

# مطالعه‌ی عددی و پارامتریک رفتار غیرخطی دیوار برشی مرکب سوراخدار

مهدی عبادی جاه‌خانه\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه داهنغان

مسعود احمدی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)  
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۳-۲۳

در پژوهش حاضر، به منظور ارتقا رفتار لرزه‌ی دیوار برشی فولادی از پوشش بتن مسلح در یک طرف ورق فولادی دیوار استفاده شده است. پارامترهایی، از قبیل: شکل بازشو، موقعیت بازشو روی دیوار برشی مرکب و مساحت بازشو در تحلیل استاتیکی غیرخطی به کمک نرم‌افزار آباکوس در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا مدل عددی با مدل آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد که اختلاف ۲/۳ و ۲/۹ درصد بین مقادیر سختی کشسان و ظرفیت باربری در دو نمونه مشاهده شد. ۱۶ مدل عددی المان محدود شبیه‌سازی شدند. نتایج تحلیل نشان داد که استفاده از پوشش بتنی می‌تواند مود تسلیم را از کماتش ورق فولادی به ترک خوردگی پوشش بتنی و افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۳٪ تغییر دهد. بازشوی دایره‌ی شکل در بین سایر بازشوها، موجب عملکرد مناسب‌تر دیوار برشی و همچنین نسبت به بازشوی مستطیلی شکل، ۵٪ ظرفیت باربری بیشتر به‌طور میانگین شده است. همچنین، با استفاده از بازشوی مربعی می‌توان بیشترین نسبت بازشو را بدون تداخل هندسی با سایر اعضا در دیوار برشی ایجاد کرد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی مرکب، تحلیل استاتیکی غیرخطی، روش

المان محدود، بازشو.

m.ebadi@du.ac.ir  
masoud.ahmadi@abru.ac.ir

## ۱. مقدمه

در عین حال، معمولاً تسلیم ورق فولادی در روش ذکر شده بعد از تسلیم کابی قاب فولادی اتفاق می‌افتد که در نتیجه نمی‌تواند به عنوان وسیله‌ی استهلاک انرژی عمل کند.

ب) برای ضعیف کردن ورق فولادی دیوار، استفاده از روش‌هایی از قبیل: ورق فولادی نازک<sup>[۶]</sup> به منظور اجازه دادن و رخ دادن کماتش برشی در ورق فولادی با تعریف حفره‌های عمودی و بازشوهایی با شکل‌های مختلف در داخل و لبه‌های دیوار پیشنهاد شده است.<sup>[۷]</sup> همچنین استفاده از مصالح فولادی با نقطه‌ی تنش تسلیم پایین، جهت کاستن مقاومت برشی استفاده شده است.<sup>[۸]</sup> در این حالت، مقاومت پس‌کمانشی بزرگی در سیستم دیوار برشی فولادی در اثر ایجاد میدان کششی ایجاد می‌شود. تشکیل میدان کششی بعد از کماتش برشی ورق فولادی نازک می‌تواند به سیستم دیوار برشی فولادی برای تداوم مقاومت در برابر نیروی افقی کمک کند. از طرفی، نیروهای کششی که در اثر میدان کششی تولید شدند، مستقیماً به ستون قاب منتقل می‌شوند و این موضوع می‌تواند باعث تسلیم زودرس آن شود. کماتش برشی کشسان ورق فولادی معمولاً منجر به کاهش سختی و مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود. علاوه بر این، شکل‌گیری متناوب میدان کششی قطری و میدان فشاری تحت بار چرخه‌ی موجب آسیب رساندن

سازه‌های فولادی به علت برتری‌شان در ارتباط با وزن و شکل‌پذیری در ساخت و سازه‌های ساختمانی به‌طور گسترده‌ی در مناطق زلزله‌خیز استفاده شده‌اند و می‌توانند نقش مؤثری در کاهش آسیب وارده به سازه‌ها تحت بارهای لرزه‌ی ایفا کنند. سیستم دیوار برشی فولادی از قاب فولادی که به‌عنوان اجزاء مرزی عمل می‌کند و ورق فولادی میان‌قاب که به عنوان دستگاه جاذب انرژی عمل می‌کند، تشکیل شده است. سیستم مذکور دارای سختی کشسان، رفتار چرخه‌ی پایدار، ظرفیت جذب انرژی بالا و شکل‌پذیری مناسبی است که به خوبی نیاز سیستم‌های جاذب انرژی را برآورده می‌کند. اصولاً دیوارهای برشی فولادی تحت سه فلسفه‌ی طراحی، طراحی و استفاده می‌شوند:

الف) برای تقویت ورق فولادی دیوار، استفاده از ورق ضخیم‌تر،<sup>[۱]</sup> سخت‌کننده‌های عرضی،<sup>[۲]</sup> سخت‌کننده‌های متقاطع و قطری،<sup>[۳]</sup> در هر دو طرف ورق فولادی استفاده می‌شود و یا برای اطمینان از کسب کل مقاومت خمیری دیوار فولادی قبل از کماتش برشی، تخته‌های (پوشش‌های) بتنی،<sup>[۴]</sup> در دو طرف دیوار به کار برده می‌شوند. نقص اصلی روش اخیر، استفاده‌ی زیاد از مصالح فولادی است.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۲۷

DOI:10.24200/J30.2020.54966.2689

به ورق می‌شود که توسط آزمایش و مدل‌سازی عددی ثابت شده است.

ج) استفاده از ورق‌های نازک فولادی با تخته‌های مقاوم در برابر کماتش از دیگر راهکارهای طراحی سیستم مذکور است.<sup>[۱۹]</sup> ورق فولادی می‌تواند قبل از کماتش برشی به مقاومت خمیری کامل خود برسد. با وجود این، تخته‌ی مقاوم در برابر کماتش معمولاً از بتن ساخته می‌شود که طبیعتاً باعث افزایش وزن دیوار برشی می‌شود و به دلیل مقاومت کششی پایین بتن، تخته‌های اشاره شده ممکن است تحت بارهای ناگهانی از قبیل زلزله، دچار ترک‌هایی شوند.<sup>[۱۰]</sup>

مطابق با روش‌های اشاره شده، روش‌های مختلفی برای افزایش و بهبود عملکرد لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی پیشنهاد شده است. در این بین، در پژوهش حاضر به استفاده از پوشش بتنی روی ورق فولادی نازک توجه شده است. دیوارهای برشی مرکب که از یک لایه‌ی ورق فولادی نازک به همراه پوششی از بتن آرمه در یک و یا دو طرف ورق فولادی ساخته شده‌اند، حالت توسعه یافته‌ی از دیوار برشی فولادی هستند که می‌توانند به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی استفاده شوند. با توجه به بیان مزایای دیوارهای برشی فولادی و مرکب، این عناصر مقاوم جانبی محدودیت‌هایی را در زمینه‌ی معماری و بازشوها ایجاد می‌کنند.<sup>[۱۱]</sup> هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی مرکب سوراخدار تحت بارهای رفت و برگشتی است. علاوه بر این، تأثیر پارامترهایی، نظیر: ابعاد، شکل و محل قرارگیری بازشو نیز در رفتار دیوار برشی مدنظر قرار گرفته است.

## ۲. مدل‌سازی عددی

برای اطمینان از صحت و رفتار نهایی مدل عددی در مدل‌سازی عددی به کمک برنامه‌ی اجزاء محدود آباکوس/استاندارد،<sup>[۱۱]</sup> از مدل مرجع جهت اعتبارسنجی استفاده شده است. برای این منظور مدل رفتاری بتن و فولاد، نوع المان و مش، اتصال المان‌ها به یکدیگر و شرایط مرزی با کمک اعتبارسنجی انجام شده استفاده شده است. در ادامه، جزئیات بیشتری ارائه شده است.

### ۱.۲. مدل رفتاری مصالح

#### ۱.۱.۲. مدل رفتاری بتن

مدل خسارت خمیری بتن (CDP)<sup>۱</sup> در برنامه‌ی آباکوس، قابلیت کلی برای مدل‌سازی بتن و سایر مصالح نیمه‌شکننده در تمام انواع سازه‌ها دارد. در مطالعه‌ی حاضر، مقدار ۱۵ درجه برای این زاویه طبق توصیه‌ی لوبلینز<sup>[۱۲]</sup> (۱۹۹۰)، برای مدل‌سازی مصالح بتن با محصورشوندگی کم استفاده شده است. به‌طور کلی به سه دسته پارامتر برای تعریف مدل اخیر نیاز است که شامل پارامترهای: حالت خمیری، منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی تک‌محوره‌ی بتن و پارامترهای آسیب در کشش و فشار است.

در بخش پارامترهای حالت خمیری، از تابع هایپر بولیک دراکر - پراگر به عنوان تابع پتانسیل جریان استفاده شده است. زاویه‌ی اتساع مطابق با توصیه‌ی برنامه، ۴۰ درجه در نظر گرفته شد. همچنین خروج از مرکزیت برابر با ۰/۱، ضریب شکل تابع برابر با ۰/۶۶۷، نسبت مقاومت فشاری دو محوره‌ی بتن به مقاومت فشاری تک‌محوره برابر با ۱/۱۶ و پارامتر ویسکوزیته نیز برابر با ۰/۱ اختیار شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، برای معرفی رابطه‌ی تنش - کرنش فشاری بتن به نرم‌افزار از رابطه‌ی هوگنستاد اصلاح شده استفاده شده است که سه بخش دارد. در بخش نخست و خطی نمودار، فرض می‌شود که رفتار بتن تا تنش بیشینه‌ی ۳۰٪ مقاومت

فشاری آن ( $f_c''$ )، رفتار خطی دارد. در بخش دوم، منحنی تنش - کرنش هوگنستاد اصلاح شده‌ی بتن در فشار براساس رابطه‌ی ۱ محاسبه و ترسیم می‌شود.

$$f_c = K_s f_c' \left[ \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = 1,8 (K_s f_c') / (4700 \sqrt{f_c'})$$

که در آن، مقدار  $K_s$  برای بتن‌های با مقاومت فشاری بیشتر از ۳۵ مگاپاسکال برابر با ۱ و  $f_c'$  برابر با ۴۳ مگاپاسکال لحاظ می‌شود. بخش سوم، شاخه‌ی نزولی منحنی هوگنستاد اصلاح شده،<sup>[۱۴]</sup> به صورت خطی است که از نقطه‌ی ( $\epsilon_0, f_c''$ ) تا نقطه‌ی ( $\epsilon_u, 0,85 f_c''$ ) امتداد دارد. مقدار  $f_c''$  برابر با  $K_S f_c'$  و  $\epsilon_u = 0,0038$  در نظر گرفته می‌شود. منحنی تنش - کرنش فشاری بتن مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

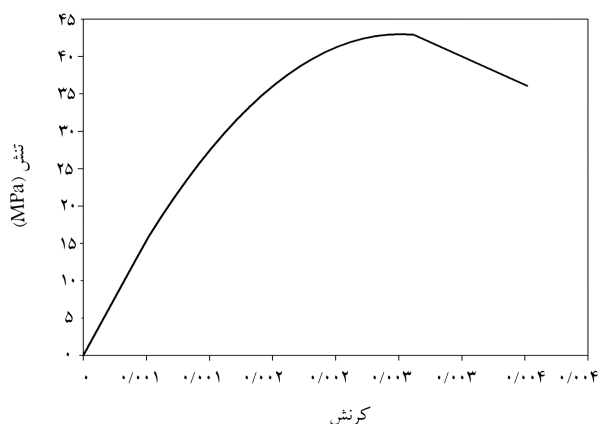
منحنی تنش کششی - کرنش بتن تا قبل از مقاومت کششی به صورت خطی است. پس از ترک‌خوردگی، شاخه‌ی نزولی منحنی با یک روند نرم‌شوندگی مدل می‌شود که به کرنش نهایی کششی  $\epsilon_u$  ختم می‌شود. دو نوع منحنی تنش - کرنش و تنش - عرض ترک برای بیان مدل رفتاری بتن تحت کشش بیان می‌شود. پس از بیان رابطه‌ی تنش کششی - عرض ترک و با استفاده از عرض ترک، رابطه‌ی تنش کششی بر حسب کرنش استخراج می‌شود که در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است.

تنش - عرض ترک را می‌توان با روش‌های مختلفی نظیر خطی، دو خطی یا تابع نمایی تعریف کرد. در مطالعه‌ی حاضر پاسخ نرم‌شوندگی دو خطی استفاده شده است که در شکل (۲الف) مشاهده می‌شود که مطابق آن،  $f_t'$  بیشینه‌ی مقاومت کششی و  $G_f$  اشاره به انرژی شکست بتن دارد که بیانگر سطح زیر منحنی تنش - عرض ترک است. انرژی شکست وابسته به کیفیت بتن و اندازه‌ی سنگ‌دانه است که از رابطه‌ی ۲ مطابق با مدل CEB-FIP<sup>[۱۵]</sup> به دست می‌آید.

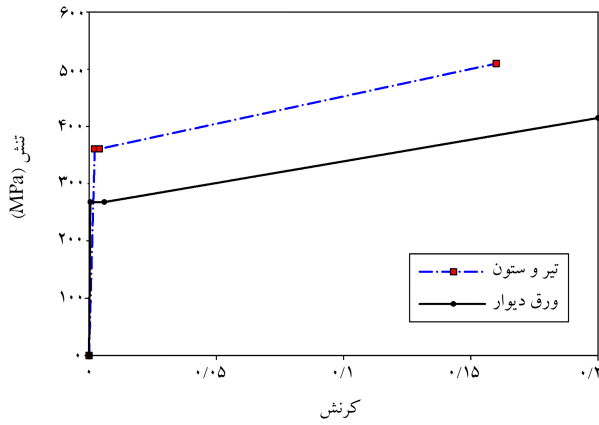
$$G_f = G_{f0} (f_{cm}/f_{cm0})^{0,7} \quad (2)$$

که در آن،  $f_{cm0}$  برابر با ۱۰ مگاپاسکال و  $G_{f0}$  انرژی شکست پایه وابسته به بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه ( $d_{max}$ ) است که مقدار آن برای  $d_{max}$  برابر با ۱۰ میلی‌متر، ۰/۲۶ نیوتن بر میلی‌متر است.<sup>[۱۵]</sup> با توجه به CEB-FIP،  $f_{cm}$  میانگین مقاومت فشاری بتن است که مرتبط با مقدار مشخصه‌ی  $f_{ck}$  است و از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad (3)$$



شکل ۱. منحنی تنش - کرنش بتن لحاظ شده در پژوهش حاضر.



شکل ۳. منحنی تنش - کرنش فولاد. [۱۶]

می‌کند. تعداد پیش فرض نقاط انتگرالی در طول ضخامت المان مذکور برابر با ۵ است که برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح در مسئله‌ی بارگذاری رفت و برگشتی کافی است. پوشش بتنی دیوار با المان حجمی مکعبی C3D8R مدل شده است که یک المان محیط پیوسته‌ی سه‌بُعدی شامل ۸ گره انتگرال کاهش یافته با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است. در آباکوس/استاندارد، فرمولاسیون سه‌بُعدی لاکرانژی برای المان‌های پوسته‌ی و حجمی محیط پیوسته استفاده شده است. در این فرمولاسیون، مختصات گره‌ی در شروع هر نمو به روز می‌شوند. توابع شکل و مشتق‌ها با استفاده از مختصات به روز شده‌ی هر گره دوباره نوشته و سرهم‌بندی می‌شوند. برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی میلگردهای طولی و عرضی از المان سه‌بُعدی دوگره‌ی T3D2 استفاده شده است. برای اطمینان از چسبندگی کافی بین بتن و میلگردها، میلگردها به‌عنوان بخش مدفون شده<sup>۴</sup> در بلوک‌های بتنی تعریف شدند که یک رفتار کوپل مؤثر و مناسب از رفتار میلگرد با بتن محیط اطراف خود ایجاد می‌کند.

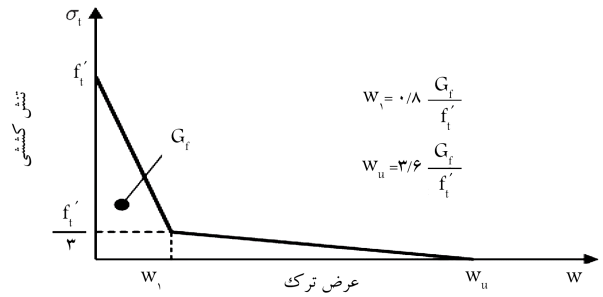
### ۳.۲. تماس بین المان‌ها، شرایط مرزی و بارگذاری

فرض شده است که اتصال‌های بین المان‌های مرزی از نوع صلب هستند. قید tie بین ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی تعریف شده است، تا شرایط مقید کردن گره‌های مرزی بین دو المان مهیا شود. همچنین سطوح داخلی دو ورق فولادی دیوار با دو سطح ورق لاستیکی نیز با کمک قید tie برای تأمین شرایط چسبندگی کامل به یکدیگر مقید می‌شوند.

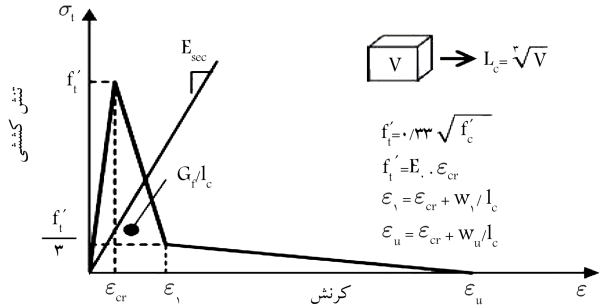
پای دو المان مرزی در سه راستا از نظر تغییرمکان انتقالی بسته شدند. در سر بالای المان مرزی در جهت عمود بر قاب مقید شد تا از تغییرشکل خارج از صفحه‌ی سیستم جلوگیری شود. همچنین بارگذاری یکنوا و چرخه‌ی به قسمت بالای سمت راست المان مرزی و به‌صورت کنترل تغییرمکان اعمال شد. در شکل ۴، به ترتیب شرایط مرزی و الگوی بارگذاری چرخه‌ی نشان داده شده است.

### ۴.۲. اعتبارسنجی مدل عددی

در مطالعه‌ی حاضر، مطالعه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی دیوار برشی فولادی مقاوم شده با روکش بتنی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر توسط عربراده و همکاران (۲۰۱۱)، [۱۶] برای اعتبارسنجی مدل عددی در نظر گرفته شده است. در بین نمونه‌های مختلف که تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار داده شدند، نمونه‌ی CS برای اعتبارسنجی انتخاب شد (شکل ۴). برای المان‌های تیر و ستون از ۲IPE۱۰۰ استفاده شده است. ضخامت ورق دیوار فولادی برابر با ۲ میلی‌متر لحاظ شد.



الف) رابطه‌ی تنش کششی - عرض ترک بتن؛



ب) رابطه‌ی تنش کششی - کرنش برای بتن.

شکل ۲. رفتار بتن در کشش و روابط تنش بر حسب کرنش و عرض ترک.

به منظور کمی‌سازی تمرکز شکست، کرنش‌های کششی با استفاده از تقسیم کردن عرض ترک ( $w$ ) بر طول مشخصه‌ی المان ( $l_c$ ) تعریف شدند. برای المان‌های سه‌بُعدی بتن، طول مشخصه را می‌توان به صورت ریشه‌ی سوم حجم المان در نظر گرفت که در شبیه‌سازی‌های عددی برابر با ۲۰ میلی‌متر اتخاذ شده است. منحنی تنش - کرنش کششی در شکل (۲ب) مشاهده می‌شود. مقدار بیشینه‌ی مقاومت کششی بتن ( $f'_t$ ) در مطالعه‌ی حاضر و مطابق با آیین‌نامه‌ی CEB-FIP برابر با ۳/۵۳ مگاپاسکال بوده است.

### ۲.۱.۲. مدل رفتاری فولاد

برای بیان رفتار قابل پیش‌بینی فولاد در کشش و فشار از دو رابطه‌ی ۴ و ۵ استفاده می‌شود. داده‌های تنش و کرنش کسب شده از آزمایش کشش به تنش واقعی  $\sigma_{true}$  و کرنش خمیری  $\epsilon_{ln}^{pl}$  برای تحلیل المان محدود با استفاده از روابط ۵ و ۶ قابل تبدیل هستند.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad (4)$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - (\sigma_{true}/E_s) \quad (5)$$

که در آن‌ها،  $E_s$  مدول کشسانی فولاد،  $\sigma_{nom}$  تنش مهندسی یا نرمال و  $\epsilon_{nom}$  کرنش مهندسی یا نرمال هستند. ضریب پواسون فولاد نیز در تحلیل‌ها برابر با ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین رفتار غیرخطی فولاد نیز از مدل خمیری کامل با رفتار سه‌خطی استفاده شده است (شکل ۳).

### ۲.۲. نوع المان‌های استفاده شده

در مدل‌های المان محدود در پژوهش حاضر، ورق‌های فولادی دیوار و المان‌های مرزی با استفاده از المان پوسته‌ی S4R مش‌بندی شده‌اند. هر گره در المان پوسته‌ی S4R، شش درجه آزادی مشتمل بر سه درجه آزادی دورانی و سه درجه آزادی انتقالی دارد. المان S4R از یک نقطه‌ی انتگرالی روی میان صفحه‌ی خود استفاده

ظرفیت باربری در نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر با ۵۸۵ کیلونیوتن بوده است که در تغییرمکان ۲۶ میلی‌متر رخ داده است. مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده در مدل شبیه‌سازی شده برابر با ۵۶۸ کیلونیوتن به دست آمده و اختلاف ۲/۹ بین دو مقدار آزمایشگاهی و عددی مشاهده شده است.

## ۵.۲. معرفی مدل‌های عددی

نمونه‌ی مینا بدون حفره است که با علامت SPSW نشان داده شده است و نمونه‌های بعدی، شامل: حفره‌های دایروی، مستطیلی و مربع شکل بودند. لازم به ذکر است در نمونه‌های شامل حفره، چهار حالت مختلف بررسی شده است: حالت اول) حفره در وسط دیوار؛ حالت دوم) حفره در گوشه‌ی دیوار؛ حالت سوم) حفره در ارتفاع میانی کنار ستون و حالت چهارم) حفره در بالای ورق دیوار و در میانه‌ی زیر تیر. در شکل ۸، موقعیت حفره‌ها نشان داده شده است. بدین ترتیب، ۱۶ مدل المان محدود تحت بارگذاری قرار گرفتند. در تمام مدل‌ها از اعمال بارگذاری ثقلی صرف‌نظر شده است. دایره‌ی به‌کار رفته در مدل‌ها به قطر  $10^\circ$  میلی‌متر مربع بوده و در نتیجه، مساحت حفره برابر با  $785^\circ$  میلی‌متر مربع شده است. از این رو، با رعایت مساحت یکسان برای حفره‌ی مربع‌شکل، بُعد حفره برابر با ۸۹ میلی‌متر شده است. به همین ترتیب، با رعایت ۲ برابر بودن طول نسبت به عرض حفره‌ی مستطیل، عرض مستطیل برابر با ۶۲ میلی‌متر و طول آن برابر با ۱۲۵ میلی‌متر به دست آمده است.

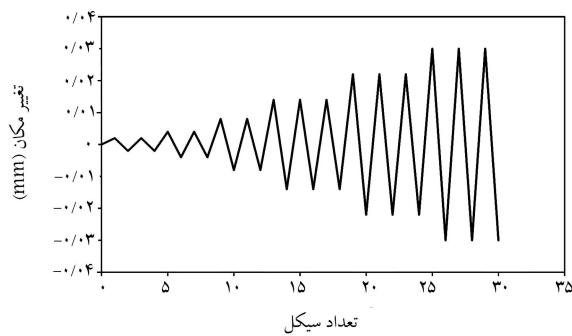
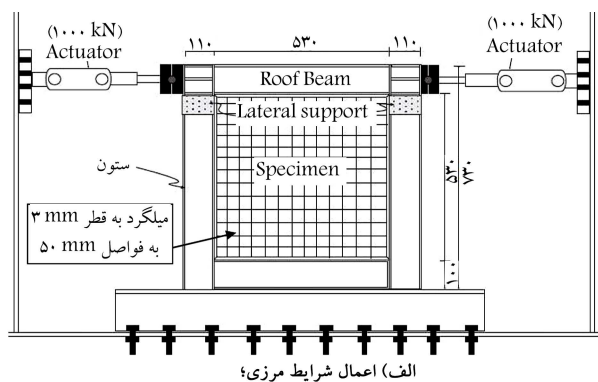
تمام ورق‌های فولادی دیوار به مساحت یکسان و اندازه‌ی  $28 \times 9$  سانتی‌متر مربع و به سه شکل مختلف دایره، مربع و مستطیل در نظر گرفته شده‌اند. به منظور جلوگیری از اندرکنشی بین دیوار فولادی و پوشش بتنی در اثر بار جانبی، فاصله‌ی بین به‌کار رفته در مدل‌ها از اعمال بارگذاری ثقلی صرف‌نظر شده است. بتن استفاده شده در تمام مدل‌ها به ضخامت  $30^\circ$  میلی‌متر، مدول ارتجاعی  $30 \times 10^4$  مگاپاسکال و مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی  $43^\circ$  مگاپاسکال بوده است. علت استفاده از بتن با مقاومت بالا، تمایل به ترک‌خوردگی کمتر در پوشش بتنی بوده است. آرماتور به میزان  $1\%$  حجم بتن در داخل آن به صورت یک سفره قرار گرفت و به صورت Rebar Layer به نرم‌افزار معرفی شد. بارگذاری به صورت استاتیکی غیرخطی بوده است که طی آن نمونه‌ها تحت اثر تغییرمکان افزایشی بر روی تیر فوقانی خود قرار گرفته‌اند.

## ۳. نتایج تحلیل مدل‌های عددی

### ۱.۳. نمونه‌های بدون بازشو

نام‌گذاری نمونه‌ها در این گروه بدین صورت است که Frame، مبین قاب فولادی بدون وجود دیوار برشی فولادی است. SPSW بیانگر دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتنی و بدون حفره است. CSPSW مبین دیوار برشی فولادی بدون وجود حفره و با پوشش بتنی در یک سمت ورق فولادی دیوار است. همچنین OSPSW معرف دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتنی است، که یک حفره‌ی دایروی در مرکز آن به مساحت  $81 \times 25$  سانتی‌متر مربع قرار دارد.

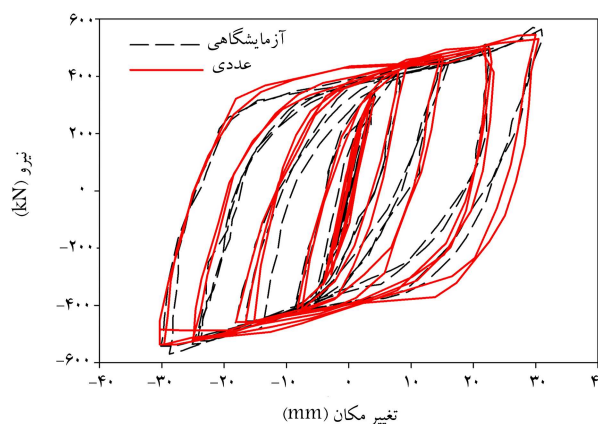
در ابتدا نمونه‌ی سالم بدون بازشو تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفته و رفتار نمونه در قالب منحنی نیرو - تغییرمکان جانبی در شکل ۶ ارائه شده است. در این راستا، ابتدا رفتار قاب به تنهایی تحت بار جانبی بررسی شد. سپس با اضافه کردن ورق فولادی پُرکننده در قاب، رفتار بهبودیافته‌ی قاب ارائه شد. سپس به منظور



الف) اعمال شرایط مرزی؛

ب) الگوی بارگذاری اعمالی.

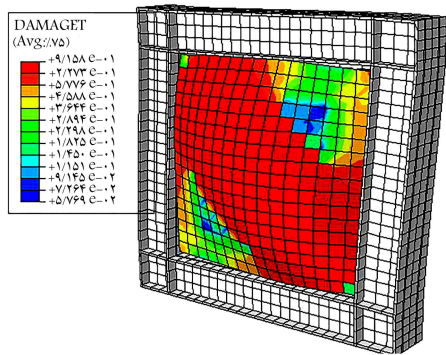
شکل ۴. نمونه‌ی مرجع و الگوی بارگذاری رفت و برگشتی. [۱۶]



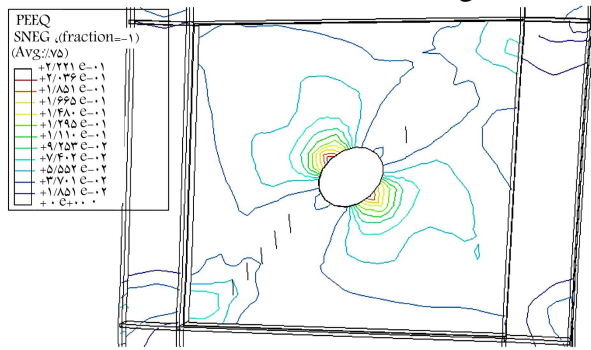
شکل ۵. مقایسه‌ی بین نمودار نیرو - تغییرمکان مدل آزمایشگاهی و عددی.

میلگردهای به‌کار رفته در مدل ذکر شده با قطر ۳ میلی‌متر و نسبت حجمی  $1\%$  در داخل روکش بتنی به ضخامت  $30^\circ$  میلی‌متر استفاده شده است. فاصله‌ی میلگردها از یکدیگر برابر با  $50^\circ$  میلی‌متر بوده و پوشش بتن روی میلگردها برابر با  $15^\circ$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ستون‌ها و تیرهای به‌کار رفته در مدل با مقاومت تسلیم  $361$  مگاپاسکال و  $510$  مگاپاسکال و ورق فولادی دیوار از فولاد با تنش تسلیم  $268$  مگاپاسکال و تنش نهایی  $415$  مگاپاسکال بوده است (شکل ۳).

در شکل ۵، مقایسه‌ی بین نتیجه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی المان محدود انجام شده است که از نتیجه‌ی آن می‌توان دریافت که مدل عددی، رفتاری مناسب و تطبیق قابل قبولی با نتیجه‌ی آزمایشگاهی داشته است. سختی کشسان اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر با  $85$  کیلونیوتن بر میلی‌متر بوده است که مقدار حاصل شده از مدل عددی نیز تقریباً برابر با  $87$  کیلونیوتن بر میلی‌متر به دست آمد که اختلاف  $2/3$  درصدی داشته است که قابل قبول است. همچنین بیشینه‌ی



الف) توزیع خسارت کششی در روکش بتنی در نمونه ی CSPSW



ب) توزیع کرنش پلاستیک در اطراف حفره ی دایروی در نمونه ی OCSPSW

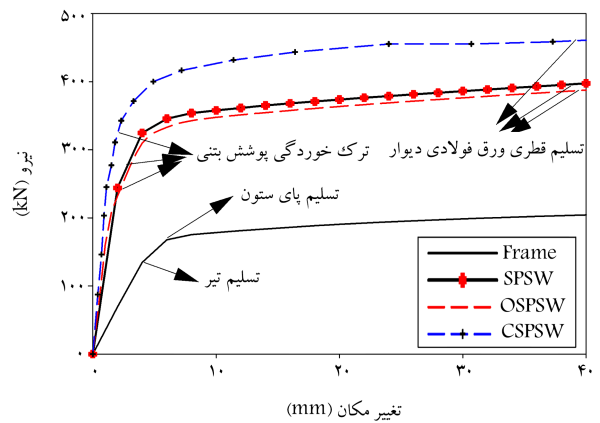
شکل ۷. تغییرشکل نهایی دیوار برشی مرکب با و بدون حفره به همراه توزیع خسارت کششی در پوشش بتنی و توزیع کرنش خمیری دیوار.

باشد. بدین ترتیب، فاصله ی لبه ی حفره تا روی بال تیر یا ستون برابر با ۱۱/۲۵ میلی متر بوده است.

نمودار نیرو - تغییرمکان در شکل ۹، تغییرشکل نهایی دیوارهای مرکب با موقعیت های مختلف بازشوی دایروی و نمودار نیرو - تغییرمکان جانبی را نشان می دهد. با توجه به یافته های حاصل از تحلیل های استاتیکی غیرخطی مدل های عددی مشخص شد که موقعیت بازشو، تأثیر قابل ملاحظه یی در رفتار سیستم و ظرفیت باربری ندارد. در تمام حالت ها، بیشترین تمرکز کرنش خمیری در اطراف بازشو و در میدان کششی ایجاد شده است. بررسی ها نشان می دهد هنگامی که بازشوها روی خط مرکزی دیوار هستند، با تغییر در موقعیت بازشو، تغییر محسوسی در میزان تمرکز تنش ها اطراف بازشوها صورت نمی پذیرد. مگر در حالت شماره ۱ که بازشو دقیقاً روی خط قطری دیوار در وسط قرار دارد. این در حالتی است که وقتی بازشوها از این موقعیت خارج می شوند، تمرکز تنش ها حول بازشوها افزایش می یابد. همچنین با تغییر در موقعیت بازشو، ظرفیت باربری به میزان ۵٪ کاهش یافت. به طور کلی، هنگامی که بازشو به صورتی تعبیه می شود که دیوار، تقارن خود را حفظ می کند، دیوار رفتار مناسب تری از خود نشان می دهد. در این حالت، تمرکز تنش حول بازشوها، کمتر از حالت نامتقارن است. همچنین در حالتی که بازشو در وسط قرار دارد، تنش بیشینه ی کمتری نسبت به حالت های نامتقارن دیگر تا میزان ۳٪ دارد.

### ۳.۳. نمونه های با بازشوی مربع شکل

مطابق با شکل ۱۰، موقعیت بازشوها ی مربع شکل نیز بدین صورت اختیار شده است. ابعاد بازشو نیز برابر با ۸۹ میلی متر در نظر گرفته شده است تا مساحت بازشوها با بازشوی دایروی یکسان باشند. در شکل ۱۰، منحنی نیرو - تغییرمکان جانبی قاب



شکل ۶. مقایسه ی بین نمودار نیرو - تغییرمکان مدل های عددی.

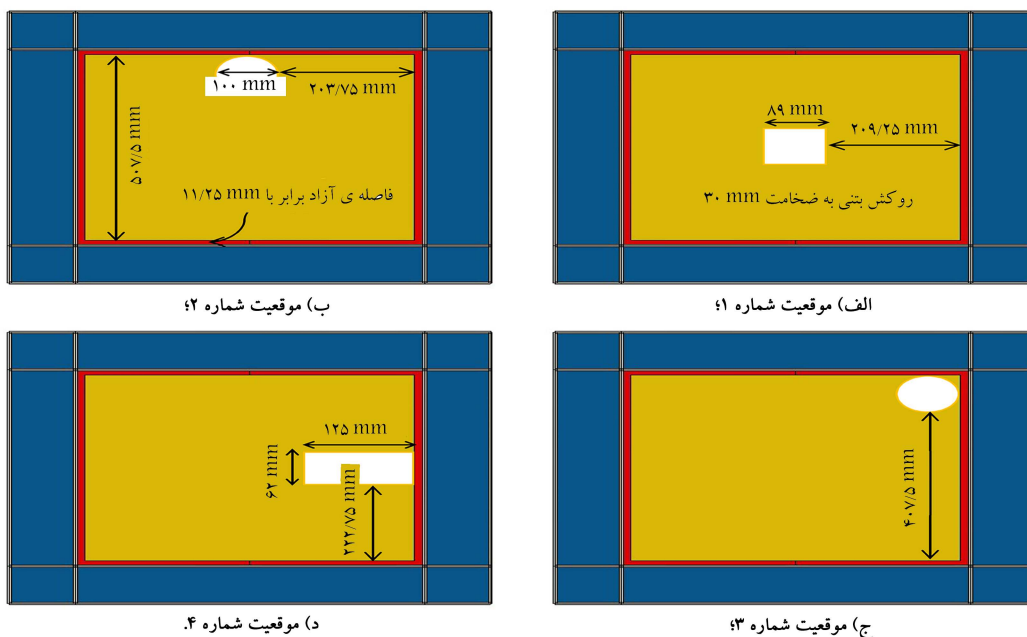
جلوگیری از کمزش برون صفحه ی قاب از یک پوشش بتنی به ضخامت ۳۰ میلی متر در یک طرف ورق فولادی استفاده و رفتار نمونه ی CSPSW با دو نمونه ی پیشین مقایسه شد.

در نمونه ی شامل فقط قاب، سختی کشسان جانبی قاب برابر با ۳۳/۶ کیلونیوتن بر میلی متر شده است که با اضافه کردن یک ورق پُرکننده ی فولادی به آن، سختی جانبی تقریباً ۳/۶ برابر شده است. در صورت وجود یک بازشوی دایروی در داخل دیوار فولادی، ظرفیت باربری کاهش می یابد. این مورد در شکل ۶ نشان داده شده است.

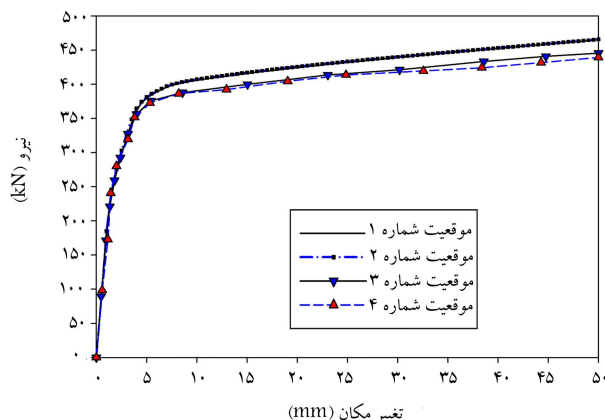
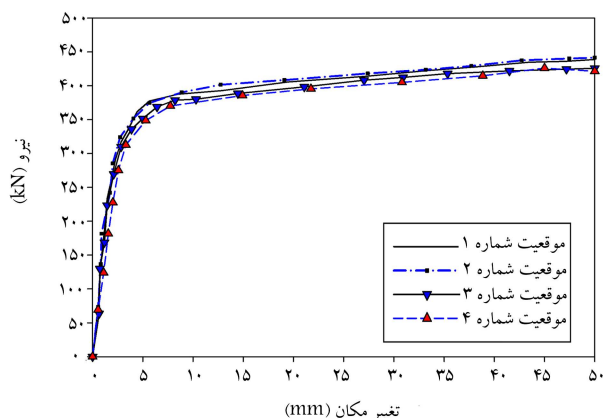
وجود یک بازشوی دایروی در دیوار فولادی، تغییری در سختی کشسان ایجاد نکرده است. اما بیشینه ی ظرفیت باربری نمونه با بازشو نسبت به نمونه ی SPSW تقریباً ۱۴٪ کاهش یافته است. همچنین مود تسلیم در نمونه ها بدین ترتیب است که در نمونه ی شامل فقط قاب، تسلیم از ناحیه ی پای ستون و چشمه ی اتصال شروع شد و به تدریج به نواحی کناری تیر گسترش یافت. در نمونه ی شامل ورق پُرکننده ی فولادی، مود تسلیم از ورق فولادی دیوار شروع شد. با وجود بازشو، کمزش ورق به طور مشهود در ورق فولادی دیوار مشاهده می شود. حال به منظور ارتقاء عملکرد و رفتار سیستم، از یک پوشش بتنی به ضخامت ۳۰ میلی متر در یک وجه ورق فولادی استفاده شده است. با اضافه کردن پوشش بتنی، سختی کشسان برابر با ۱۷۷ کیلونیوتن بر میلی متر به دست آمده و ظرفیت باربری نسبت به نمونه ی SPSW تقریباً ۱۳٪ افزایش داشته است (۴۸۲ کیلونیوتن). تغییرشکل نهایی نمونه، شامل پوشش بتنی در شکل ۷ مشاهده می شود. همچنین توزیع خسارت کششی در اثر ایجاد میدان کششی در ورق فولادی دیوار نیز در تغییرمکان جانبی ۵۰ میلی متر به تصویر کشیده شده است که بخش قطری پوشش بتنی تا ۹۰٪ دچار ترک خوردگی و خسارت کششی شده است.

### ۲.۳. نمونه های با بازشوی دایروی

در بخش کنونی، موقعیت قرارگیری بازشوی دایروی و تأثیر آن در دیوار برشی مرکب بررسی شده است. در شکل ۸، موقعیت قرارگیری بازشوها به همراه شماره ی مرتبط مشاهده می شود. در تمام نمونه های تحلیلی در گروه مذکور، مساحت حفره یکسان است. در موقعیت شماره ۱، مرکز دایره بر مرکز ورق منطبق است. در موقعیت های دیگر، که به لبه ی ورق دیوار نزدیک می شوند، فرض شده است که لبه ی پوشش بتنی منطبق بر لبه ی ضلع شکل های مربع و مستطیل و مماس بر محیط حفره، دایروی



شکل ۸. موقعیت‌های مختلف بازشوها در دیوار برشی مرکب.



شکل ۹. نمودار نیرو - تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های با بازشوی مربعی شکل.

شکل ۱۰. نمودار نیرو - تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های با بازشوی دایروی.

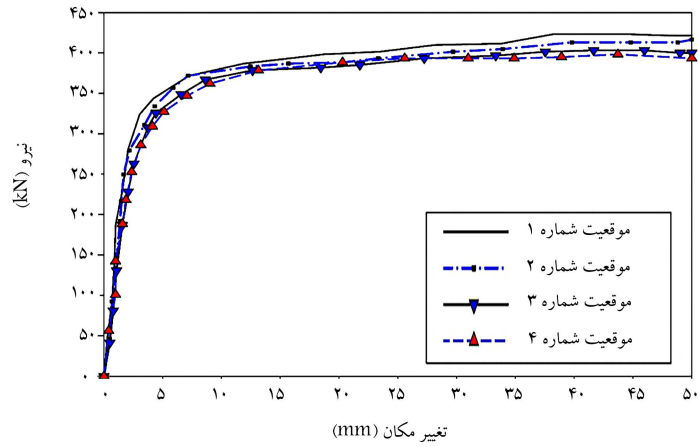
با بررسی در حالت موقعیت بازشوی شماره ۱، کمی کمتر (تقریباً ۴٪) از همان نمونه با بازشوی مربع شکل است. پس، وجود بازشو در هر حالت می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت باربری اما به مقدار کم شود. اما تغییری در مقدار سختی کشسان ندارد. همچنین با تغییر در موقعیت بازشو و دور شدن از خط قطری، ظرفیت باربری نیز تا ۶٪ در این نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین در شکل‌های (ب ۱۱) تا (د ۱۱) که توزیع خسارت کششی بتن نشان داده شده است، مشخص می‌شود که در تمام حالت‌ها، مسیر ترک ابتدا از گوشه‌ی بازشو شروع می‌شود و سپس گسترش می‌یابد. فقط در مورد بازشویی که در گوشه‌ی بالا قرار دارد، مسیر ترک به صورت قطری است و همچنین در این وضعیت، مسیر ترک به گوشه‌ی بالایی سمت چپ دیوار (شکل ۱۱) ختم نمی‌شود (به میزان ارتفاع بازشو، مسیر ترک پایان می‌یابد). این وضعیت در سایر بازشوهای مربع و دایره نیز مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه در مدل‌سازی‌ها، سه شکل مختلف: دایره، مربع و مستطیل با مساحت‌های یکسان مدل شده‌اند، از نظر شکل بازشو به ترتیب حالت‌های دایره‌یی، مربعی و مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به بقیه‌ی شکل‌ها دارد. همچنین

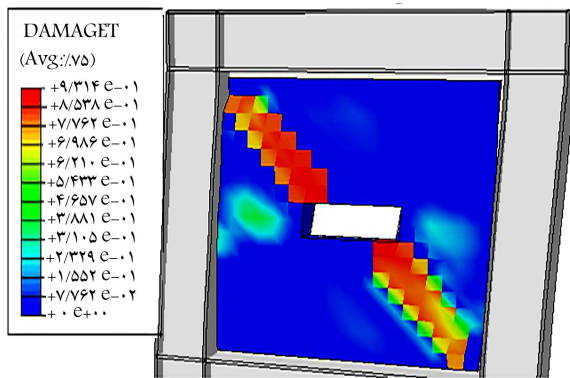
به همراه دیوار مرکب دارای بازشوی مربعی با موقعیت‌های مختلف قرارگیری بازشو نشان داده شده است. وجود بازشو تأثیر چندانی در تغییرات منحنی از جمله سختی کشسان و ظرفیت باربری ندارد. با مقایسه‌ی ساده بین دیوار با بازشوی مربع شکل در وسط نسبت به دیوار با بازشوی دایروی در وسط مشخص می‌شود، که ظرفیت باربری به مقدار تقریباً ۵٪ کاهش یافته است. در این مدل‌ها، همانند مدل قبلی، مشاهده می‌شود که با تغییر موقعیت بازشو از وسط به اطراف، ظرفیت باربری بیشینه تا میزان ۴٪ کاهش می‌یابد. تمرکز تنش نیز همانند بحث پیشین در اطراف بازشو بیشترین مقدار را دارد.

#### ۴.۳. نمونه‌های با بازشوی مستطیل شکل

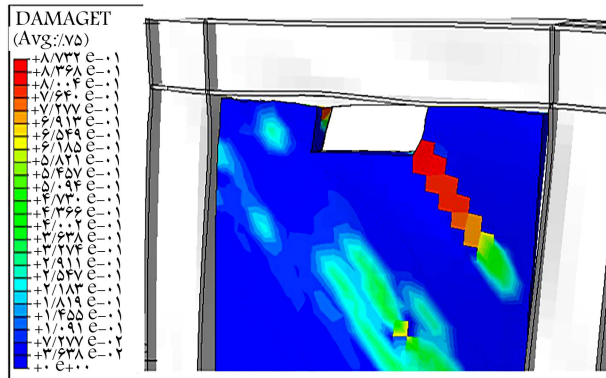
در نام‌گذاری این گروه حرف R مبین حفره از نوع مستطیلی است و عدد پس از آن موقعیت حفره را مطابق با شکل ۸ روی دیوار نشان می‌دهد. در نمونه‌های با بازشوی مستطیلی شکل، از مستطیلی به طول ۱۲۵ میلی‌متر و عرض ۶۲ میلی‌متر استفاده شده است. در این نمونه‌ها مطابق با شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که ظرفیت



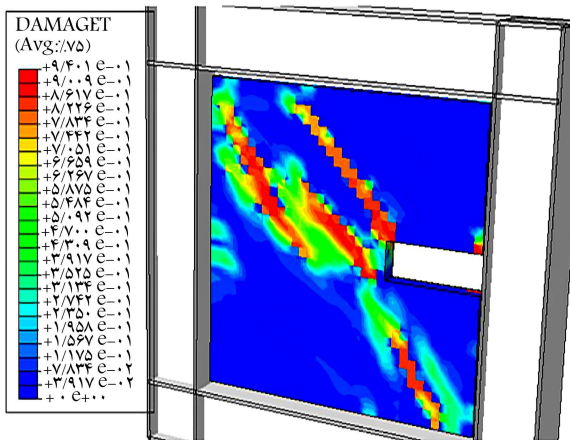
الف) نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه های دارای بازشوی مستطیلی؛



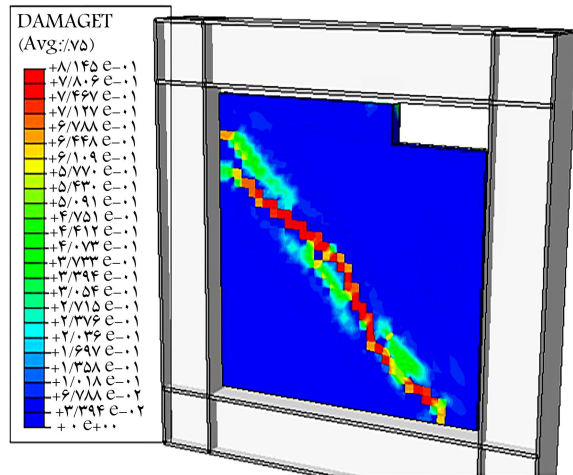
ب) توزیع خسارت کششی بتن در نمون با بازشوی مستطیلی در موقعیت شماره ۱؛



ج) توزیع خسارت کششی بتن در نمون با بازشوی مستطیلی در موقعیت شماره ۲؛



د) توزیع خسارت کششی بتن در نمون با بازشوی مستطیلی در موقعیت شماره ۳؛



ه) توزیع خسارت کششی بتن در نمون با بازشوی مستطیلی در موقعیت شماره ۴؛

شکل ۱۱. نمودار نیرو - تغییر مکان جانبی نمونه های با بازشوی مستطیل شکل.

ظرفیت باربری بازشوی دایروی نسبت به دو بازشوی دیگر به طور متوسط ۵٪ بیشتر است. دلیل این امر را می توان به ایجاد تمرکز تنش در گوشه های بازشوی مربعی و مستطیلی در دیوار برشی نسبت داد که موجب می شود شکست در ابتدا در نقاط مذکور آغاز شود. شکل بازشوها پس از اعمال بار تغییر می کند و بازشوی دایروی به سمت بیضوی و بازشوی مربعی و مستطیلی به صورت ذوزنقه ای شکل در می آیند.

با توجه به نتایج پژوهش می توان چنین اظهار کرد که در صورت نبودن مشکلات خاص سازه ای یا معماری پیشنهاد می شود که بازشوها در محلی احداث شوند که خط قطری بازشو و دیوار بر هم منطبق باشد. به عبارتی، مشخص شده است که میزان حساسیت مدل ها به بازشو در روی قطر پانل بیشتر و با نزدیک شدن آن به گوشه ای پانل افزایش می یابد و همچنین در کلیه نمونه ها تمرکز تنش در گوشه های بازشوی بالاست و تقویت گوشه های بازشو را لازم دارد. میزان افزایش



#### ۴. بررسی تأثیر مساحت در رفتار دیوار مرکب ۱.۴. دیوار با بازشوی دایروی

در شکل ۱۲، نمودارهای نیرو - تغییرمکان جانبی برای نمونه‌ی شامل بازشوی دایروی با ۴ قطر نشان داده شده است. مقادیر پس از حرف C، نشانگر قطر حفره بر حسب میلی‌متر هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مساحت بازشوی دایروی، ظرفیت باربری کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به منقطع شدن مسیر باربری در دیوار برشی نسبت داد. با توجه به شکل مذکور، می‌توان چنین اظهار کرد که در نمونه با بازشوی به قطر ۲۵۰ میلی‌متر، رفتار دیوار برشی تغییر پیدا می‌کند و هر سمت بازشوی دیوار به صورت جداگانه رفتار خواهد کرد. قسمت فوقانی و تحتانی دیوار ذکر شده تقریباً تنشی را منتقل نمی‌کنند.

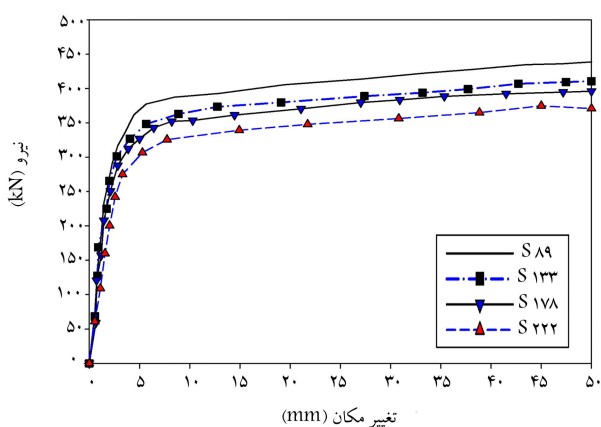
در جدول ۱، تغییرات بار نهایی در برابر مساحت بازشو برای بازشوی دایروی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مساحت بازشو، ظرفیت باربری دیوار برشی کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به صورت تابع لگاریتمی و یا نمایی تقریب زد. در نمودار نشان داده شده، محور افقی شامل دو مقدار مساحت بازشو و نسبت مساحت بازشو به مساحت دیوار (به صورت بی‌بعد) است. تغییرات انرژی جذب شده در برابر مساحت بازشوی دایروی در جدول ۱ ارائه شده است. می‌توان گفت با افزایش مساحت بازشو، میزان انرژی جذب شده کاهش یافته است. این کاهش به فرم تابع درجه‌ی دو بوده و نرخ کاهش انرژی جذب شده با افزایش مساحت، کاهش یافته است. به عبارت دیگر، میزان کاهش انرژی جذب شده در نمونه با بازشوی کوچک‌تر، بیشتر بوده است.

#### ۲.۴. دیوار با بازشوی مربعی

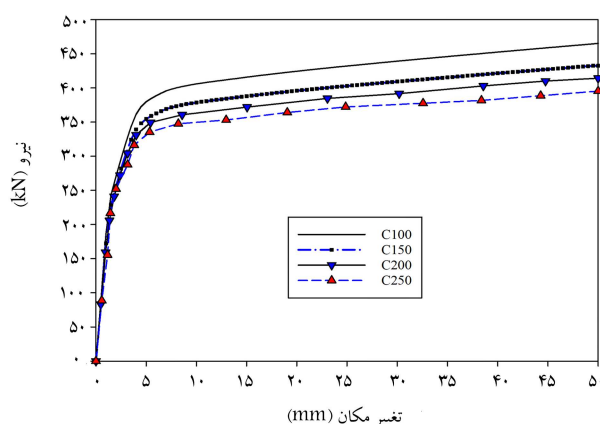
پس از بررسی تأثیر شکل بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی، نوبت به بررسی تأثیر مساحت به طور جداگانه در هر یک از بازشوی‌های مذکور می‌رسد. در بخش حاضر، به منظور بررسی تأثیر مساحت در رفتار دیوار برشی حاوی بازشوی مربعی از ۴ مساحت مختلف استفاده شده است. مقدار پس از حرف S مبین اضلاع بازشوی مربعی هستند، که برابر با ۸۹، ۱۳۳، ۱۷۸ و ۲۲۲ میلی‌متر هستند. در شکل ۱۳، نمودار بار - تغییرمکان دیوارهای برشی مشاهده می‌شود. در جدول ۲، مقادیر بار نهایی، انرژی جذب شده و میزان تغییرات آن‌ها ارائه شده است.

کاهش ظرفیت باربری با افزایش مساحت بازشوی مربعی از درجه دوم بوده و در مساحت‌های کمتر بازشو، نرخ بیشتری داشته است. دلیل این امر را می‌توان به تغییر ماهیت و رفتار دیوار برشی در بازشوی‌های بزرگ‌تر جست‌وجو کرد که موجب می‌شود افزایش مساحت بازشو تأثیر چندانی در کاهش ظرفیت باربری دیوار برشی فولادی نداشته باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مساحت بازشو، از میزان انرژی قابل جذب در سیستم کاسته شده است. انرژی قابل جذب در سیستم باربر جانبی، یکی از پارامترهای اساسی در طراحی لرزه‌ی است و نقشی اساسی در پایداری سازه هنگام زلزله و قابلیت بهره‌برداری پس از زلزله دارد.

مود تسلیم در سیستم اخیر بدین صورت است که در تغییرشکل‌های کوچک، ابتدا پوشش بتنی روی ورق فولادی دیوار در گوشه‌ها و اطراف بازشو دچار ترک خوردگی می‌شود. سپس با افزایش تغییرشکل جانبی قاب، ترک خوردگی در راستای قطری گسترش می‌یابد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که در تغییرشکل‌های بزرگ، بتن درگیری و پیوستگی خود با ورق فولادی را از طریق برش‌گیرهایی که دارد، از دست



شکل ۱۳. نیرو - تغییرمکان نمونه‌های با بازشوی مربعی با مساحت‌های مختلف.



شکل ۱۲. نیرو - تغییرمکان نمونه‌های با بازشوی دایروی با قطرهای مختلف.

جدول ۱. تغییرات بار نهایی و انرژی جذبی برای بازشوی دایروی.

نمونه	مساحت بازشو ( $cm^2$ )	بار نهایی ( $kN$ )	درصد تغییرات بار نهایی	انرژی جذب شده ( $kN.m$ )	درصد تغییرات انرژی جذب شده
C100	۸۱,۲۵	۴۶۵,۳	-	۱۸,۹	-
C150	۱۷۶,۶۳	۴۳۲,۷	۷,۰	۱۸,۰	۴,۷
C200	۳۲۵	۴۱۴,۴	۴,۲	۱۷,۱	۹,۵
C250	۴۹۰,۶۳	۳۹۵,۶	۴,۵	۱۶,۲	۱۴,۳

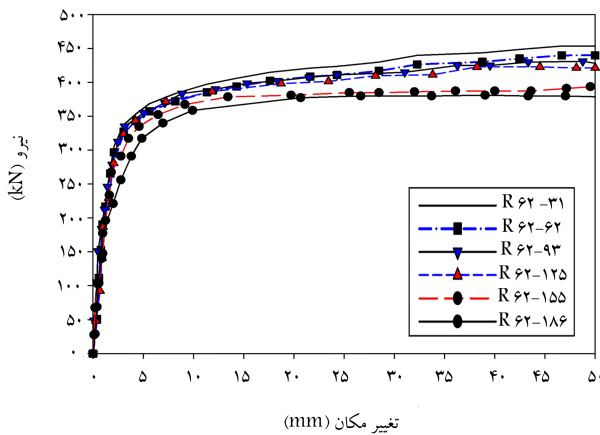


جدول ۲. تغییرات بار نهایی و انرژی جذبی برای بازشوهای مربعی.

نمونه	مساحت بازشو ( $cm^2$ )	بار نهایی ( $kN$ )	درصد تغییرات بار نهایی	انرژی جذب شده ( $kN.m$ )	درصد تغییرات انرژی جذب شده
S۸۹	۷۹,۲۱	۴۳۸,۹	-	۱۸,۴۵	-
S۱۳۳	۱۷۶,۸۹	۴۱۰,۹	۶,۴	۱۷,۰۰	۷,۸
S۱۷۸	۳۱۶,۸۴	۳۹۶,۲	۹,۷	۱۶,۹۰	۸,۴
S۲۲۲	۴۹۲,۸۴	۳۷۱,۱	۱۵,۴	۱۵,۵۷	۱۴,۶

جدول ۳. تغییرات بار نهایی و انرژی جذبی برای بازشوهای مستطیلی.

نمونه	مساحت بازشو ( $cm^2$ )	بار نهایی ( $kN$ )	درصد تغییرات بار نهایی	انرژی جذب شده ( $kN.m$ )	تغییرات انرژی جذب شده
بدون بازشو	۰	۴۶۵,۵	-	۱۹,۳۵	-
R۶۲-۳۱	۱۹,۲۲	۴۵۳,۸	۲,۵	۱۸,۵۴	۴,۲
R۶۲-۶۲	۳۸,۴۴	۴۴۰,۲	۵,۵	۱۸,۲۷	۵,۶
R۶۲-۹۳	۵۷,۶۶	۴۲۷,۵	۸,۲	۱۸,۰۰	۶,۹
R۶۲-۱۲۵	۷۷,۵۰	۴۲۱,۵	۹,۵	۱۷,۳۳	۱۰,۴
R۶۲-۱۵۵	۹۶,۱۰	۳۹۲,۵	۱۵,۶	۱۶,۶۶	۱۳,۹
R۶۲-۱۸۶	۱۱۵,۳۲	۳۷۸,۸	۱۸,۶	۱۶,۴۲	۱۵,۱



شکل ۱۴. نیرو- تغییر مکان نمونه‌های دارای بازشوی مستطیلی.

مربعی و سپس مستطیلی بوده است. به‌طور میانگین ظرفیت باربری نمونه‌های حاوی بازشوی دایروی نسبت به دو نمونه دیگر، به‌طور متوسط ۵٪ بیشتر بوده است که نشان از عملکرد مناسب‌تر بازشوی دایروی در قیاس با سایر شکل‌های بازشوهاست. دلیل این امر را می‌توان به عدم ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوی دایروی نسبت داد. لازم به ذکر است تأثیر تقارن در بازشوی دایروی و مربعی را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. همچنین مشاهده می‌شود که نرخ کاهش ظرفیت باربری در بازشوی مستطیلی بیشتر از سایر نمونه‌هاست. با توجه به شکل می‌توان بیان کرد که با استفاده از بازشوی مربعی می‌توان بیشترین نسبت بازشو را بدون تداخل هندسی با سایر اعضا در دیوار برشی ایجاد کرد. کمترین نسبت بازشو، به بازشوی مستطیلی تعلق دارد.

در شکل ۱۵، تغییرات انرژی جذب شده در برابر مساحت بازشو برای بازشوهای مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن می‌توان گفت با افزایش مساحت بازشو در

می‌دهد و ورق فولادی دیوار به تنهایی نیروی جانبی را تحمل می‌کند که در دریافت‌های بزرگ، کماتش موعی نیز از خود نشان می‌دهد.

### ۳.۴. دیوار با بازشوی مستطیلی

به منظور بررسی تأثیر مساحت و همچنین نسبت طول به عرض بازشو در بازشوهای مستطیلی، چندین مدل اجزاء محدود ساخته و تحلیل شدند. در نام‌گذاری مدل‌ها، عدد اول بیان‌گر ارتفاع بازشو و عدد دوم مبین طول افقی بازشو است (واحد اعداد برحسب میلی‌متر است). در شکل ۱۴، نمودارهای بار- تغییر مکان نمونه‌های حاوی بازشوی مستطیلی مشاهده می‌شود. در جدول ۳، نیز مقادیر بار نهایی، انرژی جذب شده و میزان تغییرات هر یک از پارامترهای مذکور در قیاس با نمونه‌ی بدون بازشو ارائه شده است.

با توجه به نتایج می‌توان دریافت که با افزایش مساحت بازشو از میزان ظرفیت باربری کاسته شده است، که روندی خطی داشته و به‌طور تقریبی به ازاء هر ۱ مترمربع مساحت بازشو، ظرفیت باربری به میزان ۴۶۸ کیلو نیوتن کاهش یافته است. با افزایش طول بازشو، عملکرد قطری دیوار برشی از بین می‌رود و دیوار به‌صورت یکپارچه عمل نخواهد کرد.

### ۴.۴. بررسی کلی

به منظور ارزیابی تأثیر شکل بازشو در ظرفیت باربری و انرژی جذب شده‌ی دیوار برشی، مقایسه‌ی کلی بین سه بازشوی بررسی شده صورت گرفته است. این ارزیابی زمانی ارزشمند می‌شود که نیاز به ایجاد بازشویی با مساحتی خاص وجود داشته باشد. با بررسی صورت‌گرفته می‌توان گفت کدام بازشو به ازاء مساحتی یکسان، کمترین کاهش ظرفیت باربری را از خود به نمایش می‌گذارد. براساس نتایج، به ازاء یک مساحت یکسان بازشو، بهترین عملکرد به ترتیب متعلق به بازشوی دایروی،

ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوی مربعی و مستطیلی در دیوار برشی نسبت داد، که موجب می‌شود شکست در ابتدا در نقاط ذکر شده آغاز شود.

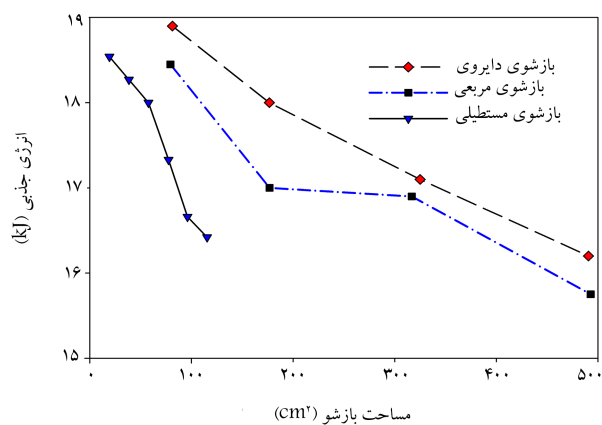
۲. با افزایش مساحت بازشو، ظرفیت باربری دیوار برشی کاهش می‌یابد. این کاهش را برای بازشوی دایروی و مربعی می‌توان از درجه دوم و برای بازشوی مستطیلی به صورت خطی تقریب زد. همچنین، با افزایش مساحت بازشوها، میزان انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. این کاهش روندی شبیه به ظرفیت باربری دارد. کاهش ظرفیت باربری با افزایش مساحت بازشو، نرخ بیشتری در مساحت‌های کمتر بازشو دارد. دلیل این امر را می‌توان به تغییر ماهیت و رفتار دیوار برشی در بازشوهای بزرگ‌تر جست‌وجو کرد، که موجب می‌شود افزایش مساحت بازشو تأثیر چندانی در کاهش ظرفیت باربری دیوار برشی فولادی نداشته باشد.

۳. در صورت داشتن مساحت یکسان از بازشوهای دایروی و مربعی، مشخص شد که نمونه با بازشوی مربعی تقریباً ۳ برابر، افت بیشتری در ظرفیت باربری نسبت به نمونه با بازشوی دایروی دارد. اما تغییرات میزان جذب انرژی بین دو مورد اخیر چندان قابل ملاحظه نیست. همچنین، با افزایش مساحت بازشوی مستطیلی مشخص شد که تغییرات ظرفیت باربری به صورت خطی بوده و به طور تقریبی به ازاء هر ۱ مترمربع مساحت بازشو، ظرفیت باربری به میزان ۴۶۸ کیلو نیوتن کاهش یافته است.

۴. با افزایش مساحت بازشو در تمامی نمونه‌ها، کاهش انرژی جذب شده مشهود است. بیشترین کاهش متعلق به نمونه‌ی مستطیلی به مقدار تقریباً ۱۹٪، به دلیل شکل هندسی خاص آن است. کمترین میزان کاهش انرژی جذب شده نیز متعلق به نمونه با بازشوی دایروی به مقدار تقریباً ۱۴٪ است.

۵. به ازاء یک مساحت یکسان بازشو، بهترین عملکرد به ترتیب متعلق به بازشوی دایروی، مربعی و سپس مستطیلی است. به‌طور میانگین ظرفیت باربری نمونه‌های حاوی بازشوی دایروی نسبت به دو نمونه‌ی دیگر، به طور متوسط ۵٪ بیشتر است که نشان از عملکرد مناسب‌تر بازشوی دایروی در قیاس با سایر شکل‌های بازشو است. دلیل این امر را می‌توان به عدم ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوی دایروی نسبت داد.

۶. مطابق با مطالعات صورت گرفته پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، رفتار این قبیل دیوارهای مرکب تحت بارگذاری حرارت و چرخه‌ی توأم بررسی شود، تا مقاومت در برابر حریق و عملکرد لرزه‌ی آن پس از حریق ارزیابی شود. همچنین به نظر می‌رسد مطالعات عددی بیشتری می‌توان بر روی نوع بتن (الیافی و با عملکرد بالا) در سیستم مذکور صورت داد.



شکل ۱۵. تغییرات انرژی جذبشده در برابر مساحت بازشوهای مختلف.

تمامی نمونه‌ها، کاهش انرژی جذب شده مشهود است. بیشترین کاهش متعلق به نمونه‌ی مستطیلی، به دلیل شکل هندسی خاص آن است. کمترین میزان کاهش انرژی جذب شده نیز همانند پارامتر ظرفیت باربری متعلق به نمونه‌ی حاوی بازشوی دایروی است. انرژی جذب شده به دلیل نقش تأثیرگذار در پایداری سیستم باربر جانبی در حین زلزله بسیار با اهمیت است و باید به آن توجه ویژه داشت.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، وجود بازشوها با شکل‌های دایروی، مربع و مستطیل در دیوارها به همراه تغییر در موقعیت قرارگیری بازشو در دیوار و اثرگذاری آن در رفتار کلی قاب بحث شده است. همچنین ابعاد مختلف بازشو، در حالتی که بازشو در وسط دیوار واقع شود، نیز در تحلیل‌های تکمیلی در نظر گرفته شده است. تحلیل از نوع استاتیکی غیرخطی بوده و تعداد مدل‌ها برابر با ۱۶ انتخاب شده است. نتایج در قالب مود تسلیم، نمودارهای نیرو- تغییرمکان، انرژی جذبشده، و مقادیر نهایی ظرفیت ارائه شده‌اند. در ادامه، خلاصه‌ی مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر ارائه شده است:

۱. بهترین نوع بازشو را می‌توان بازشوی دایروی دانست. میزان افزایش ظرفیت باربری بازشوی دایروی نسبت به دو بازشوی دیگر (مربع و مستطیل) به طور متوسط، ۵٪ است. انرژی جذب شده در دیوار برشی با بازشوی دایروی نسبت به سایر دیوارهای برشی به طور متوسط ۶٪ است. دلیل این امر را می‌توان به

## پانویس‌ها

- concrete damage plasticity model (CDP)
- Lubliner

- update
- embedded

## منابع (References)

1. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and et al. "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", *Journal of Structural Engineering*, **124**(2), pp. 112-120 (1998).
2. Guo, H.C., Hao, J.P. and Liu, Y.H. "Behavior of stiffened and unstiffened steel plate shear walls considering joint properties", *Thin-Walled Struct.*, **97**, pp. 53-62 (2015).
3. Mu, Z. and Yang, Y. "Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings", *Thin-Walled Structures*, **146**, 106457 (2020).
4. Wang, W., Ren, Y., Lu, Z. and et al. "Experimental study of the hysteretic behaviour of corrugated steel plate shear walls and steel plate reinforced concrete composite shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **160**, pp. 136-152 (2019).
5. Shafaei, S., Ayazi, A. and Farahbod, F. "The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **117**, pp. 81-90 (2016).
6. Cao, Z., Wang, Z., Du, P. and et al. "Research on steel plate shear walls stiffened with X-shaped restrainers: Hysteretic behavior and effect of height-to thickness ratio of steel plate", *Thin-Walled Structures*, **144**, 106316 (2019).
7. Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R. and et al. "Stiffness and strength degradation of steel plate shear walls having an arbitrarily located opening", *J. Constr. Steel Res*, **79**, pp. 91-100 (2012).
8. Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M. and Kafi, M.A. "Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading", *Engineering Structures*, **203**, 109866 (2020).
9. Wang, P., Xue, Z. and Xiao, S. "Seismic behavior of self-buckling-restrained steel plate shearWall made by two incline-slotted infill plates", *Journal of Constructional Steel Research*, **133**, pp. 47-64 (2017).
10. Jin, S., Yang, S. and Bai, J. "Numerical and experimental investigation of the full-scale buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots", *Thin-Walled Structures*, **144**, pp. 106362 (2019).
11. Meghdadaian, M. and Ghalehnovi, M. "Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings", *Journal of Building Engineering*, **21**, pp. 336-342 (2019).
12. ABAQUS/Standard User's Manual: Version 6.16. Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc., (HKS), 2016.
13. Lubliner, J. "Plasticity theory", Macmillan Publishing Company, New York, 495 p. (1990).
14. Hognestad, E. "A study of combined bending axial load in reinforced concrete members", Bulletin Series No. 399, Urbana: Engineering Experimental Station, The University of Illinois (1951).
15. Comit  Euro-International du Beton, CEB-FIB-model Code 1990: Design code. London: Thomas Telford; 1993
16. Chen, S.J. and Jhang, C. "Cyclic behavior of low yield point steel shear walls", *Thin-Walled Struct.*, **44**(7), pp. 730-738 (2006).