



http://journaliss.ir

# تحلیل حساسیت اتصال مرکز گرای فولادی نسبت به پارامترهای مختلف تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

نرگس حسنلو<sup>۱</sup>، نادر فنائی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir

## چکیده

اتصالات مرکزگرا، سیستم‌هایی هستند که در سازه‌ها به‌کار می‌روند تا آسیب ناشی از زلزله را به واسطه حذف جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده به حداقل برسانند. در این تحقیق یک نمونه اتصال مرجع از شش نمونه اتصال گارلوک برای صحت‌سنجی و ارزیابی، انتخاب و در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای تا ۴ درصد جابه‌جایی نسبی طبقه قرار گرفت. از نبشی‌های بالایی و نشیمن در اتصال به‌عنوان اتلاف‌کننده‌های انرژی، همراه با کابل‌های با مقاومت بالا با ایجاد خاصیت مرکزگرایی که به موازات تیر کشیده شده‌اند، استفاده می‌شود. در این مقاله تحلیل حساسیت پارامتریک تحت بارگذاری چرخه‌ای بر روی سه پارامتر از جمله مقاومت تسلیم نبشی، نیروی پس‌کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل انجام شد. در محدوده تغییرات پارامترهای اتصال مرکزگرا نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد، مقاومت تسلیم نبشی باعث افزایش جزئی ظرفیت خمشی اتصال و توان اتصال در تحمل بار جانبی می‌شود. افزایش نیروی پس‌کشیدگی و سطح مقطع کابل منجر به افزایش خاصیت مرکزگرایی اتصال، ظرفیت خمشی اتصال و ظرفیت باربری جانبی می‌شود. با تغییر تعداد کابل، نتایج نشان داد که با افزایش تعداد کابل، سختی افزایش و شکل‌پذیری کاهش و از طرفی افزایش نیروی مرکزگرایی می‌تواند منجر به آسیب تیر شود.

## واژگان کلیدی

اتصال مرکزگرا، تحلیل حساسیت پارامتریک، بارگذاری چرخه‌ای، سختی، اتلاف انرژی

## Sensitivity Analysis of Self-Centering Steel Connections to Various Parameters under Cyclic Loading

N. Hasanlou, N. Fanaie

### Abstract

Self-centering connections are systems used in structures to minimize earthquake damage by eliminating residual drift. Self-centering systems are one of the novel earthquake-resistant systems that can eliminate permanent earthquake-induced damage in buildings. In these systems, damage can be limited to those members that can be easily replaced after earthquakes. Self-centering connections in steel frames are designed to eliminate inelastic deformation and residual lateral displacement in structural members due to earthquakes. This deformable behavior is produced by creating a gap at the post-tensioned connection. The deformation capacity of this system against lateral forces is very high, and unlike steel frames that rely on the ductility and toughness of structural members, the behavior of self-centering structures is not controlled by the deformation capacity of the materials. The energy loss during seismic loading is not due to the failure of the main structural members but to elements designed as energy dissipaters that can be replaced in case of failure. In this research, a reference connection sample from six Garlock connection samples was selected for verification and evaluation and was simulated in Abaqus software and subjected to cyclic loading up to 4% of relative drift of the floor. In this article, parametric sensitivity analysis under cyclic loading was performed on three parameters, including yield strength of angle, cable post-tensioning force and cable cross-sectional area. In the range of changes in self-centering connection parameters, the results of cyclic loading show that yield strength of angle causes a slight increase in the bending capacity of the connection and the power of the connection in bearing lateral load. The increase in the post tensioning force and cable cross-sectional area leads to an increase in the self-centering property of the connection as well as the bending capacity of the connection and the lateral load capacity. By changing the number of cables, the results showed that with the increase in the number of cables, the stiffness increases and the ductility decreases. Moreover, the increase in self centering force can lead to beam damage.

### Keywords

Self-Centering Connection, Parametric Sensitivity Analysis, Cyclic Loading, Stiffness, Energy Dissipation



از المان فایبر مدل‌سازی کرد و مورد تحلیل استاتیکی غیرالاستیک و تاریخچه زمانی دینامیکی قرار داد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که این اتصالات، قابلیت مرکزگرایی دارند و دارای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری کافی هستند.

**گارلوک<sup>۶</sup> و همکاران** در سال ۲۰۰۵ مطالعات تجربی شش نمونه اتصال در مقیاس کامل را ارائه کردند که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند [۶]. برای جلوگیری از کماتش موضعی تیر که مانع مرکزگراشدن نمونه و محدودشدن شکل‌پذیری می‌شود، طبق نتایج توصیه شد از ورق تقویتی طولانی‌تر و یا از نیروی پس‌کشیدگی اولیه کوچک‌تر استفاده شود. برای جلوگیری از تسلیم کابل، تعداد بیش‌تری از کابل‌ها با نیروی پس‌کشیدگی اولیه کم‌تر در هر کابل توصیه شد. همچنین **گارلوک و همکاران** در سال ۲۰۰۶ به‌طور تحلیلی اثرات سختی، مقاومت و دیافراگم کف را بر پاسخ لرزه‌ای یک قاب خمشی مرکزگرا و مؤلفه‌های مختلف از جمله نیروی محوری که در تیر ایجاد می‌شود ارزیابی نمودند [۷]. آن‌ها در سال ۲۰۰۷ یک روند طراحی برای قاب‌های خمشی با اتصالات پس‌کشیده و اعضای جمع‌کننده که قاب مرکزگرا را به دیافراگم کف متصل می‌کند ارائه نمودند [۸].

**چو<sup>۸</sup> و همکاران** در سال ۲۰۰۶ سه اتصال فولادی پس‌کشیده با مقیاس کامل را تحت بار چرخه‌ای قرار دادند تا عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را آزمایش کنند [۹]. این اتصالات از دو تیر پس‌کشیده و ستون‌های قوطی پرشده با بتن تشکیل شده‌اند و در سال ۲۰۰۹ یک نوع اتصال مرکزگرای نوین را معرفی کردند که در آن تیرهای فولادی پس‌کشیده به ستون‌های بتن‌آرمه متصل شده بودند. برای افزایش ظرفیت اتلاف انرژی، در زیر بال پایینی تیرها، میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده تعبیه شده بود. آن‌ها با انجام تحلیل‌های عددی و آزمایش‌ها، نشان دادند که این سیستم می‌تواند ترکیبی مؤثر از مرکزگرایی و جذب انرژی فراهم کرده و در عین حال تغییرشکل‌های پسماند را به حداقل برساند [۱۰].

**فهمی و الجبھی<sup>۹</sup>** در سال ۲۰۲۱ دریافتند که در تحقیقات موجود، همبستگی بین عملکرد انعطاف‌پذیری اتصالات تیر-ستون فولادی پس‌کشیده و پاسخ غیرالاستیک سیستم اتلاف انرژی مورد نیاز، مورد توجه قرار نگرفته است [۱۱]. برای این منظور، یک لوله فولادی توخالی دایره‌ای فشرده به‌عنوان یک سیستم اتلاف انرژی قابل تعویض پیشنهاد شد (شکل (۱)).

قاب‌های مقاوم خمشی فولادی یکی از متداول‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی برای سازه‌های ساختمانی چندطبقه و بلندمرتبه هستند. آن‌ها اغلب در برابر زلزله‌های قوی دارای عملکرد رضایت‌بخشی می‌باشند، به شرطی که عمداً تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ با شکل‌پذیری کافی در اعضای خاصی مانند تیرهای فولادی رخ دهد [۱]. پس از زلزله نورث‌ریج<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۴ بیش از ۱۰۰ قاب خمشی فولادی دچار شکست‌های متعددی در اتصالات جوشی تیر به ستون شدند. استفاده از ورق‌های تقویتی، براکت‌های پیچ‌ومهره یا جوش‌داده‌شده و کاهش عرض بال تیر جهت کنترل تشکیل مفصل پلاستیک پیشنهاد شد که در مقایسه با اتصالات قبل از زلزله نورث‌ریج، منجر به تسلیم و کماتش موضعی قابل‌توجهی در تیرها و ایجاد جابه‌جایی پسماند<sup>۲</sup> خواهند شد. این امر موجب افزایش تمایل به توسعه سیستم‌های نوینی شده است که پس از زلزله به حالت اولیه بازگردند و آسیب سازه را به حداقل برسانند [۲]. یکی از این سیستم‌ها، اتصالات مرکزگرای فولادی است که از کابل‌ها یا میلگردهای پس‌کشیده با مقاومت بالا به موازات جان تیر در طول بازه قاب که توسط گیره‌های<sup>۳</sup> به بال ستون‌های خارجی قاب مهار شده است، استفاده می‌شود. کابل‌ها می‌توانند حداکثر جابه‌جایی و تغییرمکان پسماند سازه قاب فولادی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. این اتصالات به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای، رفتار هیستریزس مطلوبی همراه با سختی مناسب و اتلاف انرژی کنترل‌شده از خود نشان دهند [۳].

برای اولین بار مفهوم اتصالات پس‌کشیده در سیستم‌های بتنی پیش‌ساخته، در سال ۱۹۹۰ مورد استفاده قرار گرفت. **پرایستلی<sup>۴</sup> و مکری<sup>۵</sup>** اتصالات پس‌کشیده برای سازه‌های قاب بتنی پیش‌ساخته بدون نبشی‌های فولادی برای اتلاف انرژی را در سال ۱۹۹۳ مورد آزمایش قرار دادند [۴]. نتایج نشان داد که جابه‌جایی نسبی کم‌تری نسبت به بتن مسلح یکپارچه دارند.

**رایکلز<sup>۱</sup> و همکاران** در سال ۲۰۰۱ اتصالات مرکزگرایی را برای استفاده در قاب خمشی معرفی کردند [۵]. این اتصال دارای کابل‌های پس‌کشیده و نبشی‌های نشیمن و بالایی برای اتلاف انرژی بود. همچنین **رایکلز** این اتصالات را به‌صورت تحلیلی و با استفاده

<sup>۶</sup> Ricles

<sup>۷</sup> Garlock

<sup>۸</sup> Chou

<sup>۹</sup> Algobahi

<sup>۱</sup> Northridge

<sup>۲</sup> Residual Displacement

<sup>۳</sup> Anchorage

<sup>۴</sup> Priestley

<sup>۵</sup> MacRae

شیراوند و ترابی پور در سال ۲۰۱۷ با هدف رفع مشکلات ناشی از تمرکز تنش و ترک خوردگی در اتصالات جوشی متداول، نوعی اتصال خمشی فولادی پس کشیده طراحی و بررسی نمودند [۱۲]. در این اتصال، با استفاده از کابل‌های پس کشیده و ورق‌های اصطکاکی در ناحیه مفصل، عملکرد خمشی مطلوبی حاصل شد و میزان تغییر شکل پسماند به شکل محسوس کاهش یافت. نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که این اتصال، ضمن تأمین سختی اولیه مناسب، توانایی بازگشت به وضعیت اولیه را پس از بارگذاری چرخه‌ای حفظ می‌نماید.

گوان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل عددی از اتصال فولادی مرکزگرا را با استفاده از نبشی بالا و نشیمن به همراه کابل‌های پس کشیده در نرم‌افزار اپنسیس<sup>۲</sup> توسعه دادند [۱۳]. هدف از این مدل‌سازی، بررسی رفتار مرکزگرای اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای بود. نتایج عددی آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه و صحت‌سنجی شد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در رفتار هیستریزس و ظرفیت مرکزگرای اتصال بود.

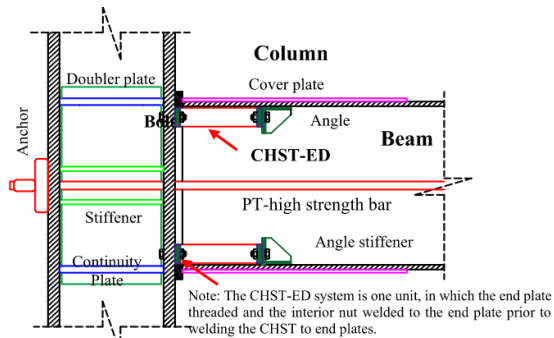
هوانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ یک نوع اتصال تیر به ستون مرکزگرای جدید با استفاده از نبشی‌های آلیاژ حافظه‌دار فوق‌الاستیک معرفی کردند [۱۴]. این اتصال نه تنها خاصیت مرکزگرای را بهبود می‌بخشد، بلکه قابلیت استفاده مجدد پس از زلزله را نیز افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از عملکرد مناسب این نوع اتصال در جذب انرژی و جلوگیری از گسیختگی در ناحیه اتصال است.

شیونگ<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ قاب مهاربندی شده Y شکلی را پیشنهاد کردند که در آن از اتصالات لغزشی یا تیرهای پیوند برشی استفاده شده است [۱۵]. این قاب با حفظ خاصیت مرکزگرای، ظرفیت اتلاف انرژی بالاتری در مقایسه با سیستم‌های متداول از خود نشان داد.

شیراوند و ترابی پور در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای عددی بر روی اتصالات فولادی پس کشیده مرکزگرا انجام دادند [۱۶]. در این تحقیق، پارامترهایی چون ضخامت نبشی و مقدار نیروی پس کشیدگی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر آن‌ها بر شکل‌پذیری، سختی و رفتار مرکزگرای اتصال تحلیل شد.

القرنی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات فولادی با استفاده از پیچ‌ها و ورق‌های آلیاژ

حافظه‌دار پرداختند [۱۷]. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند تغییر شکل‌های پسماند را تا ۹۴ درصد کاهش داده و خاصیت مرکزگرای را دو برابر کند.

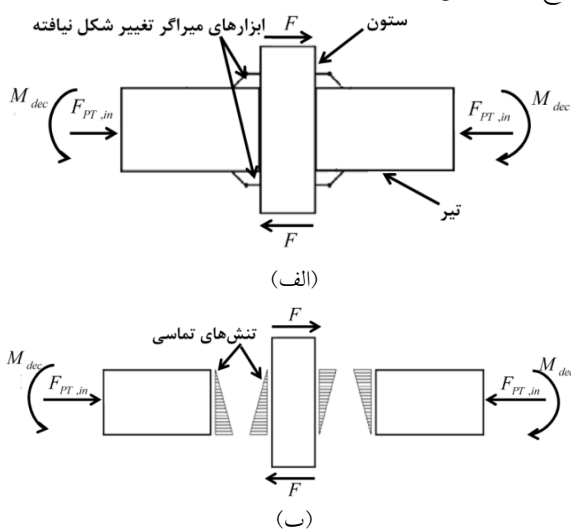


شکل ۱- جزئیات هندسی اتصال با لوله فولادی توخالی [۱۱]

با وجود توسعه چشمگیر این نوع اتصالات در سال‌های اخیر، بررسی جامع و کمی از تأثیر پارامترهای اصلی طراحی بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها، به‌ویژه در بستر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل حساسیت پارامتریک، هنوز به‌طور کامل انجام نشده است. در بسیاری از مطالعات پیشین، تنها یک یا دو پارامتر به‌صورت جداگانه بررسی شده‌اند و تعامل آن‌ها با یکدیگر یا دامنه تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های لرزه‌ای اتصال، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های صورت‌گرفته عمدتاً بر تحلیل‌های تجربی یا مدل‌سازی کلی رفتار این نوع اتصالات متمرکز بوده‌اند، اما تاکنون بررسی سیستماتیک و عددی حساسیت اتصال مرکزگرا نسبت به پارامترهای مؤثر طراحی از جمله تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل، به‌طور جامع انجام نشده است. در این مقاله ابتدا مدل‌سازی اتصال پس کشیده فولادی در نرم‌افزار آباکوس پذیرفته و ضمن صحت‌سنجی با نتایج آزمایشگاهی گارلوک و همکاران [۶]، تأثیر مقاومت و مشخصات هندسی بر روی رفتار اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل حساسیت پارامتریک، بر سه پارامتر کلیدی شامل تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل بر پاسخ اتصال مرکزگرای فولادی بررسی و مقایسه شده است. برای بررسی سختی اولیه، ظرفیت اتلاف انرژی، ظرفیت خمشی و دوران اتصال، هر یک از پارامترها ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش و سپس ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش داده شده‌اند. نتایج مدل‌سازی‌ها در دو بخش شامل نمودار و نتایج عددی، همچنین نتایج گرافیکی

<sup>1</sup> Guan  
<sup>2</sup> Opensees  
<sup>3</sup> Huang  
<sup>4</sup> Xiong  
<sup>5</sup> Alqarni

زهانی که لنگر خمشی افزایش می‌یابد، تنش‌های تماسی در سطحی از تیر که به ستون فشرده شده است افزایش می‌یابد، درحالی‌که تنش در سمت کششی (سمتی که تیر از ستون دور می‌شود) کاهش می‌یابد تا به صفر می‌رسد. لنگر خمشی متناظر با این وضعیت لنگر جداشدگی نامیده می‌شود ( $M_{dec}$ ). در این مرحله، تیرها و ستون هنوز در تماس کامل هستند و رفتار اتصال، خطی است. نیروی اعضای پس‌کشیده همچنان برابر با مقدار اولیه خود است زیرا در آن‌ها تغییر طولی صورت نگرفته و هیچ تغییر شکلی در ابزار میراگر به وجود نیامده است.



شکل ۳- نمودار جسم آزاد اتصال تیر به ستون PTED در حالت جداشدگی [۱۸]

برای مقادیر بزرگ‌تر لنگر خمشی، مطابق شکل (۴) فاصله‌ای میان تیر و ستون به وجود می‌آید و متعاقباً سطح تماس فشاری تیر و ستون کاهش می‌یابد. نیروهای داخلی در گره از طریق نیروهای تماسی در سطح مشترک تیر و ستون در ناحیه محدود ذکر شده، متمرکز شده و به همراه نیروها و لنگرهایی که در ابزار میراگر به وجود می‌آید، انتقال داده می‌شوند.

بازشدن فاصله، دو پدیده زیر را به همراه دارد:

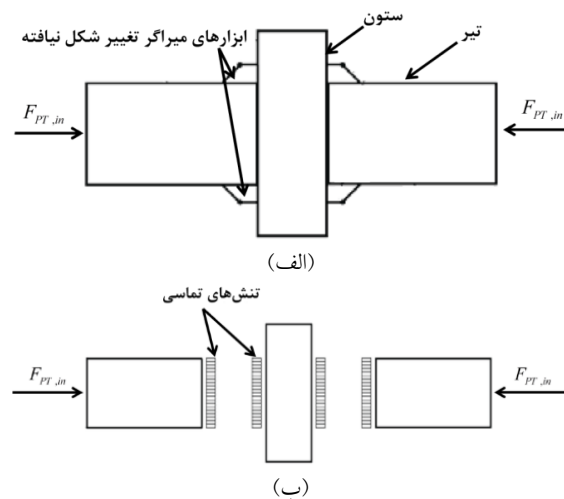
- کابل‌های پس‌کشیده در محدوده الاستیک افزایش طول می‌دهند و در نتیجه نیروی متناظر این اعضا افزایش می‌یابد و به دلیل تمایلی که برای برگشتن به طول اولیه دارند، لحظه به لحظه اتصال را به حالت اولیه بازمی‌گردانند.

- ابزارهای میراگر به دلیل چرخش نسبی بین تیر و ستون تغییر شکل می‌دهند. انرژی وارد شده به سازه به صورت پایدار مستهلک می‌شود و آسیب احتمالی به اعضای میراگر محدود می‌شود.

ارائه شده‌اند. برای نخستین بار، تأثیر تعداد کابل‌ها نیز به‌عنوان یک عامل مکمل در ارزیابی ویژگی‌های سختی، ظرفیت خمشی و خاصیت مرکزگرایی اتصال در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک می‌تواند به طراحان در انتخاب مقادیر مناسب این پارامترها برای دستیابی به عملکرد مطلوب‌تر لرزه‌ای، به‌ویژه در سازه‌های واقع در نواحی لرزه‌خیز، کمک شایانی نماید. همچنین می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی اتصالات مرکزگرا با هدف افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای و اتلاف انرژی مؤثر، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز کمک کند.

## ۲- رفتار مکانیکی اتصالات PTED

در قاب‌های فولادی دارای اتصالات PTED<sup>۱</sup>، انتقال نیروهای داخلی بین تیر و ستون به وسیله اعضای پس‌کشیده انجام می‌شود که طبق شکل (۲) توزیع یکنواختی از تنش تماسی فشاری را در سطح مشترک تیر و ستون ایجاد می‌کند. به دلیل وجود تنش‌های تماسی، نیروی برشی از طریق اصطکاک بین تیر و ستون انتقال می‌یابد. سیستم‌های دیگری نیز همچون ابزار میراگر با هر دو مکانیسم اصطکاک و تسلیم در انتقال برش نقش دارند. بعد از اعمال نیروی پس‌کشیدگی، تیرها و ستون‌ها در تماس مستقیم هستند و اتصال مانند یک اتصال صلب معمولی عمل می‌کند که قادر است برای مقادیر کوچک لنگر خمشی، نیروهای برشی و لنگر خمشی را بدون چرخش نسبی تیر به ستون انتقال دهد.

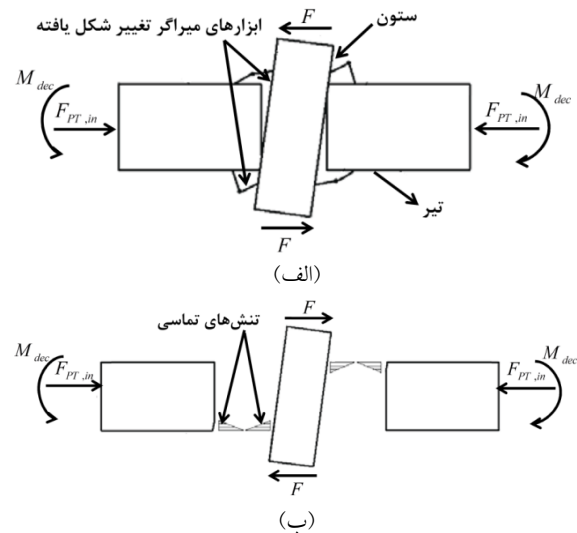


شکل ۲- نمودار جسم آزاد اتصال تیر به ستون PTED برای نشان دادن نیروی پس‌کشیدگی [۱۸]

مطابق شکل (۳) مقدار نیروی پس‌کشیدگی برابر با مقدار اولیه خود ( $F_{PT,in}$ ) است و ابزار میراگر تغییر شکل نداده است.

<sup>1</sup> Posttensioned Energy Dissipation

به دلیل بازشدگی، رفتار اتصال غیرخطی می‌شود. رفتار اعضای سازه‌ای اصلی، تیرها و ستون‌ها و اعضای پس‌کشیده الاستیک، خطی می‌ماند. دلیل اصلی به وجود آمدن رفتار غیرخطی در سیستم، تغییر شرایط مرزی در سطح تماس تیر و ستون است. عامل دیگر این موضوع نیز به تغییر شکل‌های غیرالاستیکی که در ابزار میراگر اتفاق می‌افتد بازمی‌گردد. پس از بازشدن فاصله در سطح مشترک اتصال، سختی سیستم به سختی الاستیک اعضای پس‌کشیده و سختی ابزار میراگر بستگی خواهد داشت.



شکل ۴- نمودار جسم آزاد اتصال تیر به ستون PTED بعد از

بازشدگی [۱۸]

بعد از زلزله انتظار می‌رود که تنها در ابزار میرایی اتصال جابه‌جایی نسبی پسماند باقی بماند و در نتیجه قاب خمشی با اتصال PTED که به درستی طراحی شده است، دچار هیچ‌گونه آسیبی نشود. مشخصاً سیستم پس‌کشیده باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در شرایط بهره‌برداری تماس کامل بین تیر و ستون و اصطکاک کافی برای مقاومت برشی را مهیا نماید. علاوه بر این، رفتار اتصال باید تحت زلزله‌های شدید در محدوده الاستیک باشد، زیرا شکست اعضای پس‌کشیده منجر به از بین رفتن خاصیت مرکزگرایی سیستم می‌شود و مهم‌تر از آن به علت فقدان قابلیت انتقال نیروی برشی باعث فروپاشی کل سیستم خواهد شد.

### ۳- معرفی اتصال و فرآیند مدل‌سازی

گارلوک و همکاران شش نمونه اتصال میانی در مقیاس کامل با اتصال خمشی تیر به ستون بال پهن پس‌کشیده را مورد آزمایش قرار دادند [۱۹]. شکل (۵-الف) پیکربندی آزمایشگاهی مطالعه تجربی آن‌ها را نشان می‌دهد. در این اتصال از کابل‌های پس‌کشیده که بال‌های تیر را به ستون فشار می‌دهند تا در برابر لنگر وارده

مقاومت نمایند برای تأمین نیروهای بازگرداننده استفاده می‌شود؛ درحالی‌که اجزای اتلاف انرژی (مانند نبشی‌های بالا و نشیمن) برای اتلاف انرژی به‌کار برده شده‌اند. از ورق‌های پرکننده بین انتهای تیر و بال ستون برای جلوگیری از تماس استفاده می‌شود. به دلیل حضور توام نیروی فشاری و لنگر خمشی در تیر برای جلوگیری از تسلیم بال تیر از ورق‌های تقویتی استفاده شد. طول ورق تقویتی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که کرنش انتهای ورق تقویتی کمتر از دو برابر کرنش تسلیم شود تا از حالت حدی کماتش موضعی تیر جلوگیری نماید. همچنین از ورق‌های پیوستگی برای پیشگیری از تغییر شکل خارج از صفحه بال‌های ستون و از ورق‌های مضاعف در دو طرف چشمه اتصال برای جلوگیری از تسلیم جان ستون استفاده می‌شود.

### ۳-۱- ابعاد و هندسه مدل

در این تحقیق به منظور ارزیابی و بررسی اتصالات پس‌کشیده فولادی، از بین شش اتصال مورد مطالعه گارلوک (۲۰۰۵) نمونه 36S-P-20 در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است [۲۰]. جهت مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل عددی از ابعاد و هندسه نشان‌داده‌شده در شکل (۵-ب) استفاده شده است. در این مدل مقطع ستون  $W 14 \times 398$  و مقطع تیر  $W 36 \times 150$  بوده و از نبشی با ساق‌های مساوی به ابعاد مقطع  $L 203 \times 203 \times 19$  میلی‌متر و به طول  $406$  میلی‌متر استفاده شده است. جهت تقویت تیر، ورق‌هایی به ابعاد  $1372 \times 356 \times 25$  میلی‌متر و همچنین ناحیه چشمه اتصال توسط ورق‌های پیوستگی و مضاعف با ضخامت  $25$  میلی‌متر به جان ستون و ورق‌های پرکننده به ابعاد  $32 \times 292 \times 406$  میلی‌متر به بال ستون جوش شده‌اند؛ و هریک از نبشی‌های فوقانی و تحتانی توسط یک ردیف چهارتایی و دو ردیف دوتایی پیچ A490 به قطر  $32$  میلی‌متر به ترتیب به بال و جان ستون متصل می‌شوند. هر کابل پر مقاومت فولادی شامل هفت رشته درهم تنیده فولادی به مساحت کل  $140$  میلی‌متر مربع بوده که در شش ردیف در عمق جان و دو طرف جان تیر قرار گرفته و در انتهای تیرها مهار می‌شوند.

تمامی اعضا با استفاده از المان‌های پیوسته تغییر شکل‌دهنده سه‌بعدی جامد مدل شده‌اند. المان‌های جامد برای استفاده در تحلیل‌های غیرخطی پیچیده که شامل سطوح تماسی زیاد، پلاستیسیته و تغییر شکل‌های بزرگ هستند، مناسب می‌باشند.

### ۳-۲- مشخصات مصالح

مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد استفاده‌شده در جدول (۱) ارائه شده است. تمامی اعضا به‌غیر از کابل‌ها و پیچ‌ها از فولاد

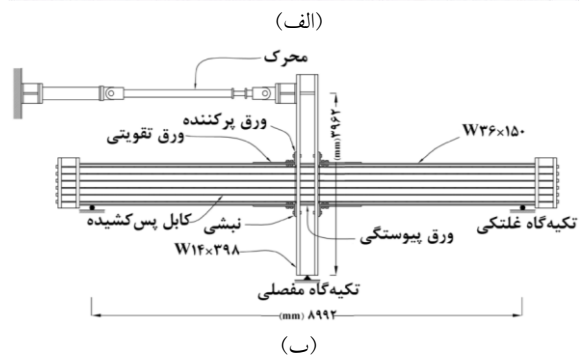
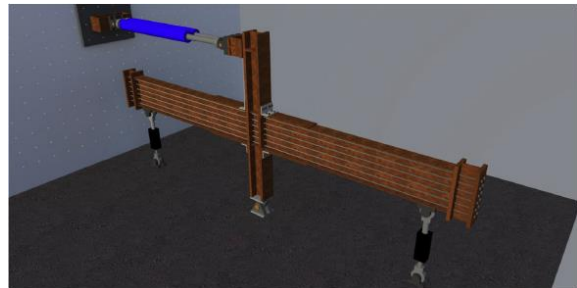
عضو ممکن نیست. این قید از الگوریتم ریاضی Master-Slave استفاده می‌کند و از جداشدن یا لغزش گره‌های Slave از Master جلوگیری می‌نماید. با توجه به این که مؤلفه‌های جوش شده در طول آزمایش دچار آسیب نمی‌شوند، استفاده از قید مهاري به جای مدل کردن جوش‌ها، تأثیری در جواب تحلیل ندارد. به‌طور مشخص قید مهاري برای مدل‌سازی اندرکنش میان اعضای زیر در نظر گرفته شده است: ورق پیوستگی با جان و بال ستون، ورق مضاعف با جان و بال ستون، ورق پرکننده و بال ستون، ورق تقویتی با بال تیر، ورق انتهایی و مقطع تیر و صفحات صلبی که برای اعمال بارگذاری و شرایط مرزی به تیر و ستون متصل شده‌اند.

برای مدل‌سازی اعضای غیرجوشی از الگوریتم تماس کلی استفاده شده است. این اعضا شامل ورق تقویتی و نبشی، نبشی و سرهای پیچ، سرهای پیچ و بال تیر، سرهای پیچ و بال ستون، ورق پرکننده با مقطع تیر، ورق تقویتی و نبشی، گیره‌های مهاري کابل‌ها با ورق‌های انتهایی، بدنه پیچ با دیوارهای داخلی سوراخ‌های نبشی، تیر، ورق تقویتی و ستون، بدنه کابل با دیوار داخلی سوراخ‌های بال ستون و ورق انتهایی هستند. از گزینه Surface Smoothing که در برنامه موجود است جهت بهبود تنش تماسی برای سطوح منحنی مانند کابل‌ها و پیچ‌ها در مدل حاضر استفاده شده است. محدودیت تماسی بین دو عضو غیرجوشی به وسیله Penalty Method انجام گرفته است. رفتار تماسی و عمودی میان این قسمت‌ها در نظر گرفته شده است. برای رفتار تماسی همه اعضا به جز بدنه پیچ، سوراخ‌های مربوط به پیچ، بدنه کابل و سوراخ‌های مربوط به کابل، ضریب اصطکاک ۰/۳۵ مطابق با دستورالعمل‌های AISC 360-16 در نظر گرفته شده است [۲۱]. رفتار تماسی اعضای نام‌برده به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. رفتار عمودی به صورت تماس سخت<sup>۴</sup> اعمال شده تا از نفوذ دو سطح مجاور در یکدیگر جلوگیری نماید.

### ۳-۴- مش‌بندی

المان‌های تشکیل‌دهنده تمامی اجزای اتصال، المان‌های سه‌بعدی شش‌وجهی C3D8R (هشت گره‌ای خطی) با انتگرال کاهش‌یافته مدل شده‌اند. این المان‌ها شش‌وجهی و هشت گره‌ای بوده و دارای یک نقطه برای انتگرال‌گیری در مرکزشان هستند؛ یک مش‌بندی خوب از المان‌های C3D8R می‌تواند جواب بهینه‌ای با دقت کافی و در زمان تحلیل کم‌تر ارائه دهد. مش‌های کوچک‌تری

ASTM A572 رده ۵۰ ساخته شده‌اند. پیچ‌ها از جنس فولاد ASTM A490 و کابل‌ها از فولاد ASTM A416 هستند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فولاد مورد استفاده به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ است. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی فولاد از مدل الاستو-پلاستیک با تسلیم فون‌میسز<sup>۱</sup> همراه با کرنش سخت‌شوندگی<sup>۲</sup> استفاده شده است.



شکل ۵- تنظیمات قاب پس‌کشیده (الف) نمای سه‌بعدی پیکربندی آزمایشگاهی (ب) تنظیمات نمونه در مدل‌سازی اجزای محدود [۱۴]

جدول ۱- خصوصیات مصالح [۶]

قطعه	تنش تسلیم $\sigma_y$ (MPa)	تنش نهایی $\sigma_u$ (MPa)
بال تیر	۳۶۲	۴۹۸
جان تیر	۴۱۴	۵۲۷
ورق تقویتی	۳۹۷	۵۷۴
بال ستون	۳۵۶	۴۹۹
جان ستون	۳۴۵	۴۹۶
نبشی	۳۸۳	۵۴۵
کابل پس‌کشیده	۱۶۲۰	۱۹۰۰

### ۳-۳- سطوح تماسی

برای مدل‌کردن اندرکنش میان اعضای جوش‌شده، از قید مهاري<sup>۳</sup> استفاده می‌شود که در این حالت هیچ‌گونه حرکت نسبی میان دو

<sup>۴</sup> Hard Contact

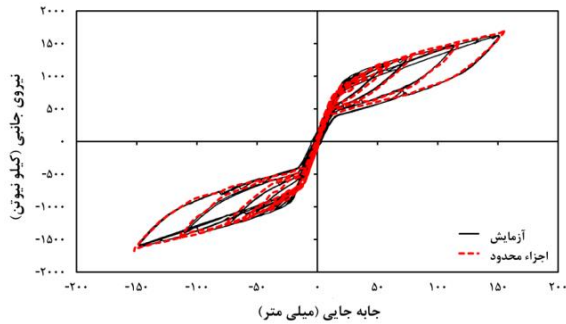
<sup>۱</sup> Von Mises

<sup>۲</sup> Isotropic Hardening

<sup>۳</sup> Tie Constraint

#### ۴- صحت سنجی

شکل (۶) نمودار نیروی جانبی-جابه‌جایی یکنواخت اتصالات پس‌کشیده را در مقایسه با پاسخ چرخه‌ای از آزمایشات گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق قابل‌قبولی بین منحنی پاسخ تحلیلی و تجربی برای نمونه وجود دارد.



شکل ۶- مقایسه پاسخ نیروی جانبی-جابه‌جایی به‌دست‌آمده از مدل اجزای محدود و آزمایشگاهی 36s-20-P [۱۹]

نتایج تحلیل المان محدود هم از نظر پیش‌بینی ویژگی‌های پاسخ (مانند سختی اولیه،  $K_i$  و حداکثر ظرفیت باربری  $F_{max}$ ) و رفتار حالت حدی (شامل نوع آسیب و شروع آسیب) قابل‌قبول تلقی می‌شوند. مقدار حداکثر نیروی جانبی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی انجام‌شده در این نمونه ۱۷۳۴ کیلو نیوتن است. مقادیر نیروی جانبی بر اساس نتایج تحلیل آزمایشگاهی توسط گارلوک و همکاران ۱۶۳۶ کیلو نیوتن بود و در نتیجه اختلافی معادل ۶ درصد برای نتایج نیرو بین دو تحلیل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

#### ۴-۱- سختی اولیه

تحت لنگر اعمال‌شده، اتصال در ابتدا به‌عنوان یک اتصال کاملاً مهارشده عمل می‌کند، تا زمانی که  $\theta_r$  برابر با صفر است در آن سختی اولیه شبیه به اتصال خمشی جوشی است. سختی اتصال پس از بازشدن فاصله اتصال با سختی محوری الاستیک کابل‌های پس‌کشیده و نبشی‌های فولادی مرتبط است که به‌عنوان سختی پسماند نام‌گذاری شده است. با ادامه بارگذاری به‌دلیل تسلیم‌شدن نبشی‌ها سختی اتصال کاهش می‌یابد [۲۳].

سختی اولیه اتصال مرکزگرا ۴۵۸۵۵ کیلو نیوتن بر متر است که تقریباً برابر با اتصال جوشی است. قابل‌ذکر است که مدل اجزای محدود سختی اولیه را کمی بالاتر از قاب آزمایش‌شده نشان

در نواحی اطراف چشمه اتصال که تغییرات بیش‌تری را در تنش و کرنش تجربه می‌کنند و همچنین نبشی‌ها که دچار تسلیم می‌شوند و مفصل پلاستیک تشکیل می‌دهند نیز در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از دقت تحلیل و همگرایی نتایج، کیفیت مش‌بندی در مدل اجزای محدود با استفاده از ابزار صحت‌سنج داخلی نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ارزیابی، پارامترهایی نظیر نسبت ابعاد<sup>۱</sup>، انحراف هندسی<sup>۲</sup> و دترمینان ژاکوبین به‌عنوان شاخص‌های کیفی مش در نظر گرفته شدند. مش‌هایی که دارای مقادیر خارج از محدوده قابل‌قبول بودند، به‌صورت موضعی اصلاح یا مجدد مش‌بندی شدند. این فرآیند به کاهش خطاهای عددی، دقت بیش‌تر در توزیع تنش‌ها و پایداری همگرایی تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای کمک شایانی نمود.

#### ۳-۵- بارگذاری و شرایط مرزی

تکیه‌گاه پای ستون از نوع مفصلی است و چرخش آزادانه نیز دارد. تکیه‌گاه‌های انتهای تیر از نوع غلتکی بوده که در فاصله ۴۴۹۶ میلی‌متری از مرکز ستون در نظر گرفته شده است (جابه‌جایی عمودی صفر است). برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیرهای تحت بار چرخه‌ای، جابه‌جایی آن‌ها بسته شده است.

در آزمایش گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) بارهای وارده توسط دو محرک به بالای ستون اعمال می‌شوند؛ مدل تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته است. بار چرخه‌ای به‌صورت تغییرمکانی در بالای ستون و بر اساس پروتکل بارگذاری مطابق با SAC 1997 است [۲۲]. آزمایش چرخه‌ای با جابه‌جایی نسبی ۴٪ تا زمانی که منجر به شکست در نمونه شود ادامه می‌یابد.

#### ۳-۶- روش و مراحل تحلیل

در این مطالعه، برای تحلیل رفتار اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای، از تحلیل دینامیکی صریح<sup>۳</sup> در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. این نوع تحلیل برای مسائل گذرای غیرخطی و بارگذاری‌های رفت‌وبرگشتی مناسب بوده و از روش انتگرال‌گیری صریح برای حل معادلات حرکت بهره می‌برد. نوع تحلیل مدل‌ها به‌صورت استاتیکی غیرخطی بوده که شامل تحلیل غیرخطی مصالح و هندسه است. تحلیل در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، تحلیل مربوط به پس‌کشیدگی کابل‌ها و در مرحله دوم، تحت بار چرخه‌ای انجام می‌شود.

<sup>1</sup> Aspect Ratio

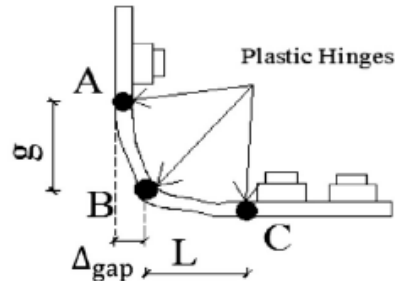
<sup>2</sup> Skewness

<sup>3</sup> Explicit Dynamic Analysis

می‌دهد. نتایج بیان‌کننده آن است که اتصالات فولادی پس‌کشیده می‌تواند مقاومت و سختی کافی را برای قاب خمشی تحت بارگذاری چرخه‌ای فراهم نماید.

#### ۴-۲- اتلاف انرژی

به‌طورکلی، ظرفیت اتلاف انرژی قاب‌های فولادی پس‌کشیده به نبشی بالا و پایین بستگی دارد. هنگامی که باربرداری رخ می‌دهد، نبشی‌های فولادی انرژی را تلف می‌کنند و در نهایت، اتصال به نقطه صفر تغییر شکل خود بازمی‌گردد. یعنی فاصله بین تیر و ستون بسته می‌شود. اتلاف انرژی با ناحیه محصور شده توسط حلقه‌های نمودار نیروی جانبی-جابه‌جایی مرتبط است که با DE<sup>۱</sup> ارائه شده است. سازوکار اتلاف انرژی در این اتصالات بر اساس تشکیل سه مفصل پلاستیک در هر نبشی مانند شکل (۷) است. با توجه توزیع کرنش پلاستیک در نبشی نقطه‌ای که دارای کرنش پلاستیک بالا هستند مستعد تشکیل مفصل پلاستیک و اتلاف انرژی هستند.



شکل ۷- سازوکار اتلاف انرژی در اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده پس از بارگذاری [۲۴]

#### ۴-۳- ظرفیت باربری (مقاومت نهایی)

مقاومت نهایی (F<sub>max</sub>)، نشان‌دهنده مقاومت حداکثر یک اتصال پس‌کشیده است که شروع هرگونه آسیب یا خرابی به‌عنوان سطح ظرفیت نهایی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج عددی مقاومت نهایی اتصال ۱۷۳۴ کیلونیوتن است.

#### ۴-۴- روابط تحلیلی

در اتصال پس‌کشیده فولادی نبشی تحت تنش بالایی قرار می‌گیرد. مفصل پلاستیک و تنش نبشی موجود به‌ترتیب به حد شکست و تنش نهایی می‌رسند. در این بخش دو شاخص شکست برای تشخیص نوع شروع شکست در نبشی‌های فولادی، شکست ترد یا شکست شکل‌پذیر ارائه شده است. بنابراین از شاخص پلاستیسیته (PI)<sup>۲</sup> برای تعیین میزان کرنش پلاستیک و شاخص

گسیختگی (RI)<sup>۳</sup> برای شکست شکل‌پذیر در نبشی‌ها استفاده شد [۲۵].

روابط (۱) و (۲) که برای شاخص پلاستیسیته و رابطه (۳)

برای شاخص گسیختگی استفاده شد به شرح زیر هستند:

$$PI = \frac{PEEQ}{\epsilon_y} \quad (1)$$

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

از آنجایی که شاخص پلاستیسیته نسبت کرنش پلاستیک معادل که از نرم‌افزار آباکوس گرفته می‌شود به کرنش تسلیم نبشی فولاد است، (ε<sub>ij</sub><sup>p</sup>) اجزای کرنش پلاستیک در جهات خاص است.

$$RI = \frac{PEEQ}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}})} \quad (3)$$

در معادله شاخص گسیختگی (σ<sub>m</sub>) تنش هیدرواستاتیک و (σ̄) تنش فون‌میسز هستند. شاخص پلاستیسیته، برای اتصال 36S-P-20 از تحلیل و محاسبه، ۱۵۷ به‌دست می‌آید و شاخص گسیختگی، ۰/۶۶ محاسبه شد.

#### ۵- بررسی پارامتریک حساسیت پارامترهای دارای عدم

##### قطعیت تحت بارگذاری چرخه‌ای

در تجزیه و تحلیل قابلیت اعتماد سازه، تحلیل حساسیت می‌تواند برای اندازه‌گیری چگونگی تأثیر متغیر ورودی بر خروجی مدل استفاده شود [۲۶]. هدف از تحلیل حساسیت (ناشی از پارامتر)، تعیین پارامترهای مهم مدل و اهمیت نسبی آن‌ها است. به‌عنوان مثال، پارامتر A مهم‌تر از پارامتر B است؟ یا اهمیت آن‌ها نسبت به C چیست؟ به‌عبارت دیگر آیا می‌توان پارامترها را به‌ترتیب اهمیت رتبه‌بندی کرد؟ اهمیت به معنای نقش آن‌ها در خروجی است [۲۷].

مراحل معمولی اجرای تحلیل حساسیت شامل موارد زیر است:

۱- طرح آزمایش (تعیین سوالی که در مدل باید پاسخ داده شود) و تعیین ورودی‌هایی که در تحلیل مورد توجه قرار می‌گیرند؛

۲- دومین مرحله در تجزیه و تحلیل حساسیت، تعیین محدوده ورودی‌ها است. انتخاب یک بازه و توزیع آماری مناسب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در هر یک از پارامترهای ورودی مدل، مهم‌ترین مرحله در شبیه‌سازی است و این انتخاب تأثیر مستقیم بر روی

<sup>۲</sup> Plasticity Index

<sup>۳</sup> Rupture Index

<sup>۱</sup> Dissipated Energy

تغییرپذیری پاسخ و همچنین اثر نتایج تحلیل حساسیت دارد؛

۳- مدل مورد مطالعه باید در نرم‌افزار شبیه‌سازی و صحت‌سنجی شود، سپس برای هر بازه تغییرات باید مدل‌ها را ایجاد کرد؛

۴- در تحلیل احتمالاتی، ارزیابی مدل برای هر مجموعه نمونه تولید شده انجام می‌شود. با توجه به این که یک رابطه ریاضی مشخص بین ورودی و خروجی وجود دارد، در این مرحله باید هر نمونه یا بازه تعیین شده به سیستم داده شود و پاسخ سیستم تحت آن محاسبه گردد؛

۵- ارزیابی اثر یا اهمیت نسبی هر پارامتر ورودی بر متغیرهای پاسخ؛

۶- شاخص‌های حساسیت پیشنهادی شامل شاخص حساسیت فردی و شاخص حساسیت تعاملی است. شاخص حساسیت فردی می‌تواند تأثیر فردی متغیر ورودی را بر خرابی سازه اندازه‌گیری نماید. شاخص حساسیت تعاملی می‌تواند مشخص کند که چگونه یک متغیر ورودی بر اثر متغیر ورودی دیگر بر خرابی سازه تأثیر می‌گذارد [۲۸].

در مدل‌های بسیار پیچیده که در آن‌ها استفاده از روش‌هایی مثل مونت‌کارلو<sup>۱</sup> [۲۹] و سوپول<sup>۲</sup> [۳۰] با محدودیت‌هایی مواجه می‌شویم. معمولاً از روش تحلیل حساسیت پارامتریک استفاده می‌شود. در این روش مدل با تعداد تحلیل کم‌تری نسبت به روش‌های دیگر با ترکیب مختلف پارامترها که هر بار یکی از آن‌ها تغییر می‌کند و با تحلیل ابتدایی تأثیر آن‌ها بر خروجی سنجیده می‌شود.

پس از صحت‌سنجی نمونه 36s-P-20، به‌طور جداگانه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تنش تسلیم نبشی (A)، سطح مقطع کابل (B)، نیروی پس‌کشیدگی کابل (C) بر رفتار اتصالات مرکزگرای فولادی انجام شد. در این پژوهش ابتدا محدوده تغییرات هر پارامتر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش و سپس ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش یافت. برای هر پارامتر با تغییرات ذکر شده در جدول (۲)، یک مدل اجزای محدود توسعه داده شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. به‌عنوان خروجی هر شبیه‌سازی، ابتدا منحنی نیروی جانبی-جابه‌جایی و منحنی لنگر-دوران با

منحنی‌های مدل اصلی مقایسه شد و ویژگی‌های پاسخ مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲- مدل‌های اجزای محدود برای تحلیل حساسیت

نام مدل	Ns	$L_{rp}$ (mm)	$T_0$ (kN)	A (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	E (GPa)
SA-1	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۴۴۰	۲/۰۹۹
SA-2	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۵۲۰	۲/۰۹۹
SA-3	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۶۰۰	۲/۰۹۹
SA-4	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۳۶۰	۲/۰۹۹
SA-5	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۲۸۰	۲/۰۹۹
SA-6	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۲۰	۲۰۰	۲/۰۹۹
SB-1	۳۶	۱۳۷۲	۳۵۱۳/۴	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SB-2	۳۶	۱۳۷۲	۴۱۵۲/۲	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SB-3	۳۶	۱۳۷۲	۴۷۹۱	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SB-4	۳۶	۱۳۷۲	۲۸۷۴/۶	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SB-5	۳۶	۱۳۷۲	۲۲۳۵/۸	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SB-6	۳۶	۱۳۷۲	۱۵۹۷	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-1	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۴۶۲	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-2	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۵۴۶	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-3	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۶۳۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-4	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۳۷۸	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-5	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۲۹۴	۴۰۰	۲/۰۹۹
SC-6	۳۶	۱۳۷۲	۳۱۹۴	۲۱۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P1	۳۶	۱۳۷۲	۴۱۵۲/۲	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P2	۲۴	۱۳۷۲	۴۱۵۲/۲	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P3	۱۸	۱۳۷۲	۴۱۵۲/۲	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P4	۳۶	۱۳۷۲	۴۷۹۱	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P5	۲۴	۱۳۷۲	۴۷۹۱	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹
SP-P6	۱۸	۱۳۷۲	۴۷۹۱	۴۲۰	۴۰۰	۲/۰۹۹

#### ۵-۱-۱-۵- تأثیر تنش تسلیم نبشی

#### ۵-۱-۱-۵- بررسی نتایج عددی

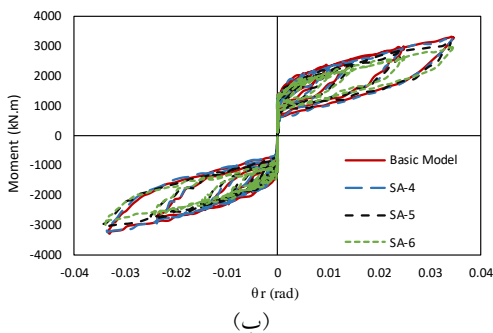
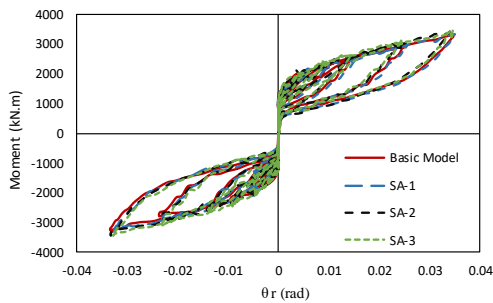
برای ارزیابی تأثیر تغییرات تنش تسلیم نبشی بر روی پاسخ اتصال مرکزگرا طبق جدول (۲) مدل‌های اجزای محدود SA-1، SA-2 و SA-3 به ترتیب با ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ افزایش تنش تسلیم نبشی و همین‌طور مدل‌های اجزای محدود SA-4، SA-5 و SA-6 به ترتیب با ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ کاهش تنش تسلیم نبشی ساخته شده و سپس تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شدند. همان‌طور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است با افزایش تنش تسلیم نمودارهای نیروی جانبی-جابه‌جایی نسبت به مدل اولیه تغییرات کم‌تری دارند. با توجه به نتایج عددی تأثیر افزایش تنش تسلیم بر ویژگی‌های پاسخ اتصال بدین شرح است. مکانیزم اتصال به‌گونه‌ای است که ابتدا بازشدگی رخ می‌دهد سپس شیب نمودار

<sup>1</sup> Monte Carlo

<sup>2</sup> Sobol



همین‌طور با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای لنگر-دوران نشان‌داده‌شده در شکل (۹)، ظرفیت خمشی اتصال با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش تنش تسلیم به‌ترتیب ۱، ۳/۱ و ۱۰/۲ درصد افزایش می‌یابد و باعث کاهش دوران نسبی بین تیر و ستون شده است. همچنین ظرفیت خمشی اتصال با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش به‌ترتیب ۱/۰۲، ۷/۱۴ و ۱۸/۳۶ درصد کاهش می‌یابد و باعث افزایش جزئی دوران نسبی تیر و ستون می‌شود.

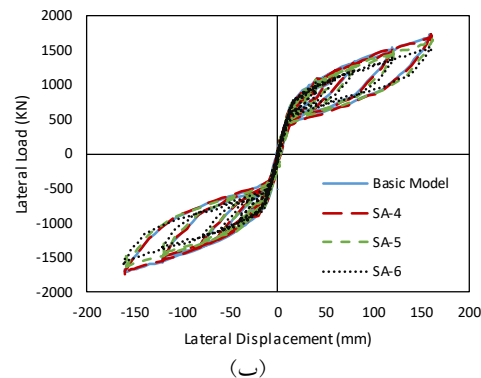
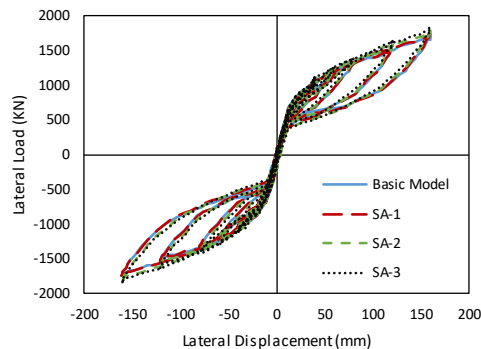


شکل ۹- مقایسه نمودار لنگر-دوران نسبی مدل‌های اجزای محدود با مدل اولیه: الف) SA-1، SA-2 و SA-3 ب) SA-4، SA-5 و SA-6

#### ۵-۱-۲- بررسی نتایج گرافیکی

در اتصال مرکزگرا معمولاً انتهای ماهیچه نبشی و پایین سوراخ ساق نبشی متصل به ستون، تمرکز تنش زیادی وجود دارد و مقدار تنش در این نقاط بسیار بالاتر از سایر نقاط نبشی است. این نقاط روی نبشی کششی، مستعد تشکیل مفصل خمیری هستند. با توجه به تمرکز تنش در نبشی‌ها و تشکیل مفصل خمیری کرنش پلاستیک در نبشی ایجاد می‌شود. بنابراین در شکل‌های (۱۰-الف) الی (۱۰-پ) توزیع کرنش پلاستیک برای مدل‌هایی که افزایش تنش تسلیم داشته‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است کرنش پلاستیک نبشی با افزایش تنش تسلیم در اتصال مرکزگرا کاهش می‌یابد. از مقایسه نتایجی که در شکل‌های (۱۱-الف) الی (۱۱-پ) مشخص است، مشاهده می‌شود که مقادیر تنش در تیر اتصال مرکزگرا با افزایش مقاومت تسلیم

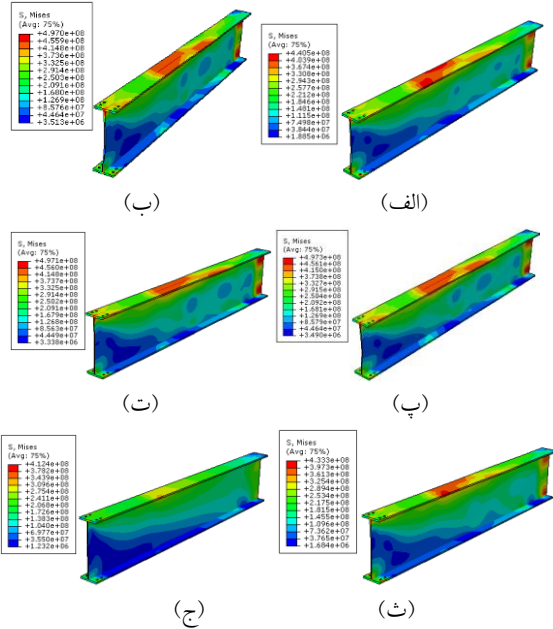
تغییر می‌کند و نبشی شروع به تسلیم می‌نماید. از آنجایی که سختی اتصال قبل از بازشدگی محاسبه می‌شود به همین دلیل تنش تسلیم نبشی تأثیری بر سختی و بازشدگی اتصال ندارد؛ ولی مقاومت نهایی به دلیل افزایش سختی بعد از بازشدگی با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش تنش تسلیم نبشی به‌ترتیب ۱/۲، ۳/۴ و ۶/۳ درصد افزایش و مساحت زیر نمودار نیروی جانبی-جابجایی که بیانگر جذب انرژی نیز می‌باشد با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش تنش تسلیم نبشی، به‌ترتیب ۰/۸، ۵/۸ و ۱۱ درصد کاهش یافت. وقتی تنش تسلیم کاهش داده می‌شود از مقدار نیروی مورد نیاز برای انتقال برش پایین‌تر می‌رود که باعث کاهش ظرفیت باربری اتصال و تغییرات بیش‌تر در نمودار نیروی جانبی-جابجایی که در شکل (۸-ب) نشان داده شده است، می‌شود. مقاومت نهایی با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش تنش تسلیم نبشی، به‌ترتیب ۲/۵، ۸/۷ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. در اینجا کاهش تنش تسلیم باعث کاهش سختی ثانویه می‌شود به همین دلیل نمودارهای نیروی جانبی-جابجایی نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی<sup>۱</sup> شده‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳)، مساحت زیر نمودار نیروی جانبی-جابجایی با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش تنش تسلیم نبشی، به‌ترتیب ۰/۸۳، ۴/۶ و ۹/۳ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۸- مقایسه نمودار نیروی جانبی-جابجایی مدل‌های اجزای محدود با مدل اولیه: الف) SA-1، SA-2 و SA-3 ب) SA-4، SA-5 و SA-6

<sup>۱</sup> Pinching

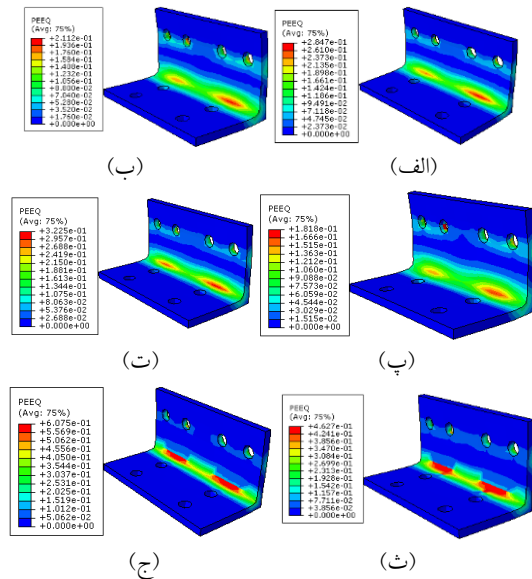
طبق نتایج حاصل از نمودارهای شکل (۱۲-الف) در جدول (۳) با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی کابل به ترتیب سختی اتصال ۲/۸، ۲/۴ و ۲۶/۶ درصد نسبت به سختی اولیه افزایش می یابد و با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی کابل مقاومت نهایی اتصال به ترتیب ۲/۲، ۵/۶ و ۷/۶ درصد نسبت به مقاومت نهایی مدل اولیه افزایش می یابد.



شکل ۱۱- توزیع تنش و وضعیت تغییر شکل یافته تیر اتصال مرکزگرا در جابه جایی نسبی ۳ درصد: الف) SA-1، ب) SA-2، پ) SA-3، ت) SA-4، ث) SA-5، ج) SA-6

همین طور نیروی پس کشیدگی بر رفتار نبشی ها تأثیر می گذارد. با بازشدگی بیشتر، تسلیم نبشی به تأخیر می افتد و تغییر پلاستیک کمتری ایجاد می شود که با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی کابل، سطح زیر نمودار نیروی جانبی-جابه جایی به ترتیب ۱/۲۶، ۳/۸۹ و ۸/۷۶ درصد کاهش پیدا می کند. نیروی پس کشیدگی کابل،  $T_0$ ، به شدت بر وضعیت حدی شکست نبشی تأثیر می گذارد. کاهش نیروی پس کشیدگی اولیه کوچک تر منجر به جداشدگی زودتر می شود و بنابراین باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک نبشی ها می شوند و در نتیجه سطح زیر نمودار نیروی جانبی-جابه جایی با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی کابل به ترتیب ۰/۷، ۴/۴ و ۱۰/۷۲ درصد افزایش می یابد. با کاهش نیروی پس کشیدگی کابل خاصیت مرکزگرایی اتصال کاهش می یابد و جداشدگی زودتر اتفاق می افتد که منجر به کاهش سختی می شود. بنابراین سختی اتصال مرکزگرا با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی

افزایش می یابد. در شکل های (۱۰-ت) الی (۱۰-ج) توزیع کرنش پلاستیک نشان داده شده است. همان طور که مشخص است کاهش تنش تسلیم نبشی، افزایش کرنش پلاستیک معادل در نبشی ها را به دنبال دارد، این موضوع مؤید افزایش کرنش ها و در نتیجه افزایش پتانسیل شکست اعم از ترد یا شکل پذیر در این نوع اتصالات در مقطع مورد بررسی شده است. در شکل های (۱۱-ت) الی (۱۱-ج) توزیع تنش در تیر اتصال مرکزگرای فولادی نشان داده شده است؛ با کاهش تنش تسلیم نبشی، مقدار تنش ایجاد شده در تیر به دلیل تسلیم شدن زودتر نبشی ها و تمرکز خرابی بر روی نبشی ها کاهش می یابد.



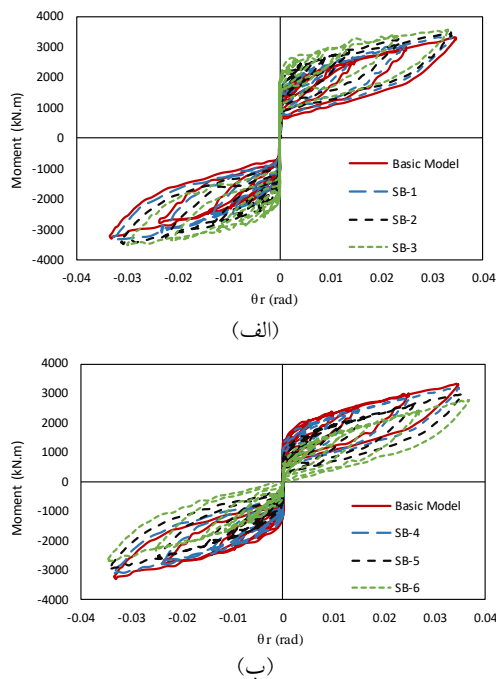
شکل ۱۰- توزیع کرنش پلاستیک نبشی های فولادی اتصال مرکزگرا در جابه جایی نسبی ۳ درصد: الف) SA-1، ب) SA-2، پ) SA-3، ت) SA-4، ث) SA-5، ج) SA-6

## ۲-۵- تأثیر نیروی پس کشیدگی کابل

### ۲-۵-۱- بررسی نتایج عددی

برای ارزیابی تأثیر تغییرات نیروی پس کشیدگی کابل بر روی پاسخ اتصال مرکزگرا نیروی پس کشیدگی کابل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش و ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش داده شدند و طبق جدول (۲) به ترتیب مدل های SB-1، SB-2، SB-3 و SB-6 برای افزایش نیروی پس کشیدگی کابل و SB-4، SB-5، SB-6 برای کاهش نیروی پس کشیدگی کابل ساخته شدند و سپس تحت بارگذاری چرخشی تحلیل شدند. از آنجایی که نیروی پس کشیدگی کابل باعث ایجاد مرکزگرایی در اتصال می شود، هرچه نیروی پس کشیدگی کابل افزایش یابد، مرکزگرایی بیشتری در اتصال ایجاد می گردد. با توجه به این که نیروی لازم برای بازشدگی، افزایش یافته است، سختی و مقاومت نهایی در اتصال بیشتر می شود.

و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. کاهش بیش از اندازه نیروی پس‌کشیدگی کابل منجر به از دست دادن خاصیت مرکزگرایی می‌شود. از آنجایی که نیروی پس‌کشیدگی کابل نسبت به مدل اولیه کم‌تر می‌شود، بازشدگی زودتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه لنگر لازم برای جداشدن تیر از ستون کم‌تر می‌شود و همچنین باعث کاهش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود. طبق نمودارهای لنگر-دوران در شکل (۱۳-ب) و نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳) با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش نیروی پس‌کشیدگی کابل به ترتیب، لنگر جداشدگی ۱۹/۵، ۴۱/۳ و ۶۵/۲ درصد و ظرفیت خمشی ۲/۰۲، ۱۰/۱۱ و ۲۱/۲۳ درصد کاهش یافته است. هرچه نیروی پس‌کشیدگی کاهش یابد، نیروی مرکزگرایی و نیروی بازگرداننده به موقعیت اولیه تیرها کم می‌شود؛ در نتیجه تیر کاملاً به حالت اولیه باز نمی‌گردد و به همین دلیل دوران نسبی با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل به ترتیب ۰/۶، ۴/۲، ۸/۸۵ درصد افزایش می‌یابد.



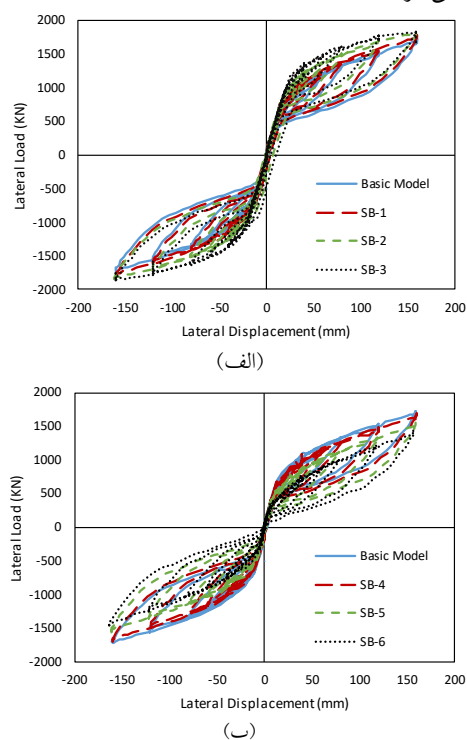
شکل ۱۳- مقایسه نمودار لنگر-دوران نسبی مدل‌های اجزای محدود با مدل اولیه: الف) SB-1، SB-2 و SB-3 ب) SB-4، SB-5 و SB-6

#### ۵-۲-۲- بررسی نتایج گرافیکی

در شکل‌های (۱۴-الف) الی (۱۴-پ) توزیع کرنش پلاستیک برای نمونه‌های اتصال مرکزگرا با افزایش نیروی پس‌کشیدگی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هرچه نیروی پس‌کشیدگی بیشتر شود، تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده به دلیل تسلیم دیرتر نبشی‌ها کاهش می‌یابد؛ بنابراین کرنش پلاستیک معادل در نبشی فولادی

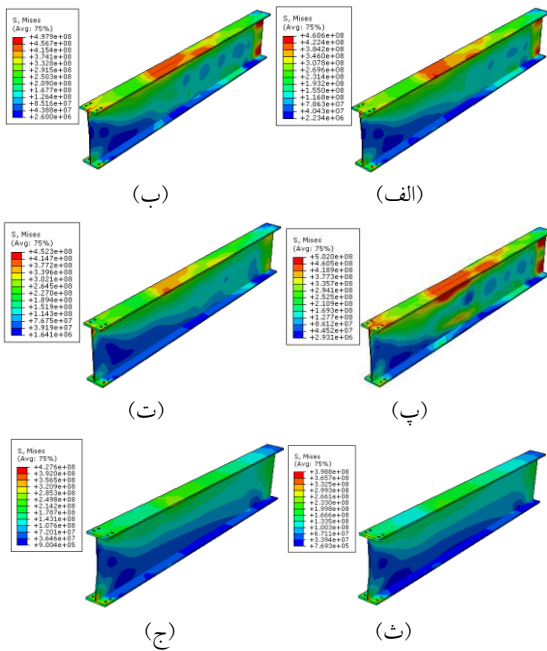
کابل به ترتیب ۲/۲، ۱۵/۵ و ۳۰/۲ درصد کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱۲-ب) مشخص است مقاومت نهایی اتصال مرکزگرا با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی اولیه به ترتیب ۲/۸۲، ۲/۲ و ۲۲/۲ درصد نسبت به مقادیر مدل اولیه کاهش می‌یابد.

با افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل بال‌های تیر تسلیم شده و دچار کمانش موضعی می‌شوند؛ کمانش موضعی سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیک باقی‌مانده در اتصال مرکزگرا می‌شود. بنابراین جابه‌جایی پسماند با افزایش ۱۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل ۲/۴ میلی‌متر، با ۳۰ درصد افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل ۶/۲۹ میلی‌متر و با ۵۰ درصد افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل برابر ۱۱/۹ میلی‌متر است.



شکل ۱۲- مقایسه نمودار نیروی-جانبی-جابه‌جایی مدل‌های اجزای محدود با مدل اولیه: الف) SB-1، SB-2 و SB-3 ب) SB-4، SB-5 و SB-6

با توجه به نمودارهای لنگر-دوران در شکل (۱۳-الف) و نتایج عددی با افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل، کابل به پارگی تمایل پیدا می‌کند بنابراین باعث دوران کم‌تر اتصال می‌شود. دوران نسبی با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل به ترتیب ۲/۶، ۷/۰۶ و ۲۰/۳ درصد نسبت به دوران نسبی مدل اولیه کاهش می‌یابد. ظرفیت خمشی اتصال نیز با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل به ترتیب ۲/۸۵، ۱۰/۲



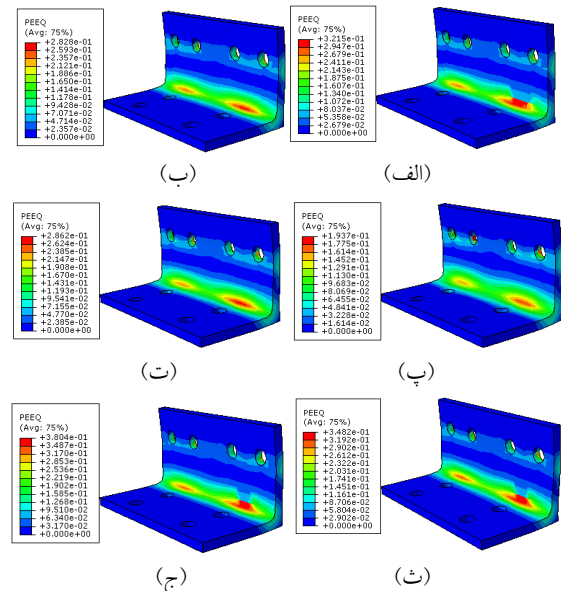
شکل ۱۵- توزیع تنش و تغییر شکل تیر اتصال مرکزگرا در جابه‌جایی نسبی ۳ درصد: الف) SB-1، ب) SB-2، پ) SB-3، ت) SB-4، ث) SB-5، ج) SB-6

### ۳-۵- تأثیر سطح مقطع کابل

#### ۱-۳-۵- بررسی نتایج عددی

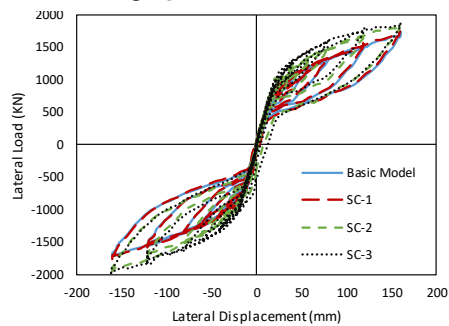
برای ارزیابی تأثیر تغییرات سطح مقطع کابل بر روی پاسخ اتصال مرکزگرا مطابق جدول (۲) مدل‌های اجزای محدود SC-1، SC-2، SC-3 و SC-6 به ترتیب برای افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل و مدل‌های SC-4، SC-5 و SC-6 به ترتیب برای کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل ساخته شده و سپس تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شدند. در شکل (۱۶-الف) نمودارهای نیروی جانبی-جابه‌جایی و در شکل (۱۷-الف) نمودارهای نگر-دوران برای افزایش سطح مقطع کابل و همچنین در جدول (۳) نتایج عددی ارائه شده و با مدل اصلی مقایسه شده‌اند. افزایش سطح مقطع کابل سبب افزایش خاصیت مرکزگرایی در برابر نیروی جانبی وارد بر سازه می‌شود. با توجه به این که نیروی پس کشیدگی اولیه کابل ( $T_0$ ) با تغییر سطح مقطع ثابت مانده است حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل ( $T_{max}$ ) با افزایش سطح مقطع کابل رابطه مستقیم دارد. با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل‌ها به ترتیب ۵/۳، ۱۷/۸۶ و ۲۹ درصد افزایش داشته است. همین‌طور با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل‌ها به ترتیب سختی اتصال ۴/۵، ۱۶/۵۶ و ۳۳/۳ درصد و مقاومت نهایی اتصال ۱/۵، ۵/۴۲ و ۹/۵ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش سطح مقطع کابل به‌ازای نیروی پس کشیدگی اولیه ثابت، خاصیت مرکزگرایی افزایش می‌یابد و

با افزایش نیروی پس کشیدگی روند کاهشی داشته است. وضعیت تغییر شکل یافته و توزیع تنش در تیر اتصال مرکزگرای فولادی در دوران نسبی ۳ درصد نشان داده شده است. طبق شکل‌های (۱۵-الف) الی (۱۵-پ) با توجه به نیروی پس کشیدگی بیش‌تر در کابل‌ها، تنش‌های ایجاد شده در نواحی جان و بال تیر افزایش می‌یابد و به دلیل دلیل ازدیاد تنش به وجود آمده در تیر، کماتش در جان تیر نیز افزایش پیدا می‌کند. همین‌طور افزایش تنش ایجاد شده در بال تیر نیز سبب کماتش موضعی و ایجاد تغییر شکل ماندگار در اتصال می‌شود و در نهایت خرابی بیش‌تری در تیر با نیروی پس کشیدگی بالا ایجاد می‌کند. به دلیل کاهش نیروی پس کشیدگی و بازشدگی زودتر اتصال، تغییر شکل پلاستیک نبشی همان‌طور که در شکل‌های (۱۴-ت) الی (۱۴-ج) نشان داده شده است، روند افزایشی دارد؛ بنابراین منجر به ایجاد کرنش پلاستیک بیش‌تر می‌شود. در شکل‌های (۱۵-ت) الی (۱۵-ج) توزیع تنش در تیر اتصال مرکزگرای فولادی برای نمونه‌ها با کاهش نیروی پس کشیدگی کابل نشان داده شده است. به دلیل کم‌بودن نیروی پس کشیدگی کابل و ازدست‌دادن خاصیت مرکزگرایی، تنش ایجاد شده در بال و جان تیر کاهش می‌یابد و ناحیه تسلیم شده در مدل با ۵۰ درصد کاهش نیروی پس کشیدگی کابل نسبت به مدل با ۱۰ درصد کاهش نیروی پس کشیدگی کابل، کم‌تر می‌شود. در نتیجه بیش‌تر خرابی‌ها در نبشی فولادی متمرکز است و تیر آسیب کم‌تری می‌بیند.

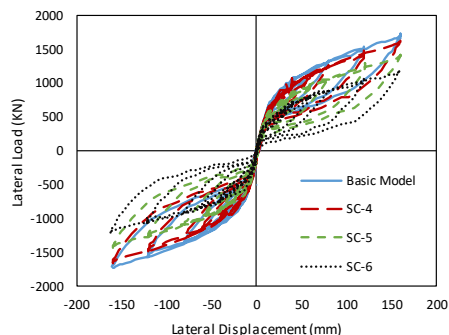


شکل ۱۴- توزیع کرنش پلاستیک نبشی فولادی اتصال مرکزگرا در جابه‌جایی نسبی ۳ درصد: الف) SB-1، ب) SB-2، پ) SB-3، ت) SB-4، ث) SB-5، ج) SB-6

حالت دوران بین تیر و ستون به طور کامل به حالت اولیه باز نمی‌گردد و دوران نسبی با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب، ۲/۶، ۷/۹ و ۱۲/۶ درصد افزایش می‌یابد.



(الف)

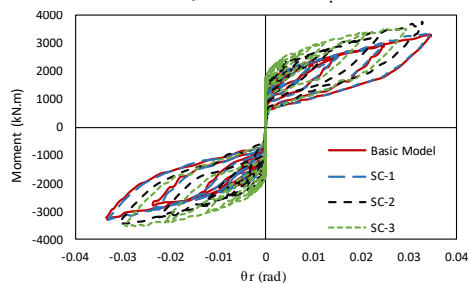


(ب)

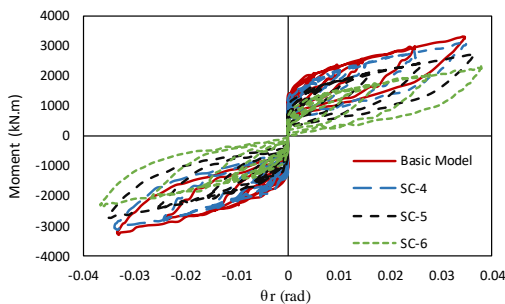
شکل ۱۶- مقایسه نمودار نیروی جانبی-جابه‌جایی مدل‌های اجزای

محدود با مدل اولیه: الف) SC-1، SC-2 و SC-3

ب) SC-4، SC-5 و SC-6



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- مقایسه نمودار لنگر-دوران نسبی مدل‌های اجزای محدود با

مدل اولیه: الف) SC-1، SC-2 و SC-3

ب) SC-4، SC-5 و SC-6

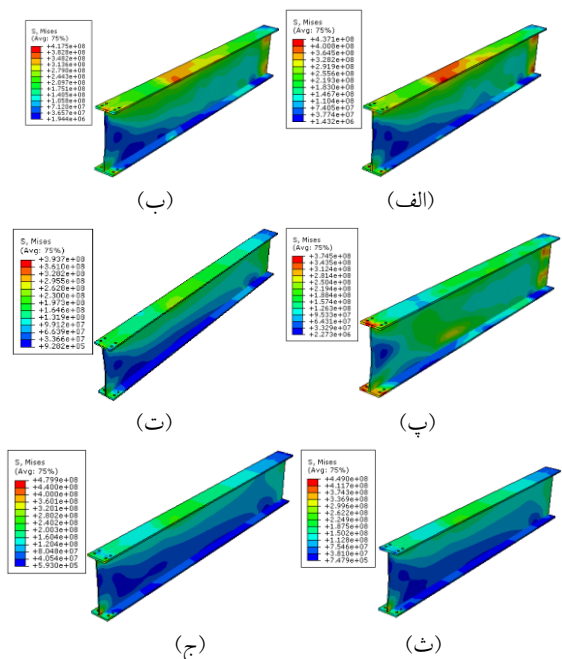
تسلیم نبشی‌ها به تأخیر می‌افتد؛ به همین دلیل سطح زیر نمودار نیروی جانبی-جابه‌جایی با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب، ۱/۹، ۸/۹ و ۱۵/۶ درصد کاهش می‌یابد. با کاهش سطح مقطع کابل، کابل ضعیف‌تر می‌شود بنابراین حداکثر نیروی کم‌تری در کابل ایجاد می‌شود که با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل به ترتیب ۱/۸، ۱۰/۷ و ۲۵ درصد کاهش یافته است. از طرفی خاصیت مرکزگرایی اتصال کم‌تر شده و موجب بازشدگی زودتر بین تیر و ستون می‌شود. طبق نمودارهای نیروی جانبی-جابه‌جایی شکل (۱۷-ب) حداکثر مقاومت اتصال با کاهش سطح مقطع کابل به ترتیب ۶/۳، ۱۷/۹ و ۳۰/۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بازشدگی زودتر، نشان‌دهنده کاهش سختی اولیه اتصال است که سختی اولیه با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۳/۸، ۲۰/۱ و ۳۴/۱ درصد کاهش می‌یابد. طبق نتایج حاصل در جدول (۳) حداکثر مقاومت اتصال با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۶/۳، ۱۷/۹ و ۳۰/۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بازشدگی زودتر، منجر به تسلیم شدن سریع‌تر نبشی‌ها و افزایش تغییرشکل پلاستیک می‌شود. بنابراین مساحت زیر نمودار نیروی جانبی-جابه‌جایی با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۱/۸، ۷/۲ و ۱۷/۶ درصد افزایش می‌یابد. تسلیم بال تیر و کمانش موضعی تیر منجر به رفتار پلاستیک شده و باعث ایجاد تغییرشکل پلاستیک باقی‌مانده در اتصال می‌گردد. با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل جابه‌جایی باقی‌مانده به ترتیب ۱/۶ میلی‌متر، ۵/۷۲ میلی‌متر و ۱۰/۷ میلی‌متر است.

افزایش سطح مقطع کابل اتصال با نیروی پس‌کشیدگی اولیه ثابت، باعث قوی‌تر شدن کابل می‌شود. در نتیجه پس‌کشیدگی کابل‌ها سخت‌تر شده و به همین دلیل بازشدگی نیز دیرتر اتفاق می‌افتد و از طرفی ظرفیت خمشی اتصال با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل، به ترتیب ۳/۸، ۱۳/۳ و ۲۱/۴ درصد افزایش می‌یابد. به دلیل نیروی بازگرداننده بیشتر، بازشدگی سریع‌تر به حالت اولیه برمی‌گردد و به همین دلیل دوران نسبی با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل، به ترتیب ۲/۹، ۵/۶ و ۱۴/۱ درصد کاهش می‌یابد. نمودارهای لنگر-دوران برای کاهش سطح مقطع کابل در شکل (۱۷-ب) ارائه شده است.

ظرفیت خمشی اتصال به دلیل کاهش ظرفیت باربری اتصال با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل، به ترتیب ۱/۱، ۹/۲ و ۲۹/۶ درصد کاهش یافته است. همچنین کاهش سطح مقطع کابل باعث کاهش نیروی بازگرداننده اتصال می‌گردد. در این

## ۵-۳-۲- بررسی نتایج گرافیکی

همان‌طور که در شکل‌های (۱۸-الف) الی (۱۸-پ) نشان داده شده است با افزایش سطح مقطع کابل، کرنش پلاستیک به دلیل خاصیت مرکزگرایی بیش‌تر و تسلیم دیرتر نبشی کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۱۹-الف) الی (۱۹-پ) توزیع تنش و وضعیت تغییرشکل یافته مدل‌های SC-1، SC-2 و SC-3 نشان داده شده است که با افزایش سطح مقطع کابل تنش بیش‌تری در بال و جان تیر ایجاد می‌شود که این تنش بیش‌تر، منجر به کماتش موضعی جان و بال شده که هر چه سطح مقطع بیش‌تر می‌شود تنش ایجادشده بیش‌تر و در نتیجه تغییرشکل نیز افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۱۸-ت) الی (۱۸-ج) توزیع کرنش پلاستیک نبشی برای کاهش سطح مقطع کابل نشان داده شده است. با توجه به این که سطح مقطع کابل در نمونه‌های شبیه‌سازی شده این بخش کاهش می‌یابد، به‌ازای نیروی پس‌کشیدگی اولیه ثابت کابل با سطح مقطع کم‌تر ضعیف‌تر شده و در نتیجه سریع‌تر کشیده می‌شود و نبشی زودتر تسلیم شده و باعث ایجاد تغییرشکل پلاستیک بیش‌تر می‌گردد؛ بنابراین کرنش پلاستیک با کاهش سطح مقطع روند افزایشی خواهد داشت. در شکل‌های (۱۹-ت) الی (۱۹-ج) توزیع تنش در جان و بال تیر نشان داده شده است که با کاهش سطح مقطع کابل کاهش می‌یابد.

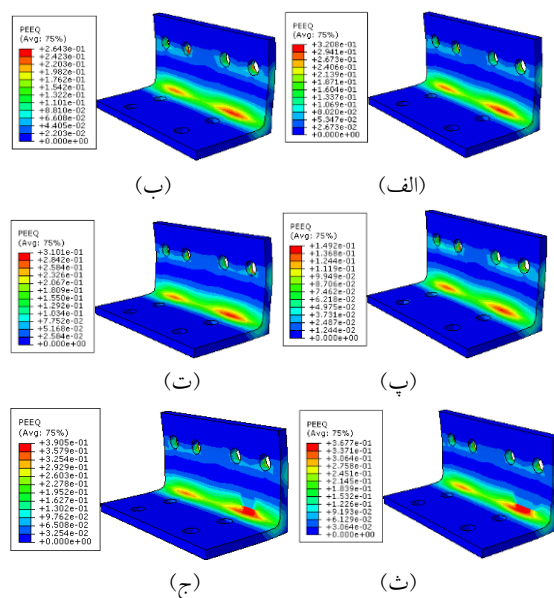


شکل ۱۹- توزیع تنش و تغییرشکل تیر اتصال مرکزگرا در جابه‌جایی نسبی ۳ درصد: الف) SC-1، SC-2 و SC-3 ب) SC-4، SC-5 و SC-6

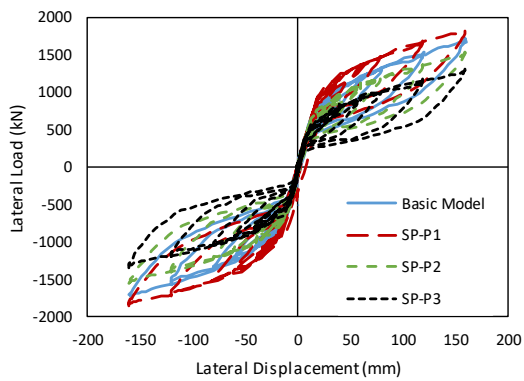
## ۵-۴- تأثیر تغییر تعداد کابل

با توجه به نتایج بخش‌های قبلی نیروی پس‌کشیدگی کابل از فاکتورهای تأثیرگذار بر روی ویژگی‌های پاسخ اتصال مرکزگرا است. از طرف دیگر افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل سبب کاهش اتلاف انرژی می‌شود. برای تأمین استهلاک انرژی و همچنین به دلیل افزایش بیش از حد ظرفیت مرکزگرایی که موجب آسیب‌رساندن به تیر می‌شود، هم‌زمان بررسی تأثیر تغییر تعداد کابل با ثابت نگه‌داشتن نیروی پس‌کشیدگی مدل‌سازی‌ها انجام شد.

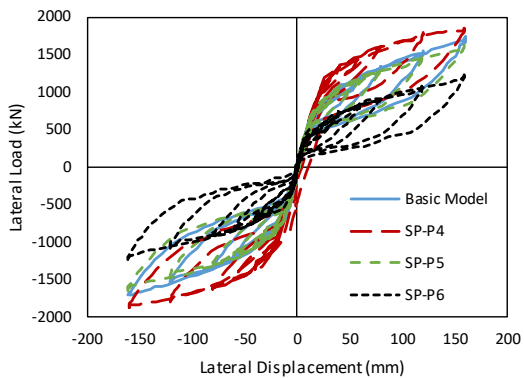
برای انجام تحلیل حساسیت بر روی اتصال مرکزگرا با تعداد کابل متغیر، مدل‌ها طبق جدول (۲) در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند. در جدول (۲) مدل‌های SP-P1 تا SP-P3 با ثابت نگه‌داشتن نیروی پس‌کشیدگی کابل بر روی ۳۰ درصد مقدار اولیه SP-P4 تا SP-P6 به‌ترتیب با ثابت نگه‌داشتن نیروی پس‌کشیدگی کابل بر روی ۵۰ درصد مقدار اولیه نیروی پس‌کشیدگی کابل (۳۱۹۴ کیلونیوتن) مدل‌سازی شدند؛ تغییر تعداد کابل بدین صورت در مدل‌سازی انجام شد که ابتدا ۳۶ کابل سپس ۲۴ کابل و در نهایت به ۱۸ کابل تغییر یافت. که طبق مقاله گارلوک هر کابل معادل سه رشته درهم تنیده است که برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس ۳۶ کابل معادل ۱۲ کابل، ۲۴ کابل معادل ۸ کابل و ۱۸ کابل معادل ۶ کابل شبیه‌سازی شد. با توجه به نمودارهای



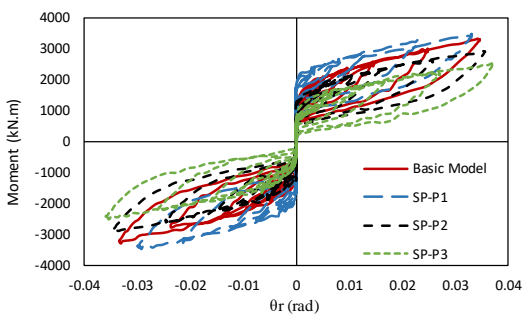
شکل ۱۸- توزیع کرنش پلاستیک نبشی فولادی اتصال مرکزگرا در جابه‌جایی نسبی ۳ درصد: الف) SC-1، SC-2 و SC-3 ب) SC-4، SC-5 و SC-6



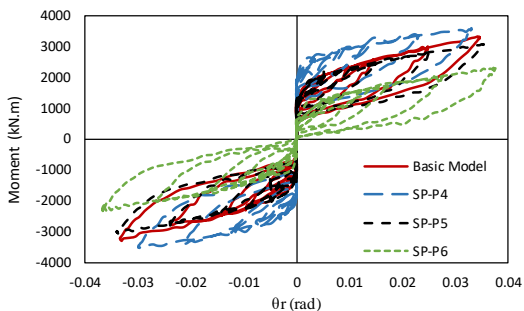
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۲۰- مقایسه نمودارهای هیستریزیس مدل‌های SP-P1 تا SP-P6

با مدل اولیه الف) مقایسه نمودارهای نیروی جانبی-جابه‌جایی

مدل‌های SP-P1 تا SP-P3، ب) مقایسه نمودارهای

نیروی جانبی-جابه‌جایی مدل‌های SP-P4 تا SP-P6، پ) مقایسه

نمودارهای لنگر-دوران مدل‌های SP-P1 تا SP-P3، ت) مقایسه

نمودارهای لنگر-دوران SP-P4 تا SP-P6

نیروی جانبی-جابه‌جایی شکل (۲۰-الف) سختی در این حالت برای مدل SP-P2 با ۸ کابل ۲/۱ درصد افزایش و برای مدل SP-P3 با ۶ کابل، چون نیرو کم‌تر از حد معمول شده ۶/۴ درصد کاهش یافته است. برای مدل SP-P1 ظرفیت اتلاف انرژی ۳/۸ درصد کاهش و برای مدل‌های SP-P2 و SP-P3 به ترتیب ۲ و ۶/۳ درصد افزایش یافته است. ظرفیت خمشی اتصال نیز با نیروی پس‌کشیدگی ثابت ۳۰ درصد و تعداد کابل ۸ و ۶ به ترتیب ۱۰/۲ و ۲۴/۳ درصد کاهش یافته است و دوران نسبی تیر نیز با افزایش ۳۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل و کاهش تعداد کابل، روند افزایشی داشته است.

با توجه به نمودارهای نیروی جانبی-جابه‌جایی شکل (۲۰-ب) برای مدل‌هایی که نیروی پس‌کشیدگی کابل بر روی ۵۰ درصد مقدار اولیه همزمان با تغییر تعداد کابل ۵۰ درصد افزایش یافته، ظرفیت اتلاف انرژی برای تعداد ۱۲ کابل به دلیل نیروی پس‌کشیدگی بالا ۹ درصد کاهش یافته است و ظرفیت اتلاف انرژی برای نمونه‌های SP-P4 و SP-P5 با ۶ و ۸ کابل به ترتیب ۰/۹ و ۲/۴ درصد افزایش یافته است. همین‌طور سختی اتصال برای دو مدل SP-P4 و SP-P5 به ترتیب ۱۸/۲ و ۲۶/۵ درصد افزایش داشته و برای مدل SP-P6، ۵/۷ درصد کاهش داشته است. همان‌طور که در شکل‌های (۲۰-پ) و (۲۰-ت) مشخص است اتصال مرکزگرا با ۱۲ کابل تأثیر افزایشی بر روی لنگر جداشدگی و ظرفیت اتلاف انرژی دارد؛ ولی با کاهش تعداد کابل به ۸ اتصال مرکزگرا وضعیت بهتری نسبت مدل‌های دیگر دارد و لنگر جداشدگی و ظرفیت خمشی تقریباً با مدل اولیه برابر است. همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد به دلیل افزایش بیش از حد مرکزگرایی در اتصال چه با افزایش نیروی پس‌کشیدگی و چه با افزایش تعداد کابل، منجر به ازدیاد نیروی مرکزگرایی کابل نسبت به ظرفیت تیر شده و دوران‌های بالا باعث آسیب‌رساندن به تیر می‌شود. با توجه به نتایج اتصال مرکزگرا در حالت افزایش ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل با تعداد ۸ کابل نسبت به مدل‌های دیگر از وضعیت بهتری برخوردار است.

جدول ۳- نتایج تحلیل‌های عددی مدل‌های اجزای محدود

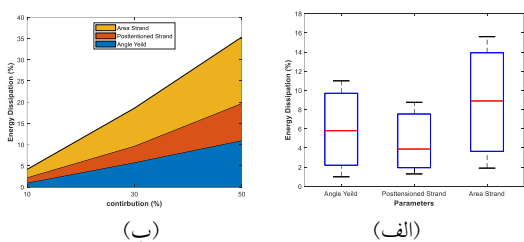
نام مدل	Initial Stiffness (K <sub>i</sub> ) (kN/m)	F <sub>max</sub> (kN)	Dissipated Energy (DE) (kJ)	$M_{max}/M_p$	$\theta_{r max}$ (rad)
SA-1	۴۵۸۹۰	۱۷۵۶	۲۷۳/۴۶	۰/۹۹	۰/۰۳۳۹
SA-2	۴۵۹۱۵	۱۷۹۱	۲۵۹/۱۲	۱/۰۱	۰/۰۳۳۷
SA-3	۴۵۹۹۷	۱۸۴۱	۲۴۲/۳۵	۱/۰۸	۰/۰۳۳۱
SA-4	۴۵۸۷۵	۱۶۹۱	۲۷۶/۳	۰/۹۷	۰/۰۳۳۸
SA-5	۴۵۸۷۰	۱۵۸۳	۲۸۳/۹	۰/۹۱	۰/۰۳۴۱
SA-6	۴۵۸۲۵	۱۴۲۱	۲۹۸/۴۵	۰/۸	۰/۰۳۴۶
SB-1	۴۷۱۷۴	۱۷۷۲	۲۷۲/۲۳	۱/۰۰۸	۰/۰۳۳۱
SB-2	۵۱۵۸۰	۱۸۳۱	۲۶۴/۹۶	۱/۰۸	۰/۰۳۱۶
SB-3	۵۸۰۹۶	۱۸۶۷	۲۵۱/۵۴	۱/۲	۰/۰۲۷۱
SB-4	۴۴۸۸۰	۱۶۸۵	۲۷۷/۴۵	۰/۹۷	۰/۰۳۴۲
SB-5	۳۸۷۷۷	۱۵۳۳	۲۸۷/۷۳	۰/۸۹	۰/۰۳۵۶
SB-6	۳۲۰۳۱	۱۳۴۹	۳۰۵/۲۶	۰/۷۸	۰/۰۳۶۹
SC-1	۴۷۹۷۸	۱۷۶۱	۲۷۰/۴۵	۱/۰۱۷	۰/۰۳۳
SC-2	۵۳۳۴۱	۱۸۲۸	۲۵۱/۴۴	۱/۱۱	۰/۰۳۲۱
SC-3	۶۱۳۱۴	۱۸۹۸	۲۳۲/۰۵	۱/۱۹	۰/۰۲۹۲
SC-4	۴۴۱۲۶	۱۶۲۵	۲۸۰/۶۲	۰/۹۷	۰/۰۳۴۹
SC-5	۳۶۵۴۷	۱۴۳۳	۲۹۳/۷۷	۰/۸۹	۰/۰۳۶۷
SC-6	۳۰۲۱۴	۱۱۹۸	۳۲۱/۴۸	۰/۶۹	۰/۰۳۸۳
SP-P1	۵۱۵۸۰	۱۸۳۱	۲۶۴/۹۶	۱/۰۸	۰/۰۳۲۲
SP-P2	۴۶۸۵۱	۱۵۱۷	۲۸۰/۸	۰/۸۸	۰/۰۳۵۲
SP-P3	۴۲۹۱۷	۱۲۸۳	۲۹۲/۴	۰/۷۴	۰/۰۳۷۲
SP-P4	۵۸۰۹۶	۱۸۶۸	۲۵۱/۵	۱/۲	۰/۰۲۷
SP-P5	۵۴۲۵۴	۱۶۲۷	۲۷۷/۶	۰/۹۳	۰/۰۳۵
SP-P6	۴۳۲۵۷	۱۱۸۷	۲۸۱/۱	۰/۶۹	۰/۰۳۶۷

## ۶- ظرفیت اتلاف انرژی

طبق توضیحات بخش قبل، مقایسه درصد تغییرات ظرفیت اتلاف انرژی برای افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل در شکل (۲۲) نشان داده شده است. نمودار (الف-۲۱) نشان می‌دهد با افزایش نیروی پس کشیدگی و سطح مقطع کابل ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد که سطح مقطع بیش‌ترین تأثیر و پراکندگی را بر ظرفیت اتلاف انرژی دارد. همچنین با افزایش تنش تسلیم نبشی، ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. نمودار (ب-۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش پارامترها، ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد که سطح مقطع کابل سهم قابل توجهی در افزایش آن دارد و نیروی پس کشیدگی کابل کم‌ترین تأثیر را دارد.

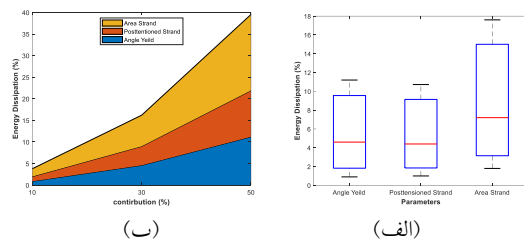
شکل (۲۲) درصد تغییرات ظرفیت اتلاف انرژی را با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد هر سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار (الف-۲۲) نشان داده شده است کاهش تنش تسلیم نبشی ظرفیت اتلاف انرژی را به دلیل تسلیم زود هنگام نبشی، افزایش می‌دهد. کاهش نیروی پس کشیدگی و سطح مقطع کابل

نیز ظرفیت اتلاف انرژی را افزایش می‌دهند. بنابراین با توجه به نمودار (ب-۲۲) کاهش سطح مقطع بیش‌ترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت اتلاف انرژی دارد. کاهش تنش تسلیم نبشی تأثیر متوسط و کاهش نیروی پس کشیدگی کم‌ترین تأثیر را دارد.



شکل ۲۱- میزان تغییرات ظرفیت اتلاف انرژی با افزایش سطح مقطع

کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل



شکل ۲۲- میزان تغییرات ظرفیت اتلاف انرژی با کاهش سطح مقطع

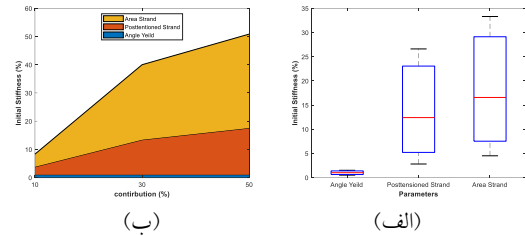
کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل

## ۷- سختی اولیه اتصال

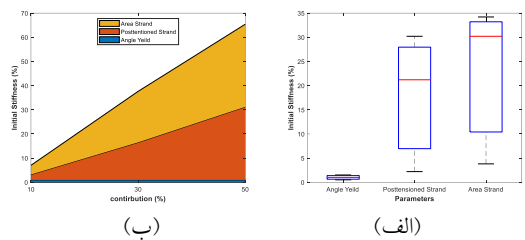
شکل (۲۳) مقایسه سختی اتصال مرکزگرا برای تأثیر افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد هر سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار (الف-۲۳) و توضیحات بخش قبل با افزایش تنش تسلیم نبشی، سختی اولیه اتصال تغییری نمی‌کند و با افزایش نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل، سختی اولیه افزایش می‌یابد. تأثیر سطح مقطع کابل بیش‌ترین تأثیر و پراکندگی را بر سختی اولیه اتصال نسبت به پارامترهای دیگر دارد. همچنین با توجه به نمودار (ب-۲۳) نیز می‌توان گفت افزایش سطح مقطع کابل سهم قابل توجهی بر تغییرات سختی دارد. نیروی پس کشیدگی تأثیر کم‌تری نسبت به سطح مقطع کابل دارد و تنش تسلیم نبشی تأثیری بر روی سختی اولیه ندارد.

شکل (۲۴) تأثیر کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد هر سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل بر روی سختی اولیه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار (الف-۲۴) با کاهش تنش تسلیم نبشی سختی اولیه اتصال تغییر نمی‌کند.

همچنین با کاهش نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل سختی اولیه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار (۲۴-ب) نشان داده شده کاهش سطح مقطع کابل به دلیل ضعیف شدن مقطع کابل، سختی اولیه را به نسبت نیروی پس کشیدگی کابل بیش‌تر کاهش می‌دهد.



شکل ۲۳- میزان تغییرات سختی اولیه با افزایش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل



شکل ۲۴- میزان تغییرات سختی اولیه با کاهش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل

## ۸- شاخص حساسیت

با توجه به بخش ۴-۴ شاخص گسیختگی و شاخص پلاستیسیته به‌عنوان شاخص‌های حساسیت در این مقاله انتخاب شدند. هرچه شاخص گسیختگی کم‌تر و شاخص پلاستیسیته برای اتصال مرکزگرا بیش‌تر باشد، اتصال از وضعیت بهتری برخوردار است. پس به‌طور خلاصه در بخش قبل سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل برای انجام تحلیل حساسیت انتخاب شدند و در مجموع ۲۴ تحلیل تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شد.

شاخص پلاستیسیته با توجه به نتایج عددی جدول (۴) به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری شکست شکل‌پذیر با افزایش تنش تسلیم نبشی به‌ترتیب در مدل‌های SA-1، SA-2 و SA-3 نسبت به مدل اولیه کاهش می‌یابد. با توجه این که در مدل‌های SB-1، SB-2 و SB-3 نیروی پس کشیدگی افزایش یافته است تغییر شکل پلاستیک نبشی کم‌تر می‌شود. همچنین توزیع کرنش پلاستیک که در بخش‌های قبلی نشان داده شده است کاهش می‌یابد و با توجه به رابطه گفته‌شده در بخش ۴-۴ هرچه توزیع کرنش پلاستیک کاهش یابد، شاخص پلاستیسیته نیز روند کاهشی خواهد داشت.

شاخص پلاستیسیته برای مدل‌های SC-1، SC-2 و SC-3 که سطح مقطع کابل افزایش یافته به دلیل تنش‌های ایجادشده کم‌تر در اتصال و تغییر شکل پلاستیک کم‌تر، کاهش یافته است. همین‌طور شاخص پلاستیسیته با کاهش تنش تسلیم در مدل‌های SA-4، SA-5 و SA-6 افزایش می‌یابد. برای مدل‌های SB-1، SB-2 و SB-3 نیروی پس کشیدگی کاهش یافته است، توزیع کرنش پلاستیک روند افزایشی داشته است که در بخش قبل به‌صورت گرافیکی نشان داده شده است؛ شاخص پلاستیسیته برای این حالت افزایش داشته است. برای مدل‌های SC-4، SC-5 و SC-6 که سطح مقطع کاهش داشته است، به دلیل ضعیف بودن کابل به‌ازای نیروی ثابت، تنش‌های ایجادشده افزایش پیدا می‌کند و با توجه به رابطه گفته‌شده در بخش ۴-۴ موجب افزایش شاخص پلاستیسیته می‌شود.

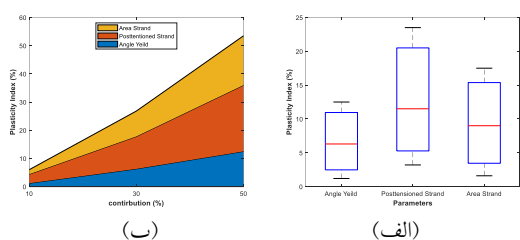
شاخص گسیختگی با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) برای مدل‌های SA-1، SA-2 و SA-3 که تنش تسلیم نبشی افزایش می‌یابد، نسبت به مدل اولیه کاهش خواهد داشت. شاخص گسیختگی برای مدل‌های SB-1، SB-2 و SB-3 که نیروی پس کشیدگی روند افزایشی دارد، تنش پلاستیک ایجادشده افزایش پیدا می‌کند. با توجه به رابطه (۳) هرچه تنش افزایش یابد، شاخص گسیختگی روند کاهشی خواهد داشت. شاخص گسیختگی برای مدل‌های SC-1، SC-2 و SC-3 به دلیل ازدیاد سطح مقطع کابل نسبت به مدل اولیه با نیروی ثابت قوی‌تر شده است و منجر به خرابی کم‌تر در اتصال می‌شود و از طرفی توزیع کرنش پلاستیک که در بخش قبلی نشان داده شده روند کاهشی دارد، به همین دلیل شاخص گسیختگی با افزایش سطح مقطع کابل کاهش می‌یابد. با افزایش توام کاهش تعداد کابل با نیروی پس کشیدگی کابل، شاخص گسیختگی به نسبت مدل‌هایی که نیروی پس کشیدگی کم‌تری دارند افزایش می‌یابند.

طبق نتایج جدول (۵) شاخص گسیختگی برای مدل‌های SA-4، SA-5 و SA-6 که تنش تسلیم به‌صورت کاهشی بوده است به دلیل تسلیم زود هنگام نبشی، افزایش می‌یابد. همین‌طور برای مدل‌های SB-4، SB-5 و SB-6 که نیروی پس کشیدگی روند کاهش دارد، باعث افزایش شاخص گسیختگی می‌شود. با کاهش سطح مقطع کابل در مدل‌های SC-4، SC-5 و SC-6 توزیع کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد و به دلیل ضعیف شدن سطح مقطع کابل اتصال تمایل به گسیختگی دارد، به همین دلیل کاهش سطح مقطع منجر به افزایش شاخص گسیختگی می‌شود.

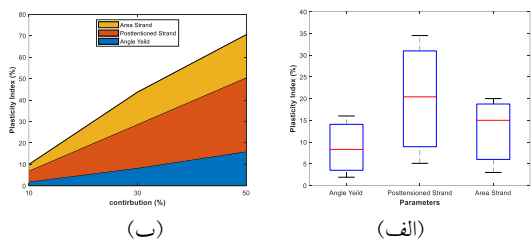
همان‌طور که از نتایج جدول (۴) مشخص است با کاهش تعداد کابل در اتصال مرکزگرا شاخص پلاستیسیته و شاخص

۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب شاخص پلاستیسیته ۱/۲، ۷ و ۱۲/۵ درصد کاهش می یابد. با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی به ترتیب ۳/۲، ۱۱/۵ و ۲۳ درصد کاهش داشته است و همین طور با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۱/۲، ۹ و ۱۷/۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به شکل های (۲۵-الف) و (۲۵-ب) افزایش نیروی پس کشیدگی کابل سهم قابل توجهی در کاهش و پراکندگی شاخص پلاستیسیته دارد. افزایش سطح مقطع کابل تأثیر متوسط و همچنین تنش تسلیم نبشی تأثیر کم تر بر روی شاخص پلاستیسیته دارد.

شکل (۲۶-الف) میزان تغییرات شاخص پلاستیسیته برای کاهش سه پارامتر را نشان می دهد. شاخص پلاستیسیته با کاهش تنش تسلیم نبشی به میزان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب ۱/۹، ۹/۵ و ۱۶ درصد کاهش می یابد. با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی به ترتیب ۵/۱، ۲۰/۳ و ۳۴/۵ درصد کاهش داشته است و همین طور با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۳، ۱۳/۳ و ۲۰ درصد کاهش یافته است با توجه به شکل های (۲۶-الف) و (۲۶-ب) کاهش نیروی پس کشیدگی کابل سهم قابل توجهی در افزایش و پراکندگی شاخص پلاستیسیته دارد. کاهش سطح مقطع کابل و تنش تسلیم نبشی تأثیر کم تری بر روی شاخص پلاستیسیته دارند.



شکل ۲۵- میزان تغییرات شاخص پلاستیسیته با افزایش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل



شکل ۲۶- میزان تغییرات شاخص پلاستیسیته با کاهش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل

طبق شکل (۲۷-الف) شاخص گسیختگی با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد تنش تسلیم نبشی به ترتیب ۳/۰۳، ۱۳/۶ و ۳۱ درصد کاهش می یابد. با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی

گسیختگی افزایش می یابد. با کاهش تعداد کابل شاخص گسیختگی به نسبت مدل هایی که نیروی پس کشیدگی کم تری دارند افزایش می یابد.

جدول ۴- شاخص گسیختگی و شاخص پلاستیسیته نمونه ها با افزایش تنش تسلیم کابل، نیروی پس کشیدگی کابل، سطح مقطع و تعداد کابل

مدل	Rupture index	Plasticity index
SA-1	۰/۶۴	۱۵۵
SA-2	۰/۵۷	۱۴۶
SA-3	۰/۴۵	۱۳۲
SB-1	۰/۶۳	۱۵۲
SB-2	۰/۵۳	۱۳۹
SB-3	۰/۴	۱۲۱
SC-1	۰/۶۲	۱۵۵
SC-2	۰/۵۱	۱۴۳
SC-3	۰/۳۶	۱۳۰
SP-P1	۰/۸۸	۱۷۹
SP-P2	۰/۵۳	۱۳۹
SP-P3	۱/۴	۱۸۵
SP-P4	۱/۶۶	۲۰۸
SP-P5	۰/۴	۱۲۱
SP-P6	۱/۲	۱۷۷

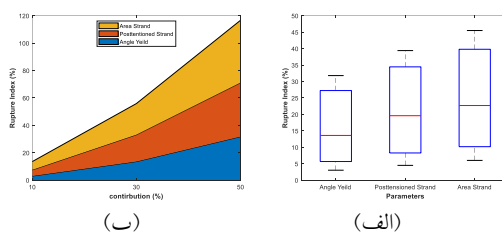
جدول ۵- شاخص گسیختگی و شاخص پلاستیسیته نمونه ها با کاهش تنش تسلیم کابل، نیروی پس کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل

مدل	Rupture index	Plasticity index
SA-4	۰/۶۹	۱۶۰
SA-5	۰/۷۷	۱۶۷
SA-6	۰/۸۸	۱۷۹
SB-4	۰/۷۲	۱۶۵
SB-5	۰/۹۱	۱۸۹
SB-6	۱/۱۴	۲۱۱
SC-4	۰/۶۹	۱۶۸
SC-5	۰/۸	۱۷۸
SC-6	۰/۹۹	۱۸۸

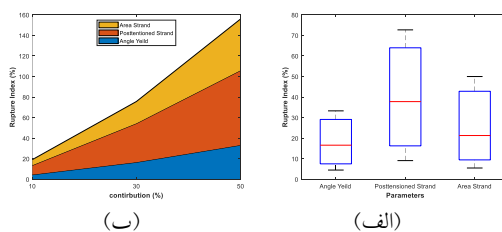
شکل (۲۷-الف) میزان تغییرات شاخص پلاستیسیته برای افزایش سه پارامتر را نشان می دهد. همان طور که در بخش های قبلی توضیح داده شد با افزایش تنش تسلیم نبشی به میزان ۱۰،

پس کشیدگی کابل شاخص گسیختگی به ترتیب ۱۹/۶، ۴/۵ و ۳۹/۴ درصد کاهش داشته است و همین طور با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۶،۰۱، ۲۲/۷ و ۴۵/۵ درصد کاهش یافته است که بیشترین تأثیر و پراکندگی را بر روی شاخص گسیختگی دارد. با توجه به نمودار (۲۷-ب) افزایش سطح مقطع کابل تأثیر زیادی بر کاهش شاخص گسیختگی دارد. افزایش نیروی پس کشیدگی کابل تأثیر متوسط و همچنین افزایش تنش تسلیم کمترین تأثیر را بر روی کاهش شاخص گسیختگی دارند.

شکل (۲۸-الف) میزان تغییرات شاخص گسیختگی برای کاهش سه پارامتر را نشان می‌دهد. شاخص گسیختگی با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد تنش تسلیم نبشی به ترتیب ۱۶/۵، ۳۳/۳ و ۷۲/۷ درصد افزایش می‌یابد. کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس کشیدگی کابل شاخص گسیختگی را به ترتیب ۳۷/۸، ۳۷/۸ و ۷۲/۷ درصد افزایش می‌دهد که بیشترین پراکندگی را بر روی شاخص گسیختگی دارد و همین طور با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل به ترتیب ۵/۵، ۲۱/۲ و ۵۰ درصد افزایش یافته است. با توجه به نمودار (۲۸-ب) می‌توان گفت کاهش نیروی پس کشیدگی تأثیر زیادی بر افزایش شاخص گسیختگی دارد. کاهش سطح مقطع کابل تأثیر متوسط و همچنین کاهش تنش تسلیم کمترین تأثیر را بر روی افزایش شاخص گسیختگی دارند.



شکل ۲۷- میزان تغییرات شاخص گسیختگی با افزایش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل



شکل ۲۸- میزان تغییرات شاخص گسیختگی با کاهش سطح مقطع کابل، تنش تسلیم نبشی و نیروی پس کشیدگی کابل

## ۹- نتیجه گیری

این مقاله تأثیر چهار پارامتر را در پاسخ چرخه‌ای اتصال پس کشیده فولادی ارزیابی کرد. این مطالعه بر اساس شبیه‌سازی اجزای محدود

سه بعدی انجام شد. استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و به‌طور خاص تحلیل صریح، روشی بهینه را برای بررسی اتصالات مرکزگرا که دارای ابعاد بزرگ، جزئیات زیاد، سطوح تماسی بسیار و عوامل ناپوستگی چون کمانش و گسیختگی هستند، فراهم می‌کند. تحلیل اجزای محدود به خوبی قادر است رفتار اتصالات دارای نبشی بالا و پایین را تحت بارگذاری چرخه‌ای پیش‌بینی نماید و فرضیات به‌کاررفته در مدل‌سازی این اتصالات قابل‌اعمال در شبیه‌سازی اتصالات مرکزگرا است. ابتدا صحت‌سنجی مدل‌ها ارائه شد. با توجه به صحت‌سنجی صورت‌گرفته، مشخص شد که مدل‌سازی اتصال پس کشیده با استفاده از روش عددی، رفتار چرخه‌ای این اتصال را به خوبی نشان می‌دهد. با استفاده از روش تحلیل حساسیت پارامتریک، یک مطالعه حساسیت انجام شد. متغیرهای در نظر گرفته شده در پژوهش شامل پارامترهای مربوط به مصالح و هندسه است. نتایج اهمیت هر پارامتر را بر ویژگی‌های پاسخ اتصال پس کشیده تعیین نمود. این متغیرهای پاسخ شامل سختی اولیه اتصال، ظرفیت اتلاف انرژی، ظرفیت خمشی اتصال و بررسی شاخص گسیختگی و شاخص پلاستیسته می‌شود. در این مقاله برای انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اتصال مرکزگرا سه پارامتر تنش تسلیم نبشی، نیروی پس کشیدگی کابل، سطح مقطع و تعداد کابل بدین منظور انتخاب شدند و در نهایت کم‌اهمیت‌ترین و با اهمیت‌ترین پارامتر انتخاب شد. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی اتصال مرکزگرای فولادی با نبشی نشیمن و بالایی، برخی از نتایج حاصل به‌طور خلاصه ارائه می‌گردد:

۱- با انجام تحلیل پارامتریک بر روی اتصال مرکزگرا با تغییرات تنش تسلیم نبشی، مشاهده شد که با افزایش تنش تسلیم نبشی میزان حداکثر بازشدگی اتصال و حداکثر نیروی ایجاد شده در کابل تغییری نمی‌کند. با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد تنش تسلیم نبشی به ترتیب ظرفیت اتلاف انرژی ۰/۸، ۷/۸ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد و ظرفیت خمشی اتصال نیز به اندازه ۱، ۳/۱ و ۱۰/۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد تنش تسلیم نبشی، بر روی سختی اتصال تأثیری ندارد و ظرفیت اتلاف انرژی اتصال را به ترتیب ۰/۸۳، ۴/۶ و ۹/۳ درصد افزایش و ظرفیت خمشی اتصال را ۱/۰۲، ۷/۱۴ و ۱۸/۳۶ درصد کاهش می‌دهد.

۲- با انجام تحلیل پارامتریک بر روی اتصال مرکزگرا با تغییرات نیروی پس کشیدگی کابل، مشاهده شد که با افزایش نیروی پس کشیدگی به میزان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد، به ترتیب سختی به میزان ۲/۸، ۲/۴ و ۲۶/۶ درصد افزایش و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی به میزان ۱/۲۶، ۳/۸۹ و ۸/۷۶ کاهش می‌یابد و افزایش ظرفیت خمشی اتصال با افزایش پس کشیدگی موجب

کمانش موضعی بال تیر و در نهایت موجب جابه‌جایی پسماند در اتصال می‌شود. با کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل، به ترتیب سختی اتصال ۲/۲، ۱۵/۵ و ۳۰/۲ کاهش و ظرفیت اتلاف انرژی ۰/۷، ۴/۴ و ۱۰/۷۲ درصد افزایش می‌یابد. همین‌طور ظرفیت خمشی اتصال ۲/۰۲، ۱۰/۱۱ و ۲۱/۲۳ درصد کاهش می‌دهد.

۳- با انجام تحلیل پارامتریک بر روی اتصال مرکزگرا با تغییرات سطح مقطع کابل، مشاهده شد که با افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سطح مقطع کابل نسبت به مقدار اولیه، سختی به ترتیب ۴/۵، ۱۶/۵۶ و ۳۳/۳ درصد افزایش و ظرفیت اتلاف انرژی ۱/۹، ۸/۹ و ۱۵/۶ درصد کاهش می‌یابد. همین‌طور ظرفیت خمشی اتصال به ترتیب ۳/۸، ۱۳/۳ و ۲۱/۴ درصد افزایش پیدا می‌کند. با کاهش سطح مقطع کابل به میزان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد، به ترتیب سختی اولیه ۳/۸، ۲۰/۱ و ۳۴/۱ درصد کاهش و ظرفیت اتلاف انرژی ۱/۸، ۷/۲ و ۱۷/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین ظرفیت خمشی اتصال به ترتیب ۱/۱، ۹/۲ و ۲۹/۶ کاهش می‌یابد.

۴- تغییرات شاخص پلاستیسیته برای افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سه پارامتر نشان می‌دهد با افزایش تنش تسلیم نبشی میزان شاخص پلاستیسیته از ۱/۲ تا ۱۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش نیروی پس‌کشیدگی کابل بین ۳/۲ تا ۲۳ درصد کاهش داشته است و همین‌طور با افزایش سطح مقطع کابل از ۱/۲ تا ۱۷/۵ درصد کاهش یافته است. میزان تغییرات شاخص پلاستیسیته برای کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سه پارامتر نشان می‌دهد که با کاهش تنش تسلیم میزان شاخص پلاستیسیته از ۱/۹ تا ۱۶ افزایش و با کاهش نیروی پس‌کشیدگی کابل و سطح مقطع کابل به ترتیب ۵/۱ تا ۳۴/۵ درصد و ۳ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

۶- میزان تغییرات شاخص گسیختگی برای افزایش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سه پارامتر متغیر بدین صورت است که با افزایش تنش تسلیم نبشی میزان شاخص گسیختگی از ۳/۰۳ تا ۳۱ درصد کاهش می‌یابد و نیروی پس‌کشیدگی کابل بین ۴/۵ تا ۳۹/۴ درصد کاهش داشته است و همین‌طور با افزایش سطح مقطع کابل از ۶/۰۱ تا ۴۵/۵ درصد کاهش یافته است. همچنین تغییرات شاخص گسیختگی برای کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد سه پارامتر با توجه به نتایج، با کاهش تنش تسلیم میزان شاخص گسیختگی از ۱/۹ تا ۱۶، به ترتیب با کاهش نیروی پس‌کشیدگی و سطح مقطع کابل ۹/۱ تا ۷۲ درصد و ۵/۵ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

۷- برای کاهش آسیب در تیر در اثر افزایش ۳۰ و ۵۰ درصد نیروی پس‌کشیدگی کابل و حذف جابه‌جایی باقی‌مانده اتصال تعداد کابل‌ها را از ۱۲ به ۸ و ۶ تغییر داده نتایج حاصل ابتدا برای

نیروی پس‌کشیدگی ثابت ۳۰ درصد با تغییر تعداد کابل و سپس برای نیروی پس‌کشیدگی ثابت ۵۰ درصد با تغییر تعداد کابل نتایج ارائه شد. طبق نتایج به دست آمده با ۳۰ و ۵۰ درصد افزایش نیروی پس‌کشیدگی با تعداد کابل ۸ ظرفیت اتلاف انرژی و مرکزگرایی مناسب را نشان داد.

## ۱۰- پیشنهاد برای مطالعات آتی

۱- رفتار بلندمدت و شرایط محیطی: بررسی تأثیرات نظیر خوردگی، خستگی مصالح و تغییر شکل مشخصات مکانیکی در طول زمان به‌ویژه در کابل‌ها برای درک بهتر عملکرد واقعی سازه در شرایط بهره‌برداری بلندمدت ضروری است.

۲- بهینه‌سازی با رویکرد چند هدفه: استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی و فراابتکاری جهت دستیابی به تعادل میان پارامترهایی مانند سختی، شکل پذیری، اتلاف انرژی و خاصیت مرکزگرایی، از مسیرهای مهم آینده است.

۳- تحلیل هزینه- فایده در طول عمر سازه: افزودن معیارهای اقتصادی شامل هزینه ساخت، تعمیر و نگهداری، قابلیت استفاده مجدد و کاهش خسارات بعد از زلزله، می‌تواند مزیت‌های اقتصادی این سیستم را نسبت به سیستم‌های سنتی آشکار سازد.

- economic loss assessment", *Journal of Constructional Steel Research*, 150, pp.129-140.
- [14] Huang, Y.Z., and Wang, J. (2024), "Self-centering steel beam-to-column connections with novel superelastic SMA angles", *Journal of Constructional Steel Research*, 214, p.108458.
- [15] Xiong, M., Hu, S., Li, X., Lin, X., and Xiong, J. (2024), "Lateral Load Behavior Analysis of a Novel Self-Centering Y-Eccentrically Braced Frames with Slip Connection Shear Link", *International Journal of Steel Structures*, 24(4), pp.777-788.
- [16] Shiravand, M.R., and Torabipour, A. (2020), "Seismic behavior of self-centering steel connections with friction T-stub", *Journal of Constructional Steel Research*, 174, p.106309.
- [17] Alqarni, A.S., Alshannag, M.J., and Higazey, M.M. (2024), "A Novel Technique for Improving Cyclic Behavior of Steel Connections Equipped with Smart Memory Alloys", *Materials*, 17(13), p.3226.
- [18] Esposto, M. (2008), "PTED beam-to-column connections for steel moment resisting frames: structural identification based on numerical analyses", Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Naples, Italy.
- [19] Al Kajbaf, A., Fanaie, N., and Najarkolaie, K.F. (2018), "Numerical simulation of failure in steel posttensioned connections under cyclic loading", *Engineering Failure Analysis*, 91, pp.35-57.
- [20] Hibbit, H., Karlsson, B., and Sorensen, E. (2012), "ABAQUS user manual, version 6.12", Simulia.
- [21] ANSI/AISC 360-16, (2016), Specification for Structural Steel Buildings. American institute of steel construction: Chicago.
- [22] Arlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2003), "Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections", *Journal of Structural Engineering*, 12, 129, pp.1615-1625.
- [23] Garlock, M.E.M. (2003), "Design, analysis, and experimental behavior of seismic resistant post-tensioned steel moment resisting frames", Lehigh University.
- [24] Shiravand, M., and Mahboubi, S. (2016), "Behavior of post-tensioned connections with stiffened angles under cyclic loading", *Journal of Constructional Steel Research*, 116, pp.183-192.
- [25] Moradi, S., and Alam, M.S. (2017), "Lateral load-drift response and limit states of posttensioned steel beam-column connections: Parametric study", *Journal of Structural Engineering*, 7, 143, p. 04017044.
- [26] Kala, Z. (2009), "Sensitivity assessment of steel members under compression", *Engineering Structures*, 6, 31, pp.1344-1348.
- [27] Ditlevsen, O., and Madsen, H.O. (1996), "Structural reliability methods", Wiley, New York, Vol. 178.
- [28] Verma, A.K. (2016), "Structural reliability," *Reliability and Safety Engineering*, pp. 257-292.
- [1] Fang, C., Yam, M.C., Chan, T.M., Wang, W., Yang, X., and Lin, X. (2018), "A study of hybrid self-centering connections equipped with shape memory alloy washers and bolts", *Engineering Structures*, 164, pp.155-168.
- [2] Ricles, J.M., Sause, R., Peng, S.W., and Lu, L.W. (2002), "Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections", *Journal of Structural Engineering*, 128(7), pp.850-859.
- [3] Asadolahi, S.M., and Fanaie, N. (2020) "Performance of self-centering steel moment frame considering stress relaxation in prestressed cables", *Advances in Structural Engineering*, 23(9), pp.1813-1822.
- [4] Priestley, M.N., and MacRae, G.A. (1996), "Seismic tests of precast beam-to-column joint subassemblages with unbonded tendons", *PCI Journal*, 41(1), pp.64-81.
- [5] Ricles, J.M., Sause, R., Garlock, M.M., and Zhao, C. (2001), "Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 127(2), pp.113-121.
- [6] Garlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2018), "Experimental studies on full-scale post-tensioned seismic-resistant steel moment connections", In *STESSA 2003-Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, pp.299-305.
- [7] Garlock, M., Li, J., and Blaisdell, M.L. (2006), "Collector beam interaction with steel self-centering moment frames", In *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Engineering*. Taipei, Taiwan.
- [8] Garlock, M.M., Sause, R., and Ricles, J.M. (2007), "Behavior and design of posttensioned steel frame systems", *Journal of Structural Engineering*, 133(3), pp.389-399.
- [9] Chou, C.C., Chen, J.H., Chen, Y.C., and Tsai, K.C. (2006), "Evaluating performance of post-tensioned steel connections with strands and reduced flange plates", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(9), pp.1167-1185.
- [10] Chou, C.C., and Lai, Y.J. (2009), "Post-tensioned self-centering moment connections with beam bottom flange energy dissipators", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), pp.1931-1941.
- [11] Algobahi, R.M., Fahmy, M.F., and Abdo, M.A.B. (2021), "Innovative energy-dissipation system for self-centering posttensioned steel moment-resisting frames", *Engineering Structures*, 254, p.113835.
- [12] Shiravand, M., and Torabipour, A. (2017), "Post-Tensioned Steel Connections Self-Centering Behavior Using the Finite Element Method", *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 7(1), pp.15-22.
- [13] Guan, X., Burton, H., and Moradi, S. (2018), "Seismic performance of a self-centering steel moment frame building: From component-level modeling to

- [29] Kowronek, M. (2010), "Probabilistic sensitivity of the limit states of structures using Monte Carlo simulation", *Meccanica*, 6, 45, pp.785-796.
- [30] Kala, Z., and Puklický, L. (2009), "Variance-based methods for sensitivity analysis in civil engineering", in *Computational Structural Engineering: Proceedings of the International Symposium on Computational Structural Engineering*, held in Shanghai, Springer, pp.120-130.

