

## ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی با بازشو تقویت شده

محمدعلی برخوردار\* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

سید علی اصغر حسینزاده (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان

مهدی صدیقی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (دوره ۲ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۸۹-۷۹)

در این پژوهش به بررسی تأثیر بازشوهای مستطیلی تقویت شده در مقاومت، سختی اولیه، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی پرداخته شده است. با هدف کاهش تعداد اعضاء تقویتی در لبه‌ی بازشوها و صرفه‌ی اقتصادی بیشتر، بازشوها در کل ارتفاع طبقه فرض شده است. در مطالعات، اثر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه‌ی مدل‌ها و مشخصات بازشوها (طول و موقعیت بازشو) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نتیجه‌ی ورود بازشو، مقاومت ورق متناسب با کاهش در سطح مقطع آن کاهش می‌یابد، در صورتی که به دلیل حضور المان‌های تقویتی به مقاومت قاب همواره افزوده می‌شود. در نتیجه، مقاومت کل سیستم بسته به موقعیت و طول بازشو می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. سختی و شکل‌پذیری سیستم‌ها نیز همواره با ورود بازشو کاهش می‌یابد، اما در صورتی که ابعاد بازشو قابل توجه نباشد، ظرفیت جذب انرژی در سیستم می‌تواند بدون تغییر و یا با افزایش همراه باشد.

واژگان کلیدی: دیوارهای برشی فولادی با بازشو، المان مرزی، مقاومت نهایی، سختی، شکل‌پذیری.

## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW)<sup>۱</sup> به عنوان سیستم مقاوم در مقابل بارهای جانبی مورد توجه پژوهشگران در کشورهای مختلف جهان قرار گرفته است. این سیستم از ورق فولادی سخت شده یا نازک بدون سخت‌کننده، که با قاب فولادی محاط شده، تشکیل شده است. در مقایسه با سایر سیستم‌های باربر جانبی متداول، این سیستم مزایای قابل توجهی از نظر اقتصادی بودن، وزن کم، جذب انرژی و شکل‌پذیری بالا و رفتار هیستریزیس پایدار دارد. همچنین، از مزایای این سیستم، علاوه بر ساختمان‌های نو، برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود نیز می‌توان بهره برد.

در گذشته، طراحی ورق در سیستم دیوار برشی فولادی به کماتش برشی آن محدود می‌شده است. لذا از ورق‌های نسبتاً ضخیم با سخت‌کننده و یا بدون آن استفاده می‌شده است، که استفاده از سیستم مذکور را، به ویژه در مقایسه با سیستم رقیب دیوار برشی بتن‌آرمه، غیراقتصادی می‌کرد. پژوهش‌ها در سال‌های اخیر نشان داده است که وقوع کماتش برشی در ورق به معنای پایان ظرفیت باربری سیستم نیست و با توسعه‌ی میدان کششی قطری در ورق، سیستم می‌تواند حتی پس از کماتش ورق نیز همچنان به باربری خود ادامه دهد. استفاده از این ایده (در نظر گرفتن ظرفیت پس از کماتش ورق) در طراحی دیوارهای برشی فولادی ابتدا در آیین‌نامه‌های کانادا

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۱۱، پذیرش ۱۳۹۳/۷/۲۶.

barkhordar@iust.ac.ir  
ahosseinzade@gmail.com  
mehdiseddighi@civileng.iust.ac.ir

۱ CAN/CSA S16-01<sup>۱</sup> و FEMA ۴۵۰<sup>۲</sup> و سپس، در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌یی آمریکا ۵-۳۴۱-AISC<sup>۳</sup>، و در سال‌های اخیر، در راهنمای ۲۰ Steel Design<sup>۴</sup>، مطرح شده است.

حضور بازشوها با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف در دیوارهای برشی فولادی به دلایل کاربردی اغلب اجتناب‌ناپذیر است. یکی از پرکاربردترین انواع بازشوهای مذکور، بازشوهای مستطیلی درب و پنجره هستند. بازشوهای درب، به ویژه وقتی که دیوارهای برشی فولادی در فضای چشمه‌ی راه پله و بالابر قرار دارد، اغلب برای تأمین عبور و مرور مورد نیاز هستند. همچنین وقتی که دیوار برشی فولادی در قاب پیرامونی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، غالباً استفاده از بازشوهای پنجره برای تأمین نور و روشنایی ضرورت پیدا می‌کند. حضور این بازشوهای بزرگ، باعث اختلال در عملکرد میدان تنش کششی قطری ورق می‌شود و برای جبران این اثر، همان‌طور که در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌یی آمریکا اشاره شده است<sup>۴</sup>، باید در لبه‌های بازشو از المان‌های تقویتی لبه‌یی که تا اعضاء مرزی (تیر و ستون‌ها) امتداد می‌یابند، استفاده شود. ضوابط طراحی دیوارهای برشی فولادی با بازشوهای مستطیلی تقویت شده در راهنمای ۲۰ Steel Design Guide<sup>۴</sup> ارائه شده است.

علی‌رغم اهمیت مقوله‌ی بازشوها و ضرورت بررسی آثار آنها در رفتار سیستم، مطالعات عددی یا آزمایشگاهی معدودی در زمینه‌ی حضور بازشوها در دیوارهای برشی فولادی توسط برخی پژوهشگران صورت گرفته است<sup>۵-۸</sup> به ویژه در زمینه‌ی

حضور بازوهای درب و پنجره در دیوارهای برشی فولادی، که مخصوصاً با الگوی پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های AISC ۳۴۱-۰۵ و Steel Design Guide ۲۰ تقویت شده باشند،<sup>[۲۳]</sup> پژوهش‌های جامعی که به بررسی آثار این بازوها در مشخصه‌های رفتاری سیستم بردارند، بسیار انگشت‌شمار است.

در پژوهشی در سال ۱۹۹۲، اثر بازو دایروی مرکزی در رفتار سیکلی پانل‌های برشی فولادی بررسی و براساس نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد شده است که سختی و مقاومت پانل‌های با بازو را می‌توان به‌صورت محافظه‌کارانه، با اعمال یک ضریب کاهش خطی به سختی و مقاومت پانل بدون بازو نظیر تخمین زد.<sup>[۵]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۵، رفتار ۳ نمونه دیوار برشی فولادی، با مجموعه‌ی منظم از بازوهای دایروی در ورق، و با بازوهای تقویت‌شده‌ی ربع دایره در دو کنج فوقانی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است.<sup>[۶]</sup> همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۶)،<sup>[۷]</sup> برای الگوی خاص از بازوهای دایروی پیشنهاد شده در پژوهش اخیر،<sup>[۶]</sup> رابطه‌ی برای کاهش مقاومت ارائه شده است. برخی پژوهشگران (۲۰۱۲)، نیز اثر تغییر ابعاد و محل قرارگیری بازوهای مستطیلی را بر روی سختی و مقاومت پانل‌های فولادی سخت‌شده (با مجموعه‌ی از ورق‌های افقی و قائم) و بدون سخت‌کننده به‌صورت عددی مطالعه کرده و نتایج آن‌ها نشان داده است که موقعیت بازو مستطیلی اهمیت چندانی در رفتار پانل‌های فولادی سخت‌شده ندارد، در حالی که در مدل‌های بدون سخت‌کننده، سختی و مقاومت پانل با تغییر موقعیت بازو به شدت تغییر می‌کند.<sup>[۸]</sup> در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)،<sup>[۹]</sup> نیز رفتار دیوارهای برشی فولادی نازک با بازوهای مستطیلی بزرگ، که به‌عنوان درب یا پنجره در ساختمان‌های متعارف استفاده می‌شود، با استفاده از روش اجزاء محدود مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته است، و در آن به جهت جبران اثرات بازو و مهار و انتقال نیروهای ناشی از حوضه‌ی کشش قطری ورق به اعضاء مرزی (تیر و ستون‌ها)، مطابق با آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی آمریکا،<sup>[۲]</sup> و راهنمای Steel Design Guide ۲۰،<sup>[۴]</sup> در اطراف بازوها از المان‌های تقویتی افقی و قائم، که تا اعضاء مرزی امتداد داشتند، استفاده شده است. اگرچه استفاده از این المان‌های تقویتی اضافی عملاً می‌تواند با افزایش حجم مصالح مصرفی و عملیات جوشکاری، منجر به افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا شود و به اقتصاد طرح لطمه وارد کند. به هر حال نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که موقعیت، هندسه و نوع درب یا پنجره بودن بازوها به‌تهایی تأثیر خاصی در رفتار سیستم‌های با بازو تقویت‌شده ندارد. به علاوه، با ورود بازو و المان‌های تقویتی پیرامون آن به سیستم مقاومت و سختی سیستم افزایش می‌یابد، در حالی که شکل‌پذیری آن تا حدی کاهش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده همچنین حاکی از آن بودند که نقش المان‌های تقویتی لبه‌ی بازوها در افزایش مقاومت قاب می‌تواند بسیار برجسته باشد.

در این پژوهش به بررسی تأثیر بازوهای مستطیلی با کاربری درب یا پنجره در رفتار دیوارهای برشی فولادی با استفاده از روش المان محدود پرداخته شده

است، و بازوها برخلاف الگوی در نظر گرفته‌شده در پژوهش انجام‌شده در سال ۲۰۱۲،<sup>[۹]</sup> و به جهت سهولت‌های اجرایی و به‌کمینه‌رساندن هزینه‌ها، در کل ارتفاع دیوار فرض شده‌اند. بدین ترتیب، علاوه بر کاهش عملیات جوشکاری بین ورق و اعضاء تقویتی، فقط استفاده از المان‌های تقویتی قائم در اطراف بازوها ضرورت پیدا می‌کند و نیاز به استفاده از المان‌های تقویتی افقی مرتفع می‌شود. لذا پیش‌بینی می‌شود رفتار سیستم با این الگوی جدید بازو (که در آن بازو در کل ارتفاع پانل امتداد دارد) متفاوت از وضعیتی باشد که بازو فقط در بخشی از ارتفاع پانل امتداد دارد و از هر دو نوع المان تقویتی افقی و قائم در لبه‌ی بازوها استفاده شده است.<sup>[۹]</sup> در مطالعات انجام‌شده، تأثیر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه‌ی مدل‌ها و همچنین، طول و موقعیت بازوها در رفتار سیستم‌ها لحاظ و رفتار مدل‌های با بازو از نظر مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و جذب انرژی با مدل‌های بدون بازو نظیر مقایسه شده است.

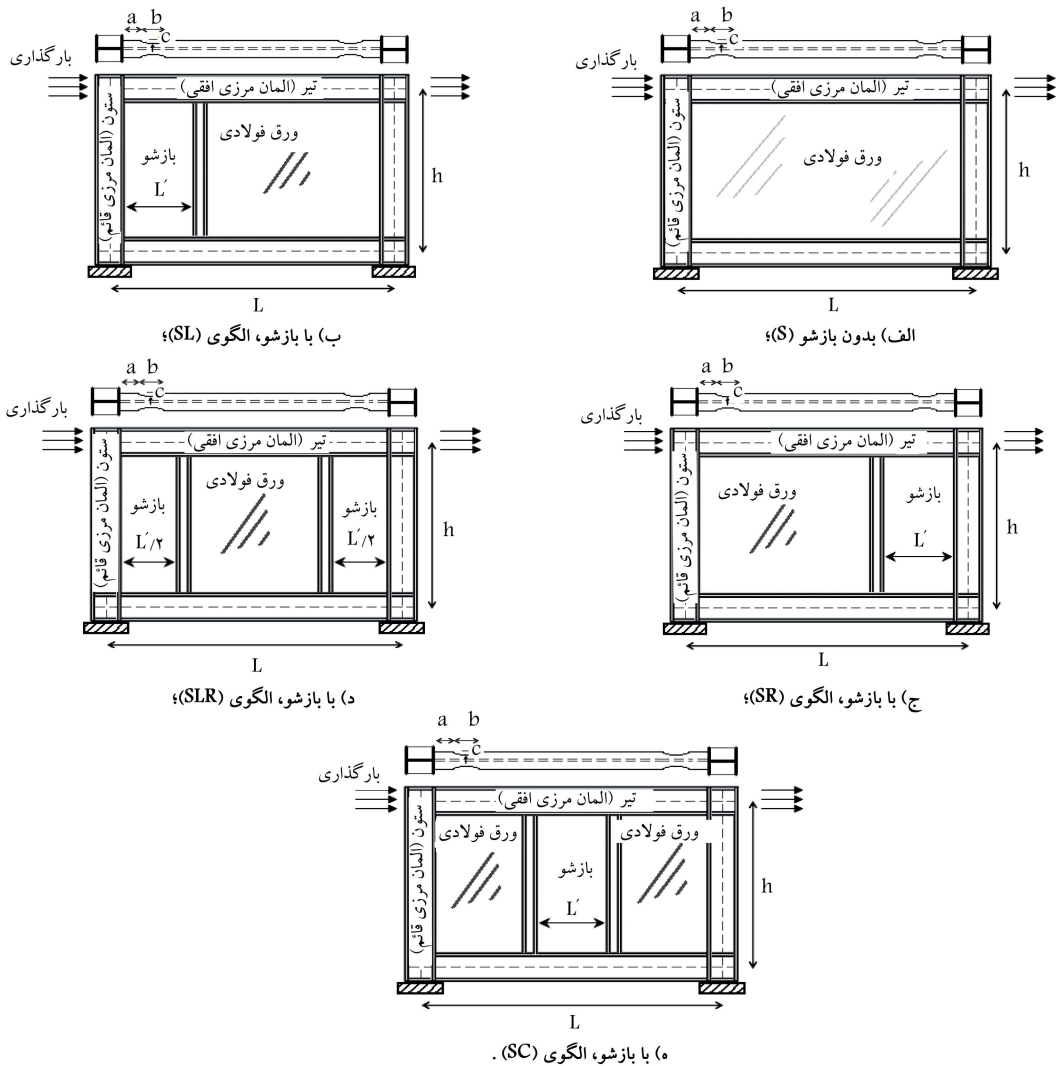
## ۲. روش مطالعه

### ۲.۱. مدل‌ها

در این پژوهش، یک مجموعه مدل‌های دیوارهای برشی فولادی یک طبقه با نسبت‌های متغیر طول دهانه به ارتفاع طبقه و شامل بازوهای مستطیلی با مشخصات مختلف در نظر گرفته شده است. مدل‌های اصلی بدون بازو از پژوهش انجام‌شده در سال ۲۰۱۲،<sup>[۹]</sup> اقتباس شده‌اند؛ که برای سهولت، جزئیات طراحی این مدل‌ها در جدول ۱ دوباره تکرار شده است. طراحی مدل‌های دیوار برشی فولادی مبتنی بر اصول طراحی براساس ظرفیت و مطابق با دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی آمریکا AISC ۳۴۱-۰۵،<sup>[۲]</sup> و راهنمای Steel Design Guide ۲۰،<sup>[۴]</sup> انجام شده است. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۱، در مدل‌های در نظر گرفته‌شده، ارتفاع طبقات ثابت ( $h = ۳/۵$  m) فرض شده است. همچنین به منظور متمرکزکردن محل تشکیل مفاصل خمیری در دو انتهای تیرها و محدودکردن تقاضای خمشی در ستون‌ها، از اتصال RBS<sup>۲</sup> در دو سمت تیرها استفاده شده است. با هدف انجام مطالعات، بازوها در کل ارتفاع دیوار و با طول‌های متغیر ( $L' = ۰/۹, ۱/۲, ۱/۵, ۱/۸, ۲/۱, ۲/۴$  m) و در ۴ الگو با موقعیت بازو متفاوت با فرض اعمال بار از سمت چپ به راست، بازو در سمت چپ مجاور با ستون کششی (الگوی SL)؛ بازو در سمت راست مجاور با ستون فشاری (الگوی SR)؛ دو نیم - بازو در دو سمت و مجاور با ستون‌های چپ یا کششی، و راست یا فشاری (الگوی SLR)؛ و بازو در وسط دهانه (الگوی SC) فرض شده‌اند. همچنین به‌منظور بررسی اثر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، ۵ نسبت مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه (۲، ۱/۷۱، ۱/۴۳، ۱/۱۴، ۰/۸۶) ( $L/h$ ) در نظر گرفته

جدول ۱. مشخصات مدل‌های اصلی بدون بازو.<sup>[۹]</sup>

نام مدل	طول دهانه $L$ (mm)	ارتفاع طبقه $h$ (mm)	نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه $L/h$	ضخامت ورق $t_w$ (mm)	مقطع تیر	مقطع ستون
۱S۳	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۰/۸۶	۳/۱۸	W ۱۴ × ۱۷۶	W ۱۴ × ۲۸۳
۱S۴	۴۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۱۴	۳/۱۸	W ۱۴ × ۱۹۳	W ۱۴ × ۳۱۱
۱S۵	۵۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۴۳	۳/۱۸	W ۱۴ × ۲۳۳	W ۱۴ × ۳۷۰
۱S۶	۶۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۷۱	۳/۱۸	W ۲۴ × ۲۵۰	W ۱۴ × ۴۵۵
۱S۷	۷۰۰۰	۳۵۰۰	۲/۰۰	۳/۱۸	W ۲۴ × ۳۷۰	W ۱۴ × ۵۵۰



شکل ۱. سیستم‌های دیوار برشی فولادی بدون بازشو و با بازشو مستطیلی در کل ارتفاع طبقه.

جهت مطالعه رفتار غیرخطی مدل‌ها نشان می‌دهد. در تحلیل‌های پوش‌اور رفتار مصالح به صورت ایزوتروپیک<sup>۳</sup> و در تحلیل‌های شبه - استاتیکی سیکلی، که شامل سیکل‌های متعدد بارگذاری است، به صورت سینماتیک با لحاظ اثر باوشینگ<sup>۴</sup> در نظر گرفته شده است.

### ۳.۲. مدل‌سازی عددی و صحنه‌گذاری بر نتایج

نحوه‌ی مدل‌سازی، اعمال شرایط مرزی و روش بارگذاری قبلاً در پژوهش انجام شده در سال ۱۳۹۲<sup>[۹]</sup> ذکر شده است، که در ادامه به اختصار به آن اشاره شده است. به منظور مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های خطی کماتشی، غیرخطی پوش‌اور<sup>۵</sup> و شبه - استاتیکی سیکلی<sup>۶</sup> از نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>۷</sup> استفاده شده است. در تمامی مدل‌ها، ورق و اعضاء قاب با بهره‌گیری از المان پوسته‌یی<sup>۸</sup> چهارگره‌یی با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (المان S4R) و استفاده از یک مش بندی نسبتاً ریز مدل‌سازی شده‌اند. در تحلیل‌های غیرخطی، اثرات تغییرشکل‌های بزرگ<sup>۹</sup> و غیرخطی هندسی<sup>۱۰</sup> نیز منظور شده است. به جهت تسهیل وقوع کماتش در ورق و کمک به توسعه‌ی حوزه‌ی کشش قطری

شده است. مطابق با راهنمای AISC ۸۲<sup>[۱]</sup>، المان‌های تقویتی قائم بازشوها بر مبنای اصول طراحی براساس ظرفیت به‌گونه‌یی طراحی شده‌اند که امکان گسترش کامل تنش‌های حوزه‌ی کشش در ورق دیوار را فراهم آورند و در عین حال نیز کشسان باقی بمانند. شکل ۱، نمای شماتیک از مدل‌های دیوار برشی فولادی بدون بازشو و با بازشو (مشمول بر ۴ الگوی بازشو مختلف) در نظر گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. جدول ۲، مشخصات مدل‌های با بازشو را نشان می‌دهد. جدول ۳، نیز جزئیات طراحی اتصال RBS را برای تیرهای طبقات مطابق با آیین‌نامه‌ی AISC ۳۵۸-۰۵<sup>[۱۰]</sup> ارائه می‌کند.

### ۲.۲. مشخصات مکانیکی مصالح

برای مصالح مصرفی در المان‌های مرزی (تیر و ستون‌ها) و تقویتی لبه‌ی بازشوها از فولاد رده ASTM-A۵۷۲ (با تنش تسلیم ۳۸۵ MPa) و برای ورق از فولاد رده ASTM-A۳۶ (با تنش تسلیم ۳۲۷/۶ MPa) استفاده شده است. مدول کشسانی و نسبت پواسون فولادهای مصرفی به ترتیب برابر با ۲۰۰ GPa و ۰/۳ فرض شده است. شکل ۲، دیاگرام‌های تنش - کرنش مربوط به هر رده از فولاد را

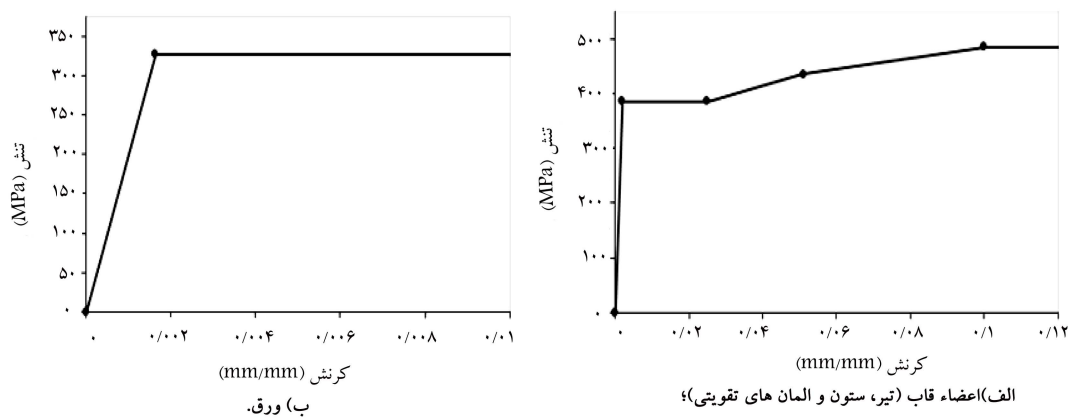
جدول ۲. مشخصات مدل‌های با بازشو.

نام مدل	مدل اصلی*	ضخامت ورق $t_w$ (mm)	مقطع المان تقویتی قائم	طول بازشو $L'$ (mm)	نام مدل	مدل اصلی*	ضخامت ورق $t_w$ (mm)	مقطع المان تقویتی قائم	طول بازشو $L'$ (mm)
۱S۶-SL۱	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۹۰۰	۱S۶-SC۳	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۵۰۰
۱S۶-SL۲	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۲۰۰	۱S۶-SC۴	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۸۰۰
۱S۶-SL۳	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۵۰۰	۱S۶-SC۵	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۱۰۰
۱S۶-SL۴	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۸۰۰	۱S۶-SC۶	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۴۰۰
۱S۶-SL۵	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۱۰۰	۱S۳-SL۲	۱S۳	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۶۰۰
۱S۶-SL۶	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۴۰۰	۱S۳-SR۲	۱S۳	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۶۰۰
۱S۶-SR۱	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۹۰۰	۱S۳-SLR۲	۱S۳	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۶۰۰
۱S۶-SR۲	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۲۰۰	۱S۴-SC۲	۱S۴	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۶۰۰
۱S۶-SR۳	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۵۰۰	۱S۴-SL۲	۱S۴	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۸۰۰
۱S۶-SR۴	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۸۰۰	۱S۴-SR۲	۱S۴	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۸۰۰
۱S۶-SR۵	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۱۰۰	۱S۴-SLR۲	۱S۴	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۸۰۰
۱S۶-SR۶	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۴۰۰	۱S۴-SC۲	۱S۴	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۰۰۰
۱S۶-SLR۱	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۹۰۰	۱S۵-SL۲	۱S۵	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۰۰۰
۱S۶-SLR۲	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۲۰۰	۱S۵-SR۲	۱S۵	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۰۰۰
۱S۶-SLR۳	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۵۰۰	۱S۵-SLR۲	۱S۵	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۰۰۰
۱S۶-SLR۴	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۸۰۰	۱S۵-SC۲	۱S۵	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۰۰۰
۱S۶-SLR۵	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۱۰۰	۱S۷-SL۲	۱S۷	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۴۰۰
۱S۶-SLR۶	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۲۴۰۰	۱S۷-SR۲	۱S۷	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۴۰۰
۱S۶-SC۱	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۹۰۰	۱S۷-SLR۲	۱S۷	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۴۰۰
۱S۶-SC۲	۱S۶	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۲۰۰	۱S۷-SC۲	۱S۷	۳٫۱۸	W ۱۴ × ۱۵۹	۱۴۰۰

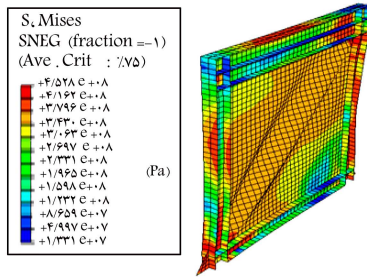
\* هندسه‌ی قاب و مقاطع تیر و ستون‌ها در مدل‌های با بازشو و مدل‌های اصلی نظیر یکسان است.

جدول ۳. جزئیات اتصال RBS برای مقاطع مختلف تیرها براساس آیین‌نامه‌ی AISC ۳۵۸-۰۵ [۹].

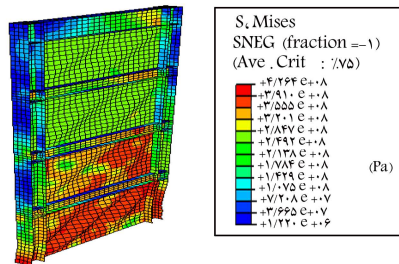
جزئیات اتصال (mm)	W ۲۴ × ۳۷۰	W ۲۴ × ۲۵۰	W ۱۴ × ۲۳۳	W ۱۴ × ۱۹۳	W ۱۴ × ۱۷۶
a	۱۷۵	۲۰۰	۲۲۰	۲۰۰	۲۰۰
b	۶۰۰	۵۵۰	۳۳۰	۳۰۰	۳۰۰
c	۸۵	۸۰	۱۰۰	۹۵	۹۵



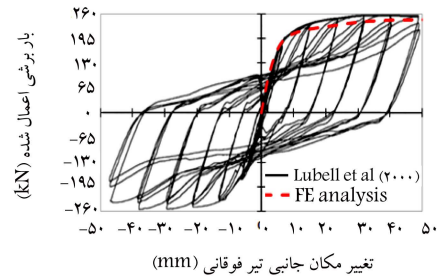
شکل ۲. منحنی‌های تنش - کرنش مصالح [۱۲].



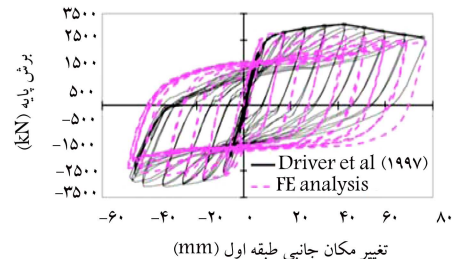
ب) توزیع تنش فون میز در مدل المان محدود در حد نهایی باربری؛



د) توزیع تنش فون میز در مدل المان محدود در جابجایی بیشینه.



الف) مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج نمونه آزمایشگاهی لوبل؛<sup>[۱۶]</sup>



ج) مقایسه نتایج تحلیل سیکلی با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی درایور؛<sup>[۱۷]</sup>

شکل ۳. صحه‌گذاری بر نتایج مدل‌سازی عددی.

یک تکیه‌گاه قائم برای تیرهای طبقات با بازشو عمل می‌کنند؛ و از این جهت، سبب تقویت تیرها و در نتیجه، تاحدی تقویت قاب می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل امتداد بازشو در ارتفاع کامل طبقه، تیرهای طبقات خود در نقش المان تقویتی افقی برای بازشوها عمل می‌کنند و نیاز به المان تقویتی افقی اضافی نیست. لذا برخلاف بازشوهایی که در پژوهش انجام‌شده‌ی در سال ۲۰۱۲<sup>[۹]</sup> مطالعه شده است، در اینجا ستون‌ها مشارکت چندانی در تغییر سختی و مقاومت سیستم ندارند. بنابراین، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، رفتار سیستم برای حالتی که بازشو در کل ارتفاع پانل امتداد دارد، در مقایسه با حالتی که بازشو فقط در بخشی از ارتفاع پانل امتداد دارد، متفاوت خواهد بود.

در این بخش، رفتار مدل‌های با بازشو و بدون بازشو از نظر مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری، و جذب انرژی با یکدیگر مقایسه شده است. در ابتدا، تأثیر طول و موقعیت بازشوها در مشخصه‌های رفتاری سیستم برای یک نسبت مشخص طول دهانه به ارتفاع طبقه بررسی و سپس، تأثیر ورود بازشو به سیستم برای نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه و الگوهای مختلف بازشو مطالعه شده است. نهایت نیز تأثیر حضور بازشوها و المان‌های تقویتی پیرامون آنها در میزان جذب انرژی توسط سیستم بررسی شده است.

جدول ۴، خلاصه‌ی نتایج مدل‌های بدون بازشو را ارائه می‌کند. در قسمت‌های بعدی، نتایج مربوط به مدل‌های با بازشو با تقسیم بر مقادیر نظیر در مدل‌های بدون بازشو به صورت بی بعد ارائه شده است.

### ۱.۳. بررسی اثر طول و موقعیت بازشو

در این قسمت، تأثیر طول و موقعیت بازشوها در مقاومت نهایی، سختی اولیه و شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، برای الگوی مختلف بازشو در یک سیستم دیوار برشی فولادی ( $L/h = 1/71$ )، طول بازشوها بین ۰٫۹ تا ۲٫۴ متر (۰٫۴، ۰٫۳۵، ۰٫۳۰، ۰٫۲۵، ۰٫۲۰، ۰٫۱۵،  $L'/L =$ ) متغیر فرض شده است.

در آن، باید اثر تغییر شکل‌های اولیه در ورق در نظر گرفته شود. برای اطمینان از حصول نتایج رضایت‌بخش، در بعضی از مراجع، استفاده از تغییر شکل‌های اولیه‌ی الگوی آن مطابق با مدل‌های کمانش و بیشینه‌ی مقدار آن متناسب با روش اجرا باشد، توصیه شده است.<sup>[۱۳]</sup> اگر چه در مورد صفحات نازک، اختیار الگو و مقدار بیشینه‌ی این تغییر شکل‌های اولیه اهمیت چندانی در نتایج ندارد.<sup>[۱۴]</sup> بر این اساس، تغییر شکل اولیه‌ی مطابق با مدل‌های کمانش ورق با بیشینه‌ی مقدار ۱ میلی‌متر به مدل‌ها اعمال شده است. مطالعات مقدماتی انجام‌گرفته کفایت مقدار اختیارشده و عدم تأثیرگذاری آن در نتایج تحلیل‌ها را تأیید کرده است. بیشینه‌ی دررفت ۱۱ مجاز طبقات، با توجه به آیین‌نامه‌ی ASCE 7-05<sup>[۱۵]</sup> برابر با ۲٫۵٪ ارتفاع طبقه منظور شده است.

برای صحه‌گذاری بر نتایج آنالیزهای پوش‌اور، نمونه‌ی آزمایشگاهی یک طبقه‌ی لوبل (فقط مدل SPSW۲)<sup>[۱۶]</sup> و برای صحه‌گذاری بر نتایج آنالیزهای سیکلی، نمونه‌ی ۴ طبقه‌ی درایور<sup>[۱۷]</sup> در نرم‌افزار مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. شکل ۳، نتایج تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از کفایت روش مدل‌سازی در پیش‌بینی رفتار پوش‌اور و سیکلی دیوار برشی فولادی است.

## ۳. بحث و بررسی نتایج

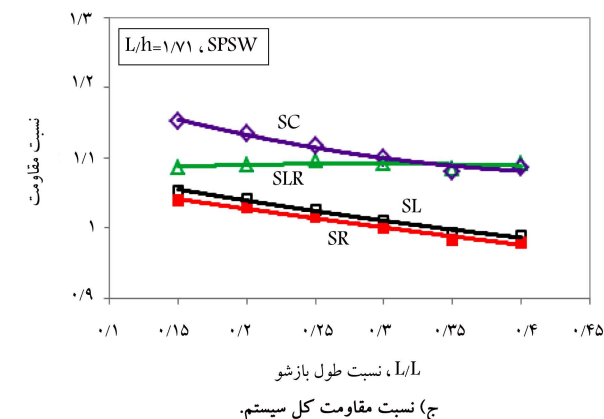
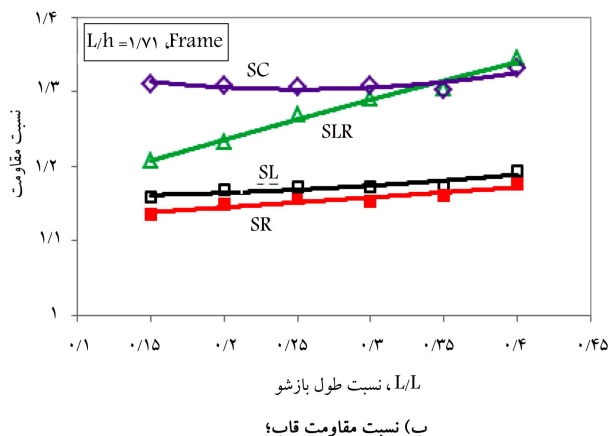
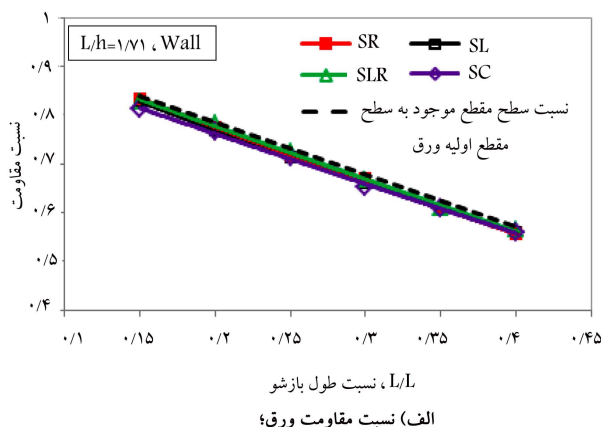
بر اساس تحقیقات انجام شده<sup>[۹]</sup> پیش‌بینی می‌شود، حضور بازشو و المان‌های تقویتی در سیستم می‌تواند مقاومت و سختی سیستم را تغییر دهد. در نتیجه‌ی حضور بازشوها، مقاومت و سختی ورق (با فرض ثابت ماندن ضخامت آن) به دلیل کاهش سطح مقطع ورق در تراز افقی کاهش می‌یابد، در حالی که به دلیل حضور المان‌های تقویتی قائم اطراف بازشوها به مقاومت و سختی قاب افزوده می‌شود. در واقع، المان‌های تقویتی قائم، علاوه بر کمک به توسعه‌ی کامل مقاومت کششی ورق و انتقال نیروهای ناشی از آن به المان‌های مرزی اطراف (تیر و ستون‌ها)، همانند با

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج مقاومت نهایی، سختی اولیه، و شکل پذیری مدل‌های بدون بازشو.

نام مدل	مقاومت نهایی (KN)			شکل پذیری
	قاب	ورق	کل سیستم	
۱۵۳	۳۳۲۱	۱۴۲۵	۴۷۴۶	۶٫۲۹
۱۵۴	۳۶۳۷	۱۹۶۰	۵۵۹۱	۶٫۸۲
۱۵۵	۴۳۸۰	۲۵۰۵	۶۸۸۵	۶٫۹۷
۱۵۶	۶۵۳۷	۳۰۵۰	۹۵۸۷	۶٫۳۸
۱۵۷	۹۰۸۸	۳۵۴۴	۱۲۶۳۲	۶٫۰۲

### ۱.۱.۳. مقاومت نهایی

شکل ۴، نسبت‌های مقاومت نهایی ورق، قاب، و کل سیستم را در مدل‌های با بازشو با نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه ثابت ( $L/h = 1/71$ ) به مدل‌های بدون بازشو نظیر، برای نسبت‌های مختلف طول بازشو به طول دهانه ( $L'/L = 0.15 - 0.4$ ) و الگوهای مختلف قرارگیری بازشو (SR، SLR، SL و SC) مقایسه می‌کند. مقاومت ورق از انتگرال‌گیری تنش‌های برشی در طول ورق در تراز تحتانی محاسبه شده و مقاومت نهایی قاب نیز از تفاضل سهم ورق از برش نهایی طبقه به دست آمده است. شکل ۴ الف نشان می‌دهد که با افزایش نسبت طول بازشو، مقاومت نهایی ورق برای الگوهای مختلف بازشو متناسب با نسبت کاهش در سطح مقطع ورق (خط چین ترسیم شده در شکل ۴ الف) کاهش یافته است. با توجه به شکل ۴ ب، همان‌طور که انتظار می‌رود، به دلیل حضور المان‌های تقویتی قائم، مقاومت قاب در سیستم با بازشو همواره بزرگ‌تر از سیستم بدون بازشو نظیر است. به‌طور کلی، نسبت افزایش مقاومت قاب برای الگوهای SC و SLR به دلیل داشتن یک المان تقویتی قائم بیشتر نسبت به الگوهای SR و SL بزرگ‌تر است. همچنین، برای محدوده‌ی انتخاب شده برای نسبت‌های طول بازشو به طول دهانه ( $L'/L = 0.15 - 0.4$ )، نسبت افزایش مقاومت در قاب برای الگوهای SL، SR و SC تقریباً مستقل از نسبت طول بازشو (یا موقعیت المان‌های تقویتی قائم) است، در حالی که برای الگوی SLR تأثیر طول بازشو (یا موقعیت المان‌های تقویتی قائم) در نسبت افزایش مقاومت قاب قابل توجه است، و با افزایش نسبی طول بازشو، کاهش طول بخش میانی تیر در حد فاصل دو المان تقویتی قائم، مقاومت قاب نیز افزایش یافته است. بنابراین در مجموع، با افزایش نسبی طول بازشو، نسبت مقاومت کل سیستم (مجموع مقاومت ورق و قاب) برای الگوهای SL، SR و SC به صورت خطی کاهش یافته است، در حالی که نسبت مذکور برای الگوی SLR تقریباً بدون تغییر باقی مانده است (شکل ۴ ج). از شکل‌های ۴ الف الی ۴ ج همچنین می‌توان نتیجه گرفت که از حیث مقاومت، قرارگیری بازشو در میانه‌ی دهانه‌ی دیوار (الگوی SC) می‌تواند گزینه‌ی مناسب‌تری باشد، اگرچه در مقایسه با حالتی که بازشو فقط در یک سمت دیوار باشد (الگوهای SL و SR)، مزایای اقتصادی کمتری را دارد. به‌علاوه با توجه به نتایج، برای حالتی که بازشو فقط در یک سمت دیوار است (الگوهای SL و SR)، از حیث مقاومت مزیت خاصی در قرارگیری بازشو در سمت چپ یا راست دیوار نسبت به هم وجود ندارد و مقاومت سیستم برای این دو الگو کم و بیش مشابه است. بررسی نتایج در این بخش همچنین حاکی از این نکته است که برخلاف حالتی که بازشو در کل ارتفاع طبقه امتداد



شکل ۴. نسبت‌های مقاومت ورق، قاب و کل سیستم برای الگوهای مختلف مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول بازشو به طول دهانه.

ندارد و در نتیجه، علاوه بر المان‌های قائم، نیاز به استفاده از المان‌های تقویتی افقی نیز هست،<sup>[۹]</sup> موقعیت بازشو می‌تواند در رفتار سیستم‌های با بازشو تأثیرگذار باشد.

### ۲.۱.۳. سختی اولیه و شکل‌پذیری

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نسبت سختی اولیه و شکل‌پذیری را در مدل‌های با بازشو با نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه ثابت ( $L/h = 1/71$ ) به مدل‌های بدون بازشو نظیر، برای طول و الگوهای مختلف قرارگیری بازشو مقایسه می‌کند. سختی اولیه سیستم با محاسبه‌ی شیب نمودار بار - جابه‌جایی در همان بارهای اولیه

ورق در رفتار سیستم، سختی اولیه و شکل‌پذیری مدل‌های با بازشو همواره کوچک‌تر از مدل‌های بدون بازشو نظیر است. همان‌طور که از مطالعات پیشین می‌دانیم،<sup>[۹]</sup> ورق منبع اصلی شکل‌پذیری در سیستم دیوار برشی فولادی است. بنابراین انتظار می‌رود با کاهش مشارکت ورق در رفتار کلی سیستم، شکل‌پذیری سیستم نیز کاهش می‌یابد. شکل‌های ۵ و ۶ همچنین نشان می‌دهند که نسبت‌های سختی و شکل‌پذیری با افزایش نسبت طول بازشو به طول دهانه به صورت خطی کاهش می‌یابد. به علاوه با توجه به نتایج، برای یک نسبت مشخص طول بازشو به طول دهانه، کمترین کاهش در سختی اولیه برای الگوی بازشو SLR و بیشترین کاهش در شکل‌پذیری سیستم‌ها برای الگوی بازشو SC اتفاق می‌افتد. البته برای یک نسبت مشخص طول بازشو به طول دهانه، بیشینه درصد اختلاف بین نسبت‌های سختی یا شکل‌پذیری برای الگوهای مختلف به حدود ۱۰٪ محدود می‌شود.

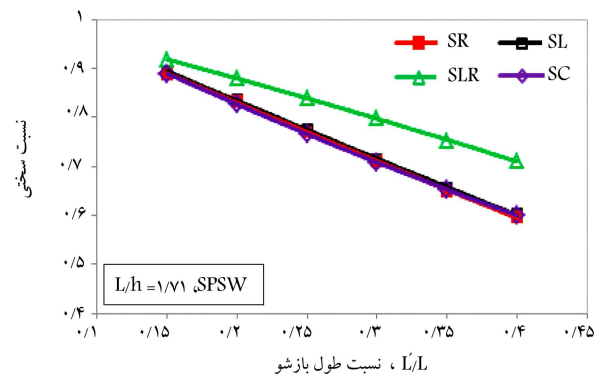
### ۲.۳. بررسی اثر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه

در این بخش، تأثیر تغییرات نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه سیستم (L/h) بر نسبت‌های مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر مد نظر قرار گرفته است. برای این منظور، سیستم‌های دیوار برشی فولادی با نسبت‌های متغیر طول دهانه به ارتفاع طبقه (L/h = ۰٫۸۶ - ۲) مشتمل بر الگوهای مختلف بازشو و با یک نسبت مشخص طول بازشو به طول دهانه (L'/L = ۰٫۲) در نظر گرفته شده است.

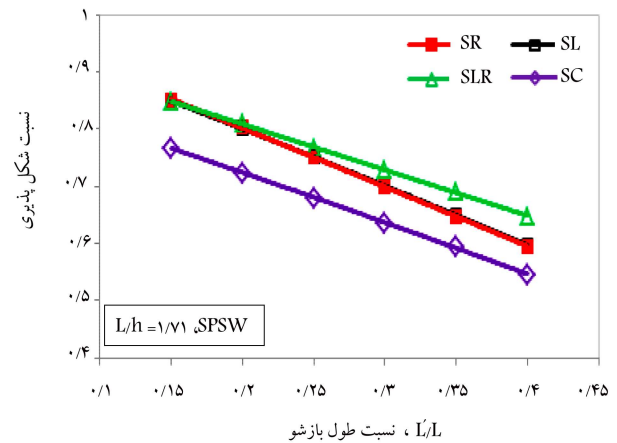
#### ۱.۲.۳. مقاومت نهایی

شکل ۸، نسبت‌های مقاومت نهایی ورق، قاب و کل سیستم را برای الگوهای مختلف بازشو و نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه و با فرض یک نسبت ثابت طول بازشو به طول دهانه (L'/L = ۰٫۲) مقایسه می‌کند. شکل ۸ الف نشان می‌دهد که برای یک نسبت ثابت طول بازشو به طول دهانه، مقاومت نسبی ورق مستقل از موقعیت بازشو و نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه است. شکل ۸ الف همچنین نشان می‌دهد که توافق مناسبی بین کاهش نسبی در مقاومت ورق و نسبت کاهش در سطح مقطع ورق برقرار است و بنابراین، مقاومت نسبی ورق در مدل‌های با بازشو را می‌توان فقط براساس نسبت طول بازشو به طول دهانه و مستقل از هندسه و مشخصات هندسی اعضاء قاب (تیر، ستون و المان‌های مرزی) بیان کرد.

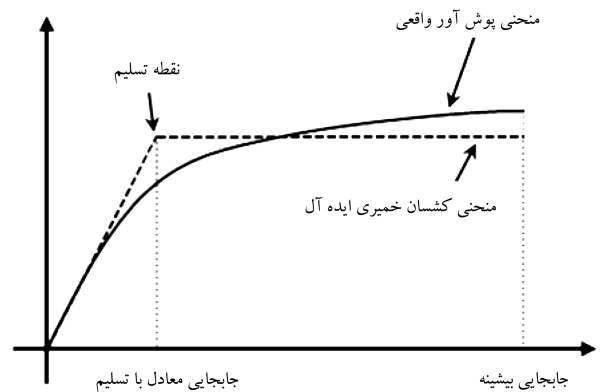
شکل ۸ ب نشان می‌دهد که به دلیل حضور المان‌های تقویتی قائم در اطراف بازشوها و نقش آنها در تقویت تیرهای طبقه، همان‌طور که انتظار می‌رود، مقاومت قاب در مدل‌های با بازشو همواره بزرگ‌تر از مدل‌های بدون بازشو نظیر است. البته در حالت کلی، نسبت افزایش مقاومت قاب در مدل‌های با بازشو می‌تواند تابع عوامل مختلفی نظیر: هندسه قاب، مشخصات هندسی اعضاء قاب، و المان‌های تقویتی قائم، تعداد و موقعیت المان‌های تقویتی قائم در طول دهانه و اندرکنش بین ورق و اعضاء قاب باشد، که این موضوع پیش‌بینی و اظهار نظر در مورد میزان افزایش در مقاومت قاب را برای حالات مختلف تاحدی پیچیده می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده، تغییرات طول دهانه به ارتفاع طبقه می‌تواند تا حدود ۲۰٪ در مقاومت نسبی قاب تأثیرگذار باشد. در اینجا نیز به دلیل حضور المان‌های تقویتی بیشتر، مقاومت قاب برای الگوهای SLR و به خصوص SC در مقایسه با الگوهای SL و SR افزایش بیشتری دارد. البته، بیشینه اختلاف بین نسبت‌های مقاومت قاب برای الگوهای مختلف به حدود ۲۰٪ محدود



شکل ۵. نسبت سختی اولیه برای الگوهای مختلف مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول بازشو به طول دهانه.

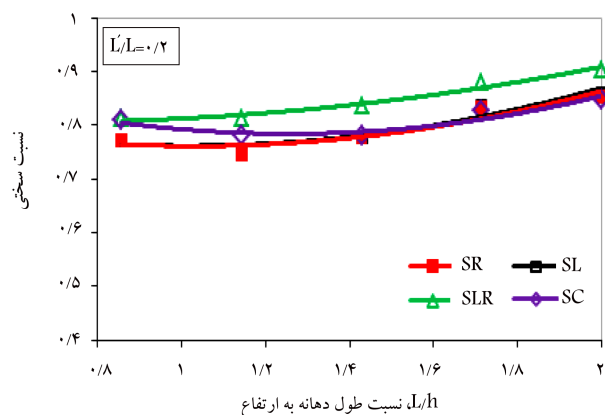


شکل ۶. نسبت شکل‌پذیری برای الگوهای مختلف مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول بازشو به طول دهانه.

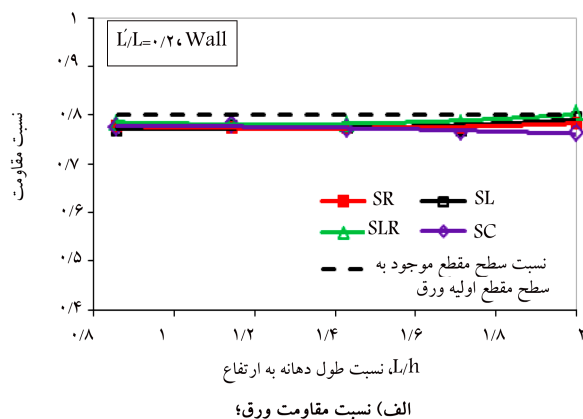


شکل ۷. معادل‌سازی منحنی رفتار و تعیین جابه‌جایی معادل با حد تسلیم.<sup>[۹]</sup>

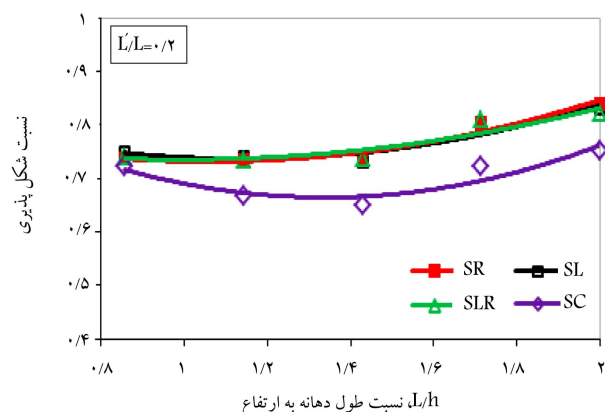
به دست آمده است. شکل‌پذیری مدل‌ها نیز از تقسیم جابه‌جایی بیشینه سیستم به جابه‌جایی حد تسلیم محاسبه شده است. جابه‌جایی بیشینه برابر با جابه‌جایی طبقه‌ی بام در لحظه‌ی وقوع دررفت ۲/۵٪ لحاظ شده است. جابه‌جایی حد تسلیم نیز از طریق ترسیم منحنی کشسان‌خمیری ایده‌آل بر منحنی پوش رفتار سیستم، به طوری که سطح محصورشده توسط منحنی‌ها در دو حالت مساوی یکدیگر باشد، مشخص شده است (شکل ۷). همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، به دلیل کاهش سطح مقطع ورق و در نتیجه کاهش مشارکت



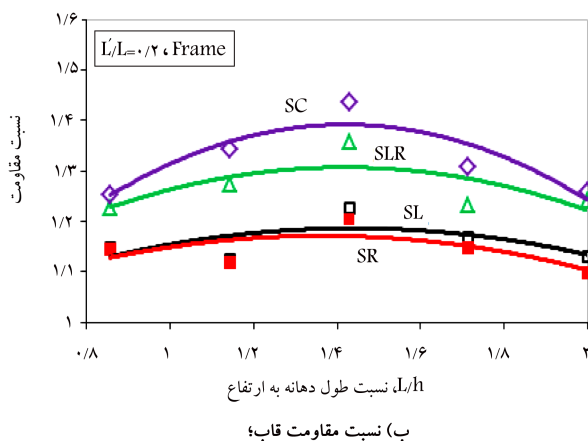
شکل ۹. نسبت سختی اولیه برای الگوهای مختلف مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه.



الف) نسبت مقاومت ورق؛



شکل ۱۰. نسبت شکل پذیری برای الگوهای مختلف مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه.



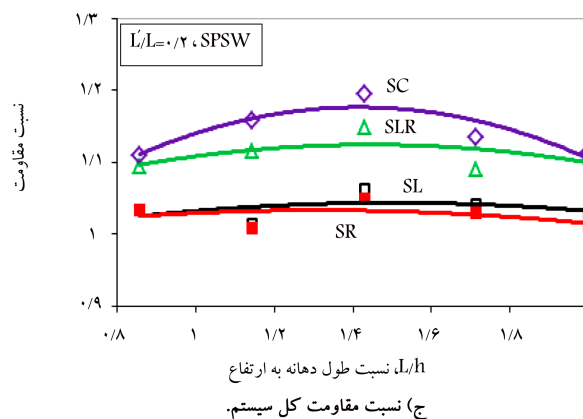
ب) نسبت مقاومت قاب؛

اختلاف بین نسبت‌های مقاومت برای الگوهای مختلف به حدود ۱۵٪ محدود می‌شود.

نتایج ارائه شده در شکل‌های ۸ الف الی ج همچنین تأیید می‌کند که در عمل، اختلاف چندانی بین نتایج برای الگوهای SL و SR در سیستم‌های مختلف وجود ندارد.

### ۲.۲.۳. سختی اولیه و شکل پذیری

در شکل‌های ۹ و ۱۰، تأثیر ورود بازشو در سختی اولیه و شکل پذیری سیستم برای الگوهای مختلف بازشو و نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه و با فرض یک نسبت مشخص طول بازشو به طول دهانه ( $L'/L = 0.2$ ) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل ورود بازشو و کوچک‌تر شدن سطح مقطع ورق و در نتیجه کمتر شدن مشارکت آن در رفتار کلی سیستم، سختی و شکل پذیری سیستم می‌تواند به ترتیب تا بیشینه‌ی ۲۵٪ و ۳۵٪ دچار افت شود. به علاوه، مشخص است که نسبت‌های سختی و شکل پذیری، چندان تحت تأثیر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه و حتی الگوی قرارگیری بازشوها نیستند. با توجه به نتایج برای یک الگوی مشخص بازشو، با تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه و بالعکس (یعنی برای یک نسبت مشخص طول دهانه به ارتفاع طبقه تغییر الگوی بازشو)، تغییرات نسبت سختی یا شکل پذیری به کمتر از ۱۰٪ محدود می‌شود.



ج) نسبت مقاومت کل سیستم.

شکل ۸. نسبت‌های مقاومت ورق، قاب و کل سیستم برای الگوهای مختلف از مدل‌های با بازشو به مدل‌های بدون بازشو نظیر در مقابل نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه.

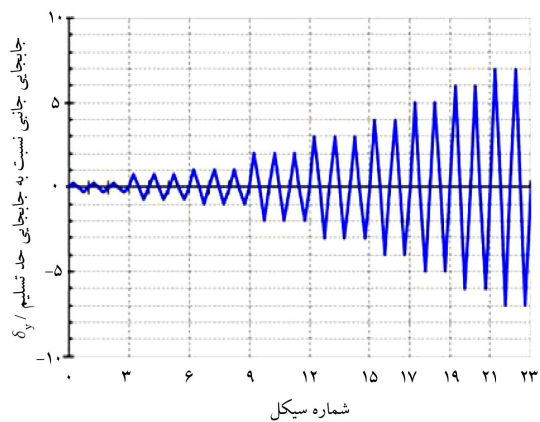
می‌شود. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۸ ج نیز مشاهده می‌شود، مقاومت کل سیستم برای الگوهای SL و SR که یک عدد المان تقویتی قائم دارند، تغییر چندانی را نسبت به مدل‌های بدون بازشو نظیر نشان نمی‌دهد (به میزان بیشینه‌ی ۵٪ افزایش در مقاومت)، در حالی که برای الگوهای SLR و SC تا بیشینه‌ی ۲۰٪ افزایش در مقاومت کل سیستم مشاهده می‌شود. شکل ۸ ج همچنین نشان می‌دهد که برای یک الگوی بازشو به خصوص، با تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه تغییر چندانی در نسبت مقاومت سیستم مشاهده نمی‌شود (کمتر از ۱۰٪). همچنین، برای یک نسبت مشخص طول دهانه به ارتفاع طبقه نیز بیشینه‌ی



### ۳.۳. بررسی قابلیت استهلاک انرژی

در این بخش، به جهت مطالعه‌ی بیشتر تأثیر بازشوها در رفتار سیستم‌های دیوار برشی فولادی، قابلیت استهلاک انرژی در سیستم‌های با بازو مطالعه، و با سیستم‌های بدون بازو نظیر مقایسه شده است. برای انجام مطالعات، نسبت طول بازو به طول دهانه معادل با  $0.2 = L'/L$  و نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه نیز برابر با  $(L/h = 1.71)$  فرض شده است. جابه‌جایی حد تسلیم  $(\delta y)$  که پارامتر اصلی در اعمال بارگذاری سیکلی است، با استفاده از نتایج تحلیل پوش‌اور، تقریباً معادل با  $13/5$  میلی‌متر برای مدل‌های با بازو و بدون بازو در نظر گرفته و تخمین زده شده است. براساس دستورالعمل ۲۴-ATC<sup>[۱۸]</sup>، بارگذاری سیکلی با اعمال ۲۳ سیکل جابه‌جایی، همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، به تراز تیر فوقانی طبقه صورت می‌گیرد. با توجه به شکل ۱۱، ۶ سیکل ابتدایی مبحثی بر جابه‌جایی‌های کوچک‌تر از جابه‌جایی تسلیم  $(0.733\delta y, 0.67\delta y)$  است و در سیکل‌های بعدی بارگذاری تا جابه‌جایی معادل با ۷ برابر جابه‌جایی حد تسلیم  $(7\delta y)$  ادامه می‌یابد. به‌طورکلی با توجه به دستورالعمل ۲۴-ATC<sup>[۱۸]</sup> برای جابه‌جایی‌های کوچک‌تر یا مساوی ۳ برابر جابه‌جایی حد تسلیم  $(3\delta y)$ ، ۳ سیکل بارگذاری، و برای جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از آن، ۲ سیکل بارگذاری در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۲، منحنی‌های هیستریزس (کل سیستم، ورق، و قاب) را در مدل‌های با بازو و بدون بازو مقایسه می‌کند. با توجه به شکل ۱۲، الگوی نسبتاً مشابهی برای منحنی‌های هیستریزس ورق، قاب، و کل سیستم در مدل‌های با بازو و بدون بازو مشاهده می‌شود. البته به دلیل کاهش سطح مقطع ورق در اثر حضور بازو، میزان جذب انرژی ورق در سیستم‌های با بازو نسبت به سیستم بدون بازو تا حدی کمتر به نظر می‌رسد (به‌ویژه در دو سیکل نهایی). در حالی که به دلیل حضور المان‌های تقویتی در لبه‌ی بازوها، جذب انرژی قاب در مدل‌های با بازو نسبتاً بیشتر است. همچنین شکل ۱۳، متوسط انرژی کل جذب‌شده توسط سیستم را در مدل‌های با بازو و بدون بازو برای سیکل‌های مختلف مقایسه می‌کند. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود بازو و کاهش سطح مقطع ورق، به دلیل حضور المان‌های تقویتی، مدل‌های با بازو، قابلیت استهلاک انرژی بالاتری نسبت به مدل بدون بازو نظیر در سیکل‌های مختلف دارند. به‌طور متوسط با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در دو سیکل نهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳)، میزان جذب انرژی در مدل‌های با بازو با الگوهای SL و SR در حدود ۱۴٪، و با الگوهای SLR و SC در حدود ۲۴٪ بزرگ‌تر از



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی جابه‌جایی سیکلی.

مدل بدون بازو نظیر به‌دست آمده است. همچنین مشابه با نتایج به‌دست‌آمده در بخش‌های پیشین، نتایج در این بخش نیز تأیید می‌کند که عملاً اختلاف چندانی در رفتار مدل‌های با بازو با الگوهای SL یا SR تحت بارگذاری سیکلی وجود ندارد.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار دیوارهای برشی فولادی یک طبقه با بازوهای مستطیلی تقویت‌شده با کاربری درب و پنجره با استفاده از روش المان محدود مطالعه شده است. جهت کاهش تعداد المان‌های تقویتی و صرفه‌ی اقتصادی بیشتر، بازوها در کل ارتفاع دیوار فرض شده‌اند. همچنین اثر طول و موقعیت بازوها و تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه در رفتار سیستم‌های با بازو مطالعه شده و رفتار سیستم‌های با بازو از حیث مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و جذب انرژی با مدل‌های بدون بازو نظیر مقایسه شده و نتایج نشان داده است:

-- برخلاف حالتی که ارتفاع بازو محدود است و در نتیجه، علاوه بر المان‌های تقویتی قائم، نیاز به استفاده از المان‌های تقویتی افقی نیز هست<sup>[۹]</sup> و موقعیت قرارگیری بازوها تمام - ارتفاع می‌تواند در رفتار سیستم‌های با بازو تقویت‌شده مؤثر باشد.

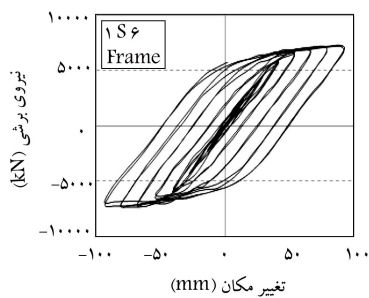
-- با افزایش طول بازو تا ۴۰٪ طول دهانه، برای الگوهای بازو SL و SR که فقط شامل یک المان تقویتی قائم هستند، تغییر چندانی در مقاومت سیستم مشاهده نمی‌شود، در حالی که برای الگوهای SLR و SC افزایش در مقاومت سیستم تا حدی برجسته‌تر است.

-- به دلیل ورود بازو و کاهش سطح مقطع ورق، مقاومت ورق در سیستم‌های با بازو همواره کوچک‌تر از سیستم‌های بدون بازو نظیر است. کاهش نسبی در مقاومت ورق متناسب با کاهش سطح مقطع ورق است. بنابراین، با افزایش متناسب ضخامت ورق انتظار می‌رود کاهش سطح مقطع ورق و در نتیجه کاهش مقاومت آن جبران شود.

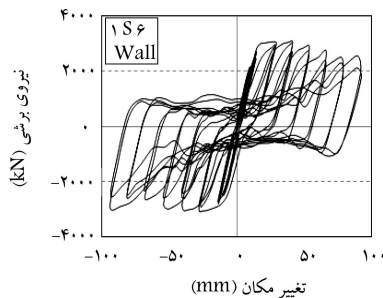
-- به دلیل حضور المان‌های تقویتی، مقاومت قاب در سیستم‌های با بازو همواره بزرگ‌تر از سیستم‌های بدون بازو نظیر است. پیش‌بینی مقدار افزایش در مقاومت قاب پیچیده به نظر می‌رسد و در حالت کلی می‌تواند تابع تعداد و موقعیت المان‌های تقویتی قائم، هندسه، و مشخصات هندسی اعضاء قاب و المان‌های تقویتی اندرکنش قاب و ورق باشد.

-- با افزایش نسبی طول بازو، نسبت‌های سختی و شکل‌پذیری سیستم‌های با بازو به سیستم‌های بدون بازو نظیر به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، برای یک نسبت مشخص طول بازو به طول دهانه، کمترین کاهش در سختی برای الگوی SLR و بیشترین کاهش در شکل‌پذیری برای الگوی SC مشاهده شده است.

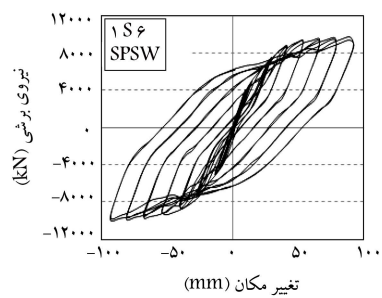
-- برای یک نسبت مشخص طول بازو به طول دهانه، نسبت‌های مقاومت، سختی، و شکل‌پذیری سیستم‌های با بازو به بدون بازو نظیر تقریباً مستقل از نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه است. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، برای یک نسبت مشخص طول دهانه به ارتفاع طبقه، بیشینه‌ی اختلاف بین نتایج برای الگوهای مختلف بازو به حدود ۱۵٪ در مورد نسبت مقاومت



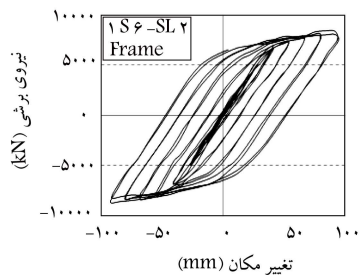
ج) قاب، مدل (1 S 6)؛



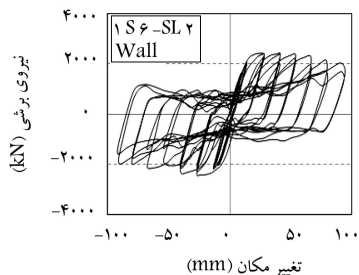
ب) ورق، مدل (1 S 6)؛



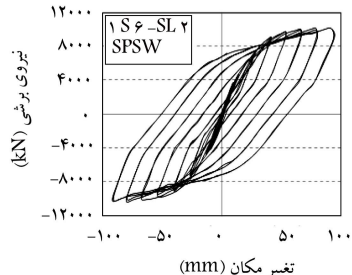
الف) دیوار برشی فولادی، مدل (1 S 6)؛



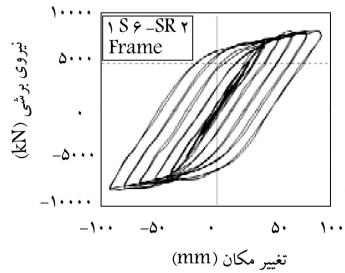
و) قاب، مدل (1 S 6-SL 2)؛



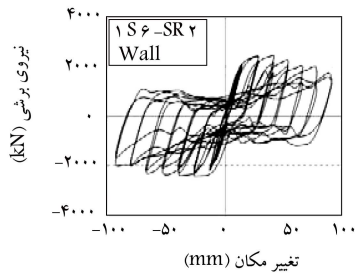
ه) ورق، مدل (1 S 6-SL 2)؛



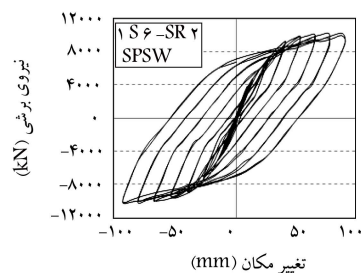
د) دیوار برشی فولادی، مدل (1 S 6-SL 2)؛



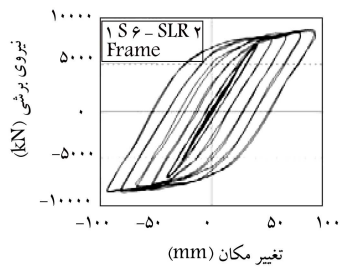
ط) قاب، مدل (1 S 6-SR 2)؛



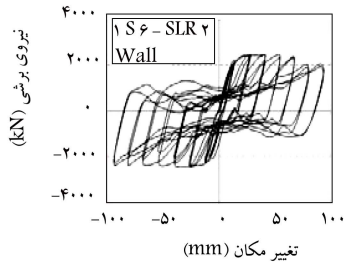
ح) ورق، مدل (1 S 6-SR 2)؛



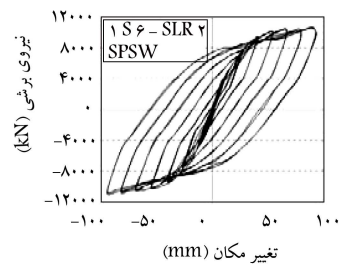
ز) دیوار برشی فولادی، مدل (1 S 6-SR 2)؛



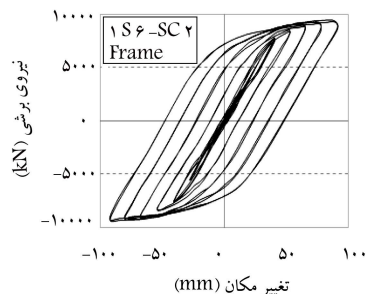
ل) قاب، مدل (1 S 6-SLR 2)؛



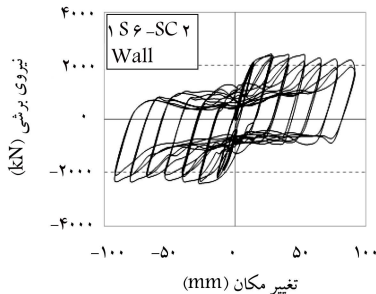
ک) ورق، مدل (1 S 6-SLR 2)؛



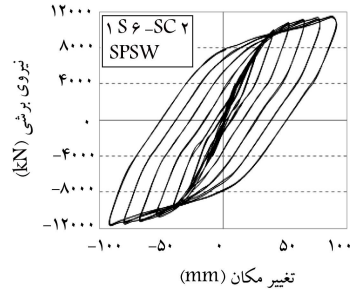
ی) دیوار برشی فولادی، مدل (1 S 6-SLR 2)؛



ش) قاب، مدل (1 S 6-SC 2)؛



ن) ورق، مدل (1 S 6-SC 2)؛

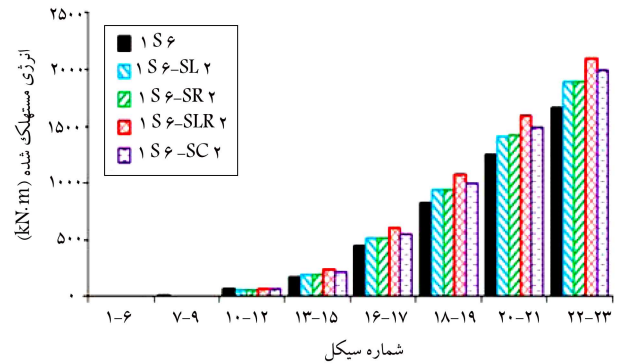


م) دیوار برشی فولادی، مدل (1 S 6-SC 2)؛

شکل ۱۲. منحنی‌های هیستریزیس سیستم‌های با بازشو و بدون بازشو.

کل، و به کمتر از ۱۰٪ در مورد نسبت‌های سختی اولیه و شکل‌پذیری محدود می‌شود.

-- حضور بازشو و کاهش سطح مقطع ورق در نتیجه‌ی آن می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت جذب انرژی ورق به‌ویژه در سیکل‌های بزرگ جابه‌جایی شود، در حالی که حضور المان‌های تقویتی اطراف بازشو ظرفیت جذب انرژی قاب را همواره افزایش می‌دهد. بنابراین در مجموع، ظرفیت جذب انرژی کل سیستم در اثر ورود بازشو می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که طول بازشو نسبت به طول دهانه قابل توجه نباشد، ظرفیت جذب انرژی سیستم در اثر ورود بازشو می‌تواند با افزایش همراه باشد و یا دست‌کم بدون تغییر باقی بماند.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی متوسط انرژی جذب‌شده توسط سیستم‌های با بازشو و بدون بازشو ( $L'/L = 0.2$  و  $L/h = 1.71$ ) در سیکل‌های مختلف بارگذاری.

## پانویس‌ها

1. steel plate shear wall
2. reduced beam section
3. Isotropic
4. Bauschinger
5. pushover
6. Quasi-static cyclic
7. ABAQUS
8. shell
9. large deformation
10. geometrical nonlinearity
11. drift

## منابع (References)

1. Canadian Standard Association, CSA-S16-01, *Limit State Design of Steel Structures*, Toronto, Ontario (2001).
2. Building Seismic Safety Council, *2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)*, Federal Emergency Management Agency (2004).
3. AISC, ANSI/AISC 341-05, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago (IL), American Institute of Steel Construction (2005).
4. AISC, *Steel Design Guide 20, Steel Plate Shear Walls*, Chicago (IL), American Institute of Steel Construction (2007).
5. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels", *Thin-Walled Struct.*, **14**(2), pp. 139-151 (1992).
6. Vian, D. "Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structures", PhD Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y. (2005).
7. Purba, R.H. "Design recommendations for perforated steel plate shear walls", M.Sc. Thesis, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y. (2006).
8. Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A. and Bradford, M.A. "Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening", *Journal of Constructional Steel Research*, **79**, pp. 91-100 (2012).
9. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
10. AISC, ANSI/AISC 358-05, *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, Chicago (IL), American Institute of Steel Construction (2005).
11. ABAQUS/Standard Theory Manual, Version 6.5.1., Hibbit, Karlsson, Sorenson, Inc, (HKS) (2004).
12. Habashi, H.R. and Alinia, M.M. "Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls", *J. Constr. Steel Res.*, **66**(2), pp. 150-158 (2010).
13. Wang, H. and Croll, J. "Optimization of shell buckling using lower bound capacities", *Thin-Walled Struct.*, **46**(7-9), pp. 1011-1120 (2008).
14. Brando, G. and De Matteis, G. "Experimental and numerical analysis of a multi-stiffened pure aluminium shear panel", *Thin-Walled Struct.*, **49**(10), pp. 1277-1287 (2011).
15. ASCE, SEI/ASCE 7-05, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Virginia (USA), American Society of Civil Engineers (2005).
16. Lubell, A.S., Prion, H.G.L., Ventura, C.E. and Rezai, M. "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *J. Struct. Eng., ASCE*, **126**(4), pp. 453-460 (2000).
17. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", *J. Struct. Eng., ASCE*, **124**(2), pp. 112-130 (1998).
18. ATC-24, *Guidelines of Cyclic Seismic Testing on Components for Steel Structures*, Redwood City, California, U.S.A., Applied Technology Council (1992).