

بررسی رفتار اتصالات خمشی فولادی دارای میراگرهای لوله‌یی پیشنهادی

ابراهیم خلیل زاده وحیدی* (استادیار)

رضا زیباسخن (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی همدسی، دانشگاه رازی

مهندسی عمران شهریه (پاییز ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۲/۳، ص. ۵۳-۶۴

در نوشتار حاضر، اتصال دارای میراگر لوله‌یی جدید که در آن اتلاف انرژی عمدتاً با استفاده از ظرفیت جذب انرژی خمیری مصالح فولادی میراگر انجام می‌شود، بررسی شده است. میراگر پیشنهادی، سرعت نصب و تعویض زیادی دارد که بعد از زلزله برای بهره‌برداری مجدد از سازه، مزیت بزرگی محسوب می‌شود. با به‌کارگیری میراگر لوله‌یی جدید در اتصالات خمشی تیر به ستون می‌توان از توسعه تغییر شکل‌های غیرکشسان در اعضا اصلی مانند تیر و ستون جلوگیری کرد؛ در حالی که سختی، مقاومت و شکل‌پذیری آن‌ها نسبت به اتصالات خمشی متداول در حد قابل قبولی باقی می‌ماند. نتایج نشان می‌دهد که میراگرهای لوله‌یی درصد زیادی از انرژی مستهلک‌شده را بدون نیاز به اعضاء اصلی به تنهایی جذب می‌کنند و برتری‌های نسبی، نظیر نیاز به فناوری ساده و هزینه ساخت کمتر نسبت به سایر انواع میراگرها دارند.

واژگان کلیدی: استهلاک انرژی، میراگر جاری‌شونده، میراگر لوله‌یی، اتصالات خمشی فولادی.

۱. مقدمه

هر چند که هدف اصلی در طراحی بیشتر سازه‌ها، جلوگیری از تخریب سازه و تلفات جانی است، ولی آسیب‌های شدید ایجادشده در سازه بعد از زلزله موجب واردشدن خسارت‌های مالی قابل توجه خواهد شد. در زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) در بسیاری از سازه‌های فولادی بدون فرو ریختن، آسیب‌های قابل توجهی ایجاد شده است. پس از زلزله‌های مذکور، ایده‌ی استفاده از سیستم‌های اتلاف انرژی و هدایت آسیب‌های وارده به محل‌های موردنظر گسترش قابل توجهی یافته است.^[۱] میراگرهای جاری‌شونده، یکی از سیستم‌های کنترل غیرفعال در سازه‌ها هستند که مزایای زیادی از جمله هزینه‌ی پایین و تکنولوژی نسبتاً ساده دارند و در آن‌ها، اتلاف انرژی عمدتاً توسط مصالح میراگر که اغلب فولادی است، انجام می‌شود. قابلیت تعویض میراگرها در سازه موجب سهولت و سرعت بیشتر و هزینه کمتر در تعمیر سازه پس از زلزله‌های شدید می‌شود.

در سال‌های اخیر، سیستم‌های متنوعی از انواع میراگرهای جاری‌شونده معرفی و بررسی شده^[۲] و استفاده از آن‌ها در قسمت‌های مختلف سازه پیشنهاد شده است. برای مثال، در سال ۱۹۹۳ پیشنهاد استفاده از میراگر V شکل در قاب‌های هم‌گرا مطرح و بررسی شده است.^[۳] برخی پژوهشگران نیز میراگرهای جاری‌شونده‌ی مختلفی برای استفاده در قاب‌های خمشی مانند: میراگرهای صفحه‌یی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۳، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۷.

e_vahidi2000@yahoo.com
reza.zibasokhan@gmail.com

و شکاف‌دار تسلیم‌شونده،^[۴] میراگرهای شکاف‌دار تسلیم‌شونده،^[۵] ورق‌های U شکل تسلیم‌شونده،^[۶] و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار،^[۷] به‌عنوان میراگر جاری‌شونده در اتصالات خمشی تیر به ستون پیشنهاد و بررسی کرده‌اند. همچنین در پژوهش دیگری، پیشنهاد استفاده از میراگر فلزی آکاردتونی پرشده مطرح و بررسی شده است.^[۸] در سال ۲۰۱۰، نیز امکان‌پذیری استفاده از لوله به‌عنوان میراگر جاری‌شونده بررسی شده است.^[۹] همچنین در ادامه‌ی پژوهش اخیر، ایده‌ی استفاده از میراگر لوله‌یی در پل‌های ماشین‌رو مطرح و اثر استفاده از آن بررسی شده است.^[۱۰]

در سال ۲۰۱۴، امکان استفاده از لوله‌ی پرشده با سرب به‌عنوان میراگر جاری‌شونده مطرح و رفتار میراگر مذکور بررسی شده است.^[۱۱] میراگرهای جاری‌شونده با جزئیات مختلف در سایر قسمت‌های سازه موارد استفاده‌ی متعددی دارند.^[۱۲-۱۴] در پژوهش حاضر، ایده‌ی استفاده از لوله‌های فولادی به‌عنوان میراگر جاری‌شونده در اتصالات خمشی فولادی توسعه داده شده است. در این حالت روشی ساده برای طراحی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی پیشنهاد شده است. بر این اساس، رفتار اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی موجود برای اتصالات مرسوم خمشی و اتصالات خمشی دارای میراگر شکاف‌دار مقایسه شده است. در انتها، نیز براساس بررسی‌های انجام‌شده، پیشنهادهایی برای طراحی بهینه‌ی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی جاری‌شونده ارائه شده است.

۲. اتصال خمشی با میراگر لوله‌یی پیشنهادی

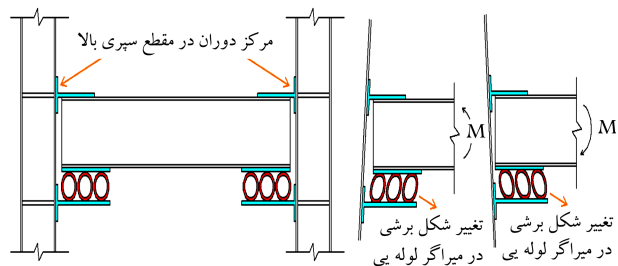
۱.۲. جزئیات میراگر لوله‌یی پیشنهادی در اتصال خمشی

اتصال خمشی در سازه‌های فولادی وظیفه‌ی انتقال نیروها و لنگرهای ایجادشده در تیر تحت بارگذاری‌های مختلف را به اعضا اصلی بر عهده دارد. لنگرهای ایجادشده در دو انتهای تیر تحت نیروهای ثقلی و جانبی، توسط اتصال به ستون فولادی منتقل می‌شوند. در اتصال پیشنهادشده دارای میراگر لوله‌یی، لنگرهای مذکور از طریق میراگر لوله‌یی به ستون منتقل می‌شوند و در حین انتقال نیرو در اثر ایجاد تغییر شکل، ستونک‌های میراگر لوله‌یی دچار تسلیم می‌شوند و در آنها مفاصل خمیری ایجاد می‌شود. در شکل ۱، نحوه‌ی قرارگیری میراگر لوله‌یی در اتصال خمشی قاب فولادی نشان داده شده است. البته با توجه به اینکه اتصال لوله‌ها به تکیه‌گاه با استفاده از جوش صورت می‌گیرد، طول آزاد ستونک میراگر مقداری کمتر از قطر لوله خواهد بود و مفاصل خمیری نیز مقداری از دو انتهای ستونک فاصله خواهند گرفت (شکل ۲). با تغییر ضخامت، قطر، طول و تعداد لوله‌ها می‌توان به ظرفیت‌های مختلف موردنظر برای انتقال لنگر تیر به ستون دست یافت. ایجاد مفصل خمیری در ستونک‌های میراگر لوله‌یی از افزایش لنگر خمشی منتقل شده از ستون به میراگر و نیز از ایجاد خسارت در اعضا اصلی اتصال شامل تیر و ستون جلوگیری می‌کند. در شکل ۲، نحوه‌ی ایجاد تغییر شکل در ستونک میراگر و تشکیل مفاصل خمیری در آن به صورت شماتیک نشان داده شده است.

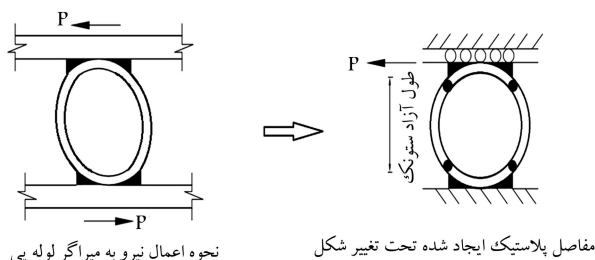
در اتصال پیشنهادشده در نوشتار حاضر، برای اتصال تیر به ستون از سپری در بال پایین و بالا همراه با میراگر لوله‌یی در بال پایین استفاده شده است. شکل ۳، جزئیات اتصال با میراگر لوله‌یی را نشان می‌دهد. برای سهولت در تعویض میراگر بعد از آسیب دیدن تحت زلزله‌ی شدید از اتصالات پیچی با پیچ‌های پر مقاومت استفاده شده است. با توجه به اتصال پیچی مورد استفاده و قرارگیری میراگر در بال پایین تیر، میراگر بعد از زلزله با هزینه‌ی کم و سرعت زیاد و بدون نیاز به آسیب گسترده به اعضا غیرسازه‌یی قابل تعویض است. با توجه به استفاده از اتصال پیچی، در صورت نیاز، سپری بال فوقانی نیز بعد از زلزله قابل تعویض است. اتصالات مذکور با توجه به استفاده از لوله و ورق در تهیه‌ی میراگر لوله‌یی به سادگی قابل اجرا هستند و هزینه‌ی ساخت پایینی دارند و نیاز به تخصص زیادی برای تولید آنها نیست.

۲.۲. نحوه‌ی طراحی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی

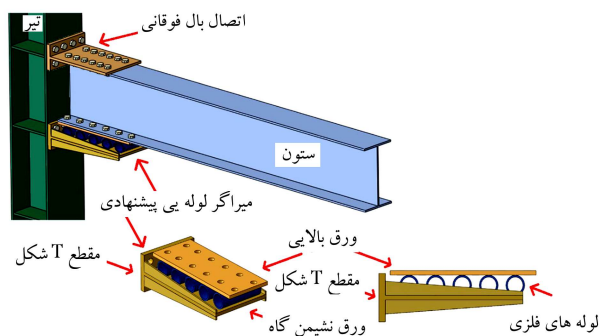
در طراحی اتصالات خمشی دارای میراگر لوله‌یی، اعضا تیر و ستون براساس نتایج تحلیل قاب در سازه‌های معمول طراحی می‌شوند. اتصال میراگر لوله‌یی جزئیاتی مانند شکل ۳ دارد که باید براساس ظرفیت خمشی تیر و بارهای وارده طراحی شود. برای جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های خمیری نامطلوب در تیر و ستون، بیشینه‌ی لنگر قابل انتقال از تیر به ستون از طریق میراگر لوله‌یی باید کمتر از لنگر تسلیم تیر باشد. میراگر لوله‌یی در بال پایین تیر قرار گرفته است، از این رو بیشینه‌ی لنگر منتقل شده بین تیر و ستون از حاصل ضرب بیشینه‌ی نیروی قابل انتقال از طریق میراگر لوله‌یی در فاصله‌ی بین سپری بالا و پایین متصل شده به ستون (h_T) در شکل ۴ به دست می‌آید. برای محدود کردن لنگر منتقل شده‌ی مذکور به مقدار کمتر از لنگر خمشی تسلیم تیر، ظرفیت انتقال نیرو در میراگر که با نیروی بال تحتانی تیر برابر است (شکل ۱)، باید محدود شود. در نوشتار حاضر، ظرفیت میراگر لوله‌یی به صورت نسبت بیشینه‌ی لنگر قابل انتقال بین تیر و ستون توسط میراگر به مقدار لنگر خمیری تیر بر حسب درصد بیان شده است. برای ایجاد سهولت و در جهت اطمینان



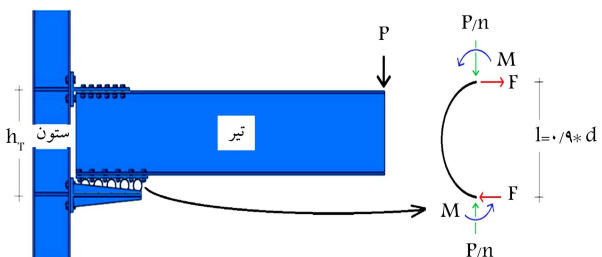
شکل ۱. نحوه‌ی قرارگیری و تغییر شکل میراگر لوله‌یی در قاب خمشی فولادی.



شکل ۲. نحوه‌ی ایجاد تغییر شکل برشی و مفاصل خمیری در میراگر لوله‌یی.

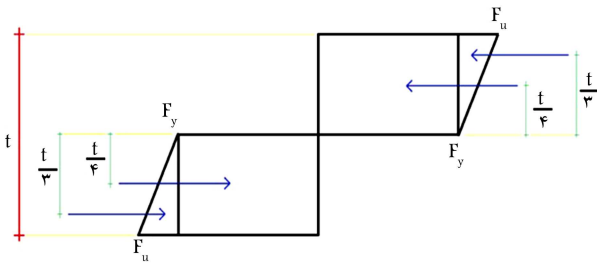


شکل ۳. جزئیات اتصال خمشی فولادی دارای میراگر لوله‌یی جاری‌شونده و نحوه‌ی اتصال میراگر به تیر و ستون.



شکل ۴. نیروهای وارد بر ستونک‌های میراگر لوله‌یی.

می‌توان در محاسبه‌ی لنگر خمیری تیر از آثار سخت‌شوندگی در آن صرف‌نظر کرد. براساس این ظرفیت و با توجه به نمودار لنگر خمشی تحت بار جانبی در قاب‌های خمشی، که لنگر در وسط تیر تقریباً صفر است، می‌توان نیروی برشی موجود در تیر را محاسبه کرد. در شکل ۴، مقدار این نیروی برشی به صورت P_E در انتهای تیر نشان داده شده است. در این حالت نیروی محوری فشاری وارد بر هر ستونک میراگر لوله‌یی از تقسیم این نیرو بر تعداد ستونک‌ها به دست می‌آید که در شکل ۴ قابل مشاهده است. البته فرض برابر بودن مقدار نیروی فشاری تمام لوله‌ها در جهت



شکل ۶. توزیع تنش در مقطع میراگر لوله‌یی در حالت تشکیل مفصل خمیری با در نظر گرفتن اثر سخت‌شوندگی.

که در آن، نیروی برشی ناشی از زلزله در تیر (به صورت نیروی محوری ستونک‌ها منتقل خواهد شد)، تعداد ستونک‌ها (۲ برابر تعداد لوله‌ها)، θ زاویه‌ی محل لنگر مطابق شکل ۵، θ زاویه‌ی انتهای ستونک میراگر در طول آزاد میراگر (مطابق شکل ۵)، نیروی برشی وارد شده بر هر ستونک میراگر و M لنگر ایجاد شده در انتهای ستونک میراگر (رابطه‌ی ۱) است.

در این حالت زاویه‌ی محل لنگر بیشینه در داخل ستونک با استفاده از مشتق‌گیری به صورت رابطه‌ی ۴ به دست خواهد آمد:

$$\theta_{M_{\max}} = \tan^{-1} \left(\frac{n \times F}{P_E} \right) \leq \theta. \quad (4)$$

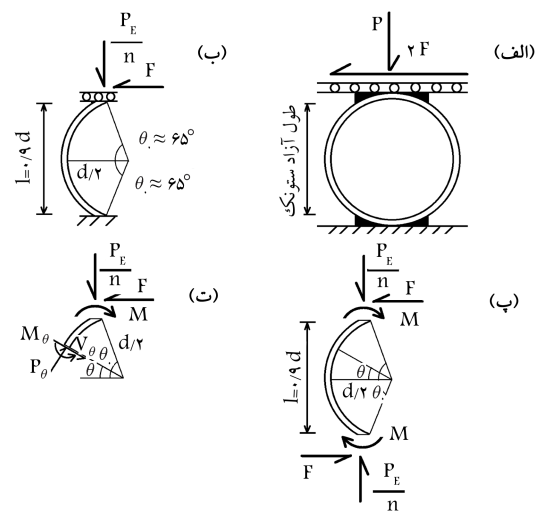
که در آن، $\theta_{M_{\max}}$ زاویه‌ی محل ایجاد لنگر بیشینه در داخل ستونک است که حداکثر با زاویه‌ی انتهای ستونک میراگر (θ) برابر است. در حالتی که بار محوری اعمال شده به ستونک (P_E/n) نسبت به نیروی برشی ناشی از انتقال لنگر خمشی از تیر به ستون (F)، به میزان قابل توجهی کمتر باشد، مفاصل خمیری در دو انتهای ستونک میراگر تشکیل خواهد شد. با افزایش نسبت بار محوری به نیروی برشی، مفاصل خمیری به سمت میانه‌ی ستونک حرکت خواهند کرد و در حالت عدم وجود نیروی برشی، یک مفصل خمیری در میانه‌ی ستونک تشکیل می‌شود.

برای محاسبه‌ی ظرفیت خمشی ستونک میراگر لوله‌یی، اثر اضافه مقاومت ناشی از سخت‌شدگی مصالح مطابق شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن سخت‌شوندگی در میراگر لوله‌یی به این دلیل است که میراگر لوله‌یی نقش فیوز را در سازه ایفا می‌کند و افزایش ظرفیت پیش‌بینی نشده‌ی آن موجب آسیب دیدن اعضا اصلی سازه خواهد شد. این موضوع برخلاف فلسفه‌ی استفاده از میراگرهای جاری‌شونده در سازه است. بنابراین ظرفیت میراگر لوله‌یی را باید با در نظر گرفتن اثر سخت‌شوندگی برآورد کرد. با توجه به شکل ۶، بیشینه‌ی ظرفیت خمشی ستونک میراگر به صورت رابطه‌ی ۵ قابل محاسبه است:

$$M_{cr} = \frac{b \times t^3 \times F_y}{4} + \frac{b \times t^3 \times (F_u - F_y)}{6} \quad (5)$$

که در آن، M_{cr} ظرفیت خمشی خمیری میراگر لوله‌یی با در نظر گرفتن اثر سخت‌شوندگی در لوله (مطابق شکل ۶)، F_y تنش تسلیم مصالح لوله، F_u تنش نهایی مصالح لوله، t ضخامت لوله و b طول لوله (عرض ستونک) است.

برای طراحی لوله‌های مورد استفاده در میراگر لوله‌یی، ابتدا تعداد لوله‌های مورد نظر برای استفاده در میراگر تعیین شده است. سپس با استفاده از ظرفیت مورد نظر برای طراحی میراگر (بر حسب درصدی از ظرفیت خمیری تیر)، نیروهای وارد بر هر ستونک میراگر مطابق شکل ۵ تعیین شده است. از قراردادن روابط ۱، ۲ و ۴ در رابطه‌ی ۳، بیشینه‌ی لنگر خمشی بر حسب نیروی برشی ستونک و نیروی محوری وارد بر آن تعیین شده است. در این حالت می‌توان با برابر قرار دادن بیشینه‌ی



شکل ۵. نیروهای داخلی ستونک میراگر لوله‌یی تحت بارهای وارده.

ساده‌سازی انجام شده است. در شکل مذکور، d قطر هر یک از لوله‌ها و n تعداد ستونک‌ها (دو برابر تعداد لوله‌ها، به شکل ۲ مراجعه شود) را نشان می‌دهد.

با توجه به استفاده از جوش برای اتصال میراگر لوله‌یی، طول آزاد ستونک کمتر از قطر لوله است (حدود ۰/۹ قطر لوله) که در این حالت نیروهای اعمال شده به ستونک میراگر مطابق شکل ۵ ب بوده و ستونک میراگر، قسمتی از یک کمان است. با استفاده از روابط تعادل و با توجه به نیروهای اعمالی به ستونک میراگر مطابق شکل ۵ ب، لنگر خمشی ایجاد شده در تکیه‌گاه‌های ستونک در حالت خطی به صورت رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$M = \frac{F \times l}{2} \quad (1)$$

که در آن، M لنگر ایجاد شده در انتهای ستونک میراگر (شکل ۵)، F نیروی برشی وارد شده بر هر ستونک میراگر ناشی از انتقال لنگر خمشی از تیر به ستون و l نیز طول آزاد ستونک است. با توجه به اینکه ظرفیت میراگر براساس درصدی از لنگر خمیری تیر تعیین می‌شود، می‌توان نیروی برشی F را براساس ظرفیت در نظر گرفته شده برای میراگر، ارتفاع و تعداد ستونک‌ها به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد:

$$F = \frac{M_p \times l}{n \times h_T} \quad (2)$$

که در آن، F نیروی برشی وارد بر ستونک میراگر، M_p درصدی از لنگر خمیری تیر، n تعداد ستونک‌ها (۲ برابر تعداد لوله‌ها) و h_T فاصله‌ی بین مرکز T بالایی و T پایینی متصل شده به ستون است.

با توجه به محاسبه‌ی لنگرهای ایجاد شده در تکیه‌گاه‌های ستونک، ستونک میراگر مطابق شکل ۵ پ تحت تأثیر نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در دو انتهای خود قرار دارد. در این حالت با افزایش نیروهای ذکر شده، لنگر خمشی داخلی در ستونک تحت نیروهای مذکور موجب ایجاد مفاصل خمیری در نقاط لنگر بیشینه خواهد شد. برای محاسبه‌ی محل مفاصل خمیری ذکر شده می‌توان لنگر داخلی ستونک را براساس روابط تعادل بخشی از ستونک تحت نیروهای داخلی و خارجی مطابق شکل ۵ ت محاسبه کرد. با توجه به اینکه ستونک بخشی از یک کمان است، می‌توان رابطه‌ی لنگر خمشی داخلی ستونک بر حسب زاویه‌ی θ را به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه کرد:

$$M_\theta = M + \frac{P_E}{n} \frac{d}{4} (\cos \theta - \cos \theta_0) - F \frac{d}{4} (\sin \theta_0 - \sin \theta) \quad (3)$$

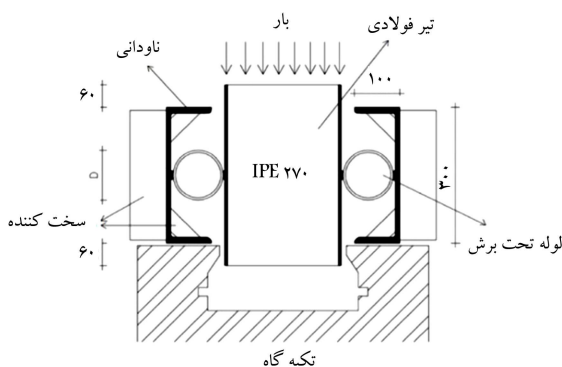
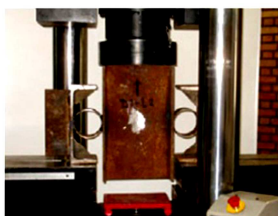
میراگر لوله‌یی قسمت ۱.۲.۳ ارائه شده است. در نواحی تماس بین دو سطح فولادی برای شبیه‌سازی رفتار جداشدگی و برخورد دو سطح از مدل رفتاری تماسی به صورت تماس سطح به سطح^۲ و رفتار مماسی^۳ با ضریب اصطکاک بین دو سطح فولادی برابر ۰/۲، در نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. صحت این فرض در صحت‌سنجی اتصال فولادی دارای میراگر شکاف‌دار قسمت ۳.۲.۳ نشان داده شده است.

۳.۲.۳. صحت‌سنجی مدل‌سازی با استفاده از روش المان محدود

به منظور صحت‌سنجی رفتار اتصالات فولادی و میراگر لوله‌یی با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی مذکور شامل یک نمونه‌ی آزمایشی میراگر لوله‌یی و ۳ نمونه‌ی اتصال بوده و برای صحت‌سنجی میراگر لوله‌یی از نتایج آزمایشی در سال ۲۰۱۱^[۱۱] استفاده شده است. برای بررسی صحت مدل‌سازی اتصالات فولادی در روش المان محدود از ۳ نمونه‌ی آزمایشگاهی دیگر در پژوهشی در سال ۲۰۰۹، استفاده شده است که شامل یک نمونه‌ی اتصال جوشی متداول (نمونه‌ی W) و ۲ نمونه‌ی اتصال خمشی دارای میراگر جاری‌شونده‌ی شکاف‌دار (نمونه‌های D۱ و D۲) بوده است.^[۷]

۳.۲.۳.۱. میراگر لوله‌یی

استفاده از میراگر لوله‌یی تحت تغییر شکل‌های برشی نخستین بار در سال ۲۰۱۰ به منظور استفاده در پل‌ها بررسی شده است.^[۱۲] برای این منظور، آزمایش‌هایی بر روی رفتار لوله‌های تحت برش به صورت شکل ۷ انجام شده است.^[۱۱] در شکل ۸، نحوه‌ی المان‌بندی نمونه و توزیع تنش فون میسر در لحظه‌ی متناظر با جابجایی نهایی در نمونه نشان داده شده است. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی در شکل ۹، نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسب نتایج است. در شکل مذکور، همچنین قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری مناسب میراگر لوله‌یی قابل مشاهده است.



شکل ۷. جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی میراگر لوله‌یی تحت برش.^[۱۱]

ظرفیت خمشی میراگر (رابطه‌ی ۵) با لنگر خمشی پیشینه‌ی ایجاد شده در ستونک، ابعاد مناسب شامل: قطر، طول لوله و ضخامت جداره‌ی لوله‌ی مورد استفاده برای میراگر لوله‌یی پیشنهادی را تعیین کرد. در رابطه‌ی ۶، پیشینه‌ی لنگر خمشی در ستونک میراگر با ظرفیت خمشی ستونک میراگر برابر قرار داده شده است:

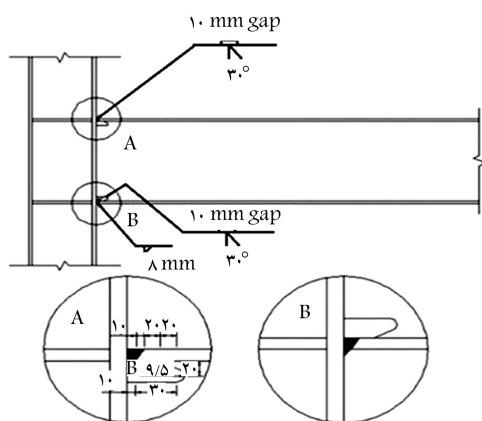
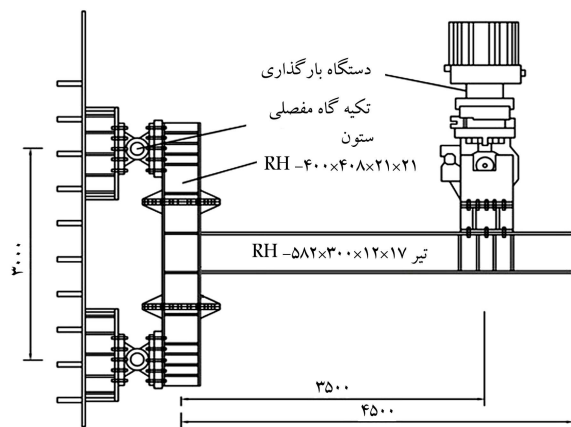
$$\frac{b \times t^2}{6} (F_u + 0.5 F_y) = \frac{F \times l}{2} + \frac{P_E d}{n} \left(\cos \theta_{M_{\max}} - \cos \theta_0 \right) - F \frac{d}{4} (\sin \theta_0 - \sin \theta_{M_{\max}}) \quad (6)$$

در شکل ۴، فقط اثر نیروی جانبی زلزله نشان داده شده است. برای اضافه کردن اثر بار ثقلی در طراحی اتصال، تغییری در مراحل فوق ایجاد نمی‌شود و فقط برای محاسبه‌ی نیروی فشاری وارد بر هر ستونک میراگر (P)، مقدار بار ثقلی ایجاد شده در نیمی از دهانه‌ی تیر به مقدار نیروی برشی ناشی از زلزله (P_E) اضافه می‌شود و نیروی برشی تیر، مجموعه‌ی دو نیروی برشی ناشی از زلزله و نیروی ناشی از بار ثقلی نیمی از دهانه خواهد بود. با توجه به اینکه ظرفیت میراگر براساس درصدی از لنگر خمیری تیر تعیین می‌شود، مقدار نیروی برشی (F) و لنگر خمشی (M) موجود در هر ستونک میراگر تغییری نخواهد کرد.

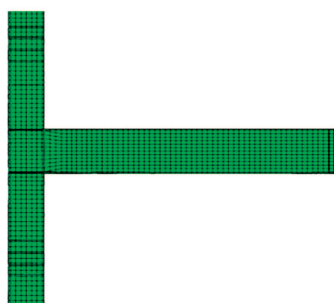
۳. تحلیل عددی

۳.۱. کلیات

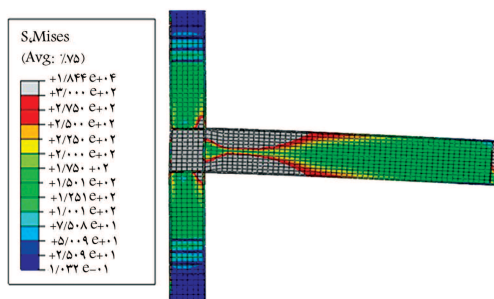
برای بررسی رفتار جانبی اتصالات خمشی فولادی از مدل‌سازی عددی به روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است. در مدل‌سازی نمونه‌های مورد بررسی از المان‌های سه‌بعدی مرتبه‌ی دوم ۲۰ گره‌یی با انتگرال‌گیری کامل ($C3D20$) استفاده شده است. به منظور افزایش دقت محاسبات، اثرات هندسه‌ی غیرخطی در محاسبات لحاظ شده است.^[۱۳] ابعاد المان‌ها در محل اتصال بین ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر و در سایر قسمت‌ها بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی اتصال فولادی، جوشی متداول حدود ۶۰۰۰ المان و در مدل‌سازی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی و شکاف‌دار، بین ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ المان از نوع المان سه‌بعدی مرتبه‌ی دوم ۲۰ گره‌یی ($C3D20$) استفاده شده است. در اتصالات دارای میراگر برای تحلیل نمونه‌ها در نرم‌افزار از روش تحلیل استاتیکی با الگوریتم هم‌گرایی نیوتن-رافسون (Static, General) استفاده شده است. با توجه به وجود تقارن در صفحه‌ی اتصال نمونه‌ها، نصف هندسه‌ی اتصال شبیه‌سازی شده و از شرایط مرزی مناسب در محل تقارن استفاده شده است. مدول کشسانی فولاد برابر $2 \times 10^5 \text{ MPa}$ و نسبت بواسون آن برابر ۰/۳ و خصوصیت رفتاری آن براساس معیار فون میسر در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، منحنی‌های تنش-کرنش مصالح فولادی به صورت دو خطی و با رفتار چرخه‌یی سینماتیک در نظر گرفته شده است. در محل‌هایی که جوش‌ها به صورت نفوذی است، با توجه به این موضوع که فاز جوش مقاومت بیشتری نسبت به فولاد نرمه‌ی معمولی دارد و حجم جوش نسبت به فاز پایه محدود است، از مدل‌سازی جوش‌های نفوذی صرف‌نظر شده است. صحت این فرض در صحت‌سنجی‌های انجام شده نشان داده شده است. در اتصال میراگر لوله‌یی به تکیه‌گاه با توجه به نحوه‌ی اتصال مطابق شکل ۲ و حجم قابل توجه جوش مورد استفاده در ناحیه‌ی مذکور، تغییر شکل‌ها در جداره‌ی لوله ایجاد می‌شود و در ناحیه‌ی اتصال لوله به تکیه‌گاه تقریباً تغییرشکلی ایجاد نمی‌شود (شکل ۲). با توجه به این موضوع، در مدل‌سازی اتصال جداره‌ی لوله به تکیه‌گاه از ابزار قید (Tie) برای ثابت نگه‌داشتن دو قسمت نسبت به هم استفاده شده است. صحت این فرض در صحت‌سنجی



شکل ۱۰. مشخصات هندسی نمونه‌ی W.V. [۷]

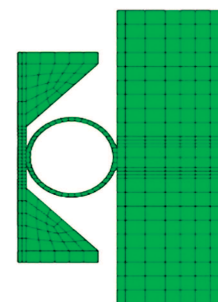


الف) نحوه‌ی المان بندی؛

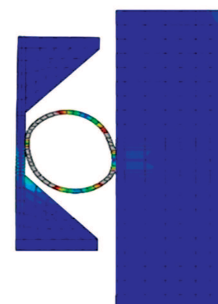


ب) توزیع تنش فون میسز.

شکل ۱۱. اتصال خمشی جوشی متداول.

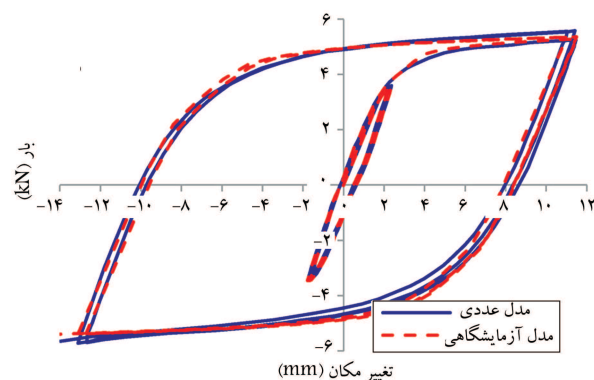


الف) نحوه‌ی المان بندی؛



ب) توزیع تنش فون میسز.

شکل ۸. میراگر لوله‌یی.



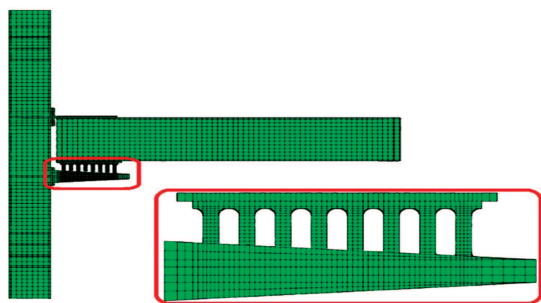
شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی بار تغییر مکان عددی و آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌یی.

۲.۲.۳. اتصال خمشی جوشی متداول

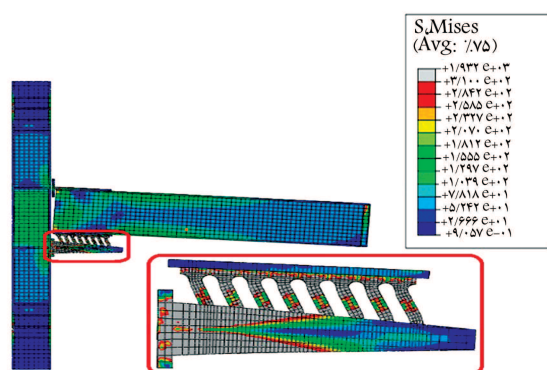
نمونه‌ی اول آزمایش شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ [۷] یک نمونه‌ی اتصال خمشی فولادی (W) نشان داده شده در شکل ۱۰ بوده است. در اتصال مذکور از جوش نفوذی با نفوذ کامل برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است. در شکل ۱۱، نحوه‌ی المان بندی نمونه و توزیع تنش فون میسز در لحظه‌ی متناظر با جابجایی نهایی در مدل المان محدود نشان داده شده است. مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۲، نشان دهنده‌ی شبیه سازی مناسب رفتار اتصال است.

۳.۲.۳. اتصالات خمشی فولادی دارای میراگر شکاف دار

نمونه‌های دیگر اتصال فولادی آزمایش شده در سال ۲۰۰۹ [۷] شامل ۲ نمونه‌ی اتصال خمشی فولادی دارای میراگرهای جاری شونده‌ی شکاف دار با ظرفیت‌های متفاوت ۳۴٪ و ۶۳٪ (نمونه‌ی D۱ و D۲) بوده است که در اینجا با استفاده از

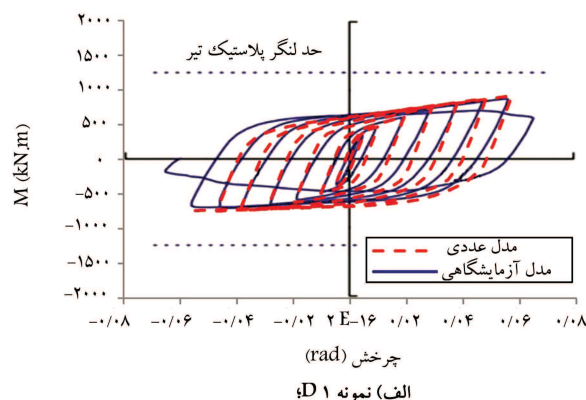


الف) المان بندي ؛

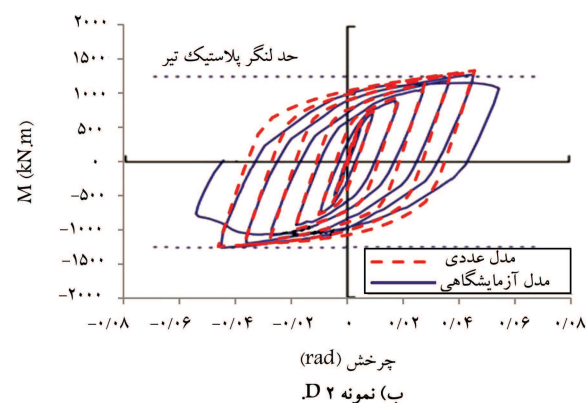


(ب) توزیع تنش فون میسر.

شکل ۱۴. اتصال خمشی فولادی دارای میراگر شکافدار (نمونه D۸).

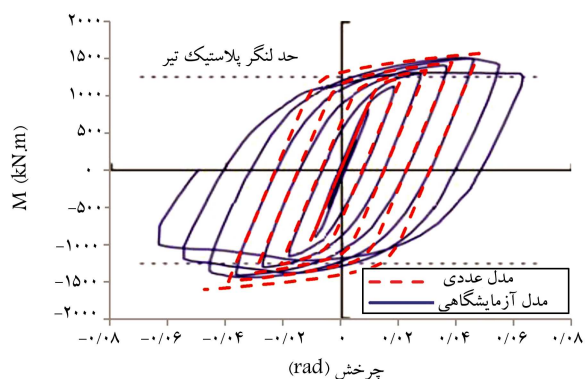


الف) نمونه ۱ D؛



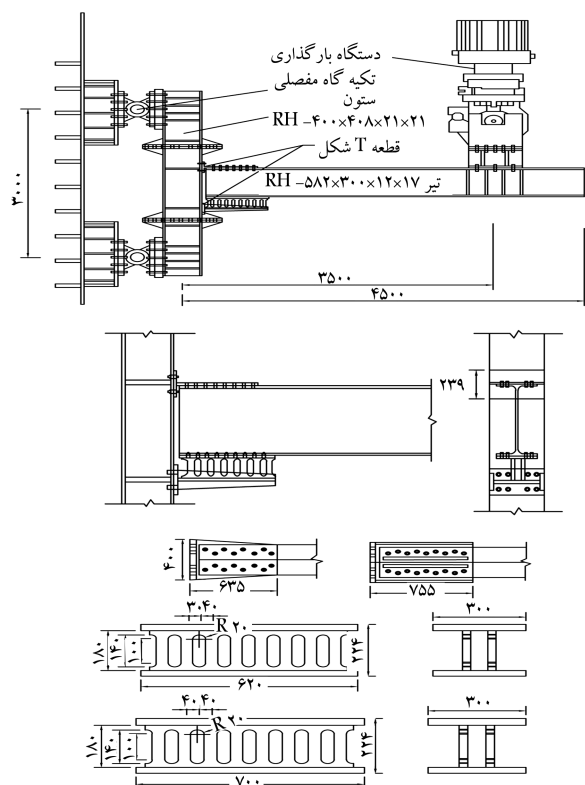
(ب) نمونه ۲ D.

شکل ۱۵. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران حاصل از مدل المان محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی.



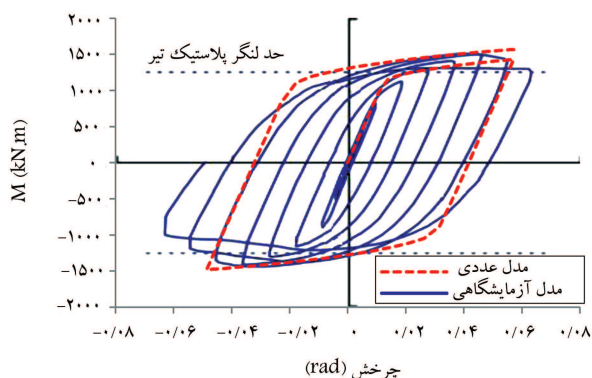
چرخش (rad)

شکل ۱۲. منحنی لنگر در برابر تغییر مکان نسبی طبقه‌ی حاصل از نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای نمونه‌ی W.

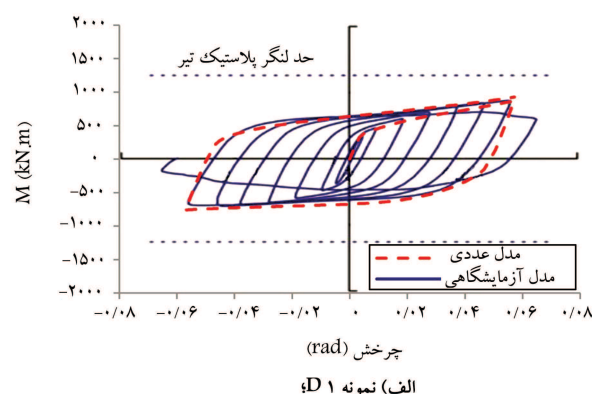


شکل ۱۳. هندسه‌ی اتصالات فولادی دارای میراگر شکاف‌دار (نمونه‌های D۱ و D۲).

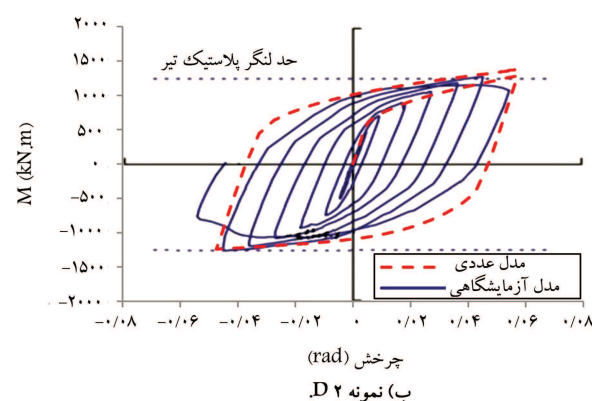
مدل‌سازی المان محدود بررسی شده است. طراحی میراگرهای شکافدار به ترتیب برای انتقال ۳۴٪ و ۶۳٪ لنگر خمیری تیر به ستون انجام شده است. با افزایش لنگر در تیر، مفاصل خمیری ایجادشده در میراگر شکافدار از افزایش لنگر خمشی منتقل شده به ستون جلوگیری می‌کند که مشابه این مسئله در میراگر لوله‌یی پیشنهادی نیز وجود دارد. جزییات اتصال و میراگر شکافدار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴، نحوه‌ی المان‌بندی و توزیع تنش فون میسز در مدل‌سازی نمونه‌ی D۱ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشی ۲ نمونه‌ی D۱ و D۲ در شکل ۱۵، نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب شبیه‌سازی به روش المان محدود در نمونه‌های مذکور است.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران عددی تحت یک سیکل بارگذاری با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی W.

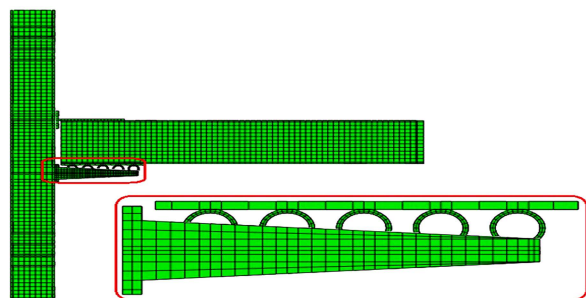


الف) نمونه D1



ب) نمونه D2

شکل ۱۷. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران عددی تحت یک سیکل بارگذاری با نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۱۸. نحوه‌ی المان‌بندی نمونه‌های دارای میراگر لوله‌یی.

۴. اتصال خمشی دارای میراگر لوله‌یی

۴.۱. معیار مقایسه‌ی اتصالات خمشی دارای میراگر لوله‌یی

به منظور مقایسه‌ی نتایج اتصالات خمشی دارای میراگر لوله‌یی و نتایج آزمایشگاهی اتصالات فولادی جوشی متداول و سایر اتصالات دارای میراگر، از نمونه‌های آزمایشگاهی در سال ۲۰۰۹ (شکل‌های ۱۰ و ۱۳)، استفاده شده است.^[۷] در این حالت میراگر لوله‌یی پیشنهادی (قسمت ۱۰.۲) با ظرفیت‌های ۳۴٪ و ۶۳٪ در بال پایشی اتصال قرار داده شده است. هدف از پژوهش حاضر، مقایسه‌ی سختی، مقاومت پیشینه و جذب انرژی در اتصالات فولادی خمشی جوشی متداول، خمشی دارای میراگر شکاف‌دار و خمشی دارای میراگر لوله‌یی جاری‌شونده است. با توجه به یکسان بودن ابعاد تیر و ستون و نحوه‌ی بارگذاری برای تمام اتصالات مورد بررسی، برای سهولت در مقایسه‌ی نتایج، در تمام اتصالات مورد بررسی فقط از بیرونی‌ترین حلقه‌ی بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی استفاده شده است. در این حالت انتهای تیر تحت اعمال جابجایی به میزان بیرونی‌ترین حلقه‌ی جابجایی آزمایشگاهی به صورت چرخشی قرار گرفته است.

نتایج تحلیل در این حالت برای نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت شکل‌های ۱۶ و ۱۷ قابل مشاهده است که مطابق آن‌ها با در نظر گرفتن رفتار بیرونی‌ترین حلقه‌ی بارگذاری آزمایشگاهی در تحلیل اجزاء محدود، رفتار منحنی لنگر - دوران عددی و آزمایشگاهی برای حلقه‌ی مذکور تطابق خوبی دارد و از منحنی عددی مذکور برای مقایسه‌ی نتایج در بررسی رفتار اتصال دارای میراگر لوله‌یی استفاده خواهد شد.

۴.۲. جزئیات اتصالات مورد بررسی

براساس روش طراحی ذکر شده برای میراگر لوله‌یی پیشنهادی (قسمت ۲.۲)، طراحی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با جزئیات مطابق شکل ۳ انجام شده است. با توجه به اینکه از اتصالات طراحی شده در این قسمت به منظور مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است، ابعاد و هندسه‌ی اتصالات مورد بررسی دارای میراگر لوله‌یی مشابه اتصال شکل ۱۳ و مشخصات مصالح مورد استفاده مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات میراگر لوله‌یی در اتصالات مورد بررسی براساس ظرفیت‌های مختلف به صورت جدول ۲ محاسبه شده است. با توجه به اینکه هندسه‌ی اتصال، مشابه اتصال شکل ۱۳ است؛ در این حالت نیز بارگذاری نمونه‌ها به صورت اعمال جابجایی به انتهای تیر به میزان ۱۷۰ میلی‌متر (دریافت حدود ۶٪) و به صورت چرخشی انجام شده است. شکل ۱۸، نحوه‌ی المان‌بندی نمونه‌های دارای میراگر لوله‌یی را در حالت کلی نشان می‌دهد.

۴.۳. تحلیل و مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های با ظرفیت ۳۴٪ و ۶۳٪

نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۱۹، نتایج عددی منحنی لنگر - دوران نمونه‌های میراگر لوله‌یی با ظرفیت ۳۴٪ و ۶۳٪ در مقایسه با نتایج عددی منحنی لنگر - دوران نمونه‌ی جوشی آزمایشگاهی نشان داده شده است. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت میراگر لوله‌یی، لنگر خمشی نهایی تحمل شده در اتصال افزایش یافته و به حد لنگر خمیری تیر نزدیک شده است.

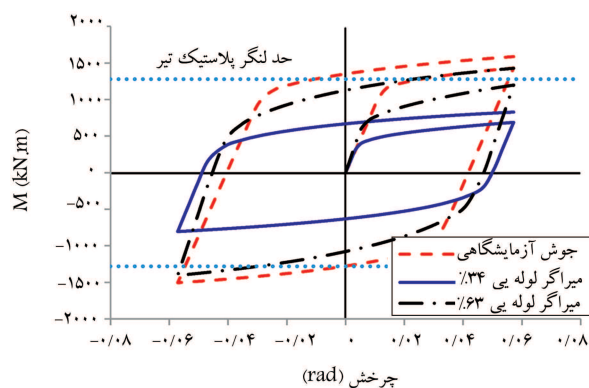
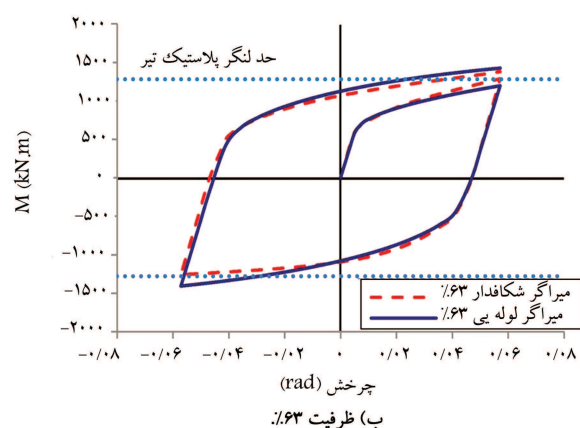
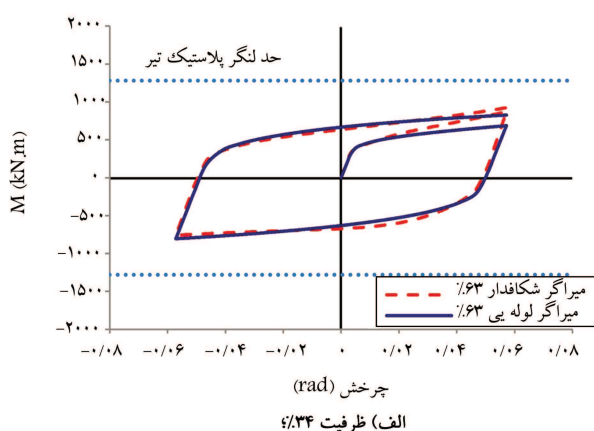
در شکل ۲۰، منحنی لنگر - دوران حاصل از تحلیل المان محدود اتصال دارای میراگر لوله‌یی و اتصال دارای میراگر شکاف‌دار آزمایشگاهی،^[۷] با ظرفیت‌های ۳۴٪ و ۶۳٪ مقایسه شده است. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که رفتار اتصال

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در اجزاء مختلف اتصالات مورد بررسی.

نمونه‌ی آزمایشی	ضخامت (mm)	نوع فولاد	تنش جاری شدن (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
تیر	۱۲=جان	SS۴۰۰	۳۳۹	۴۸۸	۲۷
	۱۷=بال	SS۴۰۰	۳۱۸	۴۸۰	۳۰
ستون	۲۰=جان	SS۴۹۰	۳۹۵	۵۵۴	۲۷
	۲۰=بال	SS۴۹۰	۳۷۸	۵۵۱	۲۴
مقطع T شکل	۲۲=جان	St۳۷	۲۴۰	۳۷۰	۳۰
	۳۵=بال	St۳۷	۲۴۰	۳۷۰	۳۰
میراگر لوله‌یی	جدول ۲	St۳۷	۲۴۰	۳۷۰	۳۰

جدول ۲. مشخصات میراگر لوله‌یی.

ظرفیت میراگر لوله‌یی (%)	طول لوله (mm)	ضخامت لوله (mm)	قطر لوله (mm)	تعداد لوله
۳۴	۳۰۰	۹/۳	۱۰۰	۵
۵۰	۳۰۰	۱۱/۰	۱۰۰	۵
۶۳	۳۰۰	۱۲/۱	۱۰۰	۵
۷۰	۳۰۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵
۸۰	۳۰۰	۱۳/۴	۱۰۰	۵
۹۰	۳۰۰	۱۴/۱	۱۰۰	۵
۱۰۰	۳۰۰	۱۴/۷	۱۰۰	۵



شکل ۱۹. منحنی لنگر - دوران اتصالات خمشی دارای میراگر لوله‌یی ۳۴٪، میراگر لوله‌یی ۶۳٪ و اتصال جوشی متداول.

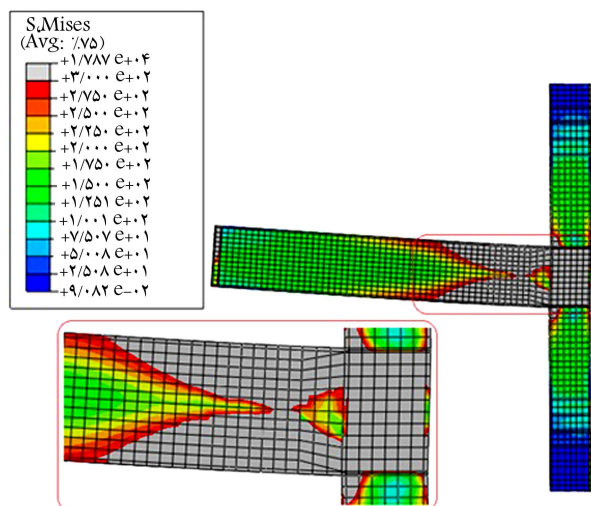
شکل ۲۰. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران اتصالات دارای میراگر لوله‌یی و میراگر شکافدار.

قابل ملاحظه‌ی از تیر در اتصال جوشی متداول بیشتر است و موجب کاهش طول آزاد تیر خواهد شد. این موضوع باعث افزایش سختی اولیه‌ی اتصال در اتصالات دارای میراگر خواهد شد. با افزایش ظرفیت میراگر از ۳۴٪ به ۶۳٪ سختی اولیه حدود ۲۰٪ افزایش پیدا می‌کند که این موضوع با توجه به افزایش ضخامت‌ها در اجزاء میراگر با ظرفیت بالاتر قابل انتظار است.

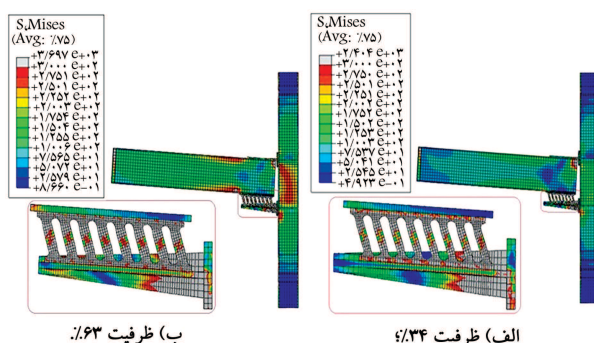
دارای میراگر لوله‌یی و اتصال دارای میراگر شکافدار با ظرفیت‌های یکسان مشابه است. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، سختی اولیه‌ی اتصال محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول مذکور، سختی اولیه‌ی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی و میراگر شکافدار با ظرفیت‌های مختلف بر حسب سختی اولیه‌ی اتصال جوشی متداول نشان داده شده است. همچنین در جدول مشاهده می‌شود که در تمام حالات سختی اولیه‌ی اتصالات دارای میراگر از سختی اولیه‌ی اتصال جوشی متداول بیشتر است. دلیل اصلی این موضوع این است که در محل استفاده از میراگر به دلیل افزایش قابل توجه ارتفاع مقطع، سختی تیر به میزان

جدول ۳. سختی اولیه در نمونه‌ها.

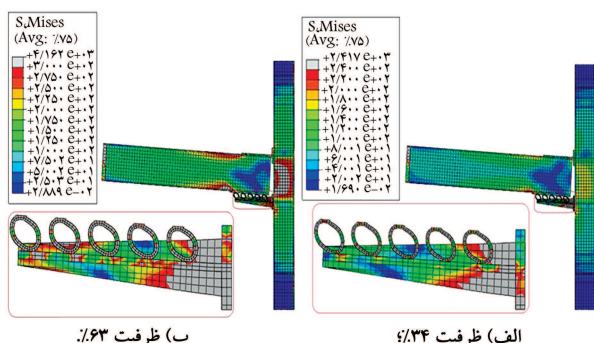
نمونه	میراگر لوله‌یی		میراگر شکاف‌دار		جوشی متداول
	٪۶۳	٪۳۴	٪۶۳	٪۳۴	
سختی اولیه (kN/m)	۱۱۸۲۵۰	۹۶۱۵۰	۱۲۵۷۵۰	۱۰۵۵۲۰	۹۱۵۵۰
سختی اولیه نسبت به اتصال جوشی متداول	۱/۲۹	۱/۰۵	۱/۳۷	۱/۱۵	۱



شکل ۲۱. توزیع تنش فون میسز در لحظه‌ی متناظر با جابجایی نهایی در اتصال خمشی جوشی متداول.



شکل ۲۲. توزیع تنش فون میسز در لحظه‌ی متناظر با جابجایی نهایی در اتصال خمشی دارای میراگر شکاف‌دار.



شکل ۲۳. توزیع تنش فون میسز در لحظه‌ی متناظر با جابجایی نهایی در اتصال خمشی دارای میراگر لوله‌یی.

بیشینه‌ی مقاومت خمشی اتصالات مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس این جدول می‌توان گفت که بیشینه‌ی مقاومت خمشی اتصال نیز وابستگی زیادی به نحوه‌ی طراحی میراگر دارد و با بالا رفتن ظرفیت میراگر، مقدار مقاومت نهایی خمشی افزایش می‌یابد. همچنین کاهش در ظرفیت طراحی میراگر باعث می‌شود که مقاومت نهایی اتصال نسبت به اتصال جوشی متداول کاهش یابد. البته این موضوع با توجه به فرضیات موردنظر برای کنترل خسارت در تیر و ستون موردانتظار است. به منظور مقایسه‌ی رفتار اتصالات از نظر نحوه‌ی استهلاک انرژی، میزان انرژی مستهلک شده ناشی از ایجاد تغییر شکل‌های خمیری در قسمت‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. در جدول مذکور، انرژی مستهلک شده در میراگر و سایر اجزاء اتصال شامل اعضاء اصلی تیر و ستون به تفکیک نشان داده شده و نیز میزان کل انرژی تلف شده تحت بارگذاری چرخه‌ی محاسبه و مقدار آن نسبت به اتصال جوشی متداول نشان داده شده است.

همچنین مطابق جدول مذکور مشاهده می‌شود که حدود ۸۹٪ از انرژی مستهلک شده در اتصالات دارای میراگر جاری‌شونده، توسط میراگر جذب می‌شود و این موضوع سبب می‌شود که میزان خسارت وارد شده به اعضاء اصلی اتصال شامل تیر و ستون به میزان قابل ملاحظه‌ی کاهش یابد. این موضوع در حالی است که در اتصال جوشی متداول، اگرچه میزان جذب انرژی و مقاومت اتصال بیشتر از اتصالات دارای میراگر است؛ ولی این اتصالات پس از زلزله دچار آسیب کلی اعضاء خواهند شد که تعمیر آنها با دشواری و هزینه‌ی قابل توجهی همراه است و در عمده‌ی موارد می‌تواند حتی غیراقتصادی هم باشد. در اتصالات دارای میراگر جاری‌شونده پس از زلزله‌ی میراگر به سادگی و با هزینه‌ی اندک قابل تعویض است.

در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، توزیع تنش فون میسز در اتصالات مورد بررسی در لحظه‌ی متناظر با جابجایی بیشینه قابل مشاهده است. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که بخش قابل توجهی از تیر و ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال تسلیم شده است. در شکل‌های ۲۲ و ۲۳، توزیع تنش در ناحیه‌ی اتصال نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که تغییر شکل‌های خمیری در ناحیه‌ی میراگر متمرکز شده است و اعضاء اصلی شامل تیر و ستون تقریباً در حالت کشسان باقی مانده و فقط در برخی از نقاط به صورت موضعی به مقدار محدودی تسلیم رخ داده است.

۵. محدوده‌ی قابل قبول ظرفیت طراحی میراگر لوله‌یی

به منظور تعیین محدوده‌ی قابل قبول ظرفیت برای طراحی اتصالات دارای میراگر، به بررسی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با ظرفیت‌های ۵۰٪، ۷۰٪، ۸۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت خمیری تیر پرداخته شده است. در این حالت برای تغییر ظرفیت میراگر، ضخامت لوله‌های مورد استفاده تغییر داده شده است. در جدول ۲، مشخصات میراگرهای لوله‌یی مورد استفاده نشان داده شده است. همانند قسمت قبل، سایر مشخصات اتصالات مورد بررسی در این قسمت مطابق جدول ۱ است.

در جدول‌های ۶ و ۷، به ترتیب سختی اولیه‌ی نمونه‌ها و مقاومت بیشینه‌ی

جدول ۴. بیشینه‌ی مقاومت خمشی اتصالات مورد بررسی.

نمونه	میراگر لوله‌یی		میراگر شکاف‌دار		جوشی متداول
	%۳۴	%۶۳	%۳۴	%۶۳	
بیشینه‌ی مقاومت خمشی (kN.m)	۱۴۲۵	۸۲۸	۱۳۷۶	۹۲۳	۱۵۶۸
بیشینه‌ی مقاومت نسبت به اتصال جوشی متداول	۰/۹۱	۰/۵۳	۰/۸۸	۰/۵۹	۱

جدول ۵. مقدار انرژی تلف شده توسط میراگرها و قسمت‌های دیگر.

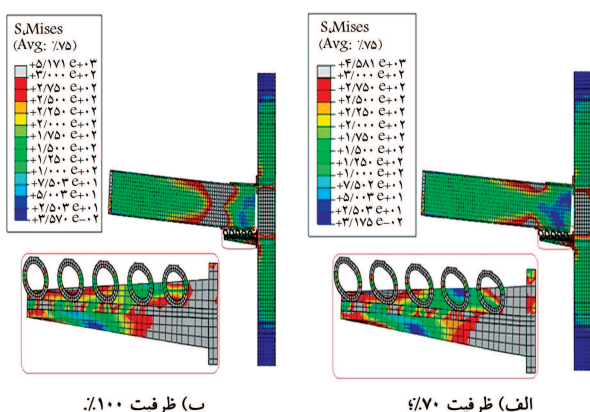
انرژی مستهلک شده	میراگر لوله‌یی		میراگر شکاف‌دار		جوشی متداول
	%۳۴	%۶۳	%۳۴	%۶۳	
میراگر (kJ)	۱۲۹/۰۵	۷۹/۶۶	۱۲۷/۶۶	۸۰/۸۲	۰
%	۹۸/۳	۹۸	۹۸/۳	۹۷/۳	۰
سایر قسمت‌ها (kJ)	۲/۱۹	۱/۶۱	۲/۲۵	۲/۲	۱۴۵/۴۶
%	۱/۷	۲	۱/۷	۲/۷	۱۰۰
انرژی مستهلک شده‌ی کل (kJ)	۱۳۱/۲۴	۸۱/۲۷	۱۲۹/۹۱	۸۳/۰۲	۱۴۵/۴۶
نسبت به اتصال جوشی متداول	۰/۹۰	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۵۷	۱

جدول ۶. سختی اولیه در اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با ظرفیت‌های مختلف.

ظرفیت میراگر لوله‌یی (%)	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۳	۵۰	۳۴
سختی اولیه (kN/m)	۱۲۹۵۰۰	۱۲۷۴۵۰	۱۲۴۷۰۰	۱۲۱۴۵۰	۱۱۸۲۵۰	۱۱۱۱۰۰	۹۶۱۵۰
سختی اولیه نسبت به اتصال جوشی متداول	۱/۴۲	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۳۳	۱/۲۹	۱/۲۱	۱/۰۵

جدول ۷. بیشینه‌ی مقاومت نمونه‌ها.

ظرفیت میراگر لوله‌یی (%)	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۳	۵۰	۳۴
بیشینه‌ی مقاومت (kN/m)	۱۷۷۱	۱۷۴۹	۱۷۰۷	۱۵۶۹	۱۴۲۵	۱۱۷۱	۸۲۸
بیشینه‌ی مقاومت نسبت به اتصال جوشی متداول	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۰۹	۱	۰/۹۱	۰/۷۵	۰/۵۳



شکل ۲۴. توزیع تنش فون میسز در اتصال دارای میراگر لوله‌یی.

نمونه‌های دارای میراگر لوله‌یی نشان داده شده است. در جدول ۶ مشاهده می‌شود که مطابق الگوی قسمت قبل با افزایش ظرفیت طراحی، سختی اولیه‌ی اتصالات مورد بررسی نسبت به اتصال جوشی متداول افزایش یافته است. در جدول ۷، همین موضوع در مورد مقاومت نهایی اتصالات دارای میراگر لوله‌یی مشاهده می‌شود. در جدول مذکور با افزایش ظرفیت میراگر بیشتر از ۷۰٪ لنگر خمیری تیر، بیشینه‌ی مقاومت اتصال از اتصال جوشی متداول بیشتر خواهد شد که دلیل این موضوع ایجاد مفصل خمیری در تیر است. با وجود میراگر لوله‌یی با ظرفیت بالا، مفصل خمیری ایجاد شده در تیر از ستون فاصله می‌یابد و همین موضوع موجب افزایش ظرفیت اتصال نسبت به اتصال جوشی متداول است که در آن مفصل خمیری در بر ستون تشکیل خواهد شد. این موضوع از مقایسه‌ی شکل‌های ۲۱ و ۲۴ قابل درک است. در جدول ۸، تکنیک انرژی تلف شده در میراگر و سایر قسمت‌ها شامل تیر و ستون برای اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق جدول مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت به بیشتر از ۷۰٪،

جدول ۸. تفکیک انرژی تلف شده در اتصالات دارای میراگر لوله‌یی با ظرفیت‌های مختلف.

انرژی مستهلک شده (%)	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۳	۵۰	۳۴
میراگر	(kJ)	۹۲/۵۷	۱۱۴/۵۳	۱۴۰/۶۶	۱۳۸/۹۶	۱۲۹/۰۵	۷۹/۶۶
	%	۵۲/۷	۶۸/۳	۹۰/۶	۹۷/۶	۹۸/۳	۹۸
سایر قسمت‌ها	(kJ)	۸۳/۱۲	۵۳/۰۹	۱۴/۵۳	۳/۴۲	۲/۱۹	۱/۶۱
	%	۴۷/۳	۳۱/۷	۹/۴	۲/۴	۱/۷	۲
استهلاک کل	(kJ)	۱۷۵/۶۹	۱۶۷/۶۱	۱۵۵/۱۹	۱۴۲/۳۸	۱۳۱/۲۴	۸۱/۲۷
نسبت به اتصال جوشی متداول		۱/۲۱	۱/۱۵	۱/۰۷	۰/۹۸	۰/۷۶	۰/۵۶

دارای میراگر شکاف‌دار است و مقاومت، سختی و جذب انرژی مناسبی از خود نشان می‌دهد. در این حالت با توجه به سهولت ساخت و بی‌نیازی به نیروی متخصص برای اجرای اتصال پیشنهاد شده، اتصال دارای میراگر لوله‌یی پیشنهاد شده با هزینه‌ی کمتر و سرعت ساخت بیشتری نسبت به اتصال دارای میراگر شکاف‌دار است. سختی اولیه‌ی اتصال دارای میراگر شکاف‌دار بین ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از اتصال دارای میراگر لوله‌یی است، ولی بیشینه‌ی مقاومت و میزان انرژی مستهلک شده در هر دو نوع اتصال تقریباً برابر است.

۲. بررسی رفتار اتصالات پیشنهادی نشان می‌دهد که میزان لنگر خمشی منتقل شده از تیر به ستون با تغییر مشخصات و تعداد لوله‌های مورد استفاده قابل تعیین است. در این حالت می‌توان از ایجاد مفاصل خمیری نامطلوب در تیرها و ستون‌ها جلوگیری کرد. با افزایش ظرفیت میراگر لوله‌یی از ۳۴٪ به ۷۰٪، مقدار لنگر خمشی منتقل شده توسط اتصال تقریباً دو برابر شده است، در حالی که میزان انرژی مستهلک شده در تیرها و ستون‌ها نسبت به کل انرژی مستهلک شده در اتصال از ۲٪ به ۲۴٪ افزایش پیدا کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی در محدوده‌ی ظرفیت طراحی مذکور به خوبی از ایجاد تغییر شکل‌های خمیری در اعضا اصلی تیر و ستون جلوگیری می‌کند.

۳. نتایج این بررسی نشان داده است که استفاده از میراگرهای لوله‌یی با ظرفیت لنگر خمشی بیش از ۷۰٪ ظرفیت لنگر خمیری تیر، موجب ایجاد تغییر شکل‌های خمیری در اعضا اصلی یعنی تیر و ستون خواهد شد. در میراگرهای با ظرفیت کمتر از ۷۰٪، نسبت انرژی مستهلک شده در تیرها و ستون‌ها کمتر از ۵٪ کل انرژی مستهلک شده در اتصال است، در حالی که در میراگر با ظرفیت ۸۰٪ و ۱۰۰٪ این نسبت به ترتیب به ۱۰٪ و ۵۰٪ افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت میراگر و نزدیک شدن ظرفیت آن به ظرفیت خمیری تیر، باعث ایجاد آسیب در اعضا اصلی تیر و ستون خواهد شد.

۴. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای استفاده‌ی بهینه از ظرفیت خمشی تیر و جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های خمیری نامطلوب در تیرها و ستون‌ها به نظر می‌آید که میراگرهای لوله‌یی پیشنهادی باید به گونه‌ی طراحی شوند که ظرفیت لنگر نهایی آنها حدود ۵۰٪ لنگر خمیری تیر باشد.

تغییر شکل‌های خمیری در سایر اجزاء شامل تیر و ستون افزایش یافته و میزان جذب انرژی در اتصال از اتصال جوشی متداول بیشتر بوده که به این دلیل است که در اتصال جوشی متداول، مفاصل خمیری در تیر و ستون ایجاد می‌شوند، ولی در اتصال دارای میراگر با ظرفیت بالا، علاوه بر تیر و ستون خود میراگر لوله‌یی نیز در معرض تسلیم قرار می‌گیرد. این موضوع از مقایسه‌ی بین شکل‌های ۲۱، ۲۳ ب و ۲۴ قابل مشاهده است. در شکل ۲۴ ملاحظه می‌شود که در اتصال دارای میراگر با ظرفیت ۷۰٪، قسمت‌هایی از تیر و چشمه‌ی اتصال ستون وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شود و در حالت ظرفیت ۱۰۰٪، مفصل خمیری کامل در تیر، ستون و میراگر لوله‌یی ایجاد شده است. براساس نتایج جدول‌های ۷ و ۸ می‌توان گفت که برای جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های خمیری نامطلوب در تیرها و ستون‌ها، ظرفیت طراحی میراگر لوله‌یی در حدود ۵۰٪ ظرفیت خمیری تیر مناسب است و در ظرفیت‌های بیشتر از ۷۰٪، آسیب زیادی به اعضا اصلی تیر و ستون وارد خواهد شد و فلسفه‌ی استفاده از میراگرهای جاری‌شونده را نقض خواهد کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک اتصال خمشی جدید دارای میراگرهای جاری‌شونده‌ی لوله‌یی پیشنهاد شده است. سهولت در ساخت میراگر لوله‌یی پیشنهادی و هزینه‌ی اندک آن و بی‌نیازی به نیروی با تخصص بالا از ویژگی‌های میراگر لوله‌یی پیشنهادی مذکور است. برای سهولت در تعویض میراگر و کاهش هزینه‌ی تعمیرات سازه پس از زلزله، برای اتصال میراگر پیشنهادی به تیر و ستون از اتصال پیچی با پیچ‌های پرمقاومت استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده در این بررسی را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

۱. رفتار اتصال پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی یک اتصال جوشی متداول و دو اتصال دارای میراگر جاری‌شونده‌ی شکاف‌دار مقایسه شده است. مقایسه‌ی بین نتایج اتصالات پیشنهادی با ظرفیت‌های مختلف و اتصالات آزمایشگاهی نشان داده است که اتصال پیشنهاد شده با خصوصیات رفتاری نزدیک به اتصالات

پانوشتها

1. Abaqus
2. surface to surface
3. tangential behavior

منابع (References)

1. Symans, M., Charney, F., Whittaker, A., Constantinou, M., Kircher, C., Johnson, M. and McNamara, R. "Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice and recent developments", *Journal of Structural Engineering*, **134**(1), pp. 3-21 (2008).
2. De Silva, C.W., *Vibration Damping, Control and Design* Press book, 634 p. (2007).
3. Kelly, J.M., Skinner, R. and Heine, A. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering*, **5**, pp. 63-88 (1972).
4. Skinner, R., Kelly, J. and Heine, A. "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **3**(3), pp. 287-296 (1974).
5. Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
6. Kishiki, S., Yamada, S., Suzuki, K., Seaki, E. and Wada, A. "New ductile moment-resisting connections limiting damage to specific elements at the bottom flange", *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, Usa (April 18-22 2006).
7. Oh, S.H., Kim, Y.J. and Ryu, H.S. "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering Structures*, **31**(9), pp. 1997-2008 (2009).
8. Koetaka, Y., Chusilp, P., Zhang, Z., Ando, M., Suita, K., Inoue, K. and Uno, N. "Mechanical property of beam-to-column moment connection with hysteretic dampers for column weak axis", *Engineering Structures*, **27**(1), pp. 109-117 (2005).
9. Speicher, M.S., DesRoches, R. and Leon, R.T. "Experimental results of a NiTi shape memory alloy (SMA)-based recentering beam-column connection", *Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2448-2457 (2011).
10. Nateghi-Elahi, F., Motamedi, M. and Izadi-Zamanabadi, E. "Experimental behavior of the seismic filled accordion metallic dampers, FAMD", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (October 12-17 2008).
11. Maleki, S. and Bagheri, S. "Pipe damper, part I: Experimental and analytical study", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(8-9), pp. 1088-1095 (2010).
12. Maleki, S. and Bagheri, S. "Pipe damper, part II: Application to bridges", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(8-9), pp. 1096-1106 (2010).
13. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "Infilled-pipe damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **98**, pp. 45-58 (2014).
14. Chaofeng, Z., Zhisheng, Z. and Qiuju, Z. "Static and dynamic cyclic performance of a low-yield-strength steel shear panel damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **79**, pp. 195-203 (2012).
15. Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F. and Farzinfar, A. "U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper", *Structures*, **3**, pp. 163-171 (2015).
16. Deng, K., Pan, P., Su, Y. and Xue, Y. "Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading", *Engineering Structures*, **93**, pp. 27-35 (2015).
17. ABAQUS Inc., *ABAQUS/Theory User Manual*, Version 6.8 (2007).