



http://journaliss.ir

## بررسی پارامتریک رفتار چرخه‌ای اتصال تیر به ستون با میراگرهای فلز-الاستومر

کمال غنی‌زاده<sup>۱</sup>، وحید اکرمی<sup>۲\*</sup>، شیرین اسماعیلی<sup>۲</sup>، ناصرالدین شاهبازی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

\*ardabil، صندوق پستی ۵۶۱۱۹-۱۱۳۶۷، v.akrami@uma.ac.ir

### چکیده

یکی از گزینه‌های مطرح برای افزایش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی سازه‌ها، استفاده از میراگرهای فلز-الاستومر در اتصالات خمشی می‌باشد. در مقاله حاضر، میراگر جدیدی از نوع فلز-الاستومر معرفی شده و به روش عددی به مطالعه رفتار لرزه‌ای آن تحت بار چرخه‌ای پرداخته شده است. میراگر بررسی شده در این تحقیق شامل یک لایه الاستومر برای کنترل ارتعاشات در سطح پایین و تعدادی پیچ تسلیمی برای اتلاف انرژی در زمین‌لرزه‌های قوی می‌باشد. در پیکربندی جدید، علاوه بر تعبیه میراگر در پایین تیر که در مطالعات قبلی بررسی شده است، افزودن میراگر در بالای تیر نیز مدنظر قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف میراگر نظیر تعداد، قطر و ارتفاع پیچ‌های تسلیمی و همچنین ضخامت لایه الاستومر بر رفتار اتصال دارای میراگر بررسی و با رفتار اتصال فاقد میراگر مقایسه شده است. مدل‌سازی نمونه‌های عددی در نرم‌افزار آباکوس انجام و با استفاده از نتایج تحقیقات قبلی، صحت‌سنجی شده است. بر اساس نتایج، سختی و مقاومت نمونه‌های دارای میراگر با تعداد پیچ تسلیمی کم در مقایسه با اتصال فاقد میراگر، بسیار پایین بوده و غیرقابل قبول می‌باشد (سختی در حدود ۲۵٪ و مقاومت در حدود ۴۰٪). این درحالی است که با افزایش تعداد و قطر پیچ‌های تسلیمی، سختی و مقاومت اتصال دارای میراگر بهبود یافته و به مقدار متناظر اتصال فاقد میراگر می‌رسد. در عین حال، بیشینه کرنش‌های پلاستیک در اجزای اتصال تا بیش از ۵۰٪ کاهش یافته و رفتار اتصال بهبود می‌یابد. گفتنی است سطح کرنش‌های پلاستیک در پیچ‌های تسلیمی نمونه‌های دارای دو میراگر کم‌تر از نمونه دارای یک میراگر است.

### واژگان کلیدی

اتصال تیر به ستون، میراگر فلز-الاستومر، عضو تسلیم‌شونده، مدل‌سازی عناصر محدود، رفتار چرخه‌ای

## A Parametric study on the Cyclic Behavior of Beam-to-Column Connections with Metal-Elastomer Dampers

K. Ghanizadeh, V. Akrami, Sh. Esmaili, N. Shahbazi

### Abstract

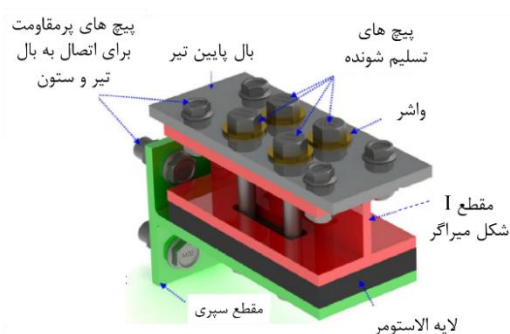
One of the methods to increase the ductility and energy dissipation of structures is the use of metal-elastomer dampers in the moment connections. In this paper, a new metal-elastomer damper is introduced and its seismic behavior under cyclic load is evaluate numerically. The damper studied in this research includes an elastomer layer to control slight vibrations and a number of yielding bolts to dissipate energy in strong earthquakes. In the new configuration, placing two dampers at the top and bottom of the beam is considered as an alternative to the formerly studied connections with one damper at the bottom of the beam. The effect of different parameters such as the number, diameter and height of the yielding bolts as well as the thickness of the elastomer layer has been studied and compared to the connection without damper. Numerical models are created in Abaqus software and validated using results from previous studies. Based on the results, the stiffness and strength of the connections with dampers having few yielding bolts is very small compared to the rigid connection (stiffness about 25% and strength about 40%). As the number and diameter of the bolts increase, stiffness and strength of the connection increase reaching the corresponding values for the original connection. However, the maximum plastic strain in connection decreases by more than 50% which is a sign of improved behaviour. It is worthy to note that plastic stains in bolts of connections with two dampers are less than that of connections with one damper.

### Keywords

Beam-Column Connection, Metal-Elastomer Damper, Yielding Member, Finite Element Modeling, Cyclic Behavior



زمین‌لرزه‌های پیشین و اثرات مخرب آن‌ها بر روی سازه‌ها، مهندسين را به سمت استفاده از اجزای سازه‌ای نوین در صنعت ساخت‌وساز سوق داده است. استفاده از سازه‌های با شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی بالا در مقابله با اثرات زمین‌لرزه‌های قوی بسیار مهم است. یکی از ابزارهایی که به تازگی برای افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سازه پیشنهاد شده است، میراگرهای فلز-الاستومر می‌باشد که می‌تواند در محل‌های مختلف یک سازه از جمله اتصالات تیر به ستون مورد استفاده قرار گیرد. الاستومرها دسته بسیار بزرگی از مواد هستند که در گروه پلیمرها قرار می‌گیرند. ویژگی بسیار بارز این مواد قابلیت ارتجاعی آن‌ها است. منحنی تنش-کرنش الاستومرها در حالت رفت و برگشت نیرو دارای اختلاف اندکی می‌باشد که این به معنای اتلاف انرژی این مصالح طی چرخه‌های بارگذاری است. در این تحقیق از میراگر پیشنهادی بنی‌شیخ‌الاسلامی و همکاران استفاده شده است [۱]. مطابق شکل (۱)، این میراگر شامل ترکیبی از مواد الاستومر و پیچ‌های تسلیمی برای اتلاف انرژی لرزه‌ای می‌باشد.



شکل ۱- میراگر پیشنهادی بنی‌شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱]

در زلزله‌های کوچک، پیچ‌های تسلیمی و لایه‌ی الاستومر هم‌زمان وظیفه‌ی تأمین سختی را به عهده دارند؛ این درحالی است که تأمین میرایی در زلزله‌های با شدت کم، تنها بر عهده‌ی لایه‌ی

الاستومر می‌باشد. در زمین‌لرزه‌های بزرگ، میرایی سیستم توسط رفتار هیسترتیک پیچ‌های تسلیمی تأمین می‌شود.

به طور کلی، میراگرهای مرکب فلز-الاستومر مبتنی بر یکی از رفتارهای محوری، برشی و یا دورانی هستند. بسته به نوع رفتار میراگر، می‌توان از آن‌ها در مهاربند، در وسط تیر و یا در محل اتصال تیر به ستون استفاده نمود. اولین نوع از میراگرهای فلز-الاستومر، میراگرهای نصب‌شونده در مهاربند هستند. میراگرهای با عملکرد محوری عمدتاً با هدف میراسازی ارتعاشات در طول مهاربند سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی از این میراگرها توسط شو<sup>۱</sup> [۲]، شو و همکاران [۳] و جی<sup>۲</sup> و همکاران [۴] به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. درحالی‌که در میراگرهای برشی از جابه‌جایی نسبی بین دو طبقه برای ایجاد تغییرشکل‌های برشی در مواد الاستومر استفاده می‌شود. ژو<sup>۳</sup> و همکاران [۵]، چن<sup>۴</sup> و همکاران [۶]، اسکندری‌نصب و همکاران [۷] و مهرابی و همکاران [۸] نمونه‌هایی از این نوع میراگرها را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

نوع بعدی از میراگرهای الاستومری، میراگرهای نصب‌شونده در وسط تیر می‌باشند. این نوع میراگرها عمدتاً مبتنی بر عملکرد برشی بوده و برای اتلاف انرژی در محل اتصال دو بخش سازه به هم به کار می‌روند (به‌عنوان مثال در تیرهای پیوند). نمونه‌هایی از این میراگرها را در تحقیقات مونتگومری<sup>۵</sup> و کریستوپولوس<sup>۶</sup> [۹]، وانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰] و جیانگ<sup>۸</sup> و همکاران [۱۱] می‌توان مشاهده نمود. آخرین نوع از میراگرهای الاستومری، میراگرهای نصب‌شونده در اتصال خمشی تیر به ستون هستند. این میراگرها معمولاً مبتنی بر یکی از عملکردهای دورانی و یا برشی می‌باشند. دو نمونه از میراگرهای مبتنی بر عملکرد دورانی در مطالعات شو<sup>۹</sup> و همکاران [۱۲] و همچنین ژانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۳] معرفی و مورد بررسی قرار گرفته است. میراگرهای مرکب فلز-الاستومر که دارای عملکرد برشی می‌باشند، معمولاً در محل اتصال تیر به ستون و در پایین یا بالای تیر نصب می‌شوند تا از نیروی کششی و فشاری بال‌های تیر برای ایجاد تغییرشکل برشی در الاستومرها

<sup>1</sup> Xu

<sup>2</sup> Ge

<sup>3</sup> Zhou

<sup>4</sup> Chen

<sup>5</sup> Montgomery

<sup>6</sup> Christopoulos

<sup>7</sup> Wang

<sup>8</sup> Jiang

<sup>9</sup> Shu

<sup>10</sup> Zhang

نتایج این نمونه‌ها برای بررسی تأثیر تعداد میراگر مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

- مدل‌های ۲ تا ۴ در گروه نخست و نمونه‌های ۱۶ تا ۱۸ در گروه دوم به ترتیب دارای ۲، ۳ و ۴ پیچ تسلیمی در هر ردیف هستند، که مقایسه نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تأثیر تعداد پیچ‌ها بر رفتار اتصال می‌باشد.
- بررسی تأثیر قطر پیچ‌های تسلیمی از طریق مقایسه نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های ۴، ۷ و ۸ در گروه نخست و ۱۸، ۲۱ و ۲۲ در گروه دوم انجام می‌شود. در این نمونه‌ها قطر ناحیه تسلیمی پیچ به ترتیب ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ میلی‌متر است.
- همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ارتفاع مقطع اشکل مورد استفاده در ساخت میراگر برای نمونه مرجع برابر با ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این ارتفاع کنترل‌کننده ارتفاع پیچ‌های تسلیمی میراگر و ظرفیت خمشی آن‌ها خواهد بود. برای بررسی تأثیر ارتفاع یادشده، نتایج تحلیل‌ها بر روی نمونه‌های ۸ تا ۱۱ در گروه نخست و ۲۲ تا ۲۵ در گروه دوم با هم مقایسه خواهد شد. ارتفاع مقطع اشکل در این نمونه‌ها به ترتیب ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ میلی‌متر است.
- در ادامه، بررسی تأثیر ضخامت لایه الاستومری از طریق مقایسه نتایج نمونه‌های ۴ تا ۶ در گروه نخست و ۱۸ تا ۲۰ در گروه دوم صورت خواهد گرفت، که در آن‌ها ضخامت الاستومر به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر است.

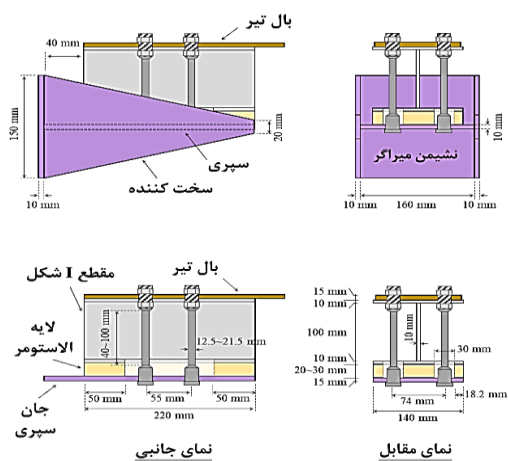
استفاده نمایند. نمونه‌ای از این میراگرها که در شکل (۱) نیز مشاهده می‌شود، توسط بنی‌شیخ‌الاسلامی و همکاران پیشنهاد شده است [۱]. رفتار این نوع میراگرها در چندین مطالعه به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است [۱۴-۱۶]. هرچند مطالعات انجام‌شده، حاکی از امکان استفاده از میراگر مذکور برای بهبود رفتار اتصالات خمشی تیر به ستون می‌باشد، اما انجام مطالعات تکمیلی برای شناخت بهتر رفتار و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار این میراگرها ضروری است. در همین راستا، مقاله حاضر به بررسی رفتار چرخه‌ای اتصالات خمشی دارای میراگر فلز-الاستومر با استفاده از تحلیل عناصر محدود می‌پردازد. بدین منظور، علاوه بر اتصال دارای میراگر تکی در زیر تیر که در مطالعات قبلی بررسی شده است، افزودن میراگر در بالا و پایین تیر به صورت هم‌زمان نیز مدنظر قرار گرفته است. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف میراگر نظیر تعداد، قطر و ارتفاع پیچ‌های تسلیمی و همچنین ضخامت لایه الاستومر بر رفتار اتصال دارای میراگر تکی و دوبل بررسی و با رفتار اتصال فاقد میراگر مقایسه شده است. از مزایای میراگر مورد بررسی می‌توان به رفتار دوسطوحی آن تحت سطوح مختلف ارتعاش، سهولت نصب و امکان جایگزینی آن به منظور بهسازی پس از بروز زلزله‌های شدید اشاره نمود. جزئیات مدل‌سازی، صحت‌سنجی و نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها در بخش‌های بعد ارائه شده است.

## ۲- جزئیات مدل‌سازی عناصر محدود

### ۱-۲- هندسه میراگر مورد بررسی

چنانچه گفته شد، مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق برگرفته از میراگرهای پیشنهادی بنی‌شیخ‌الاسلامی و همکاران می‌باشد [۱]. پیکربندی کلی میراگر مذکور و ابعاد اجزای مختلف آن در شکل (۲) نمایش داده شده است. این میراگر که در تحقیقات سلطان‌آبادی و همکاران [۱۴] در زیر بال پایین تیر قرار گرفته است، از یک صفحه نشیمن T شکل، یک لایه الاستومر، یک قطعه اشکل و تعدادی پیچ تسلیمی تشکیل می‌شود. مشخصات ابعادی مدل‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در جدول (۱) خلاصه شده است. مطابق این جدول، نمونه‌های مورد بررسی را به دسته‌های زیر می‌توان تفکیک نمود:

- نمونه شماره ۱ اتصال خمشی فاقد میراگر بوده، نمونه‌های ۲ الی ۱۵، دارای یک میراگر در پایین تیر و نمونه‌های ۱۶ الی ۲۹، دارای دو میراگر در بالا و پایین تیر هستند. مقایسه



شکل ۲- مشخصات هندسی میراگر مورد بررسی (واحد mm)

جدول ۱- مشخصات ابعادی مدل های مورد بررسی (واحد mm)

شماره نمونه	تعداد میراگر	پیکربندی میراگر	تعداد پیچ در ردیف	قطر پیچ	ارتفاع میراگر	ضخامت الاستومر
#۱	-	-	-	-	-	-
#۲	۱	۱	۲	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۳	۱	۱	۳	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۴	۱	۱	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۵	۱	۱	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۲۵
#۶	۱	۱	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۳۰
#۷	۱	۱	۴	۱۵/۵	۱۰۰	۲۰
#۸	۱	۱	۴	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۹	۱	۱	۴	۱۸/۵	۸۰	۲۰
#۱۰	۱	۱	۴	۱۸/۵	۶۰	۲۰
#۱۱	۱	۱	۴	۱۸/۵	۴۰	۲۰
#۱۲	۲	۱	۶	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۳	۲	۱	۶	۲۱/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۴	۲	۱	۸	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۵	۲	۱	۸	۲۱/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۶	۲	۲	۲	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۷	۲	۲	۳	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۸	۲	۲	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۲۰
#۱۹	۲	۲	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۲۵
#۲۰	۲	۲	۴	۱۲/۵	۱۰۰	۳۰
#۲۱	۲	۲	۴	۱۵/۵	۱۰۰	۲۰
#۲۲	۲	۲	۴	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۲۳	۲	۲	۴	۱۸/۵	۸۰	۲۰
#۲۴	۲	۲	۴	۱۸/۵	۶۰	۲۰
#۲۵	۲	۲	۴	۱۸/۵	۴۰	۲۰
#۲۶	۲	۲	۶	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۲۷	۲	۲	۶	۲۱/۵	۱۰۰	۲۰
#۲۸	۲	۲	۸	۱۸/۵	۱۰۰	۲۰
#۲۹	۲	۲	۸	۲۱/۵	۱۰۰	۲۰

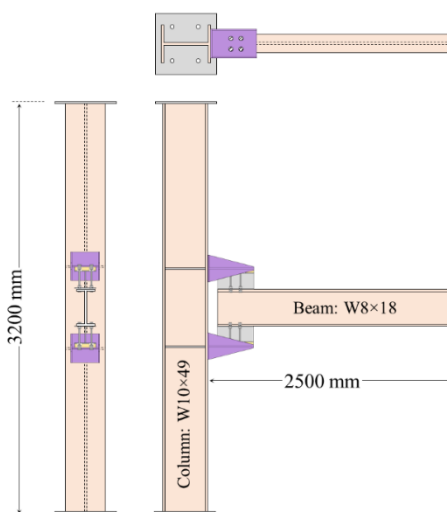
آن طول ورق میراگر ۳۷۰ میلی متر است. سایر مشخصات این پیکربندی، مطابق شکل (۲) و جدول (۱) می باشد.

مطابق شکل (۲)، طول ورق نشیمن مورد استفاده در ساخت میراگر برای نمونه مرجع برابر با ۲۲۰ میلی متر می باشد. در این حالت با توجه به فاصله مورد نیاز بین پیچ های تسلیمی، امکان تعبیه حداکثر چهار پیچ تسلیمی در طول میراگر فراهم است. برای بررسی رفتار میراگر با تعداد پیچ های تسلیمی بیشتر (شش و هشت پیچ)، از میراگر با پیکربندی ۲ استفاده شده است، که در



## ۲-۲- هندسه اتصال مورد بررسی

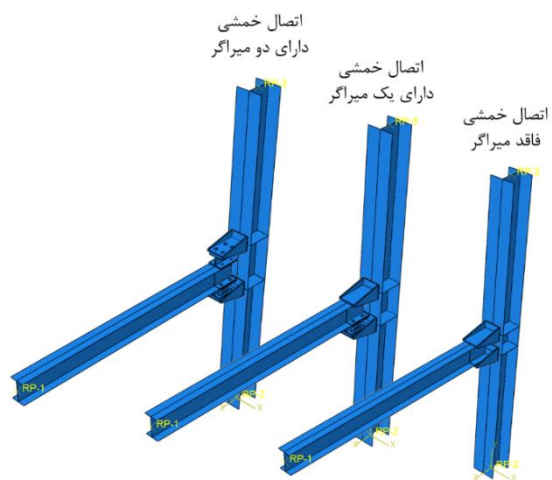
مطابق شکل (۳)، اتصال مورد بررسی در این تحقیق دارای هندسه T شکل شامل نصف طول تیر در یک دهانه و نصف ارتفاع ستون‌ها در طبقات بالا و پایین است. با توجه به این که تحت بارهای لرزه‌ای لنگر در وسط دهانه و نیمه ارتفاع طبقات برابر با صفر می‌باشد، از این پیکربندی استفاده شده است. طول تیر برابر با ۲۵۰۰ میلی‌متر (شامل میراگر و تیر متصل به آن) و ارتفاع ستون‌ها در بالا و پایین برابر با ۱۶۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. برای مقطع تیر از پروفیل W8×18 و برای مقطع ستون از پروفیل W10×49 استفاده شده است. این انتخاب به نحوی صورت گرفته است که عرض بال تیر تقریباً هم‌عرض نشیمن‌گاه آن روی میراگر (قطعه I شکل) باشد و در ضمن معیار تیر ضعیف-ستون قوی برای اتصال رعایت گردد. برای چشمه اتصال از یک ورق تقویت ۱۲ میلی‌متری استفاده شده است. ضخامت ورق‌های پیوستگی، هم‌ضخامت ورق بال تیر بوده و ضخامت سایر ورق‌های مورد استفاده در اتصال برابر با ۱۰ میلی‌متر لحاظ شده است. نمونه‌ای از اتصال فاقد میراگر به همراه اتصال‌های دارای یک و دو میراگر که در فضای نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۳- شماتیک پیکربندی اتصال دارای دو میراگر

مطابق شکل (۴) و توضیحات قبلی، اتصال در سه حالت شامل، اتصال خمشی فاقد میراگر، اتصال خمشی دارای یک میراگر در زیر تیر و اتصال خمشی دارای دو میراگر در زیر و روی تیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از تحلیل اتصال

خمشی فاقد میراگر به‌عنوان مدل مرجع و نتایج حاصل از دو نمونه دیگر برای مقایسه مورد استفاده قرار خواهند گرفت.



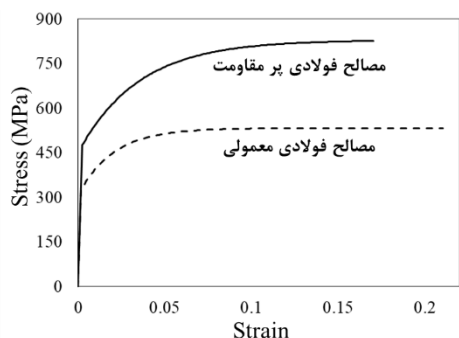
شکل ۴- پیکربندی اتصالات مورد بررسی در تحقیق حاضر

## ۲-۳- مشخصات مصالح

در تحلیل‌های این تحقیق هر دو نوع رفتار غیرخطی مصالح و هندسی در نظر گرفته شده است. برای معرفی مشخصات مکانیکی فولاد و میراگر ویسکوالاستیک از داده‌های ارائه شده توسط **سلطان‌آبادی و همکاران** استفاده شده است [۱۴]. بر همین اساس مشخصات مکانیکی دو نوع فولاد در جدول (۲) ارائه شده و نمودار تنش- کرنش واقعی مورد استفاده در نرم‌افزار برای آن‌ها در شکل (۵) ترسیم شده است. فولاد نوع اول برای استفاده در مقاطع تیر و ستون و همچنین ورق‌های اتصال است، درحالی‌که فولاد نوع دوم برای استفاده در پیچ‌های تسلیم‌شونده می‌باشد.

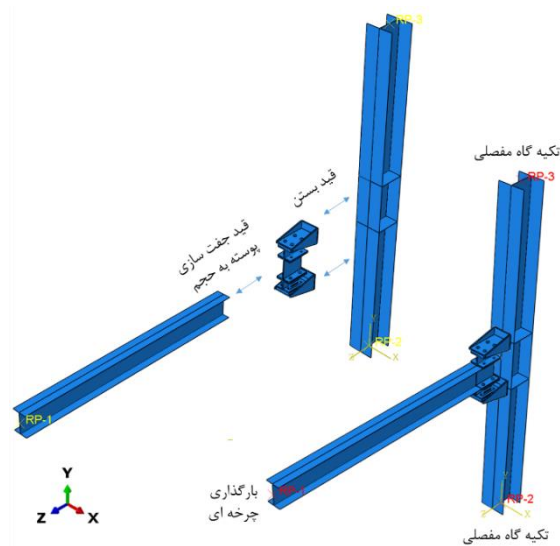
جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی [۱۴]

ردیف	مقاومت فولاد	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی کرنش نهایی (%)
۱	معمولی	۲۰۰	۳۲۵	۴۴۰
۲	پر مقاومت	۲۰۰	۴۷۵	۷۰۸



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش واقعی مصالح فولادی مورد استفاده

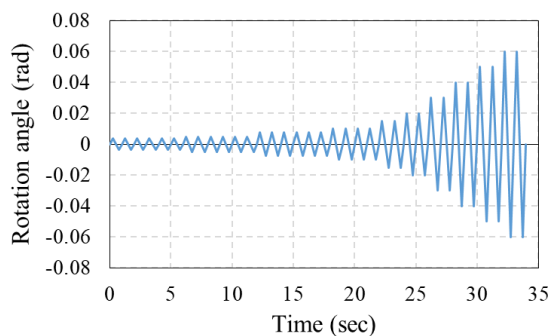
ورق‌های بال و نشیمن از طریق قید بستن<sup>۶</sup> تأمین شده است. اتصال سایر اجزای میراگر نظیر مواد الاستومر به ورق فولادی نیز از طریق قید بستن انجام شده است. همچنین، اتصال میراگر به ستون از طریق قید بستن و اتصال میراگر به تیر از طریق قید جفت‌سازی پوسته به حجم<sup>۷</sup> انجام شده است.



شکل ۷- قیدها و شرایط تکیه‌گاهی در مدل‌سازی اتصال

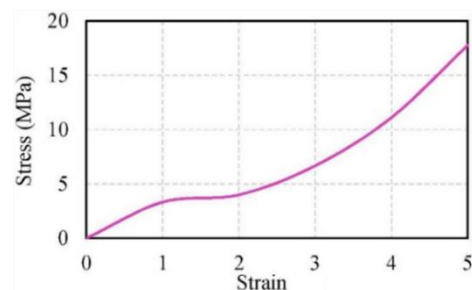
## ۲-۵- بارگذاری نمونه‌ها

مطابق شکل (۷)، بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق به صورت اعمال جابه‌جایی در نقطه انتهای تیر بوده است. تاریخچه بارگذاری اعمال شده به نمونه‌های عناصر محدود مطابق الگوی بارگذاری آیین‌نامه AISC 341-16 می‌باشد [۱۷]. تاریخچه بارگذاری مذکور در شکل (۸) ترسیم شده است.



شکل ۸- تاریخچه بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها مطابق الگوی بارگذاری AISC 341-16 [۱۷]

برای شبیه‌سازی بخش پلاستیک رفتار مصالح فولادی، سخت‌شوندگی کرنشی از نوع ترکیبی<sup>۱</sup> استفاده شده است. مطابق روش مورد استفاده توسط سلطان‌آبادی و همکاران [۱۴]، شبیه‌سازی مصالح الاستومر توسط مدل هایپرلاستیک<sup>۲</sup> از نوع مارلو<sup>۳</sup> صورت گرفته است. برای این کار از نتایج آزمایش تک‌محوره بر روی لایه الاستومری مطابق شکل (۶) استفاده شده است. هرچند رفتار مواد الاستومر عموماً وابسته به دما می‌باشد، اما با توجه به دمای عملکردی این مصالح در سازه و این که اثرات حرارتی در الاستومرها تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ناچیز است، می‌توان از آن صرف‌نظر نمود [۱۵]. همچنین، مطابق تحقیقات سلطان‌آبادی و بهنام‌فر [۱۶] تغییر در سرعت بارگذاری، تأثیر ناچیزی بر رفتار چرخه‌ای میراگرهای مورد بررسی دارد که با استناد به آن می‌توان رفتار نمونه‌ها را در قالب تحلیل استاتیکی و مستقل از سرعت بارگذاری بررسی نمود.



شکل ۶- نتایج آزمایش تک‌محوره بر روی مواد الاستومر [۱۴]

## ۲-۴- قیدها و شرایط تکیه‌گاهی

برای مقیدسازی نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا یک نقطه مرجع<sup>۴</sup> در بالا و پایین ستون ایجاد شده و سپس درجات آزادی گره‌های موجود بر روی وجوه بالا و پایین ستون با استفاده از قید جفت‌سازی<sup>۵</sup> به نقطه مزبور بسته شده‌اند. در ادامه، از تغییرمکان نقاط مرجع در ابتدا و انتهای ستون مطابق شکل (۷) در جهات سه‌گانه جلوگیری به عمل آمده، لذا درجات آزادی دورانی آزاد گذاشته شده است (تکیه‌گاه مفصلی). لازم به ذکر است که انتهای تیر در جهت خارج از صفحه مقید شده است.

با توجه به واشرهای قفلی مورد استفاده در ابتدا و انتهای پیچ‌های تسلیمی [۱۶]، و مطابق مدل‌سازی مورد استفاده توسط بنی‌شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱] اتصال پیچ‌های تسلیمی به

<sup>۶</sup> Tie Constraint

<sup>۷</sup> Shell to Solid Coupling

<sup>۱</sup> Combined Isotropic-Kinematic Hardening

<sup>۲</sup> Hyperelastic

<sup>۳</sup> Marlow

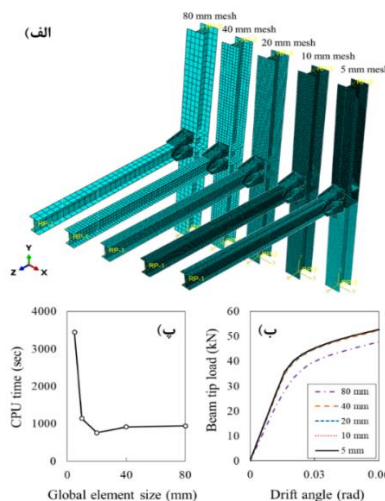
<sup>۴</sup> Reference Point

<sup>۵</sup> Coupling

۲-۶- مش بندی نمونه‌ها

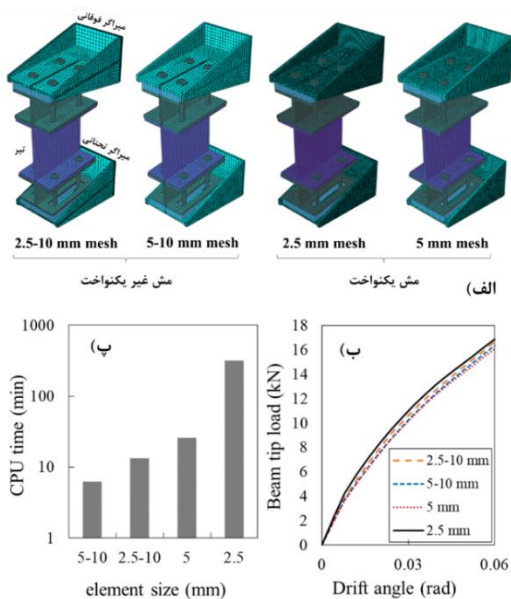
برای مدل‌سازی تیر و ستون اتصال مورد بررسی از عناصر دوبعدی S4R با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته<sup>۱</sup> استفاده شده است. در مدل‌سازی لایه الاستومری و بخش فولادی میراگر به ترتیب عناصر سه‌بعدی C3D8H و C3D8R به کار رفته‌اند. عنصر C3D8R از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و عنصر C3D8H از فرمول‌بندی هیبریدی<sup>۲</sup> استفاده می‌نماید. جهت تعیین اندازه مناسب برای عناصر نمونه‌ها از تحلیل حساسیت مش استفاده شده است. بدین منظور ابتدا تحلیل حساسیت مش عمومی اتصال انجام شده است. در این مرحله، اتصال فاقد میراگر بوده و اندازه مش در ناحیه اتصال ثابت و برابر با ۵ میلی‌متر است. شکل (۹)، مش‌بندی نمونه‌ها، تغییرات نمودار نیرو-جابجایی و تغییرات زمان مورد نیاز برای تحلیل را نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود با کاهش اندازه مش از ۲۰ به ۵ میلی‌متر زمان تحلیل به شدت افزایش می‌یابد درحالی‌که افزایش دقت چندان مشهود نیست. به همین دلیل، اندازه مش کلی نمونه‌ها در نواحی تیر و ستون برابر با ۲۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

در ادامه، نمونه‌ای دارای دو میراگر در بالا و پایین اتصال در نظر گرفته شده و تأثیر اندازه مش در محدوده میراگر بر رفتار اتصال بررسی شده است. بر اساس بررسی‌های اولیه، استفاده از مش با اندازه یکنواخت در ناحیه میراگر زمان تحلیل را تا حد زیادی بالا می‌برد. دو نمونه نخست در شکل (۱۰)، نشان‌دهنده مدل با مش یکنواخت ۵ و ۲/۵ میلی‌متر در ناحیه میراگر می‌باشد. برای یافتن راهکاری جهت کاهش زمان تحلیل، از مش‌بندی غیریکنواخت نمونه‌ها در ناحیه دارای میراگر استفاده شده است.



شکل ۹- تعیین اندازه مش عمومی؛ الف) نمونه مش‌بندی،

ب) تغییرات نمودار نیرو-جابجایی، پ) تغییرات زمان تحلیل



شکل ۱۰- تعیین اندازه مش در ناحیه میراگر؛ الف) نمونه مش‌بندی،

ب) تغییرات نمودار نیرو-جابجایی، پ) تغییرات زمان تحلیل

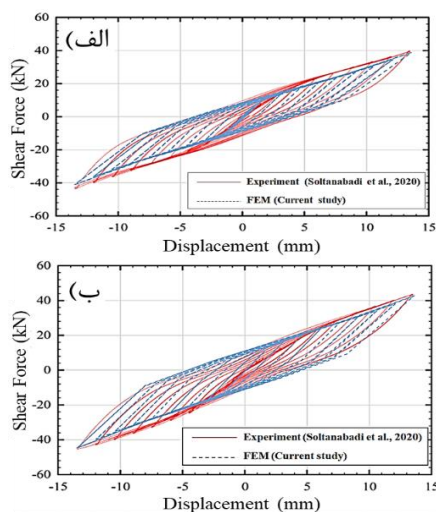
برای این کار، اندازه مش در جهت طولی و عرضی ۱۰ میلی‌متر و در راستای ضخامت یک‌بار ۵ میلی و بار دیگر ۲/۵ میلی‌متر فرض شده است. با توجه به منحنی‌های شکل (۱۰)، ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از مش‌بندی با ابعاد غیریکنواخت تفاوت ناچیزی با نمونه‌های دارای مش یکنواخت دارد. این درحالی است که با استفاده از مش غیریکنواخت زمان تحلیل تا حد زیادی کاهش یافته است. بدین ترتیب، برای مش‌بندی نمونه‌ها در ناحیه دارای میراگر ابعاد طولی و عرضی مش‌ها ۱۰ میلی‌متر و ابعاد عناصر در راستای ضخامت قطعات ۲/۵ میلی‌متر فرض شده است.

۲-۷- صحت‌سنجی نمونه‌ها

برای صحت‌سنجی مدل‌های عناصر محدود در تحقیق حاضر، از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مجموعه میراگر مورد بررسی توسط سلطان‌آبادی و همکاران استفاده شده است [۱۴]. مطابق شکل (۱۱)، در این آزمایش نمونه‌هایی از میراگر ترکیبی، تحت آزمایش چرخه‌ای به صورت کشش و فشار قرار گرفته است. اجزای مختلف میراگر مطابق جزئیات ارائه‌شده در شکل (۲) است. مشخصات مکانیکی ورق‌های به‌کاررفته در ساخت میراگر از نوع فولاد ST37 و مشخصات رفتاری مصالح ویسکوالاستیک مطابق توضیحات ارائه‌شده در بند ۲-۳ می‌باشد. دو نمونه RSCD01 و

<sup>1</sup> Reduced Integration

<sup>2</sup> Hybrid Formulation



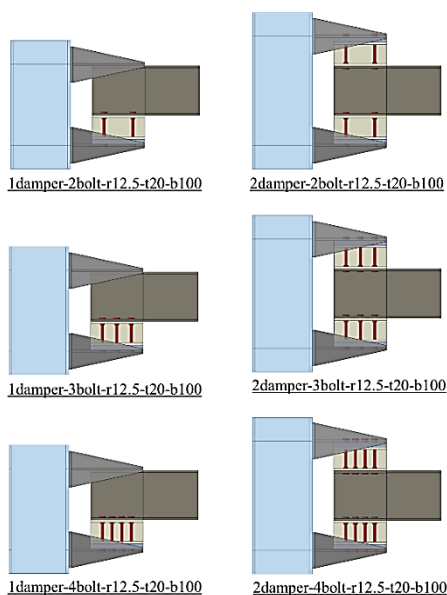
شکل ۱۳- مقایسه منحنی هیستریزس حاصل از آزمایش و مدل‌سازی عددی؛ الف) نمونه RSCD01، ب) نمونه RSCD02

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سختی اولیه، نیروی تسلیم، سختی ثانویه و نیروی نهایی حاصل از تحلیل‌های عددی انطباق خوبی با منحنی هیستریزس حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده دارد.

### ۳- نتایج تحلیل‌ها

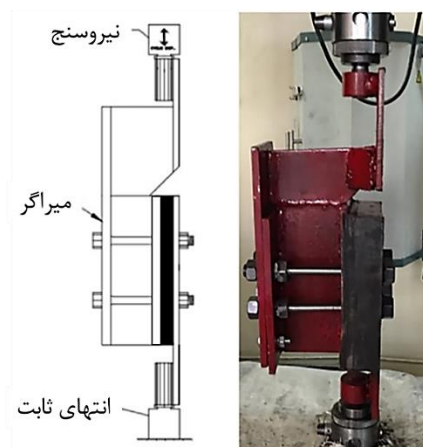
#### ۳-۱- بررسی تأثیر تعداد پیچ‌های تسلیمی

مطابق توضیحات قبل، برای بررسی تأثیر تعداد پیچ‌های تسلیمی از مقایسه نتایج مدل‌های ۲ تا ۴ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۱۶ تا ۱۸ در اتصالات با دو میراگر استفاده می‌شود. پیکربندی کلی این میراگرها را در شکل (۱۴) می‌توان ملاحظه نمود.



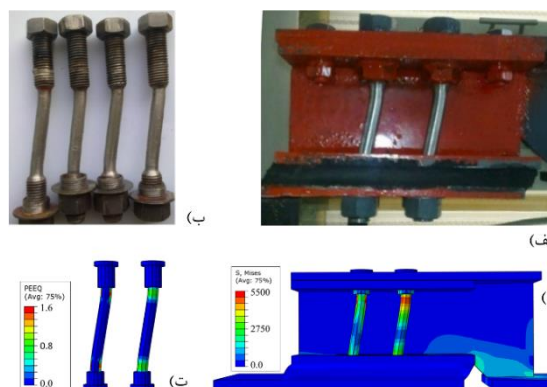
شکل ۱۴- پیکربندی میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر تعداد پیچ‌های تسلیمی

RSCD02 آزمایش‌شده توسط سلطان‌آبادی و همکاران [۱۴] برای صحت‌سنجی در این مقاله استفاده شده است. تفاوت نمونه‌های مزبور در نوع فولاد پیچ‌ها می‌باشد. مطابق جدول (۲)، برای نمونه RSCD01، پیچ‌های تسلیمی از فولاد با مقاومت معمولی و برای نمونه RSCD01، این پیچ‌ها از فولاد با مقاومت بالا ساخته شده بودند.



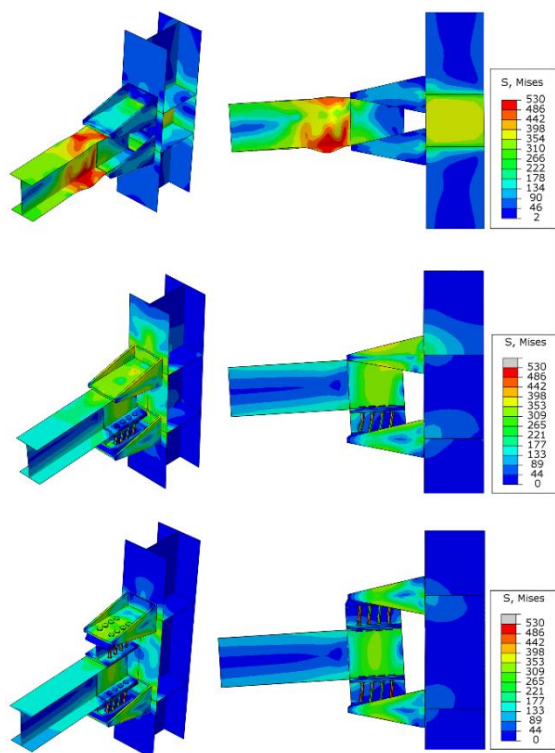
شکل ۱۱- پیکربندی نمونه آزمایش سلطان‌آبادی و همکاران [۱۴]

بارگذاری نمونه‌ها مطابق الگوی ارائه‌شده توسط ATC 24 انجام شده است [۱۸]. حالت تغییرشکل یافته میراگر RSCD01 در آزمایشگاه در شکل (۱۲) قابل ملاحظه است [۱]. همچنین، کانتورهای تنش و کرنش در پایان بارگذاری در نمونه عددی میراگر و پیچ‌های تسلیمی آن در همان شکل ارائه شده است که انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. برای مقایسه دقیق‌تر نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی، منحنی‌های هیستریزس حاصل از بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



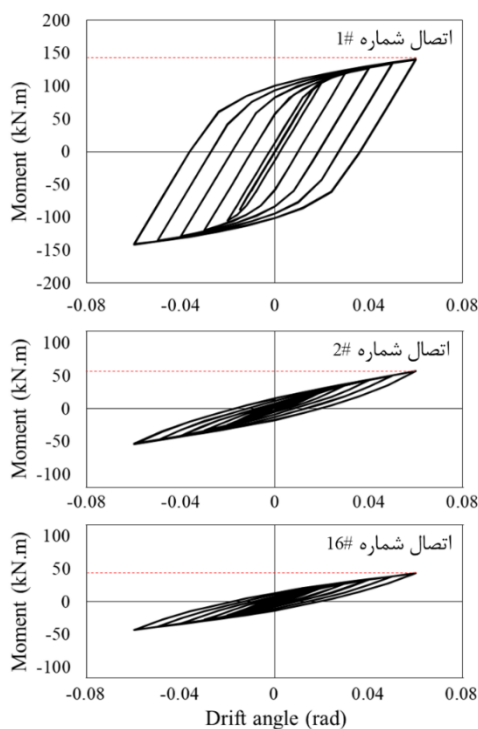
شکل ۱۲- مقایسه نتایج برای میراگر RSCD01؛ الف) میراگر، ب) پیچ‌های تسلیمی، پ) کانتور تنش میراگر، ت) کانتور کرنش پیچ‌ها

با توجه به این که در مکانیزم عملکردی مورد انتظار برای میراگرهای مورد بررسی، خمش دوانحنایی پیچ‌های تسلیمی تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از ظرفیت اتصال می‌باشد، لذا تعداد این پیچ‌ها اثر مستقیم بر ظرفیت خمشی اتصال خواهد داشت که این مسئله در داده‌های ستون سوم جدول (۳) مشخص است. مطابق این جدول، افزودن میراگر باعث کاهش قابل ملاحظه بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در عناصر تیر و ستون اتصال می‌شود. در این بین استفاده از دو میراگر باعث کاهش بیش‌تری در بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی تیر و ستون شده است. این درحالی است که در نمونه‌های دارای میراگر، مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در پیچ‌های تسلیمی حتی بیش‌تر از مقدار مربوطه برای نمونه فاقد میراگر است. با توجه به این که در نمونه‌های گروه دوم، دو میراگر در تغییرشکل ایجادشده مشارکت دارند، لذا سطح کرنش پلاستیک تجمعی در این نمونه‌ها پایین‌تر از نمونه‌های دارای یک میراگر است. کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک در انتهای تیر و مرکز آن در پیچ‌های تسلیمی نمونه‌های دارای میراگر را در شکل (۱۶) می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۱۶- توزیع تنش‌های مایسز در اتصال فاقد میراگر، دارای یک میراگر و دو میراگر با چهار پیچ تسلیمی (دریفت ۰/۶)

نمونه‌ای از منحنی‌های رفتار چرخه‌ای برای این اتصالات در شکل (۱۵) ارائه شده است. همچنین مقادیر کلیدی منحنی‌های رفتاری نظیر سختی اولیه، ظرفیت خمشی و بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی (PEEQ) در انتهای تحلیل برای میراگر و عناصر تیر و ستون در جدول (۳) گزارش شده است. با توجه به شکل و جدول یادشده ملاحظه می‌شود که سختی و مقاومت نمونه‌های دارای میراگر بسیار پایین‌تر از اتصال خمشی فاقد میراگر می‌باشد. همچنین سختی و مقاومت نمونه‌های دارای دو میراگر اندکی کم‌تر از اتصال دارای یک میراگر است.



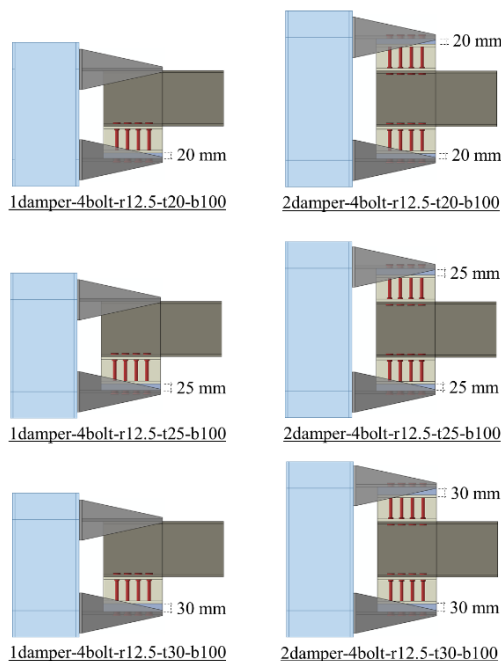
شکل ۱۵- نمونه‌ای از منحنی‌های رفتار چرخه‌ای برای اتصال فاقد میراگر، اتصال دارای یک میراگر و اتصال دارای دو میراگر

جدول ۳- نتایج برای بررسی تأثیر تعداد پیچ‌های تسلیمی

شماره نمونه	سختی اولیه (kN.m/rad)	مقاومت نهایی (kN.m)	تیر و ستون	میراگر	کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ
#۱	۵۹۱۷	۱۴۲	۰/۸۰	-	-
#۲	۱۴۲۸	۵۷	۰/۰۵	۱/۲۷	-
#۳	۱۶۳۰	۶۰	۰/۰۴	۱/۲۶	-
#۴	۱۷۸۱	۶۳	۰/۰۴	۱/۲۶	-
#۱۶	۱۲۱۴	۴۴	۰/۰۱	۱/۰۳	-
#۱۷	۱۴۲۵	۴۸	۰/۰۱	۰/۹۸	-
#۱۸	۱۶۱۸	۵۲	۰/۰۱	۰/۹۵	-

### ۲-۳- بررسی تأثیر ضخامت لایه الاستومر

چنانچه در توضیحات جدول (۱) اشاره شد، بررسی تأثیر ضخامت لایه الاستومر با مقایسه نتایج نمونه‌های ۴ تا ۶ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۱۸ تا ۲۰ در اتصالات با دو میراگر میسر می‌باشد. پیکربندی کلی این میراگرها در شکل (۱۷) ارائه شده است.



شکل ۱۷- پیکربندی میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر ضخامت لایه الاستومر

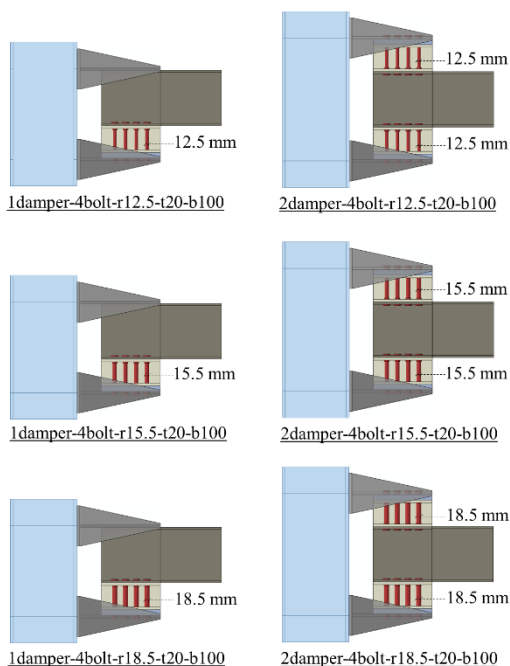
با تحلیل این نمونه‌ها، پارامترهای رفتاری آنها از روی منحنی‌های چرخه‌ای محاسبه و نتایج مربوطه در جدول (۴) گزارش شده است. با توجه به نتایج جدول، می‌توان گفت که افزایش ضخامت لایه الاستومر باعث اندکی کاهش در سختی و مقاومت نمونه می‌شود. از آنجا که کرنش برشی لایه الاستومر برابر با جابه‌جایی نسبی ورق‌های بالا و پایین میراگر تقسیم بر ضخامت لایه الاستومر است، لذا منطقی است که با افزایش ضخامت لایه الاستومر، کرنش آن (و در نتیجه تنش آن) کمتر شده و سختی و مقاومت نمونه کاهش یابد.

### جدول ۴- نتایج برای بررسی تأثیر ضخامت لایه الاستومر

شماره نمونه	سختی اولیه (kN.m/rad)	مقاومت نهایی (kN.m)	کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ	میراگر
#۱	۵۹۱۷	۱۴۲	۰/۸۰	-
#۴	۱۷۸۱	۶۳	۰/۰۴	۱/۲۶
#۵	۱۷۵۹	۶۰	۰/۰۴	۱/۲۷
#۶	۱۷۴۱	۵۹	۰/۰۴	۱/۲۸
#۱۸	۱۶۱۸	۵۲	۰/۰۱	۰/۹۵
#۱۹	۱۶۰۰	۴۸	۰/۰۱	۰/۹۷
#۲۰	۱۵۸۲	۴۷	۰/۰۱	۰/۹۹

### ۳-۳- بررسی تأثیر قطر پیچ‌های تسلیمی

برای بررسی تأثیر قطر ناحیه تسلیمی پیچ‌های میراگر بر رفتار اتصال، از مقایسه نتایج نمونه‌های ۴، ۷ و ۸ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۱۸، ۲۱ و ۲۲ در اتصالات با دو میراگر استفاده خواهد شد. میراگرهای هر سه نمونه، دارای چهار پیچ در هر ردیف بوده و قطر ناحیه تسلیمی پیچ در آنها به ترتیب ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ میلی‌متر می‌باشد. پیکربندی کلی این میراگرها در شکل (۱۸) ارائه شده است.

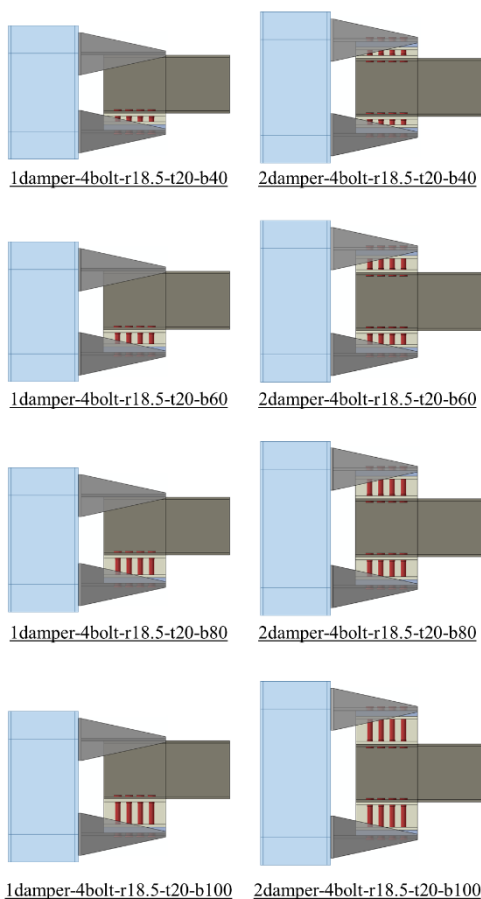


شکل ۱۸- پیکربندی میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر قطر پیچ‌های تسلیمی

خلاصه‌ای از پارامترهای رفتاری این نمونه‌ها در جدول (۵) گزارش شده است. بر اساس این نتایج، می‌توان ملاحظه نمود که

### ۴-۳- بررسی تأثیر ارتفاع میراگر

ارتفاع مقطع اشکل میراگر در حقیقت کنترل‌کننده طول پیچ‌های تسلیمی نیز می‌باشد. برای بررسی تأثیر این پارامتر، نتایج تحلیل‌ها بر روی نمونه‌های ۸ تا ۱۱ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۲۲ تا ۲۵ در اتصالات با دو میراگر با هم مقایسه خواهد شد. پیکربندی کلی این میراگرها را در شکل (۲۰) می‌توان ملاحظه نمود.



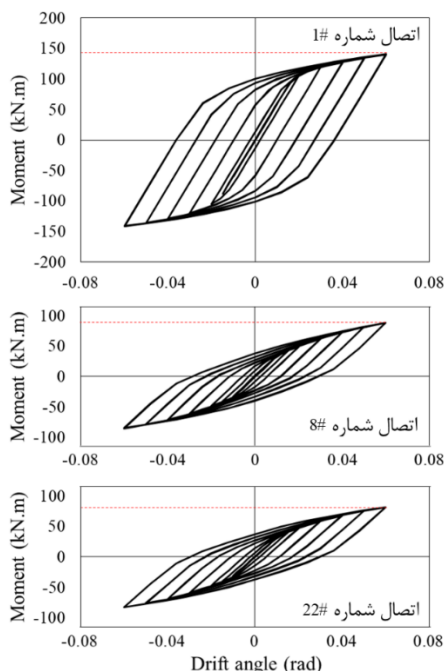
شکل ۲۰- پیکربندی میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر ارتفاع میراگر

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل این نمونه‌ها در جدول (۶) خلاصه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، کاهش ارتفاع مقطع اشکل (طول پیچ‌های تسلیمی) منجر به افزایش قابل‌ملاحظه در سختی و مقاومت نمونه‌ها شده است. همان‌گونه که ذکر شد بخش عمده‌ای از ظرفیت اتصال دارای میراگر از طریق خمش دوانحنایی پیچ‌های تسلیمی تأمین می‌گردد. بدین ترتیب کاهش ارتفاع مقطع اشکل (طول پیچ‌های تسلیمی) باعث افزایش سختی و مقاومت پیچ‌ها و در نتیجه کل اتصال می‌شود. مطابق روند قبل، در این

افزایش قطر پیچ‌های تسلیمی، تا حد زیادی سختی و مقاومت نمونه‌های دارای میراگر را بهبود داده است. این بهبود در سختی و مقاومت نمونه‌ها را می‌توان به افزایش ممان اینرسی و اساس مقطع پلاستیک پیچ‌ها در اثر افزایش قطر آن‌ها مرتبط دانست. برای داشتن درک مشخصی از این روند، منحنی‌های رفتار چرخه‌ای اتصال فاقد میراگر به همراه اتصالات دارای یک میراگر و اتصال دارای دو میراگر با قطر پیچ تسلیمی ۱۸/۵ میلی‌متر در شکل (۱۹) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش قطر پیچ‌های تسلیمی نمودار نسبت به قبل بازتر و سطح زیر چرخه‌های منحنی نیز افزایش یافته است؛ اما هنوز هم سختی، مقاومت و مساحت چرخه‌های نمونه‌های دارای میراگر پایین‌تر از اتصال خمشی فاقد میراگر است.

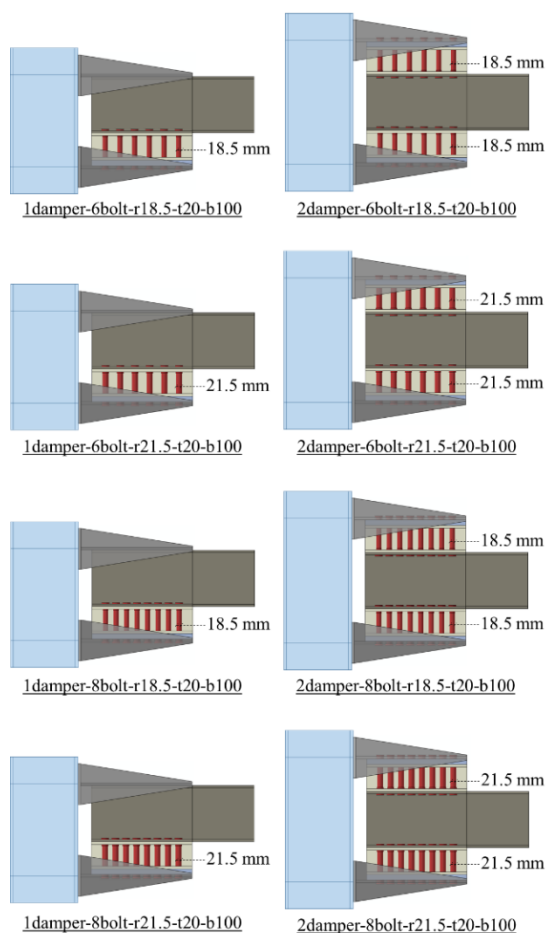
جدول ۵- نتایج برای بررسی تأثیر قطر پیچ‌های تسلیمی

شماره نمونه	سختی اولیه (kN.m/rad)	مقاومت نهایی (kN.m)	کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ	تیر و ستون	میراگر
#۱	۵۹۱۷	۱۴۲	۰/۸۰	-	-
#۴	۱۷۸۱	۶۳	۰/۰۴	۱/۲۶	-
#۷	۲۳۴۲	۷۵	۰/۰۴	۱/۲۴	-
#۸	۳۲۹۹	۸۸	۰/۰۳	۱/۷	-
#۱۸	۱۶۱۸	۵۲	۰/۰۱	۰/۹۵	-
#۲۱	۲۳۲۳	۶۵	۰/۰۲	۰/۹۱	-
#۲۲	۳۰۸۲	۸۲	۰/۰۴	۱/۰۰	-



شکل ۱۹- منحنی‌های رفتار چرخه‌ای اتصالات دارای یک میراگر و اتصال دارای دو میراگر با قطر پیچ تسلیمی ۱۸/۵ میلی‌متر

شده است. همچنین مشابه بندهای پیشین، نتایج به دست آمده از تحلیل این نمونه‌ها در جدول (۷) گزارش شده است.



شکل ۲۱- پیکربندی میراگرهای مورد استفاده برای بررسی تأثیر پیکربندی میراگر

جدول ۷- نتایج برای بررسی تأثیر پیکربندی میراگر

شماره نمونه	سختی اولیه (kN.m/rad)	مقاومت نهایی (kN.m)	تیر و ستون	میراگر	کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ
#۱	۵۹۱۷	۱۴۲	۰/۸۰	-	
#۱۲	۴۳۵۰	۱۲۲	۰/۱۲	۱/۴۸	
#۱۳	۵۴۴۷	۱۴۲	۰/۲۶	۱/۴۷	
#۱۴	۴۹۵۴	۱۳۴	۰/۱۷	۱/۳۰	
#۱۵	۵۹۰۵	۱۴۹	۰/۳۷	۰/۹۱	
#۲۶	۴۳۸۲	۱۲۷	۰/۱۴	۱/۰۸	
#۲۷	۵۳۹۱	۱۴۶	۰/۳۳	۰/۹۰	
#۲۸	۴۸۴۶	۱۳۸	۰/۲۲	۰/۷۳	
#۲۹	۵۸۵۴	۱۵۲	۰/۴۴	۰/۷۸	

حالت نیز سختی نمونه‌های دارای یک میراگر اندکی بیش‌تر از نمونه‌های دارای دو میراگر می‌باشد. لذا باید توجه داشت که به‌ازای جابه‌جایی ثابت در بالای میراگر، کاهش ارتفاع پیچ‌های تسلیمی باعث افزایش دوران مفاصل پلاستیک در بالا و پایین این پیچ‌ها و در نتیجه افزایش قابل‌توجه کرنش پلاستیک تجمعی در این پیچ‌ها می‌شود. همانند حالت‌های قبل، سطح کرنش پلاستیک تجمعی در نمونه‌های دارای دو میراگر پایین‌تر از نمونه‌های دارای یک میراگر است که این مسئله، به‌دلیل مشارکت دو میراگر در تغییر شکل‌های اتصال است.

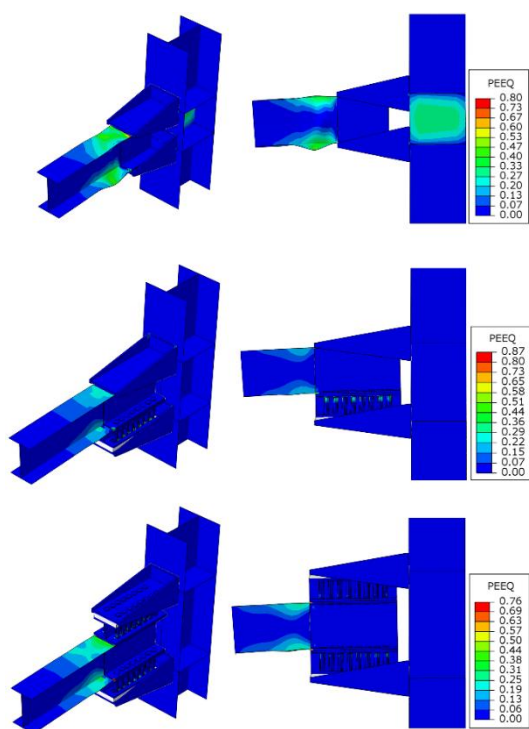
جدول ۶- نتایج برای بررسی تأثیر ارتفاع میراگر

شماره نمونه	سختی اولیه (kN.m/rad)	مقاومت نهایی (kN.m)	تیر و ستون	میراگر	کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ
#۱	۵۹۱۷	۱۴۲	۰/۸۰	-	
#۸	۳۲۹۹	۸۸	۰/۰۳	۱/۷۰	
#۹	۳۸۲۱	۹۶	۰/۰۵	۲/۲۹	
#۱۰	۴۵۸۳	۱۰۹	۰/۰۹	۳/۱۸	
#۱۱	۵۵۶۸	۱۲۸	۰/۲۴	۳/۷۸	
#۲۲	۳۰۸۲	۸۲	۰/۰۴	۱/۰۰	
#۲۳	۳۵۷۷	۹۱	۰/۰۶	۱/۲۸	
#۲۴	۴۲۹۱	۱۰۵	۰/۱۳	۱/۸۰	
#۲۵	۵۲۶۴	۱۲۸	۰/۲۸	۲/۳۱	

۳-۵- بررسی تأثیر پیکربندی میراگر

با توجه به طول و عرض میراگر مورد بررسی در بخش‌های پیشین، جانمایی پیچ‌های تسلیمی در بیش از دو ردیف چهارتایی امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای رفع این محدودیت، چنانچه در توضیحات جدول (۱) گفته شد، از میراگر با پیکربندی ۲ استفاده شده است، که در آن طول ورق میراگر برابر با ۳۷۰ میلی‌متر است. این مسئله امکان جانمایی تا هشت پیچ تسلیمی در هر ردیف را فراهم می‌سازد. برای بررسی تأثیر پیکربندی میراگر با تعداد پیچ‌های تسلیمی بیش‌تر، از مقایسه نتایج نمونه‌های ۱۲ و ۱۴ یا ۱۳ و ۱۵ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۲۶ و ۲۸ یا ۲۷ و ۲۹ در اتصالات با دو میراگر استفاده خواهد شد. همچنین برای بررسی تأثیر قطر پیچ در میراگر با پیکربندی جدید می‌توان از مقایسه نتایج نمونه‌های ۱۲ و ۱۳ یا ۱۴ و ۱۵ در اتصالات با یک میراگر و نمونه‌های ۲۶ و ۲۷ یا ۲۸ و ۲۹ در اتصالات با دو میراگر استفاده نمود. پیکربندی کلی این میراگرها در شکل (۲۱) ارائه

نصف نمونه فاقد میراگر می‌باشد. شکل (۲۳)، توزیع کرنش پلاستیک تجمعی در اتصال فاقد میراگر، اتصال دارای یک میراگر و اتصال دارای دو میراگر با پیکربندی ۲ و قطر پیچ ۲۱/۵ میلی‌متر را در دریفت ۰.۶٪ نشان می‌دهد. با مقایسه تصاویر این شکل و شکل (۱۶) به وضوح می‌توان کاهش سهم مشارکت میراگر در تغییر شکل‌های اتصال و گسترش نواحی پلاستیک به داخل تیر و ستون در اثر تقویت میراگر را مشاهده نمود. به علاوه می‌توان ملاحظه کرد که کرنش تجمعی تیر و ستون در نمونه دارای دو میراگر بیش‌تر از نمونه تک میراگری می‌باشد. این درحالی است که در نمونه‌های دارای دو میراگر، به دلیل مشارکت دو فیوز در تغییر شکل‌های اتصال، سطح کرنش‌های پلاستیک در پیچ‌های تسلیمی کم‌تر از نمونه دارای یک میراگر است.

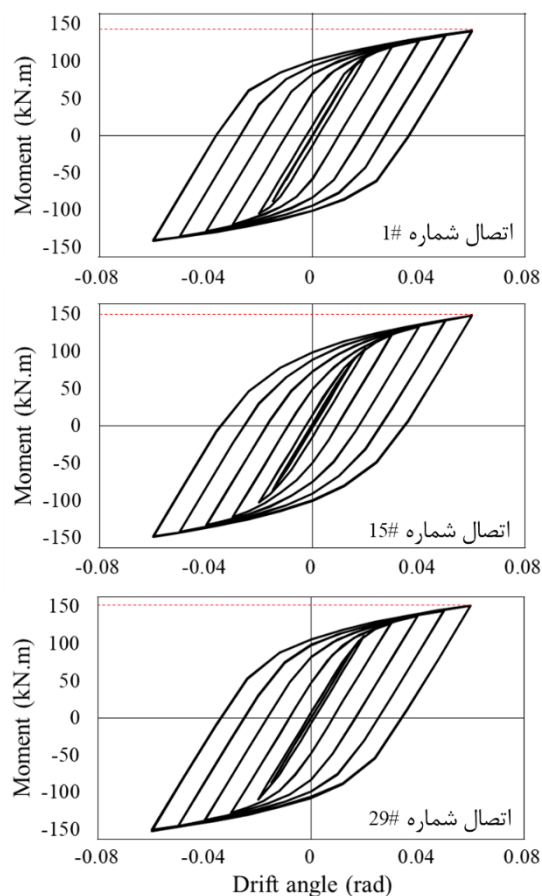


شکل ۲۳- توزیع کرنش پلاستیک تجمعی در اتصال فاقد میراگر، اتصال دارای میراگر با پیکربندی ۲ و قطر پیچ ۲۱/۵ میلی‌متر (دریفت ۰.۶٪)

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیش، ملاحظه گردید بیش‌ترین تأثیر بر سختی و مقاومت اتصال مورد بررسی ناشی از تغییر تعداد و قطر پیچ‌های تسلیمی می‌باشد. در این میان، کاهش ارتفاع پیچ‌های تسلیمی به دلیل افزایش بیش از حد کرنش‌های تجمعی در آن‌ها قابل توصیه نیستند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن نمونه‌های با ضخامت الاستومر برابر با ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع مقطع

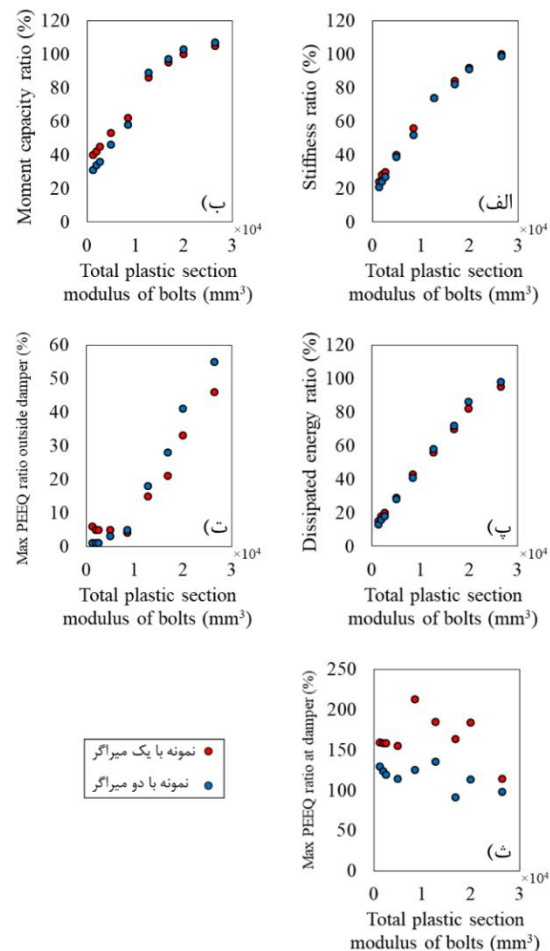
با توجه به نتایج، می‌توان گفت که افزایش تعداد یا قطر پیچ‌های تسلیمی در پیکربندی دوم، باعث افزایش سختی و ظرفیت خمشی نمونه‌های مورد بررسی می‌شود. برای مشاهده واضح‌تر این مسئله، منحنی‌های رفتار چرخه‌ای اتصال فاقد میراگر به همراه اتصال‌های دارای یک و دو میراگر با پیکربندی ۲ (هشت پیچ تسلیمی در هر ردیف) در شکل (۲۲) ارائه شده است. مطابق شکل، ملاحظه می‌شود که چرخه‌های رفتاری از سختی، مقاومت و مساحت زیر نمودار مناسبی برخوردار هستند. در کنار افزایش مقاومت میراگر در پیکربندی دوم، سهم مشارکت آن در تغییر شکل‌های اتصال کاهش یافته و لذا می‌توان انتظار داشت که نواحی پلاستیک به داخل عناصر تیر و ستون گسترش پیدا کرده و بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در تیرها و ستون‌های این نمونه‌ها افزایش یابد.



شکل ۲۲- منحنی‌های رفتار چرخه‌ای اتصال‌های دارای یک میراگر و اتصال دارای دو میراگر با پیکربندی ۲ (هشت پیچ تسلیمی در هر ردیف)

این مسئله در نتایج جدول (۷) کاملاً مشهود است. لازم به ذکر است که علیرغم این افزایش، بیشینه کرنش پلاستیک در عناصر تیر و ستون نمونه دارای میراگر در بدترین حالت کم‌تر از

اشکل برابر با ۱۰۰ میلی‌متر و مرتب‌کردن آن‌ها بر اساس مجموع اساس مقطع پلاستیک پیچ‌های تسلیمی (که تابعی از تعداد و قطر پیچ‌های تسلیمی است) نمودارهای شکل (۲۴) ترسیم شده است که نشان‌دهنده تأثیر این پارامتر بر مشخصات رفتاری مختلف اتصال می‌باشد. لازم به ذکر است که هر کدام از پارامترهای رفتاری مورد بررسی با مقدار متناظر خود برای نمونه فاقد میراگر نرمال‌سازی شده است.



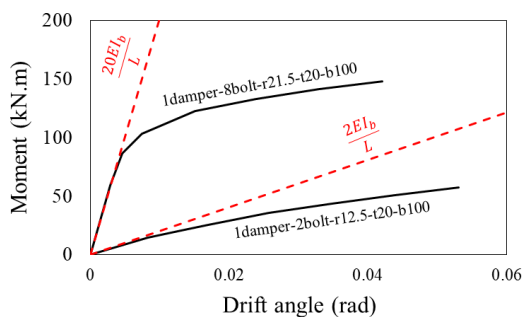
شکل ۲۴- تأثیر مجموع اساس مقطع پلاستیک پیچ‌ها؛ الف) سختی، ب) مقاومت خمشی، پ) اتلاف انرژی، ت) بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی خارج از میراگر، ث) بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی میراگر

افزایش بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در تیرها و ستون‌ها و کاهش نسبی آن در پیچ‌های میراگر در اثر افزایش اساس مقطع پلاستیک پیچ‌ها است. برای داشتن طراحی بهینه، مقدار این دو کرنش بایستی در یک تعادل منطقی باشند تا از شروع خرابی در تیر یا پارگی پیچ‌ها در اثر بارهای چرخه‌ای جلوگیری شود.

در خاتمه برای بررسی صلیبیت اتصالات مورد بررسی، با حذف تغییرشکل‌های مربوط به تیر و ستون با استفاده از رابطه زیر، مقدار دوران اتصال محاسبه و نمودار لنگر-دوران برای ضعیف‌ترین و قوی‌ترین اتصال دارای میراگر تکی در شکل (۲۵) ارائه شده است:

$$\theta_d = \theta_t - \frac{PL(H - h_d)^2}{16EI_c H} - \frac{P(L - 2l_d)^3}{12EI_b L} \quad (1)$$

که در آن،  $(\theta_t)$  دوران کل مجموعه،  $(P)$  میزان نیروی وارد در انتهای تیر،  $(L)$  طول دهانه قاب (در تحقیق حاضر ۵۰۰۰ میلی‌متر)،  $(H)$  ارتفاع ستون طبقه (در تحقیق حاضر ۳۲۰۰ میلی‌متر)،  $(l_d)$  و  $(h_d)$  طول و ارتفاع میراگر،  $(E)$  مدول الاستیسیته و  $(I_b)$  و  $(I_c)$  به ترتیب ممان اینرسی تیر و ستون می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود، برای اتصال دارای میراگر با تعداد پیچ کم، صلیبیت اتصال بسیار پایین بوده و در محدوده مربوط به اتصال ساده قرار دارد. این درحالی است که برای اتصال با هشت پیچ تسلیمی در هر ردیف، صلیبیت اتصال معادل اتصال گیردار می‌باشد. لازم به ذکر است که برای اتصال دارای میراگر دابل نیز نتایج مشابه حالت میراگر تکی است.



شکل ۲۵- نمودار لنگر-دوران برای دو اتصال دارای میراگر تکی

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار سازه‌ای اتصالات تیر به ستون دارای میراگرهای ترکیبی فلز-الاستومر پرداخته شد. بدین منظور دو نمونه اتصال تیر به ستون با میراگر فلز-الاستومر که در تحقیقات قبلی آزمایش شده بودند، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و رفتار مدل‌های عددی صحت‌سنجی گردید. در ادامه نمونه‌های دارای میراگر تکی یا دابل به صورت عددی شبیه‌سازی شده و

مطابق شکل، تأثیر اساس مقطع پلاستیک پیچ‌ها بر سختی، مقاومت و اتلاف انرژی نمونه‌ها کاملاً مشهود است. چنانچه ملاحظه می‌شود، با رسیدن سختی، مقاومت و اتلاف انرژی مجموعه به مقدار متناظر برای اتصال فاقد میراگر، میزان این پارامترها ثابت شده و افزودن بیش‌تر اساس مقطع پلاستیک (یعنی تعداد یا قطر پیچ‌ها) تأثیر چندانی بر موارد یادشده نخواهد داشت. از دیگر نتایجی که با توجه به این شکل می‌توان استنباط نمود،

تأثیر پارامترهای مختلف میراگر بر رفتار نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به شرح ذیل می‌باشند:

- افزودن میراگر در سیستم باعث کاهش میزان سختی و مقاومت خمشی اتصال خمشی می‌شود. میزان این کاهش در بدترین حالت تا ۷۵٪ برای سختی و ۶۰٪ برای مقاومت اتصال بود. در مقابل، بیشینه کرنش تجمعی از قسمت تیر و ستون به سمت پیچ‌های تسلیمی میراگر انتقال می‌یابد.
- با افزایش قطر و تعداد پیچ‌های تسلیمی سختی و مقاومت اتصال افزایش می‌یابد. این افزایش تا رسیدن سختی و مقاومت اتصال به مقادیر مربوط به اتصال فاقد میراگر ادامه یافته و سپس ثابت می‌شود. در این حالت کرنش پلاستیک در انتهای تیر تا ۵۰٪ حالت بدون میراگر افزایش می‌یابند.
- با افزایش ضخامت لایه الاستومر سختی و مقاومت اتصال به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. افزایش ۵۰٪ ضخامت الاستومر کاهش کم‌تر از ۱۰٪ سختی و مقاومت اتصال را در پی داشت.
- کاهش ارتفاع مقطع اشکل میراگر که به دنبال خود کاهش ارتفاع پیچ‌های تسلیمی را در پی دارد، باعث افزایش مقادیر سختی، لنگر و میزان اتلاف انرژی (چرخه‌های زیر منحنی نیرو-جابجایی) اتصال می‌شود. در عین حال بیشینه کرنش‌های نمونه تا چندین برابر افزایش می‌باشد.
- مطابق بررسی‌های صورت گرفته، اثر هم‌زمان تعداد و قطر پیچ‌های تسلیمی را می‌توان از طریق مجموع اساس مقطع پلاستیک پیچ‌های تسلیمی نشان داد. با افزایش این پارامتر، سختی، مقاومت و اتلاف انرژی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- به‌طور کلی می‌توان گفت استفاده از میراگرهای فلز-الاستومر با ترکیب مناسب از لایه الاستومر و پیچ‌های تسلیمی می‌تواند تغییر شکل‌های پلاستیک در اجزای سازه‌ای را کاهش داده و رفتار چرخه‌ای اتصال را بهبود بخشد.

- [14] Soltanabadi, R., Mamazizi, A., and Behnamfar, F. (2020), "Evaluating the performance of chevron braced frame with RSCD viscoplastic damper", *Engineering Structures*, 206, p. 110190.
- [15] Behnamfar, F., and Soltanabadi, R. (2020), "Analytical studies on a combined rubber-steel damper for repairable steel moment connections", *Journal of Earthquake Engineering*, 24(1), pp. 37-58.
- [16] Soltanabadi, R., and Behnamfar, F. (2018), "Experimental studies on a combined damper for repairable steel moment connections", *International Journal of Steel Structures*, 18, pp. 211-224.
- [17] AISC 341 (2016), "Seismic Provisions for Structural Steel Building", American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois.
- [18] ATC 24 (1994), "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures", Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [19] AISC 358 (2018), "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications", American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois.
- [1] Banisheikholeslami, A., Behnamfar, F., and Ghandil, M. (2016), "A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control", *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp. 185-195.
- [2] Xu, Z. (2021), "Structure design, mathematical modeling and dynamical performance tests of a new viscoelastic elastomer damper", *Measurement*, 174, p. 108820.
- [3] Xu, Z.D., Liao, Y.X., Ge, T., and Xu, C. (2016), "Experimental and theoretical study of viscoelastic dampers with different matrix rubbers", *Journal of Engineering Mechanics*, 142(8), p. 04016051.
- [4] Ge, T., Huang, X.H., Guo, Y.Q., He, Z.F., and Hu, Z.W. (2021), "Investigation of mechanical and damping performances of cylindrical viscoelastic dampers in wide frequency range", In *Actuators* Vol. 10, No. 4, pp. 71. MDPI.
- [5] Zhou, Y., Li, D., Shi, F., Luo, W., and Deng, X. (2021), "Experimental study on mechanical properties of the hybrid lead viscoelastic damper", *Engineering Structures*, 246, p. 113073.
- [6] Chen, Y., Chen, C., Ma, Q., Jiang, H., and Wan, Z. (2019), "Study on mechanical properties of high damping viscoelastic dampers", *Advances in Structural Engineering*, 22(14), pp. 2925-2936.
- [7] Eskansdari Nasab, M.S., Javidan, M.M., Chun, S., and Kim, J. (2021), "Experimental study on seismic retrofit of a RC frame using viscoelastic dampers", In *Structures* Vol. 34, pp. 771-786. Elsevier.
- [8] Mehrabi, M.H., Suhatril, M., Ibrahim, Z., Ghodsi, S.S., and Khatibi, H. (2017), "Modeling of a viscoelastic damper and its application in structural control", *PloS one*, 12(6), p.e 0176480.
- [9] Montgomery, M., and Christopoulos, C. (2015), "Experimental validation of viscoelastic coupling dampers for enhanced dynamic performance of high-rise buildings", *Journal of Structural Engineering*, 141(5), p. 04014145.
- [10] Wang, S.J., Chiu, I.C., Yu, C.H., and Chang, K.C. (2018), "Experimental and analytical study on design performance of full-scale viscoelastic dampers", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(4), pp. 693-706.
- [11] Jiang, H., Li, S., and He, L. (2019), "Experimental study on a new damper using combinations of viscoelastic material and low-yield-point steel plates", *Frontiers in Materials*, 6, p. 100.
- [12] Shu, Z., Ning, B., Li, S., Li, Z., Gan, Z., and Xie, Y. (2020), "Experimental and numerical investigations of replaceable moment-resisting viscoelastic damper for steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 170, p. 106100.
- [13] Zhang, C., Huang, W., Zhou, Y., and Luo, W. (2021), "Experimental and numerical investigation on seismic performance of retrofitted RC frame with sector lead viscoelastic damper", *Journal of Building Engineering*, 44, p. 103218.