از روش‌های ایجاد خاصیت خودمرکزی در سازه‌ها استفاده از اتصالات پس‌کشیده فولادی است. این دسته از اتصالات شامل دو جزء اصلی: (۱) کابل‌های پرمقاومت فولادی و (۲) وسیله مستهلک کننده انرژی می‌باشند. تاکنون ابزارهای مستهلک کننده انرژی گوناگونی نظیر میله‌های فولادی تسلیم شونده، صفحات فلزی با عملکرد اصطکاکی نصب شده بر روی بال و یا در جان تیر و نبشی‌های فوقانی و تحتانی، برای این اتصالات ارائه شده‌اند [۲، ۴، ۵]. در این تحقیق به بررسی رفتار اتصالات فولادی پس‌کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی پرداخته شده است. در این اتصالات ابتدا تیر و ستون توسط نبشی‌های پیچ شده به بال تیر و بال ستون، به یکدیگر متصل شده، سپس کابل‌های 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 می‌شوند (شکل ۲). نیروی پس‌کشیدگی اولیه ایجاد شده در کابل‌های فولادی، ممان مقاومی را در اتصال ایجاد کرده و سبب بازگرداندن اعضای اتصال به وضعیت اولیه‌اش پس از باربرداری می‌شود. انرژی وارد شده به اتصال از طریق نبشی‌های فوقانی و تحتانی مستهلک شده به طوری که در پایان بارگذاری، نبشی‌ها دچار تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگی شده و می‌بایستی تعویض شوند. نبشی‌ها، علاوه بر استهلاک انرژی در تامین مقاومت خمشی و برشی اتصال نیز مشارکت دارند.

Garlock و همکارانش [۳] نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی از اتصالات فولادی پس‌کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد مطالعه قرار داده و فقط با استفاده از مقایسه نمودارهای هیستریزس نیرو-جابجایی

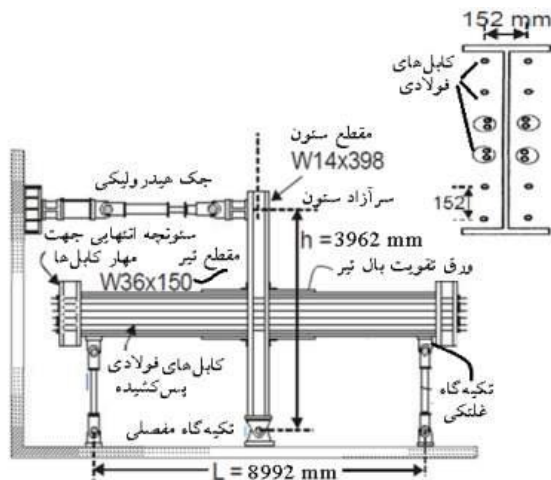
با وقوع زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴ میلادی، شکست‌های متعددی در ناحیه جوش نفوذی اتصالات قاب‌های خمشی فولادی مشاهده شد. پس از وقوع این زلزله، اتصالات فولادی جدیدی نظیر اتصال تیر با مقطع کاهش یافته، اتصال تیر با ورق تقویت پیچ یا جوش شده به بال تیر و اتصال تقویت شده با استفاده از ماهیچه‌های فولادی، جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات ارائه شدند. اگرچه این اتصالات با دورکردن 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 می‌شوند، اما همچنان پس از باربرداری زلزله، تغییرشکل‌های باقی‌مانده بزرگی در اعضای اصلی اتصال وجود داشته، که این امر، علاوه بر دشوار نمودن فرآیند بهسازی سازه آسیب دیده، سطح عملکرد سازه در مقابل زلزله‌های بعدی را کاهش می‌دهد [۱-۳]. یکی از راهکارهای کاهش و یا حذف تغییرشکل‌های باقی‌مانده ایجاد شده در اعضای اصلی سازه، استفاده از سیستم‌های سازه‌ای خودمرکزی می‌باشد. سیستم خودمرکز<sup>۱</sup> به سیستمی اطلاق شده که پس از باربرداری توانایی بازگرداندن اعضای اصلی تشکیل دهنده‌اش به موقعیت اولیه خود را دارد. در شکل (۱) نمودار هیستریزس ایده‌آل نیرو-جابجایی دو سیستم خودمرکز و الاستو-پلاستیک نشان داده شده است. سطح سایه خورده میان حلقه‌ها معرف میزان انرژی مستهلک شده در این دو سیستم می‌باشد. در سیستم‌های الاستو-پلاستیک که سازه‌های 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 تغییرشکل‌های پلاستیک در این اعضا، مستهلک می‌شود.

مطابق شکل (۱-الف) استهلاک انرژی در سازه‌های معمول همراه با ایجاد تغییرشکل‌های باقی‌مانده بزرگ در اعضای سازه بوده به طوری که هرچه انرژی مستهلک شده بیشتر باشد، طول OC که معرف میزان تغییرشکل‌های باقی‌مانده در اعضای سازه است نیز بزرگتر می‌باشد. این درحالی است که در یک سیستم سازه‌ای 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 می‌شود. بنابراین خسارت اعضای اصلی سازه به

<sup>۱</sup> Self-Centering System

مدل مقطع تیر و ستون به ترتیب  $W14 \times 398$  و  $W36 \times 150$  بوده و از نبشی با ساق‌های مساوی به ابعاد مقطع  $203 \times 203 \times 19$  mm و به طول  $406$  mm استفاده شده است. جهت تقویت تیر، ورق‌هایی به ابعاد  $914 \times 356 \times 25$  mm توسط جوش گوشه به بعد  $13$  mm به بال‌های فوقانی و تحتانی تیر متصل شده‌اند. ناحیه چشمه اتصال توسط ورق‌های پیوستگی و مضاعف به ابعاد  $406 \times 292 \times 32$  mm جوش شده به جان ستون، تقویت شده است. هریک از نبشی‌های فوقانی و تحتانی توسط یک ردیف  $4$  تایی و دو ردیف  $2$  تایی پیچ  $A490$  به قطر  $32$  mm به ترتیب به بال ستون و بال تیر متصل می‌شوند.

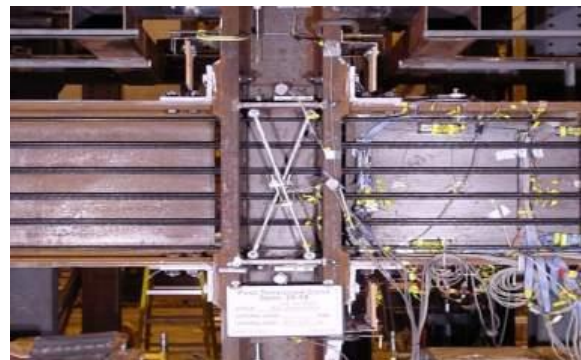
جهت ساخت قطعات تشکیل دهنده مدل عددی در نرم افزار ABAQUS، از المان Wire در کابل‌های فولادی و از المان Solid در سایر قطعات تشکیل دهنده مدل استفاده شده است. هرکابل پرمقاومت فولادی شامل  $7$  رشته درهم تنیده فولادی به مساحت کل  $140$  mm<sup>2</sup> بوده که در شش ردیف، در عمق جان و دوطرف جان تیر قرار گرفته و در انتهای تیرها مهار می‌شوند (شکل (۳)).



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

## 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  $1600$  کیلونیوتن قرار دارد بقیه مدل‌ها تحت نیروی کلی معادل  $3200$  کیلونیوتن پس کشیده شده‌اند. با استفاده از تحلیل عددی



شکل ۲- نمونه آزمایشگاهی اتصالات فولادی پس کشیده همراه با نبشی‌های فوقانی و تحتانی [۳]

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 توام بارمحوری و بارچرخه‌ای وارده 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 هیستریزس 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 تغییرشکل‌های 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- مدل‌سازی اتصالات

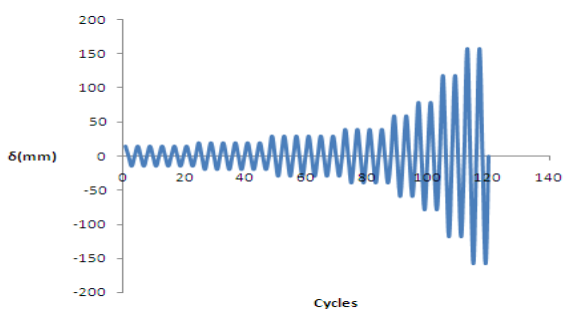
### ۲-۱- ابعاد و هندسه کلی مدل

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 [۶]. 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

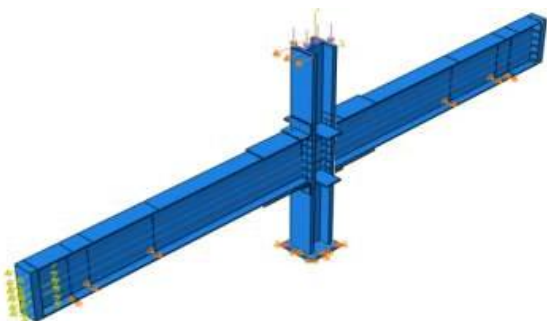
جانبی گره‌های کناری و جابجایی افقی، جانبی و قائم گره‌های میانی ورق ارتجاعی جوش شده به پای ستون و جابجایی قائم گره‌های تیر در محل تکیه‌گاه غلتکی، مقید می‌شوند. جهت مدل‌سازی تکیه‌گاه جانبی، جابجایی جانبی عمود برصفحه گره‌های بال تیر در این فواصل مقید شده است.

## 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. بارچرخه‌ای به صورت تغییر مکانی در بالای ستون و براساس الگوی ارائه شده توسط SAC-97 [7]، اعمال شده است (شکل (۴)). بارمحوری وارد شده به نمونه SP4 به صورت گسترده در سطح مقطع ستون اعمال می‌گردد (شکل (۵)). نیروی محوری معادل بارگسترده وارده به سرآزاد ستون در مدل SP4، ۲۵۳۵ کیلو نیوتن می‌باشد. نوع تحلیل مدل‌ها به صورت استاتیکی غیرخطی بوده که شامل تحلیل غیرخطی مصالح و هندسه می‌باشد. تحلیل هر مدل در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، تحلیل مربوط به پس کشیدگی کابل‌ها و اعمال نیروی محوری و در مرحله دوم، تحلیل تحت بارچرخه‌ای انجام می‌شود.



شکل ۴- نحوه اعمال بارچرخه ای به سرآزاد ستون



شکل ۵- نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مدل عددی

این پنج مدل، نقش عواملی چون تعداد کابل‌ها، نیروی پس کشیدگی اولیه در کابل‌ها، اثر توام 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 دریافت ۴ درصد قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های عددی مورد مطالعه

مدل	بار محوری MPa	L mm	تعداد کابل	$T_0$ kN
SP1	---	۹۱۴	۱۶	۲۰۰
SP2	---	۹۱۴	۲۰	۸۰
SP3	---	۹۱۴	۲۰	۱۶۰
SP4	۶۹	۹۱۴	۱۶	۲۰۰
SP5	---	۱۲۱۹	۱۶	۲۰۰

## 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 ۲۰۰ GPa و ۰/۳ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات فولاد قطعات مختلف مدل آزمایشگاهی [۳]

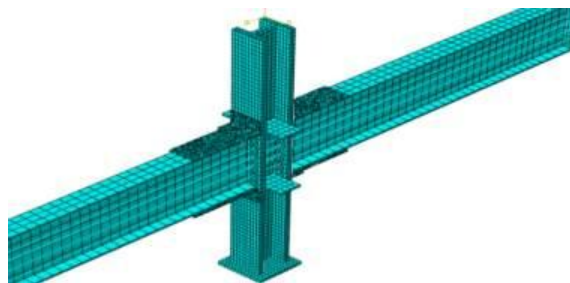
قطعه	تنش تسلیم $f_y$ MPa	تنش نهایی $f_u$ MPa
بال تیر	۳۶۲	۴۹۸
جان تیر	۴۱۴	۵۲۷
بال ستون	۳۵۶	۴۹۹
جان ستون	۳۴۵	۴۹۶
ورق تقویتی	۳۹۷	۵۷۳
نبشی	۳۸۳	۵۴۵
کابل‌های پس کشیده	۱۶۲۰	۱۹۰۰

## ۲-۴- شرایط تکیه گاهی

براساس نمونه آزمایشگاهی [۳]، تکیه‌گاه پای ستون از نوع مفصلی و تکیه‌گاه‌های 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

## 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

## ۲-۳- شاخص میسر

شاخص میسر (MI) به صورت تنش در معیار فون میسر ( $\sigma_{vm}$ ) تقسیم بر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) محاسبه می‌شود. تنش در معیار فون-میسر از رابطه (۲) بدست می‌آید:

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

در رابطه (۲)،  $S_{ij}$  معرف درایه‌های تانسور تنش انحرافی بوده که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شوند:

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

در رابطه بالا  $\sigma_{ij}$  درایه‌های 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 می‌باشد.

## ۳-۳- شاخص کرنش پلاستیک معادل

شاخص کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) از تقسیم مقدار کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) بر کرنش تسلیم ( $\epsilon_y$ ) تعریف شده و معیاری از شکل‌پذیری موضعی می‌باشد. کرنش پلاستیک معادل با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

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

که در این رابطه  $\epsilon_{ij}^p$  مولفه‌های کرنش پلاستیک در امتداد محورهای  $i$  و  $j$  می‌باشد.

## ۳-۴- شاخص سه محوره

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

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

شاخص سه محوری کمیت مهمی جهت بررسی وقوع شکست شکل‌پذیر در فلزات می‌باشد. مقادیر TRI بین ۰/۷۵ و ۱/۵ معرف کاهش شدید مقدار کرنش نظیر گسیختگی فلزات است و چنانچه مقدار TRI از ۱/۵ نیز بیشتر باشد، نشانگر ایجاد گسیختگی ترد می‌باشد.

## ۳-۵- شاخص گسیختگی

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

## ۳- معرفی شاخص‌های خسارت

جهت مقایسه رفتار اتصالات پس کشیده مورد مطالعه، از شاخص‌های خسارت شامل شاخص‌های فشار، میسر، کرنش پلاستیک معادل، سه محوره و گسیختگی استفاده شده که توسط El-Tawil [۸ و ۹]، پیشنهاد شده‌اند.

## ۳-۱- شاخص فشار

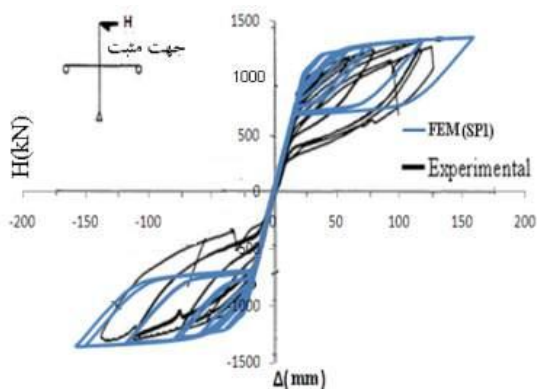
شاخص فشار (PI) به صورت نسبت تنش هیدرواستاتیکی ( $\sigma_m$ ) تقسیم بر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) تعریف می‌شود. تنش هیدرواستاتیکی معادل منفی یک سوم مجموع درایه‌های روی قطراصلی تانسور تنش بوده و از رابطه (۱) بدست می‌آید:

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

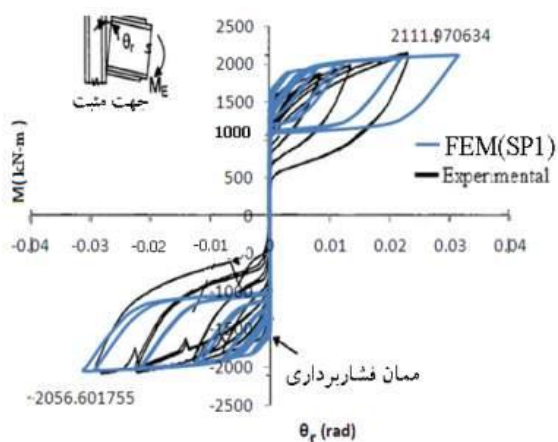
که در این رابطه ( $\sigma_{ij}$ ) معرف تانسور تنش و  $i, j$  بیانگر محورهای مختصاتی کلی بوده به طوریکه  $i, j=1,2,3$  است.

مقادیر تنش‌های هیدرواستاتیکی کششی بزرگ معمولاً با تنش‌های اصلی بزرگ همراه بوده به طوریکه چنانچه در ماده ترک یا عیب دیگری وجود داشته باشد، وقوع این تنش‌های اصلی بزرگ منجر به افزایش ضریب تشدید تنش در نوک ترک شده و احتمال وقوع شکست ترد را افزایش می‌دهد. این شکست‌های ترد به صورت ناگهانی و بدون وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجه رخ داده و لذا مطلوب نمی‌باشند. از طرفی دیگر تنش هیدرواستاتیکی بزرگ سبب کاهش شکل‌پذیری عضو شده و بر پتانسیل شکست بیشتری دلالت دارد.

نتایج تحلیل آزمایشگاهی انجام شده توسط Garlock و همکارانش [۳] به ترتیب ۱۲۹۰ kN 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.



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



شکل ۹- مقایسه نمودار ممان خمشی- زاویه شکاف بدست آمده از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی مدل SPI

#### ۵- نتایج تحلیل عددی

از آنجایی که یکی از مزایای اتصالات پس کشیده توانایی اتصال در حذف یا کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک ایجاد شده در اعضای اصلی اتصال می‌باشد، در شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب چگونگی توزیع تنش در معیار میسز ایجاد شده در تیر و ستون

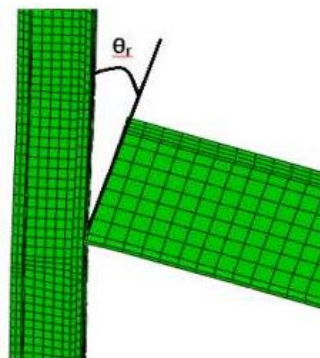
$$RI = \frac{PEEQ}{\varepsilon_y} \exp\left(1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}\right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) عبارت صورت کسر شاخص کرنش پلاستیک معادل و عبارت  $\frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}$  همان شاخص سه محوری بوده که در قسمت‌های 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 [۳] و تحلیل عددی مدل SPI بایکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل (۸) و (۹)).  $H$ ، معادل نیروی جانبی است که در هر مرحله از آزمایش به سرآزاد ستون وارد شده  $\Delta$ ، معادل جابجایی افقی سرآزاد ستون می‌باشد.  $M$ ، 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 بال‌های تیر از بال ستون جدا شده و شکافی میان تیر و ستون در محل اتصال ایجاد می‌شود که در شکل (۷) نشان داده شده است.

از مقایسه نمودارهای  $H-\Delta$  و  $M-\theta_r$  بدست آمده از تحلیل عددی مدل SPI انجام شده در این تحقیق و نتایج آزمایشگاهی (شکل (۸) و (۹))، مشاهده کرده پوش نمودارها مطابقت مناسبی با یکدیگر داشته، هرچند طول مرحله باربرداری در نمودارهای بدست آمده از تحلیل عددی کوتاه‌تر است.

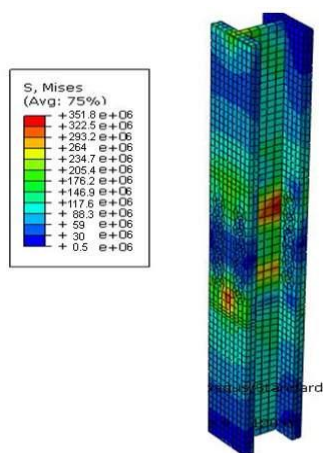


شکل ۷- تعریف شکاف ایجاد شده بین تیر و بال ستون در محل اتصال

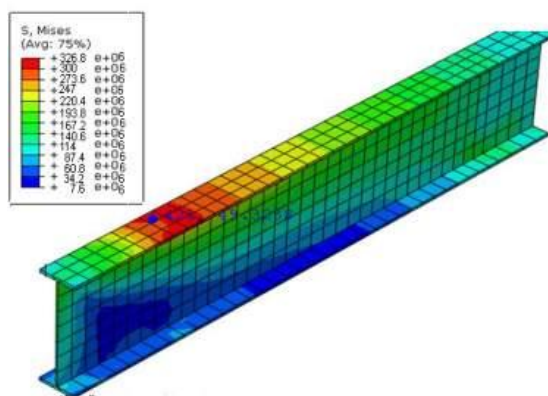
مقادیر حداکثر نیروی جانبی و ممان بدست آمده از تحلیل عددی انجام شده در این تحقیق به ترتیب معادل ۱۳۵۵ kN و ۲۱۱۲ kN.m می‌باشد. مقادیر نیروی جانبی و ممان براساس

محل اتصال تیر به ستون می‌باشد. هرچند مقادیر تنش‌های ماکزیمم ایجاد شده در سایر مدل‌های اتصالات پس‌کشیده مورد بررسی متفاوت است ولی نحوه توزیع تنش و نواحی ماکزیمم تنش ایجاد شده در سایر مدل‌ها مشابهت زیادی با نتایج بدست آمده برای مدل SP1 دارد.

مدل SP1 برحسب پاسکال در دو حالت (الف) آخرین مرحله بارگذاری و (ب) مرحله باربرداری نهایی (حذف بارچرخه‌ای) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود ناحیه ماکزیمم تنش ایجاد شده در تیر، بر روی بال تیر و از قسمت انتهایی محل اتصال ورق تقویت بال به تیر شروع می‌شود. 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

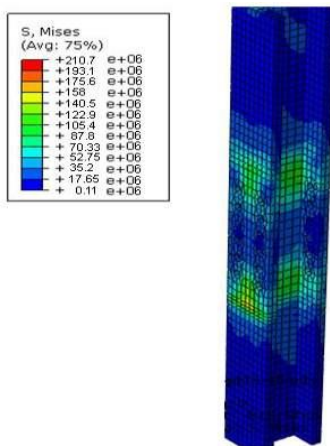


(ب) ستون

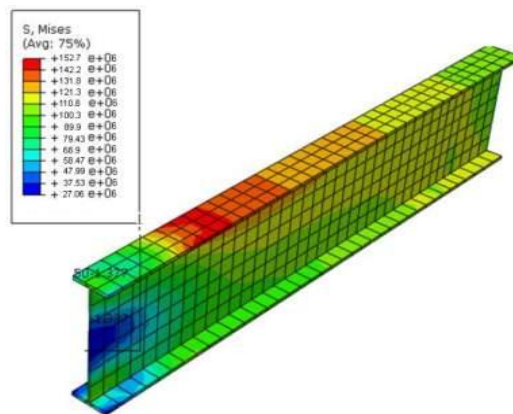


(الف) تیر

شکل ۱۰- توزیع تنش بر اساس معیار میسز بر روی تیر و ستون مدل SP1 در آخرین مرحله بارگذاری (Pa)



(ب) ستون



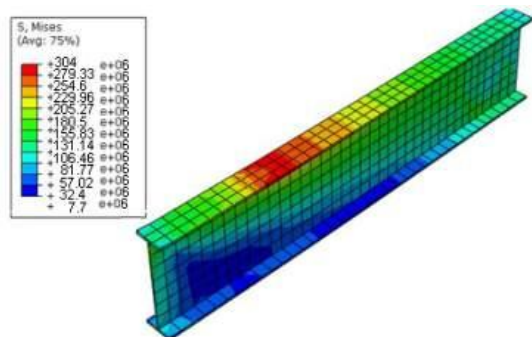
(الف) تیر

شکل ۱۱- توزیع تنش بر اساس معیار میسز بر روی تیر و ستون مدل SP1 در مرحله باربرداری نهایی (Pa)

شده در اعضا، رخ داده هرچند در مدل SP2 که تحت نیروی پس‌کشیدگی کل کمتری نسبت به بقیه مدل‌ها قرار دارد، میزان کاهش تنش ایجاد شده بین مرحله بارگذاری و باربرداری نهایی کمتر است. بین دو مدل SP1 و SP3 که هردو تحت نیروی کل ۳۲۰۰ kN پس‌کشیده شده‌اند، در مدل SP1 که دارای تعداد

در جدول (۳) مقادیر تنش ماکزیمم در تیر، ستون و ورق تقویت بال تیر مدل‌های مورد بررسی در معیار میسز، نظیر دومرحله بارگذاری و باربرداری آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۳) مشاهده کرده در تمام مدل‌ها پس از باربرداری چرخه‌ای، کاهش قابل توجهی در مقدار تنش ایجاد

بال تیر برای پنج مدل نشان داده شده است. در این شکل خطوط شماره‌های (۱) و (۲) به ترتیب معرف محل تماس انتهایی ورق‌های تقویت به طول ۹۱۴ و ۱۲۱۹ میلی‌متری با بال تیر می‌باشند.



شکل ۱۲- توزیع تنش میسز روی تیر مدل SP5 در آخرین مرحله بارگذاری چرخه‌ای (Pa)

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌ها، ماکزیمم مقدار تنش در بال تیر، بعد از محل تماس انتهایی ورق تقویت با تیر ایجاد می‌شود. در مدل‌های SP1، SP3 و SP4 که همگی دارای هندسه مدل مشابهی بوده و تحت نیروی پس‌کشیدگی 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.

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.

کابل‌های فولادی کمتری بوده ولی هرکابل تحت نیروی پس‌کشیدگی بزرگتری نسبت به مدل SP3 قرار دارد، میزان کاهش تنش در اعضای اصلی اتصال بین مرحله باربرداری و بارگذاری اندکی بیشتر می‌باشد. اعمال بارمحوری به سرآزاد ستون در مدل SP4 علاوه بر بارگذاری چرخه‌ای، 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.

جدول ۳- مقادیر ماکزیمم تنش میسز برحسب مگاپاسکال

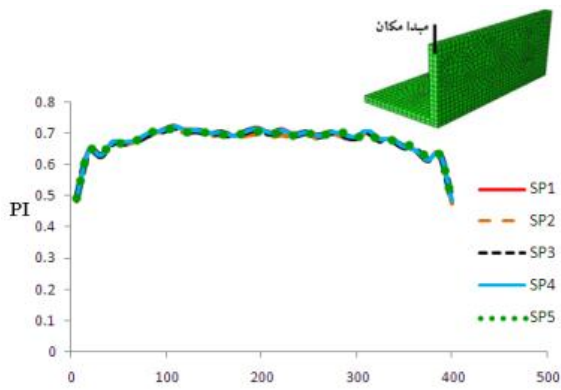
مدل	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
$(S_{max})_L$ تیر	۳۴۰/۰۸	۲۰۳/۲۷	۳۴۰/۲۲	۳۳۳/۰۴	۳۱۴/۷۷
$(S_{max})_{UnL}$ تیر	۱۵۳/۵۶	۱۴۴/۴۶	۱۵۶/۳۹	۱۵۰/۲۵	۱۳۶/۴۶
درصد کاهش تنش	۵۴/۸	۲۸/۹	۵۴	۵۴/۹	۵۶/۶
$(S_{max})_L$ ستون	۳۵۱/۸۰	۲۵۰/۰۹	۳۵۱/۶۶	۳۵۶/۴۹	۳۵۱/۷۳
$(S_{max})_{UnL}$ ستون	۲۱۰/۳۱	۱۹۶/۱۰	۲۱۱/۳۴	۱۷۴/۴۵	۲۰۸/۶۵
درصد کاهش تنش	۴۰/۲	۲۱/۶	۳۹/۹	۵۱	۴۰/۷
$(S_{max})_L$ ورق تقویت	۴۶۴/۴۰	۴۰۹/۶۵	۴۶۵/۰۹	۴۶۶/۱۲	۴۵۰/۷۵
$(S_{max})_{UnL}$ ورق تقویت	۳۶۶/۴۲	۳۵۴/۰۸	۳۷۰/۹۷	۳۷۸/۶۲	۳۳۲/۲۹
درصد کاهش تنش	۲۱/۱	۱۳/۶	۲۰/۲	۱۸/۸	۲۶/۳

$(S_{max})_L$  = تنش ماکزیمم در آخرین مرحله بارگذاری چرخه‌ای

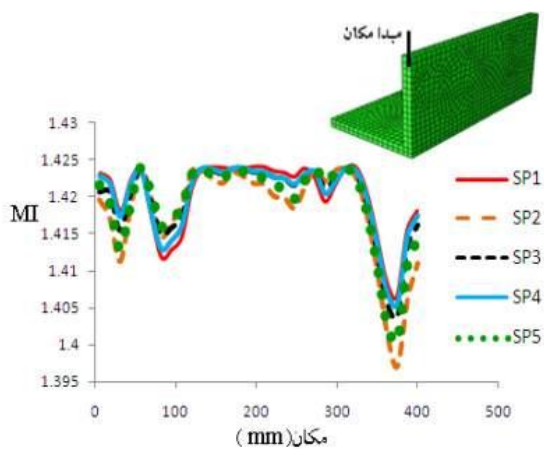
$(S_{max})_{UnL}$  = تنش ماکزیمم در مرحله باربرداری نهایی

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 هر یک از مراحل بارگذاری و باربرداری، می‌شود.

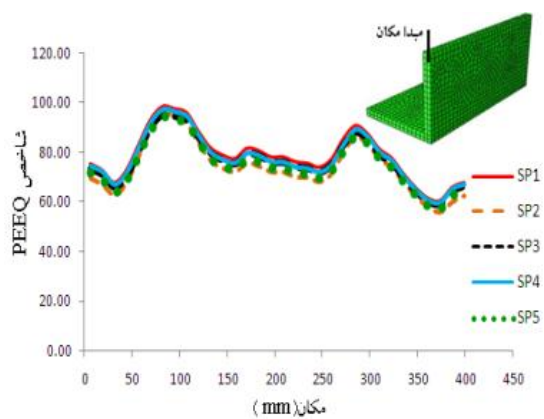
در شکل (۱۲) چگونگی توزیع تنش میسز در تیر مدل SP5 به صورت کنٹوری نشان داده شده است. در این مدل هم مانند سایر مدل‌های مورد بررسی، ماکزیمم تنش در تیر، بر روی بال تیر ایجاد شده و ناحیه بحرانی تنش از ناحیه انتهایی تماس ورق تقویت با بال تیر شروع می‌شود هرچند محل ماکزیمم تنش بعد از انتهایی محل اتصال ورق تقویت با بال تیر قرار دارد. در شکل (۱۳) نمودار تغییرات شاخص میسز در طول خط مرکزی



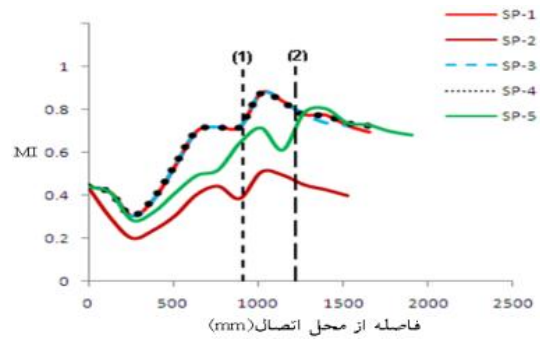
شکل ۱۶- تغییرات شاخص فشار در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده



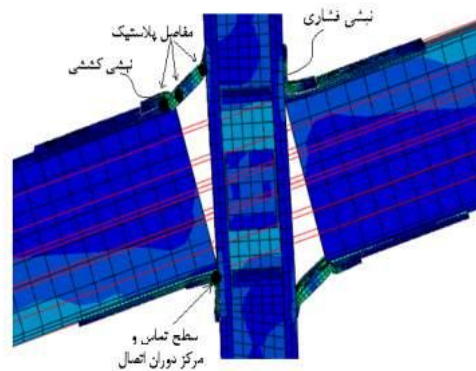
شکل ۱۷- تغییرات شاخص میسز در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده



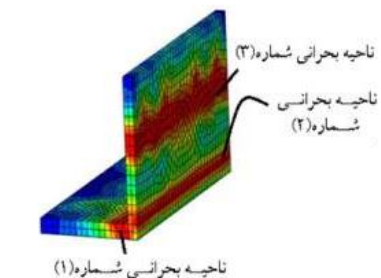
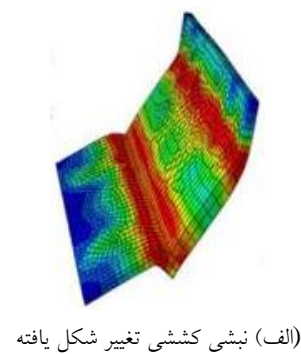
شکل ۱۸- تغییرات شاخص PEEQ در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس کشیده



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



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

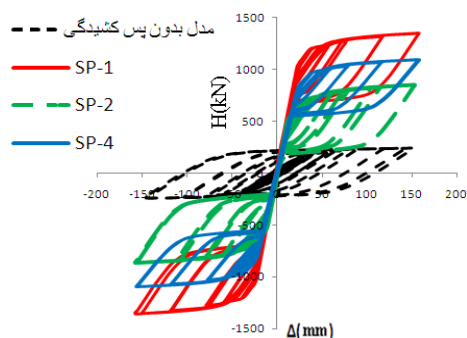


(ب) نبشی کششی بدون در نظر گرفتن تغییر شکل

شکل ۱۵- نواحی بحرانی نبشی کششی

طولانی‌تر، احتمال وقوع گسیختگی در نبشی کششی کمتر می‌باشد. از سویی دیگر مطابق شکل (۲۱) با حذف بار چرخه‌ای، مدل SP-2 که با نیروی کل کمتری پس‌کشیده شده است توانایی کمتری در کاهش تنش و تغییرشکل پلاستیک ایجاد شده در اعضای اتصال دارد.

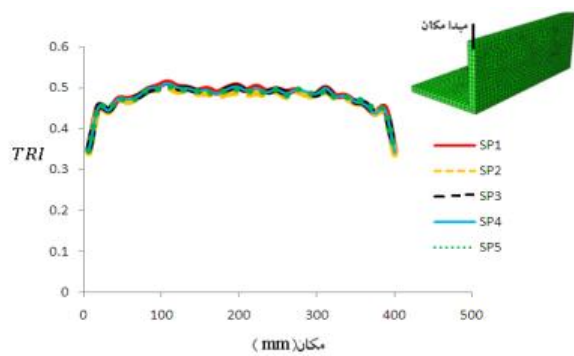
جهت بررسی ظرفیت باربری اتصالات پس‌کشیده، نمودار نیروی جانبی-جابجایی افقی ( $H-\Delta$ ) مدل‌های SP-1، SP-2، SP-4 و مدلی مشابه این سه مدل بدون کابل‌های فولادی و اعمال نیروی پس‌کشیدگی در شکل (۲۲) با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به این نمودارهای نتیجه گرفته، استفاده از کابل‌های فولادی و خاصیت پس‌کشیدگی چندین برابر ظرفیت باربری اتصال را افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر وجود بارمحوری سبب کاهش ظرفیت باربری جانبی اتصال شده و با کاهش نیروی پس‌کشیدگی کل اعمالی به اتصال، توان باربری اتصال نیز کاهش می‌یابد. مقادیر ماکزیمم ظرفیت باربری جانبی انواع مدل‌های اتصال پس‌کشیده و مدل بدون خاصیت پس‌کشیدگی تحت دریافت یکسان در جدول (۴) آورده شده است.



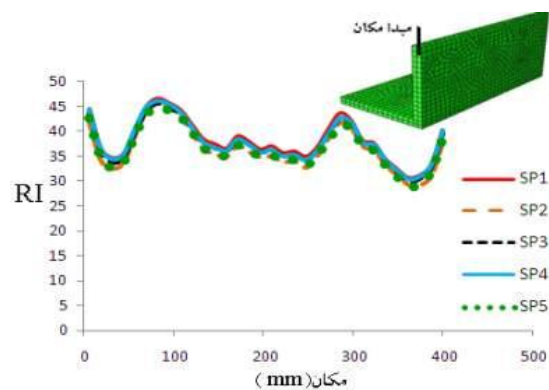
شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بین مدل اتصالات پس‌کشیده و مدل اتصال مشابه بدون خاصیت پس‌کشیدگی

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

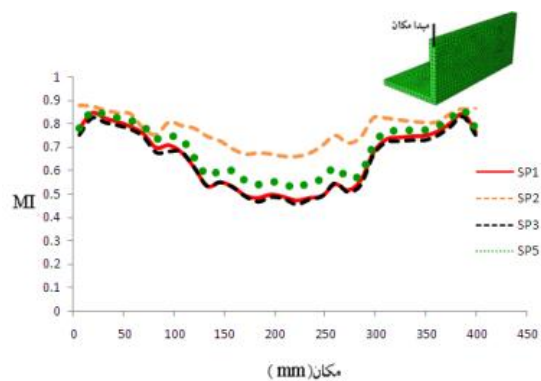


شکل ۱۹- تغییرات شاخص سه‌محوری در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی پنج مدل اتصال پس‌کشیده



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

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



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

با توجه به نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) نتیجه گرفته، در مدل اتصال پس‌کشیده با ورق تقویت

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله نقش عوامل مختلف بر روی رفتار اتصالات پس کشیده همراه با نبشی های 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، تنش های ایجاد شده در تیر و ستون در طول مرحله بارگذاری چرخه ای در حالت الاستیک باقی مانده و با حذف بارچرخه ای، تنش ها و تغییرشکل های ایجاد شده در اعضای اصلی اتصال به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

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 می کند، سبب شده تا اندازه تنش های ایجاد شده در تیر نیز کاهش یافته و نبشی های کششی، شاخص خسارت کمتری داشته باشند. این امر بدان معناست که احتمال وقوع گسیختگی ترد در نبشی اتصال پس کشیده همراه با ورق تقویت طولانی تر کمتر می باشد.

از آنجایی که بخش عمده ای از استهلاک انرژی توسط نبشی های اتصال انجام شده، تنش ها و تغییرشکل های بزرگی در آنها ایجاد می شود. از بررسی های انجام شده در این تحقیق، سه ناحیه بحرانی تنش در نبشی ها مشاهده شد که مفصل پلاستیک در این نواحی تشکیل می شوند. 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 سوراخ های ایجاد شده جهت پیچ کردن نبشی به بال ستون، ایجاد می شود. از بررسی تغییرات شاخص های خسارت در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) نبشی کششی مدل ها، مشخص شد در فواصل ۱۰۰ میلیمتری از دو انتهای نبشی، احتمال وقوع گسیختگی بیشتر می باشد. از بررسی نمودار تغییرات شاخص سه محوری در طول ناحیه بحرانی شماره (۲) در تمام مدل ها، درمی یابیم که حداکثر مقدار شاخص سه محوری در این ناحیه ۰/۵ بوده و در نتیجه شکست ترد در این ناحیه رخ نمی دهد.

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 می باشد. به طوریکه حداکثر نیروی جانبی تحمل شده تحت میزان جابجایی جانبی نسبی مشابه، در سه مدل SP1، SP3 و SP5 که همگی با نیروی کل یکسانی پس کشیده شده اند، تقریباً مساوی است. از طرفی دیگر،

اعمال توام بارمحوری و بارچرخه ای، سبب کاهش ظرفیت باربری جانبی اتصال به میزان ۱۹ درصدی شود. با کاهش نیروی پس کشیدگی کل اعمال شده به اتصال به میزان ۵۰ درصد، توان باربری جانبی اتصال به میزان تقریباً ۳۶ درصد کاهش می یابد.

## ۷- مراجع

- [1] Vasdravellis, G., Karavasilis, T.L., and Uy, B. (2013), "Finite Element Models and Cyclic Behavior of Self-Centering Steel Post-Tensioned Connections with Web Hourglass Pins", *Engineering Structures*, Vol. 52, pp. 1-16.
- [2] Ricles, J., Sause, R., Garlock, M. and Zhao, C. (2001), "Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, pp. 113-121.
- [3] Garlock, M., Ricles, J. and Sause, R. (2004), "Experimental Studies on Full scale Post-Tensioned steel Moment connections", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2514.
- [4] Christopoulos, C., Filiatrault, A. and Folz, B. (2002), "Seismic Response of Self-centring Hysteretic SDOF Systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 1131-1150.
- [5] Rojas, P., Ricles, J. and Sause, R. (2004), "Seismic Response and Design of Post-Tensioned Steel Moment Resisting Frames with Friction Components", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1603.
- [6] DassaultSystemes. Abaqus user's Manual, Version 6.13. Providence, RI, USA, 2013.
- [7] Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H. and Shaw, R. (1997), "Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens", Report No. SAC/BD-97/02, SAC Joint Venture, Sacramento, CA.
- [8] El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E. and Kunnath, K. (1998), "Strength and Ductility of FR Welded-Bolted-Connections", Report No. SAC/BD-98/01.SAC Joint Venture.
- [9] Hu, F., Shi, G., Bai, Y. and Shi, Y. (2014), "Seismic performance of prefabricated steel beam-to-column connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 102, pp. 204-216.