

## Investigation of connection type effects of composite steel plate shear wall with a circular opening to boundary elements

Mehdi Ebadi Jamkhaneh<sup>1\*</sup>, Masoud Ahmadi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Ayatollah Boroujerdi, Boroujerd, Iran

### ABSTRACT

Composite SPSW consisting of steel plates and reinforced concrete encasement on one or both sides of the steel plate has been developed as one method to tackle these problems. In this study, the behavior of CSPSW is investigated by considering the type of wall connection to boundary elements under nonlinear static loading. Firstly, the numerical model was validated with reference model and then parametric studies were performed by generalizing the numerical model. Two key parameters of the circular opening diameter and type of wall steel plate connection to the boundary elements were considered in the studies. Four diameters of 50, 100, 150 and 200 cm were used for circular openings. Three types of hinge, rigid and free joints were also used to connect the steel plate to the beam and column, simulating a total of 32 numerical models. The results of numerical models showed that rigid connection of composite shear wall to columns and beams was the best performance. Also, with the presence of 4 mm thick steel plate including opening with different diameters, two parameters of bearing capacity and elastic stiffness have been increased. When 46% of the steel plate surface is considered to be as opening, the bearing capacity and elastic stiffness rather than the frame alone increased by approximately 46% and 187%, respectively. By decreasing the percentage of the opening area from 46% to 3%, the bearing capacity increased by approximately 20% and the lateral elastic stiffness improved by approximately 135%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 16 March 2020

**Revise Date:** 25 April 2020

**Accept Date:** 22 September 2020

### Keywords:

Composite steel shear wall  
Finite element method  
Circular opening  
Load-displacement  
relationship  
Load bearing capacity  
Connection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

**doi:** <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.223780.2110>

\*Corresponding author: Mehdi Ebadi Jamkhaneh  
Email address: m.ebadi@du.ac.ir

## ارزیابی تاثیر نوع اتصال دیوار برشی فولادی مرکب با بازشوی دایروی به المان‌های

### مرزی

مهدی عبادی جامخانه<sup>۱\*</sup>، مسعود احمدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران

### چکیده

دیوار برشی مرکب نوع جدیدی از دیوار برشی است که از ویژگی مثبت ورق فولادی و پنل بتنی برای مقابله با بارهای جانبی بهره می‌گیرد. در این تحقیق، رفتار دیوار برشی مرکب با لحاظ نمودن نوع اتصال ورق دیوار به المان‌های مرزی تحت بارگذاری استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. قطر بازشوی دایروی و نوع اتصال ورق فولادی دیوار به المان‌های مرزی بعنوان پارامترهای کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. از چهار مقدار برای قطر و سه نوع اتصال مفصلی، صلب و آزاد برای اتصال ورق فولادی دیوار به تیر و ستون استفاده شد که در مجموع ۳۲ مدل عددی ایجاد شد. مدل عددی با نمونه‌ی مرجع صحت سنجی شد که میزان اختلاف ۳/۷ و ۲/۵ درصد بین نتایج شکل‌پذیری و حداکثر نیرو در مدل عددی و مرجع وجود دارد. نتایج مدل‌های عددی نشان داد که اتصال صلب دیوار برشی مرکب به ستون‌ها و تیرها بهترین عملکرد را دارد. همچنین با حضور ورق فولادی به ضخامت ۴ میلیمتر شامل بازشو با قطرهای مختلف، دو پارامتر ظرفیت باربری و سختی الاستیک افزایش یافته است. در حالتی که ۴۶ درصد از سطح ورق، بازشو باشد، ظرفیت باربری و سختی الاستیک نسبت به قاب تنها به ترتیب تقریباً به مقدار ۴۶ درصد و ۱۸۷ درصد افزایش یافت.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی مرکب، روش اجزاء محدود، بازشوی دایروی، رابطه‌ی نیرو-تغییر مکان، ظرفیت باربری، اتصال

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.223780.2110	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.223780.2110	۱۴۰۰/۰۷/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۲/۰۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۶
مهدی عبادی جامخانه <sup>*</sup> m.ebadi@du.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی مرکب<sup>۱</sup> سیستم‌های مهارجانبی نوینی هستند که به دلیل برخورداری از برتری‌ها و خصوصیات رفتاری منحصر به فرد خود، بسیاری از نیازهای لرزه‌ای سازه را برآورده می‌سازند. در مقایسه با دیوار برشی بتنی، دیوار برشی مرکب با ظرفیت برشی مشابه، دارای ضخامت و وزن کم‌تری خواهد بود. وزن کم‌تر این دیوارها، امکان استفاده از این‌گونه دیوارها برای سازه‌های بلند را نیز فراهم می‌کند. این کاهش وزن موجب فراهم آوردن ابعاد کوچک‌تر اعضای سازه‌ای در مقابل نیروهای جانبی می‌شود [۱]. از آنجا که دیوار برشی فولادی می‌تواند سختی و پایداری دیوار را در زمان اجرا فراهم کند، ساخت دیوارهای برشی بتنی به طور مجزا و مستقل از دیوار برشی فولادی انجام پذیرد. در حالت پیش‌ساخته، دیوارهای بتنی در هر زمان دلخواه به ورق فولادی پیچ می‌شود [۲]. علاوه بر این، در دیوار برشی مرکب، دیوار بتنی ورق فولادی را محدود می‌کند و قبل از جاری شدن ورق از کمانش آن جلوگیری می‌شود. در نتیجه، ورق فولادی نیروی برشی طبقه را به کمک جاری شدن در برش تحمل می‌کند [۳]. در دیوارهای برشی مرکب، دیوار بتنی باعث ایجاد عایق صوتی و حرارتی و همچنین محافظ آتش‌سوزی ورق فولادی می‌شود [۴].

مهم‌ترین بخش در این سیستم، اتصالات بخش‌های مختلف دیوار و المان‌های افقی و عمودی است. در دیوار برشی مرکب سنتی، دیوار بتنی بدون هیچ‌گونه فاصله‌ای به تیرها و ستون‌های مرزی متصل می‌شود که با کوچک‌ترین تغییرشکل جانبی، گسیختگی و ترک در مرز دیوار و المان مرزی ایجاد می‌شود. از این‌رو برای رفع مشکل درگیری پنل بتنی در دیوار برشی مرکب با المان‌های مرزی از یک شکاف و فاصله بین پنل بتنی و المان مرزی استفاده می‌کنند. این امر موجب عدم درگیری دو بخش پنل بتنی و المان‌های مرزی در زلزله‌هایی با احتمال وقوع زیاد و شدت کم و متوسط می‌شود. در نتیجه، المان اصلی در تحمل نیروی برشی و کاهش دریافت طبقه‌ها، دیوار برشی فولادی خواهد بود. برای چنین زلزله‌هایی، ورق فولادی به تنهایی جوابگوی بارهای جانبی می‌باشد. در این حالت، پنل بتنی نقشی در تحمل بارهای جانبی ندارد و بدون آسیب باقی می‌ماند که به منزله‌ی مهاربند دیوار برشی فولادی عمل می‌کند و از کمانش آن جلوگیری می‌کند [۵]. در زلزله‌هایی با شدت بیشتر و افزایش تغییرشکل جانبی، پنل بتنی به المان‌های مرزی برخورد می‌کند و در باربری جانبی نقش ایفا می‌کند. در این حالت، مقاومت برشی دیوار بتنی به مقاومت برشی دیوار برشی مرکب اضافه می‌شود و در کاهش تغییرمکان نسبی طبقه مفید خواهد بود.

از جمله تحقیق‌های صورت گرفته در ارتباط با دیوارهای برشی مرکب مسلح شده با پنل بتنی در یک سمت از ورق فولادی می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط ژائو و آستانه اصل در سال ۲۰۰۴ [۶] اشاره نمود. آن‌ها نمونه‌هایی از قاب سه طبقه‌ی یک دهانه با مقیاس یکدوم، با و بدون فاصله‌ی پنل بتنی و المان مرزی را آزمایش نمودند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که دیوار مرکب نوین می‌تواند تا دریافت پنج درصد را تحمل کند. در آزمایش‌های انجام گرفته توسط رضائی و همکاران [۷] بر دیوار برشی مرکب، دو سیستم مجزا که در یکی درز بین لایه‌ی بتنی و قاب دیوار برشی و در دیگری بدون درز پیرامون لایه‌ی بتنی قرار داده شده بود، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش ظرفیت برشی و پایداری بیشتر حلقه‌های هیستریزس در نمونه‌ی با درز بود. در سال ۲۰۰۸، رهایی و همکاران [۷] مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی روی دیوارهای مرکب انجام دادند. در این مطالعه، پنل بتنی به طور کامل به المان‌های مرزی متصل بود و نشان دادند که فاصله‌ی بین بولت‌ها بر روی رفتار سیستم تاثیرگذار است. افزایش فاصله بین گل‌میخ‌ها نسبت شکل‌پذیری و میزان انرژی جذبی را بهبود می‌بخشد. عربزاده و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ مطالعات آزمایشگاهی بر روی قاب شامل دیوار برشی فولادی مرکب سه طبقه یک دهانه با مقیاس یک‌چهارم انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد برشگیرها و بولت، مقاومت برشی بهبود می‌یابد و شکل‌پذیری سیستم کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از بتن با مقاومت بالا می‌تواند خسارت پنل بتنی را کاهش دهد. در سال ۲۰۱۱، یک نمونه قاب با دیوار برشی فولادی و یک قاب با دیوار برشی مرکب به همراه ستون‌های فولادی پر شده با بتن توسط گو<sup>۲</sup> و همکاران [۹] آزمایش شدند. هر دو نمونه با مقیاس یک‌سوم و دو طبقه‌ی یک دهانه بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در حالی که نسبت تغییرمکان نسبی سیستم کمتر از ۰/۰۵ است، رفتار هر دو سیستم تقریباً مشابه است. پس از این مقدار، مقاومت برشی و انرژی جذبی نمونه با دیوار مرکب افزایش می‌یابد. شفاهی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۶ به بررسی تاثیر ضخامت پنل بتنی در دیوارهای برشی فولادی

1 Composite steel shear walls

2 Guo

مرکب پرداختند. پارامترهایی از قبیل ضخامت ورق فولادی و پنل بتنی از متغیرهای اصلی تحقیق بودند. نتایج تحقیق نشان داد که درصد شکل پذیری و جذب انرژی دیوار مرکب با وجود پنل بتنی بهبود یافت.

از آنجائی که حضور بازشوها با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف در دیوار برشی به دلایل کاربردی اغلب اجتناب‌ناپذیر است، وجود این بازشوها در عملکرد میدان تنش کششی قطری می‌تواند اختلال ایجاد کند. از این‌رو تحقیق‌هایی در ارتباط با تاثیر بازشوها بر رفتار سیستم انجام گرفته است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۲، اثر بازشوی دایروی در رفتار سیکلی پانل‌های برشی فولادی بررسی و براساس نتایج بدست آمده پیشنهاد شده است که سختی و مقاومت پانل‌های با بازشو را می‌توان به صورت محافظه‌کارانه با اعمال یک ضریب کاهش خطی به سختی و مقاومت پانل بدون بازشو نظیر تخمین زد [۱۱]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۵ [۱۲]، رفتار سه نمونه دیوار برشی فولادی با مجموعه‌ای منظم از بازشوهای دایروی در ورق و با بازشوهای تقویت شده‌ی ربع دایره در دو کنج فوقانی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین در پژوهش دیگری [۱۳] برای الگوی خاص از بازشوهای دایروی پیشنهاد شده در پژوهش اخیر [۱۲]، رابطه‌ای برای کاهش مقاومت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر مطالعات انجام گرفته در ارتباط با دیوارهای برشی با بازشو، معطوف به دیوارهای برشی فولادی می‌باشند و تحقیق کمی به بررسی رفتار دیوارهای برشی مرکب دارای بازشو پرداختند. از این‌رو، رفتار پیچیده‌ی دیوار برشی مرکب نیاز به بررسی‌های تحلیلی بیشتری دارد. علاوه بر این، مطالعه‌ی المان محدود کمی روی تاثیر پنل بتنی در یک سمت دیوار برشی فولادی مرکب بازشودار صورت گرفته است. دیوارهای برشی مورد بررسی در این پژوهش شامل دیوار برشی فولادی با ورق میانی سوراخ‌دار است که با پانل بتنی در دو طرف تقویت شده است. اتصال این دو پانل به ورق فولادی میانی به کمک برشگیرها صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، وجود و نوع اتصال دیوار برشی مرکب به المان‌های افقی و عمودی در رفتار سیستم قاب و دیوار تاثیرگذار می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق سه نوع اتصال مفصلی، گیردار و آزاد برای مرز بین دیوار برشی و اعضای تیر و ستون در نظر گرفته می‌شود. رفتار مجموعه‌ی سیستم تحت بارگذاری یکنوا و تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نتایج مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل سازی عددی

در مدل سازی عددی به کمک برنامه‌ی آباکوس [۱۴] برای اطمینان از صحت و رفتار نهایی مدل عددی از مدل مرجع جهت اعتبارسنجی استفاده شده است. برای این منظور مدل رفتاری بتن و فولاد، نوع المان و شبکه، اتصال المان‌ها به یکدیگر و شرایط مرزی با کمک اعتبارسنجی انجام شده، بکار گرفته شدند. در ادامه جزئیات بیشتری ارائه می‌شود.

### ۲-۱- مدل رفتاری مصالح

#### ۲-۱-۱- مدل رفتاری بتن

مدل خسارت پلاستیک<sup>۳</sup> بتن در برنامه‌ی آباکوس قابلیت کلی برای مدل سازی بتن و سایر مصالح نیمه شکننده در تمام انواع سازه‌ها دارد. این مدل، یک مدل محیط پیوسته براساس پلاستیسیته برای بتن تحت محصورشوندگی کم (کمتر از ۴ یا ۵ برابر مقاومت فشاری تک محوره) است. این مدل قادر به در نظرگیری افت و زوال سختی الاستیک در سیکل‌های بارگذاری یا حرارت‌های زیاد در فشار و کشش می‌باشد. مدل CDP از قانون جریان غیرهمسانگرد با ترکیب خسارت ایزوتروپیک الاستیک استفاده می‌کند. تابع هایپربولیک دروکر-پراگر برای تعریف این تابع جریان استفاده می‌شود. مدل خسارت پلاستیک بتن، تعمیم یافته‌ی معیار شکست دروکر-پراگر می‌باشد. طبق اصلاح صورت گرفته در مدل خسارت پلاستیک، لزومی بر دایروی بودن صفحه انحرافی وجود ندارد و می‌تواند شکل دیگری نیز داشته باشد. شکل این صفحه با ضریب  $K_c$  تعیین می‌شود. از لحاظ فیزیکی،  $K_c$  نسبت فاصله بین محور هیدرواستاتیک با پوش فشاری و پوش کششی است. در مدل خسارت پلاستیک بتن مقدار پیش فرض این ضریب برابر با ۰/۶۷ می‌باشد که براساس آزمایش‌های فشاری سه محوره و تحلیل‌های عددی پیشنهاد شده است. در بخش پارامترهای پلاستیسیته، از تابع هایپربولیک دروکر-پراگر به عنوان تابع پتانسیل جریان

3 Concrete damage plasticity (CDP) model

استفاده شد. زاویه‌ی اتساع مطابق با توصیه‌ی برنامه، ۱۵ درجه [۱۵] در نظر گرفته شد. همچنین خروج از مرکزیت برابر با ۰/۱، نسبت مقاومت فشاری دو محوره‌ی بتن به مقاومت فشاری تک محوره برابر با ۱/۱۶ و پارامتر ویسکوزیته نیز برابر با ۰/۰۱ اختیار شد.

## ۲-۱-۲- مدل رفتاری فولاد

برای بیان رفتار قابل پیش‌بینی فولاد در کشش و فشار از دو رابطه‌ی (۱) و (۲) استفاده می‌شود. داده‌های تنش و کرنش حاصل از آزمایش کشش به تنش واقعی  $\sigma_{true}$  و کرنش پلاستیک لگاریتمی  $\epsilon_{ln}^{pl}$  برای تحلیل المان محدود با استفاده از روابط ذیل قابل تبدیل هستند.

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

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - (\sigma_{true} / E_s) \quad (2)$$

در این رابطه،  $E_s$  مدول الاستیسیته‌ی فولاد،  $\sigma_{nom}$  و  $\epsilon_{nom}$  به ترتیب تنش و کرنش نرمال می‌باشند. ضریب پواسون فولاد برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- نوع المان‌های مورد استفاده

در تحقیق حاضر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی در برنامه‌ی المان محدود آباکوس در بخش آنالیز صریح انجام خواهد گرفت. در مدل‌های المان محدود در این تحقیق، ورق‌های فولادی دیوار و المان‌های مرزی با استفاده از المان پوسته‌ای S4R شبکه‌بندی می‌شود. هر گره در المان پوسته‌ای S4R دارای شش درجه آزادی مشتمل بر سه درجه آزادی دورانی و سه درجه آزادی انتقالی است. این المان از یک نقطه‌ی انتگرالی روی میان صفحه‌ی خود استفاده می‌کند. پنل بتنی دیوار با المان حجمی مکعبی C3D8R مدل شده است که یک المان محیط پیوسته‌ی سه بعدی شامل هشت گره انتگرال کاهش یافته با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است. برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی میلگردهای طولی و عرضی از المان سه‌بعدی دو گره‌ای T3D2 استفاده شده است. برای اطمینان از چسبندگی کافی بین بتن و میلگردها، میلگردها به عنوان بخش مدفون شده<sup>۴</sup> در بلوک‌های بتنی تعریف شدند. این روش یک رفتار کوپل موثر و مناسبی از رفتار میلگرد با بتن محیط اطراف خود ایجاد می‌کند.

## ۲-۳- تماس بین المان‌ها، شرایط مرزی و بارگذاری

اتصالات بین المان‌های مرزی فرض شده‌اند که صلب هستند. در صورت داشتن اتصال صلب بین المان‌های مرزی و ورق فولادی، قید tie بین آن‌ها تعریف شده است تا شرایط مقید نمودن گره‌های مرزی بین دو المان مهیا شود. همچنین سطوح داخلی ورق فولادی با پنل بتنی نیز با کمک قید tie برای تامین شرایط چسبندگی کامل به یکدیگر مقید می‌شوند. پای دو المان مرزی در سه راستا از نظر تغییرمکان انتقالی بسته شدند. دو بخش بالای المان مرزی در جهت عمود بر قاب مقید شد تا از تغییرشکل خارج از صفحه‌ی سیستم جلوگیری شود. همچنین بارگذاری یکنوا به قسمت بالای سمت راست المان مرزی و به صورت کنترل تغییرمکان اعمال شد.

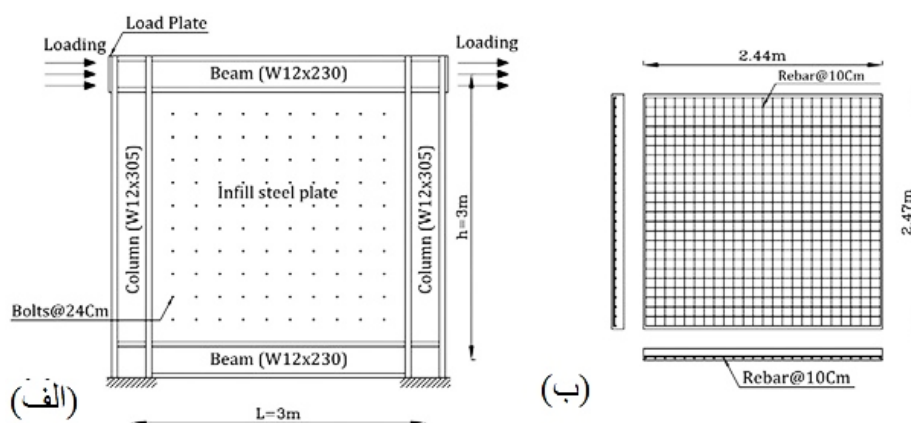
## ۳- اعتبارسنجی مدل عددی

در نمونه‌ی مرجع [۱۶] که یک قاب تک دهانه‌ی یک طبقه شامل دیوار برشی مرکب است، یک شکاف به فاصله‌ی ۷۵ میلی‌متر بین المان‌های مرزی فولادی، با پانل بتنی مسلح وجود دارد. طول دهانه و ارتفاع طبقه برابر با ۳ متر در نظر گرفته شد. در شکل (۱) تصویر و مشخصات هندسی قاب نشان داده شده است.

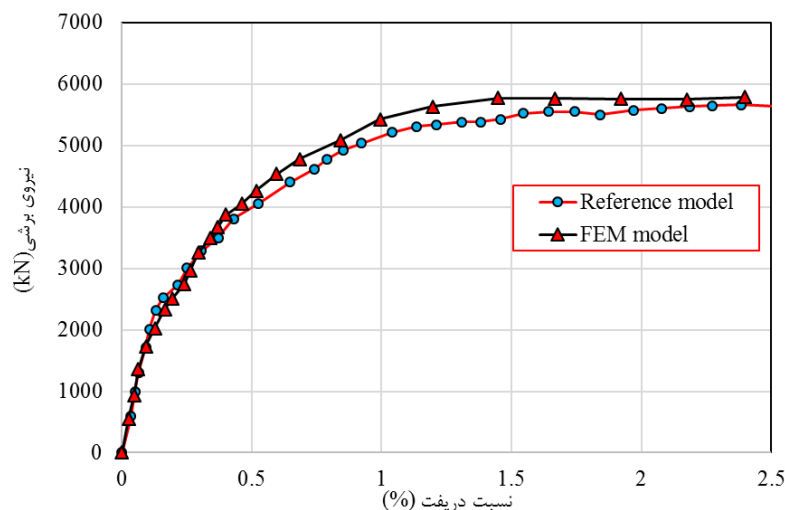
از مصالح فولادی با تنش تسلیم و نهایی به ترتیب برابر با ۲۴۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال برای المان‌های مرزی و ورق فولادی دیوار استفاده شده است. تنش تسلیم بولت‌ها برابر با ۶۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. مدول یانگ برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون نیز برابر با

۰/۳ می باشد. مقاومت فشاری بتن برابر با ۵۰ مگاپاسکال اختیار شد. همچنین به منظور تحلیل بارافزون تغییرمکان جانبی مطابق با شکل (۱) به بالای تیر وارد شد. حد نهایی تغییرمکان نهایی فرض شد که در نسبت دررفت ۲/۵ درصد مطابق با آئین نامه ی ASCE 7-10 [۱۷] اتفاق بیافتد. در مدل های المان محدود، درجات آزادی برون صفحه ای سخت کننده های بالای ستون بسته شدند. همچنین، تمام شش درجه آزادی گره های پای هر دو ستون (بال ها و جان) مقید و گیردار شدند.

در این نمونه از ستون  $W12 \times 305$ ، تیر  $W12 \times 230$ ، ورق فولادی با ضخامت ۴ میلیمتر، ضخامت پنل بتنی ۵۰ میلیمتر، قطر میلگرد برابر با ۸ میلیمتر با فاصله ی ۱۰۰ میلیمتر از یکدیگر استفاده شده است. در نمونه ی آزمایشگاهی، شکل پذیری حاصل از آزمایش برابر با ۷/۹۶ حاصل شد که نمونه ی عددی تنها ۳/۷ درصد اختلاف با آن دارد (شکل ۲). حداکثر مقدار نیروی جانبی قابل تحمل در مدل عددی به میزان ۲/۵۵ درصد بیشتر از مقدار مربوطه در مدل مرجع بدست آمده است که از دقت مناسب در شبیه سازی حاصل شده است.



شکل ۱: مدل دیوار برشی مرکب مرجع [۱۶].



شکل ۲: مقایسه بین دو نمونه ی مرجع و مدل عددی از نظر نیرو-تغییرمکان.

#### ۴- معرفی مدل های عددی

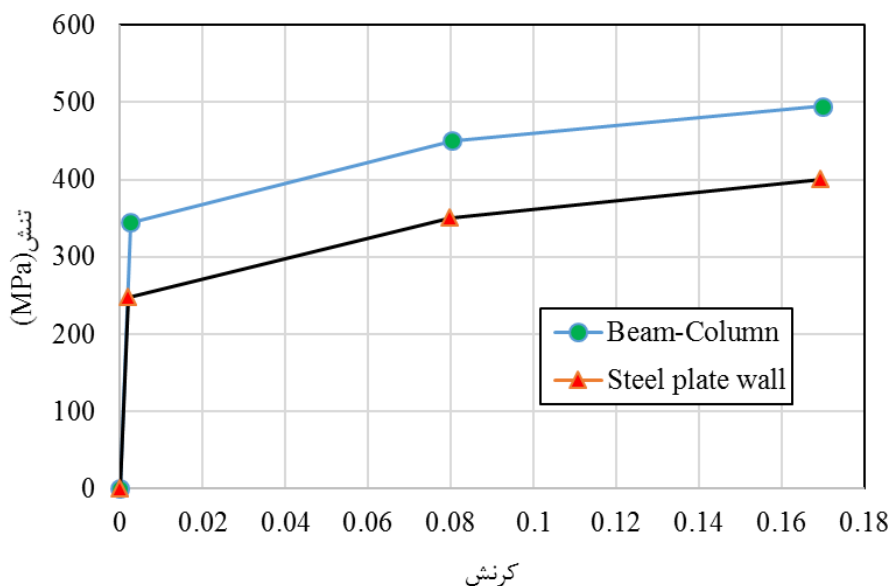
در این تحقیق یک قاب فولادی یک دهانه (طول دهانه و ارتفاع طبقه برابر با سه متر می باشند) در نظر گرفته شد که اتصالات تیر و ستون آن صلب می باشد. همچنین اتصال دیوار برشی فولادی به تیر و ستون، هشت حالت در نظر گرفته شده است. هشت حالت اتصال به

این صورت است که در چهار حالت اول، ورق به قاب اتصال دارد و در چهار حالت دوم ورق از یک طرف آزاد و از طرف دیگر به قاب اتصال دارد.

جدول ۱: معرفی مدل‌های عددی

شماره مدل	نام نمونه	توضیحات
۱	CR-BR	اتصال ورق به ستون و تیر صلب
۲	CR-BH	اتصال ورق به ستون صلب و به تیر مفصل
۳	CH-BR	اتصال ورق به ستون مفصل و به تیر صلب
۴	CH-BH	اتصال ورق به ستون مفصل و به تیر مفصل
۵	CR-BF	اتصال ورق به ستون صلب و به تیر آزاد
۶	CH-BF	اتصال ورق به ستون مفصل و به تیر آزاد
۷	CF-BR	اتصال ورق به ستون آزاد و به تیر صلب
۸	CF-BH	اتصال ورق به ستون آزاد و به تیر مفصل

نمونه‌ی نخست، نمونه‌ی بدون بازشو است و سایر نمونه‌ها دارای بازشوی دایروی می‌باشند. علاوه بر این، ابعاد بازشو نیز از متغیرهای دیگر در تحلیل می‌باشد. از چهار بازشوی دایره‌ای شکل به قطر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر استفاده شده است. موقعیت بازشوی دایروی در وسط پنل می‌باشد. بدین ترتیب، ۳۲ مدل عددی در نظر گرفته می‌شود. در تمام مدل‌ها از اعمال بارگذاری ثقلی صرف‌نظر شده است. در شکل (۳) مدل رفتاری دو خطی برای مصالح فولادی انتخاب شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های عددی از نظر هندسی و مشخصات مصالح همانند مدل اعتبارسنجی می‌باشند. هر کدام از مدل‌ها، با چهار قطر مختلف بازشوی دایروی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار می‌گیرد. منظور از حروف C و B در نمودارها، به ترتیب بیانگر ستون و تیر می‌باشند. سه حرف R، F و H به ترتیب معرف صلب، آزاد و مفصل می‌باشند.



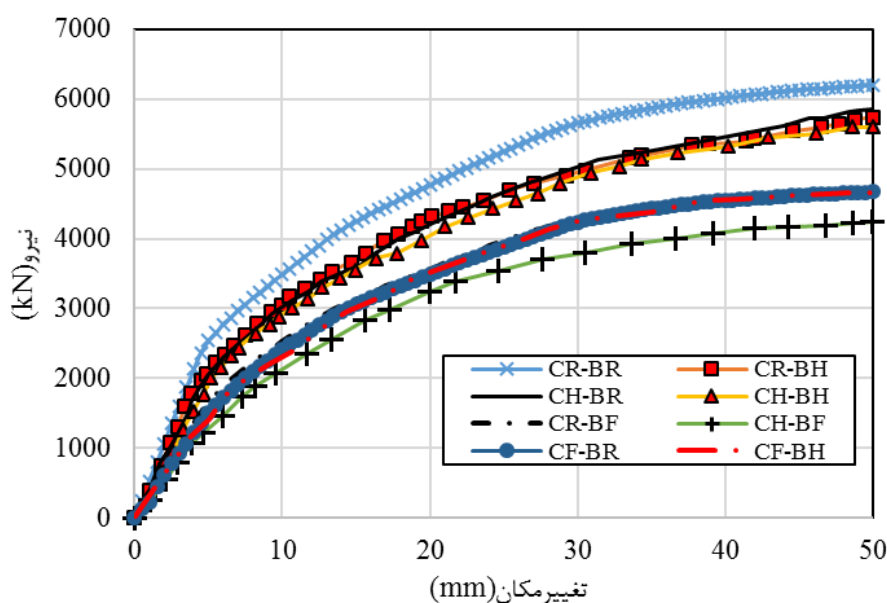
شکل ۳: منحنی تنش-کرنش مصالح فولادی.

## ۵- نتایج مدل‌های عددی

در بررسی نتایج مدل‌های عددی از چهار قطر مختلف برای بازشوی دایروی استفاده شده است. برای هر مدل با قطر مشخص بازشو، هشت تحلیل استاتیکی غیرخطی مجزا با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی مختلف ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی انجام گرفت. در ادامه نتایج تحلیل ارائه شده است.

## ۵-۱- مدل‌های با بازشوی به قطر ۵۰ سانتی‌متر

نتایج در قالب دو نمودار نیرو-تغییرمکان جانبی درون صفحه‌ای دیوار و نمودار نیرو-تغییرمکان برون صفحه‌ای دیوار ارائه می‌شود. در شکل (۴) منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی نمونه‌های دارای بازشوی ۵۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)، مدل شماره (۱) که اتصال ورق به تیر و ستون به صورت صلب در نظر گرفته شده است، دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۶۱۹۸ کیلونیوتن نسبت به سایر حالات است. همچنین بیشترین سختی الاستیک جانبی نیز مربوط به همین حالت (CR-BR) به مقدار ۵۲۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. ضعیف‌ترین وضعیت عملکرد در بین حالات مربوط به نمونه‌ی (CH-BF) با ظرفیت باربری ۴۲۴۵ کیلونیوتن و سختی الاستیک جانبی تقریباً ۲۲۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر وضعیت در اتصال ورق دیوار فولادی به المان مرزی، ظرفیت باربری جانبی سیستم و سختی الاستیک جانبی به ترتیب به میزان ۳۱/۵ درصد و ۵۷ درصد کاهش می‌یابد. در جدول (۲) مقادیر متناظر با ظرفیت باربری و سختی الاستیک هر کدام از حالات ارائه شده است.



شکل ۴: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۵۰ سانتی‌متر.

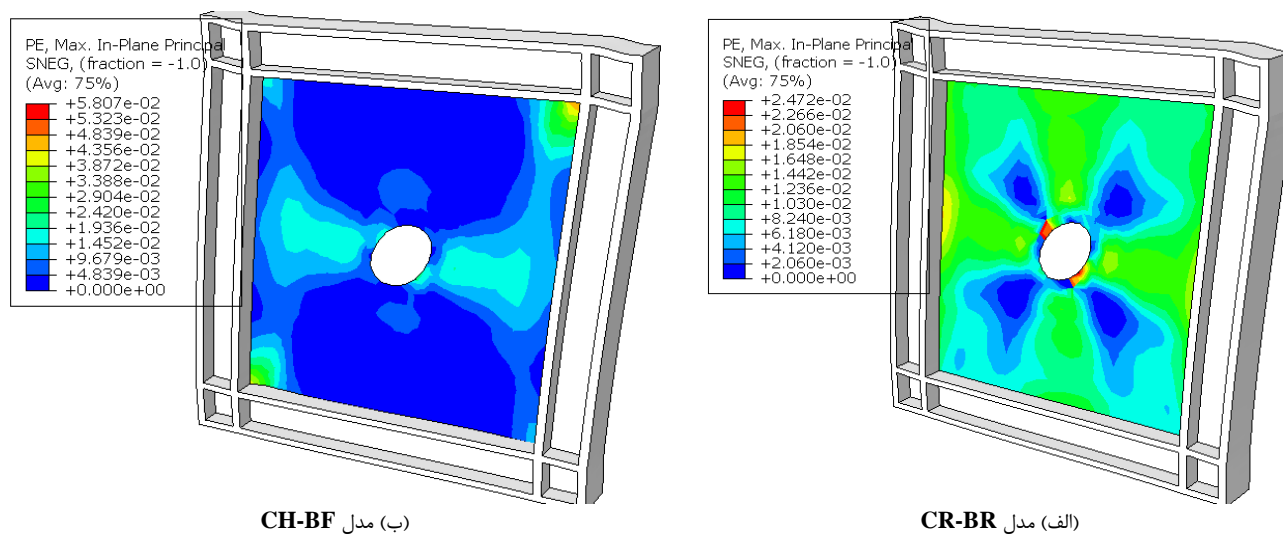


جدول ۲: ظرفیت باربری و سختی الاستیک نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۵۰ سانتی‌متر

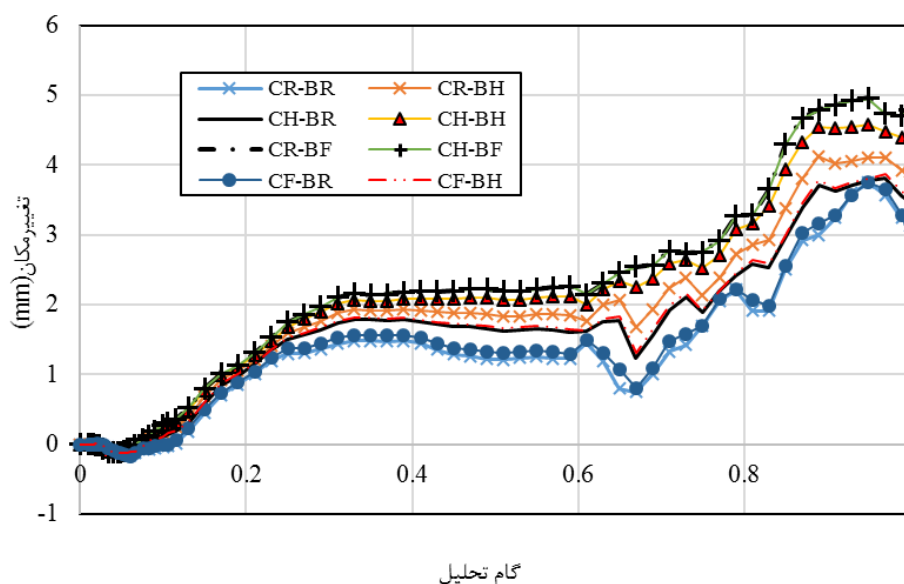
شماره مدل	وضعیت اتصال	ظرفیت باربری (kN)	درصد کاهش ظرفیت باربری	سختی الاستیک (kN/mm)	درصد کاهش سختی الاستیک
مدل ۱	CR-BR	۶۱۹۸	---	۵۲۷	---
مدل ۲	CR-BH	۵۷۳۶	۷/۵	۴۱۳	۲۱/۶
مدل ۳	CH-BR	۵۸۴۹	۵/۶	۴۶۴	۱۱/۹
مدل ۴	CH-BH	۵۶۰۴	۹/۶	۳۶۱	۳۱/۵
مدل ۵	CR-BF	۴۷۲۹	۲۳/۷	۲۹۳	۴۴/۴
مدل ۶	CH-BF	۴۲۴۵	۳۱/۵	۲۲۷	۵۶/۹
مدل ۷	CF-BR	۴۶۷۲	۲۴/۶	۲۵۵	۵۱/۶
مدل ۸	CF-BH	۴۶۶۰	۲۴/۸	۳۰۶	۴۱/۹

نتایج فوق حاکی از آن دارد که از لحاظ جابجایی در صفحه مدل ۱ بهترین نوع اتصال و دارای بهترین نوع عملکرد می‌باشد و کمترین جابجایی را در بین هشت حالت دارا می‌باشد. بعد از این اتصال، اتصالات مدل ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب در یک محدوده‌ی جابجایی قرار دارند و مدل‌های ۵ و ۷ و ۸ به ترتیب یک بازه پایین‌تر از مدل‌های قبلی قرار دارند و مدل شماره ۶ بدترین نوع اتصال می‌باشد که بیشترین جابجایی را دارد. به عبارتی با آزاد نمودن مرز مشترک بین ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی، سختی جانبی به طور محسوسی کاهش یافته و ظرفیت باربری تا ۳۰ درصد تقلیل می‌یابد.

در شکل (۵) تغییر شکل و توزیع کرنش پلاستیک در دو مدل CR-BR و CH-BF نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در نمونه‌ای که اتصالات ورق به المان‌های مرزی صلب باشد، کرنش پلاستیک حداکثری در اطراف بازشوی دایروی اتفاق افتادند. این در حالی است که با تغییر وضعیت اتصال از صلب به مفصلی و آزاد بودن اتصال مشاهده می‌شود که کرنش پلاستیک حداکثر به سمت گوشه‌های ورق نزدیک به ستون هدایت می‌شوند. همچنین جالب توجه است که در مدل با اتصال صلب در آخرین گام بارگذاری، حداکثر مقدار کرنش پلاستیک برابر با تقریباً ۰/۰۲۵ و در مدل CH-BF این مقدار به ۰/۰۵۸ رسیده است که نشان از عملکرد مطلوب‌تر و مناسب‌تر اتصال صلب ورق به المان‌های مرزی دارد.



شکل ۵: توزیع کرنش پلاستیک در دو نمونه.



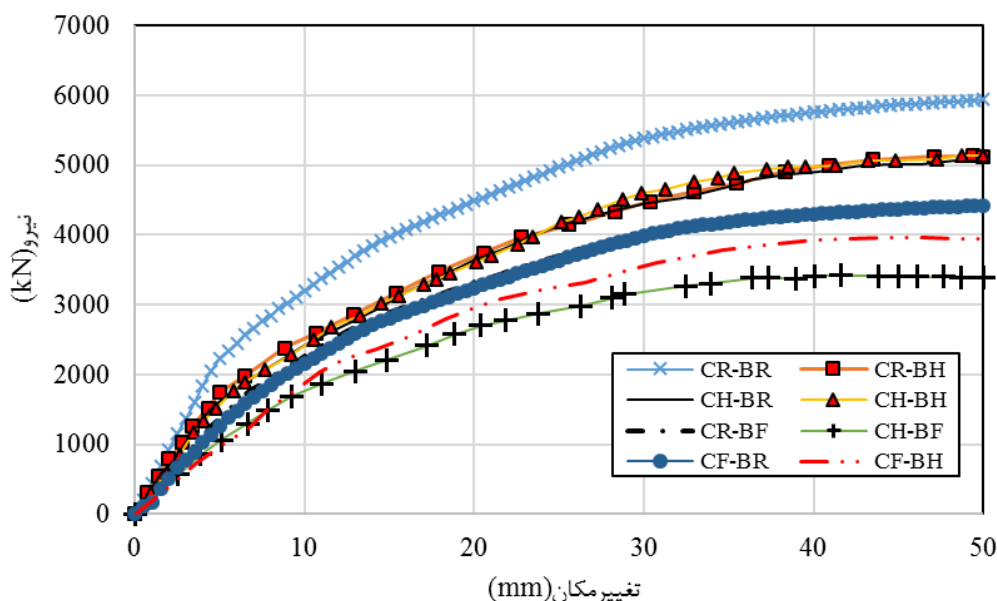
شکل ۶: تغییرات تغییرمکان برون صفحه‌ای دیوار برشی مرکب با بازشوی دایروی به قطر ۵۰ سانتی‌متر.

در شکل (۶) نمودارهای تغییرات تغییرمکان برون صفحه‌ای در اطراف بازشو برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل، کمترین تغییرمکان برون صفحه‌ای به مقدار  $3/13$  میلی‌متر مربوط به نمونه با اتصالات صلب و بیشترین تغییرمکان برون صفحه‌ای متعلق به نمونه‌ی با اتصال مفصلی ورق به ستون و آزاد به تیر به مقدار  $4/79$  میلی‌متر است.

در مدل ۱ به خاطر صلب بودن اتصال، حداکثر جابجایی روی قطر اصلی و در مجاورت دو طرف قطر اتفاق افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۲ و ۳ و ۴ حداکثر جابجایی‌ها در مجاورت دو طرف قطر اتفاق افتاد که نسبت به همدیگر تقارن دارند. در مدل ۵ و ۶ به خاطر اینکه اتصال ورق به تیر آزاد می‌باشد حداکثر جابجایی خارج صفحه در بالا و پایین ورق و در مجاورت تیرها اتفاق افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۷ و ۸ به خاطر اینکه اتصال ورق به ستون آزاد است حداکثر جابجایی خارج صفحه در مجاورت ستون‌ها اتفاق افتاد.

## ۵-۲- مدل‌های با بازشوی به قطر ۱۰۰ سانتی‌متر

نتایج در قالب دو نمودار نیرو-تغییرمکان جانبی درون صفحه‌ای دیوار و نمودار نیرو-تغییرمکان برون صفحه‌ای دیوار ارائه می‌شود. در شکل (۷) منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی نمونه‌های دارای بازشوی ۱۰۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، مدل شماره (۱) که اتصال ورق به تیر و ستون به صورت صلب در نظر گرفته شده است، دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۵۹۳۸ کیلونیوتن نسبت به سایر حالات است. همچنین بیشترین سختی الاستیک جانبی نیز مربوط به همین حالت (CR-BR) به مقدار ۴۴۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. ضعیف‌ترین وضعیت عملکرد در بین حالات مربوط به نمونه‌ی (CH-BF) با ظرفیت باربری ۳۳۸۹ کیلونیوتن و سختی الاستیک جانبی تقریباً ۲۲۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر وضعیت در اتصال ورق دیوار فولادی به المان مرزی، ظرفیت باربری جانبی سیستم و سختی الاستیک جانبی به ترتیب به میزان  $42/9$  درصد و  $49/7$  درصد کاهش می‌یابد. در جدول (۳) مقادیر متناظر با ظرفیت باربری و سختی الاستیک هر کدام از حالات ارائه شده است. نتایج تحلیل حاکی از آن است که از لحاظ جابجایی در صفحه مدل ۱ بهترین نوع اتصال و دارای بهترین نوع عملکرد می‌باشد و کمترین جابجایی را در بین هشت حالت دارا می‌باشد. بعد از این اتصال، اتصالات مدل ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب در یک محدوده جابجایی قرار دارند و مدل‌های ۵ و ۷ و ۸ به ترتیب یک بازه پایین‌تر از مدل‌های قبلی قرار دارند و مدل شماره ۶ بدترین نوع اتصال می‌باشد که بیشترین جابجایی را دارد (به عبارتی کمترین سختی جانبی را موجب می‌شود).

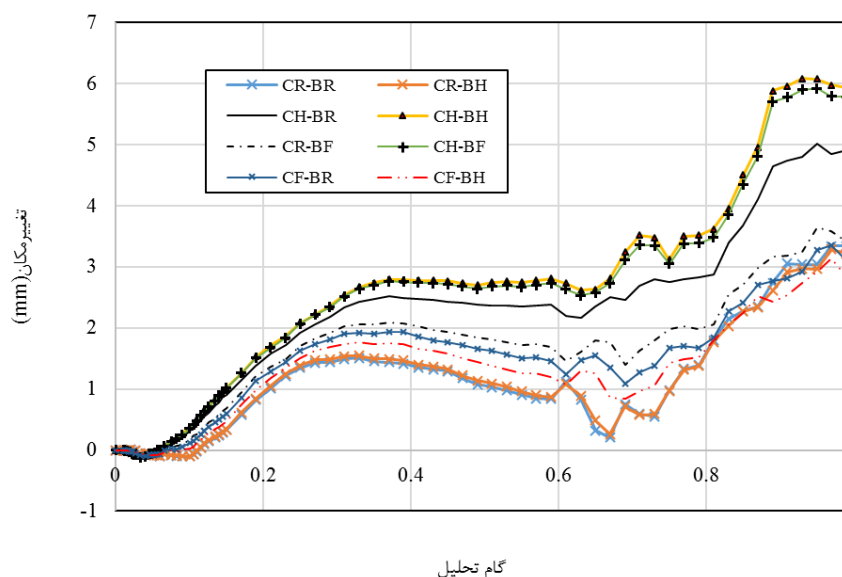


شکل ۷: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۱۰۰ سانتی‌متر.

جدول ۳: ظرفیت باربری و سختی الاستیک نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۱۰۰ سانتی‌متر

شماره مدل	وضعیت اتصال	ظرفیت باربری (kN)	درصد کاهش ظرفیت باربری	سختی الاستیک (kN/mm)	درصد کاهش سختی الاستیک
مدل ۱	CR-BR	۵۹۳۸	---	۴۴۱	---
مدل ۲	CR-BH	۵۱۲۷	۱۳/۶	۳۸۹	۱۱/۸
مدل ۳	CH-BR	۵۰۷۲	۱۴/۶	۳۸۰	۱۳/۸
مدل ۴	CH-BH	۵۱۴۶	۱۳/۳	۳۱۷	۲۸/۱
مدل ۵	CR-BF	۴۴۶۷	۲۴/۸	۲۲۶	۴۸/۷
مدل ۶	CH-BF	۳۳۸۹	۴۲/۹	۲۲۲	۴۹/۷
مدل ۷	CF-BR	۴۴۲۱	۲۵/۵	۱۶۷	۶۲/۱
مدل ۸	CF-BH	۳۹۲۳	۳۳/۹	۲۰۲	۵۴/۲

مشخص گردیده است که میزان حساسیت مدل‌ها به بازشو در روی قطر پانل بیشتر و با نزدیک شدن آن به گوشه پانل افزایش می‌یابد. در شکل (۸) نمودارهای تغییرات تغییر مکان برون صفحه‌ای در اطراف بازشو برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل، کمترین تغییر مکان برون صفحه‌ای به مقدار ۳/۳ میلی‌متر مربوط به نمونه با اتصالات صلب و بیشترین تغییر مکان برون صفحه‌ای متعلق به نمونه‌ی با اتصال مفصلی ورق به ستون و آزاد به تیر به مقدار ۵/۹ میلی‌متر است. در مدل ۱ به خاطر صلب بودن اتصال، حداکثر جابجایی روی قطر اصلی و در مجاورت دو طرف قطر افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۲ و ۳ و ۴ حداکثر جابجایی‌ها در مجاورت دو طرف قطر افتاد که نسبت به همدیگر تقارن دارند. در مدل ۵ و ۶ به خاطر اینکه اتصال ورق به تیر آزاد می‌باشد حداکثر جابجایی خارج صفحه در بالا و پایین ورق و در مجاورت تیرها افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۷ و ۸ به خاطر اینکه اتصال ورق به ستون آزاد است حداکثر جابجایی خارج صفحه در مجاورت دو طرف ستون‌ها افتاد. مطابق با شکل (۸)، با آزاد نمودن اتصال ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی، امکان تغییر شکل برون صفحه‌ای بیشتری به دیوار نسبت به دو نوع اتصال دیگر بوجود آمده است که این امر موجب ترک خوردگی بیشتر لایه‌ی بتنی پانل فولادی می‌شود.

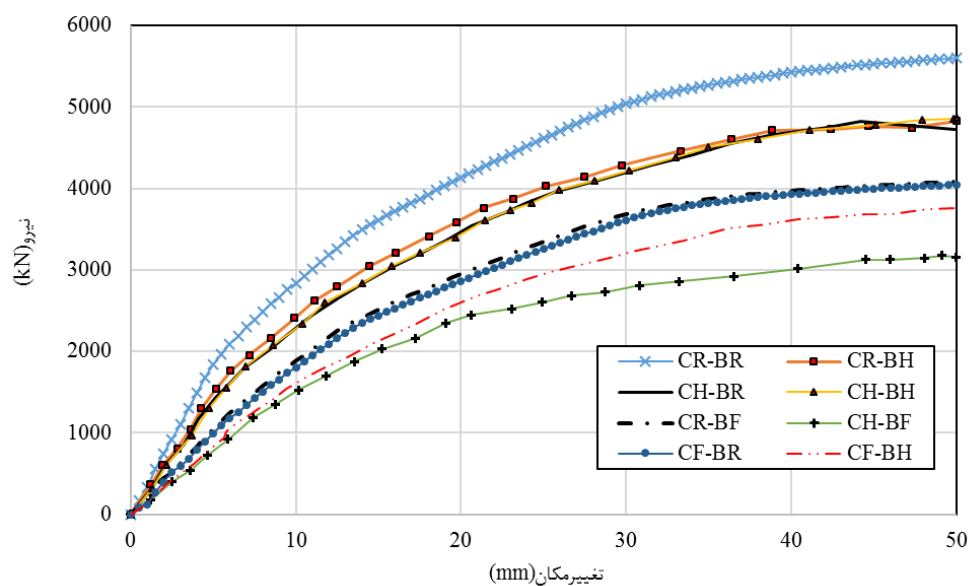


شکل ۸: تغییرات تغییر مکان برون صفحه‌ای دیوار برشی مرکب با بازشوی دایروی به قطر ۱۰۰ سانتی‌متر.

### ۵-۳- مدل‌های با بازشوی به قطر ۱۵۰ سانتی‌متر

نتایج در قالب دو نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی درون صفحه‌ای دیوار و نمودار تغییرات تغییر مکان برون صفحه‌ای دیوار ارائه می‌شود. در شکل (۹) منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی نمونه‌های دارای بازشوی ۱۵۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹)، مدل شماره (۱) که اتصال ورق به تیر و ستون به صورت صلب در نظر گرفته شده است، دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۵۵۹۹ کیلونیوتن نسبت به سایر حالات است. همچنین بیشترین سختی الاستیک جانبی نیز مربوط به همین حالت (CR-BR) به مقدار ۳۳۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. ضعیف‌ترین وضعیت عملکرد در بین حالات مربوط به نمونه‌ی (CH-BF) با ظرفیت باربری ۳۱۵۹ کیلونیوتن و سختی المان مرزی، ظرفیت باربری جانبی سیستم و سختی الاستیک جانبی به ترتیب به میزان ۴۳/۶ درصد و ۵۵/۸ درصد کاهش می‌یابد. در جدول (۴) مقادیر متناظر با ظرفیت باربری و سختی الاستیک هر کدام از حالات ارائه شده است.

نتایج تحلیل حاکی از آن است که از لحاظ جابجایی در صفحه مدل ۱ بهترین نوع اتصال و دارای بهترین نوع عملکرد می‌باشد و کمترین جابجایی را در بین هشت حالت دارا می‌باشد. بعد از این اتصال، اتصالات مدل ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب در یک محدوده جابجایی قرار دارند و مدل‌های ۵ و ۷ و ۸ به ترتیب یک بازه پایین‌تر از مدل‌های قبلی قرار دارند و مدل شماره‌ی ۶ بدترین نوع اتصال می‌باشد که بیشترین جابجایی را دارد (به عبارتی کمترین سختی جانبی را موجب می‌شود).

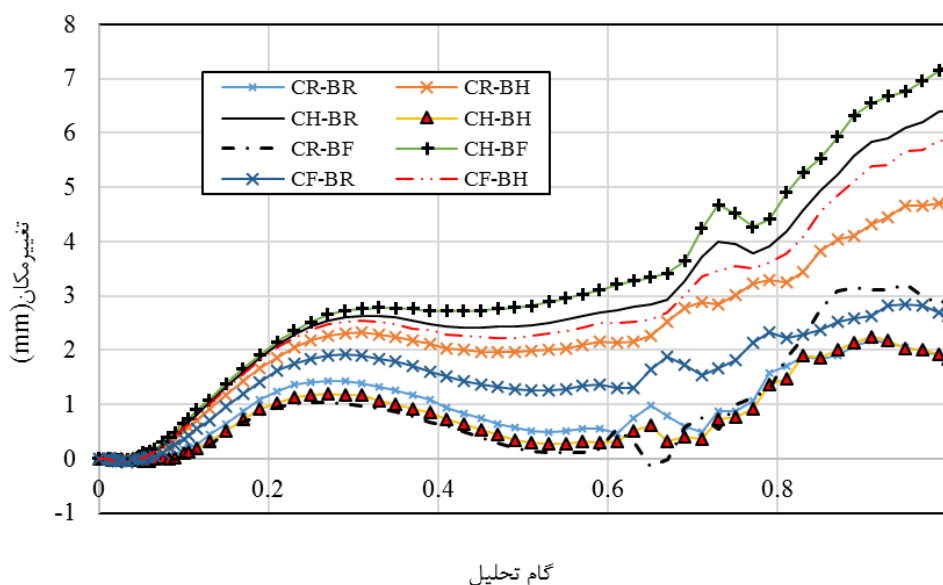


شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۱۵۰ سانتی‌متر.

جدول ۴: ظرفیت باربری و سختی الاستیک نمونه‌های دارای بازشوی به قطر ۱۵۰ سانتی‌متر

شماره مدل	وضعیت اتصال	ظرفیت باربری (kN)	درصد کاهش ظرفیت باربری	سختی الاستیک (kN/mm)	درصد کاهش سختی الاستیک
مدل ۱	CR-BR	۵۵۹۹	---	۳۳۷	---
مدل ۲	CR-BH	۴۸۲۵	۱۳/۸	۳۱۲	۷/۴
مدل ۳	CH-BR	۴۷۳۰	۱۵/۵	۲۸۸	۱۴/۵
مدل ۴	CH-BH	۴۸۷۳	۱۳/۰	۲۷۷	۱۷/۸
مدل ۵	CR-BF	۴۰۸۵	۲۷/۰	۱۵۹	۵۲/۸
مدل ۶	CH-BF	۳۱۵۹	۴۳/۶	۱۴۹	۵۵/۸
مدل ۷	CF-BR	۴۰۴۵	۲۷/۸	۱۱۸	۶۴/۹
مدل ۸	CF-BH	۳۷۶۲	۳۲/۸	۱۶۸	۵۰/۲

در شکل (۱۰) نمودارهای تغییرات تغییرمکان برون صفحه‌ای در اطراف بازو برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل، کمترین تغییرمکان برون صفحه‌ای به مقدار ۲ میلی‌متر مربوط به نمونه با اتصالات صلب و بیشترین تغییرمکان برون صفحه‌ای متعلق به نمونه‌ی با اتصال مفصلی ورق به ستون و آزاد به تیر به مقدار ۷ میلی‌متر است. در مدل ۱ به خاطر صلب بودن اتصال، حداکثر جابجایی روی قطر اصلی و در مجاورت دو طرف قطر اتفاق افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۲ و ۳ و ۴ حداکثر جابجایی‌ها در مجاورت دو طرف قطر اتفاق افتاد که نسبت به همدیگر تقارن دارند. در مدل ۵ و ۶ به خاطر اینکه اتصال ورق به تیر آزاد می‌باشد حداکثر جابجایی خارج صفحه در بالا و پایین ورق و در مجاورت تیرها اتفاق افتاد که نسبت به هم تقارن دارند. در مدل ۷ و ۸ به خاطر اینکه اتصال ورق به ستون آزاد است حداکثر جابجایی خارج صفحه در مجاورت دو طرف ستون‌ها اتفاق افتاد. به طور مثال، با افزایش ۵۰ درصدی بازو از قطر ۱۰۰ به ۱۵۰ سانتی‌متر، در مدل CH-BF، حداکثر جابجایی برون صفحه‌ای تقریباً ۲۵ درصد بیشتر شده است. این روند افزایش در سایر نمونه‌های این دسته مشاهده می‌شود. براساس نمودارهای تغییرمکان خارج صفحه، در یک نقطه‌ی معین، تغییرمکان بیشینه رخ می‌دهد. این تغییر زمانی رخ می‌دهد که پوشش بتنی به دلیل ترک‌خوردگی و شکست کارایی خود را از دست می‌دهد و تنها ورق فولادی تحمل تنش می‌کند.



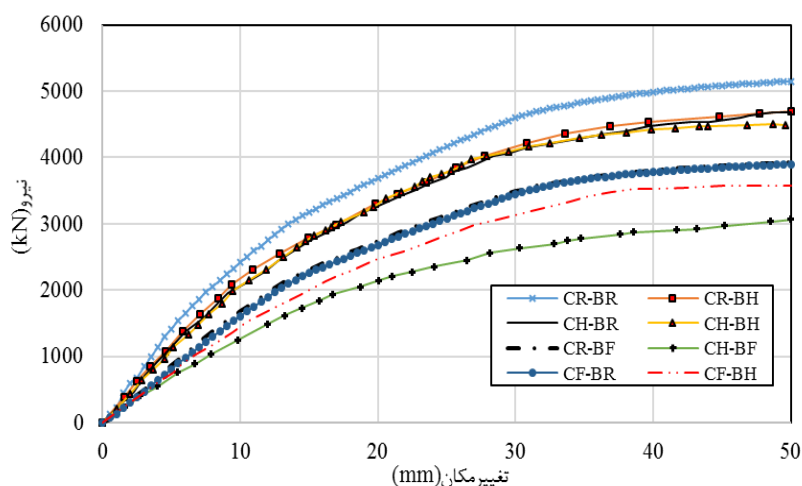
شکل ۱۰: تغییرات تغییرمکان برون صفحه‌ای دیوار برشی مرکب با بازشوی دایروی به قطر ۱۵۰ سانتی‌متر.

#### ۴-۵- مدل‌های با بازشوی به قطر ۲۰۰ سانتی‌متر

نتایج در قالب دو نمودار نیرو-تغییرمکان جانبی درون صفحه‌ای دیوار و نمودار تغییرات تغییرمکان برون صفحه‌ای دیوار ارائه می‌شود. در شکل (۱۱) منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی نمونه‌های دارای بازشوی ۲۰۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. مدل شماره (۱) که اتصال ورق به تیر و ستون به صورت صلب در نظر گرفته شده است، دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۵۱۵۰ کیلونیوتن نسبت به سایر حالات است. همچنین بیشترین سختی الاستیک جانبی نیز مربوط به همین حالت (CR-BR) به مقدار ۲۲۴ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. ضعیف‌ترین وضعیت عملکرد در بین حالات مربوط به نمونه‌ی (CH-BF) با ظرفیت باربری ۳۰۶۴ کیلونیوتن و سختی الاستیک جانبی تقریباً ۱۲۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر وضعیت در اتصال ورق دیوار فولادی به المان مرزی، ظرفیت باربری جانبی سیستم و سختی الاستیک جانبی به ترتیب به میزان ۴۰/۵ درصد و ۴۲/۴ درصد کاهش می‌یابد. در جدول (۵) مقادیر متناظر با ظرفیت باربری و سختی الاستیک هر کدام از حالات ارائه شده است.

نتایج تحلیل حاکی از آن است که از لحاظ جابجایی در صفحه مدل ۱ بهترین نوع اتصال و دارای بهترین نوع عملکرد می باشد و کمترین جابجایی را در بین هشت حالت دارا می باشد. بعد از این اتصال، اتصالات مدل ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب در یک محدوده جابجایی قرار دارند و مدل های ۵ و ۷ و ۸ به ترتیب یک بازه پایین تر از مدل های قبلی قرار دارند و مدل شماره ۶ بدترین نوع اتصال می باشد که بیشترین جابجایی را دارد (به عبارتی کمترین سختی جانبی را موجب می شود). در شکل (۱۲) نمودارهای تغییرات تغییرمکان برون صفحه-ای در اطراف بازو برای مدل های مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل، کمترین تغییرمکان برون صفحه ای به مقدار ۲ میلی متر مربوط به نمونه با اتصالات صلب و بیشترین تغییرمکان برون صفحه ای متعلق به نمونه ای با اتصال مفصلی ورق به ستون و آزاد به تیر به مقدار ۷/۶ میلی متر است.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی ها مشخص می شود که مقاومت کل سیستم بسته به طول بازو کاهش می یابد. سختی و شکل پذیری سیستم ها نیز همواره با ورود بازو کاهش می یابد، اما در صورتی که ابعاد بازو قابل توجه نباشد، ظرفیت جذب انرژی در سیستم می تواند بدون تغییر و یا با افزایش همراه باشد. همچنین به دلیل کاهش سطح مقطع ورق و در نتیجه کاهش مشارکت ورق در رفتار سیستم، سختی اولیه و شکل پذیری مدل های با بازو همواره کوچک تر از مدل بدون بازو است.



شکل ۱۱: نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه های دارای بازو به قطر ۲۰۰ سانتی متر.

جدول ۵: ظرفیت باربری و سختی الاستیک نمونه های دارای بازو به قطر ۲۰۰ سانتی متر

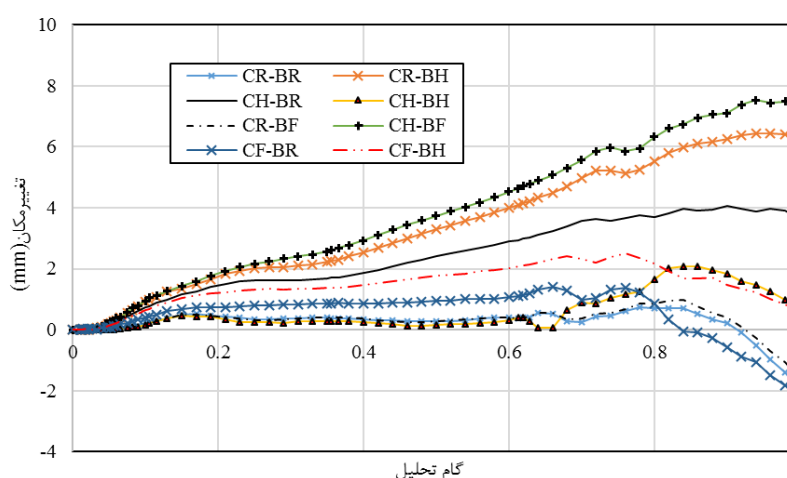
شماره مدل	وضعیت اتصال	ظرفیت باربری (kN)	درصد کاهش ظرفیت باربری	سختی الاستیک (kN/mm)	درصد کاهش سختی الاستیک
مدل ۱	CR-BR	۵۱۵۰	---	۲۲۴	---
مدل ۲	CR-BH	۴۶۹۴	۸/۸	۲۱۴	۴/۴
مدل ۳	CH-BR	۴۶۷۷	۹/۲	۲۰۹	۶/۷
مدل ۴	CH-BH	۴۴۸۴	۱۲/۹	۲۱۸	۲/۷
مدل ۵	CR-BF	۳۹۲۸	۲۳/۷	۱۴۳	۳۶/۲
مدل ۶	CH-BF	۳۰۶۴	۴۰/۵	۱۲۹	۴۲/۴
مدل ۷	CF-BR	۳۸۹۹	۲۴/۳	۱۴۸	۳۳/۹
مدل ۸	CF-BH	۳۵۸۱	۳۰/۵	۱۵۴	۳۱/۳

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق از یک پنل بتنی به ضخامت ۵۰ میلیمتر در یک طرف ورق فولادی استفاده شده است. مدل عددی ابتدا با نمونه‌ی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و سپس مطالعات پارامتریک روی مدل عددی انجام گرفت. دو پارامتر کلیدی قطر بازشو و نوع اتصال ورق فولادی دیوار به المان‌های مرزی در مطالعات لحاظ شدند. از چهار قطر برای بازشوه‌های دایروی و سه نوع اتصال برای اتصال ورق فولادی دیوار به تیر و ستون استفاده شد که در مجموع ۳۲ مدل عددی تحلیل شد. در ادامه، خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های تحقیق ارائه می‌شود.

(۱) نتایج تحلیل حاکی از آن است که از لحاظ جابجایی درون صفحه، مدل ۱ بهترین نوع اتصال و دارای بهترین نوع عملکرد می‌باشد و کمترین جابجایی را در بین هشت حالت دارا می‌باشد.

(۲) از لحاظ جابجایی خارج صفحه، باز هم مدل ۱ بهترین نوع اتصال می‌باشد و کمترین جابجایی خارج صفحه را دارد و مدل ۶ بیشترین جابجایی خارج صفحه را دارد.



شکل ۱۲: تغییرات تغییر مکان برون صفحه‌ای دیوار برشی مرکب با بازشوی دایروی به قطر ۲۰۰ سانتی‌متر.

(۳) به طور کلی، اتصال کاملاً صلب به عنوان بهترین و مطلوب‌ترین اتصال از بین هشت مدل تعریف شده می‌باشد که کمترین جابجایی‌ها را از لحاظ جابجایی داخل صفحه و جابجایی خارج صفحه دارد.

(۴) با حضور ورق فولادی به ضخامت ۴ میلیمتر شامل بازشو با قطرهای مختلف، دو پارامتر ظرفیت باربری و سختی الاستیک افزایش یافته است. در حالتی که ۴۶ درصد از سطح ورق فولادی به صورت بازشو در نظر گرفته شده است، ظرفیت باربری و سختی الاستیک نسبت به قاب تنها به ترتیب تقریباً به مقدار ۴۶ درصد و ۱۸۷ درصد افزایش یافته است. با کاهش سطح بازشو از ۴۶ درصد به ۳ درصد، ظرفیت باربری تقریباً ۲۰ درصد و سختی الاستیک جانبی تقریباً ۱۳۵ درصد افزایش یافت.

## مراجع

- [1] Astaneh-Asl, A. (2002). *Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls*. Steel Tips Report, Structural Steel Educational Council, USA, 49.
- [2] Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A. (2007). Seismic behavior of composite shear wall systems and application of smart structures technology. *Steel Struct.*, 7, pp. 69-75.
- [3] Habashi, H.R. and Alinia, M.M. (2010). Characteristics of the wall frame interaction in steel plate shear walls. *J. Constr. Steel Res.*, 66(2), pp. 150-158.



- [4] Behbahanifard, M.R., Grondin, G.Y. and Elwi, A.E. (2003). *Experimental and numerical investigation of steel plate shear wall*. Structural Engineering Report 254, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- [5] Vian, D. (2005). *Steel Plate Shear Walls for Seismic Design and Retrofit of Building Structures*. Ph.D. Dissertation, University at Buffalo, New York.
- [6] Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A. (2004). Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls. *J. Struct. Eng. ASCE*, 130, pp. 271-284.
- [7] Rezaii, M., Ventura, C.E. and Prion, H.G.L. (2000). Numerical investigation of thin unstiffened steel plate shears walls. Proceedings 12th World Conf. on Earthquake Engineering, 801, 1-8.
- [8] Rahai, A. and Hatami, F. (2009). Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings. *J. Constr. Steel Res.*, 65, pp. 1528-1537.
- [9] Arabzadeh, A., Soltani, M. and Ayazi, A. (2011). Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings. *Thin-Walled Struct.*, 49, pp. 842-854.
- [10] Guo, L., Li, R., Rong, Q. and Zhang, S. (2012) Cyclic behavior of SPSW and CSPSW in composite frame. *Thin-Walled Struct.*, 51, pp. 39-52.
- [11] Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992). Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. *Thin-Walled Struct.*, 14(2), pp. 139-151.
- [12] Vian, D. (2005). *Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structures*. PhD Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- [13] Purba, R.H. (2006). *Design recommendations for perforated steel plate shear walls*. M.Sc. Thesis, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- [14] ABAQUS User's Manual: Version 6.16. (2016). Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc., (HKS).
- [15] Lubliner, J. (1990). *Plasticity Theory*. New York, Macmillan Publishing Company, 495p.
- [16] Shafaei, S., Ayazi, A. and Farahbod, F. (2016). The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp. 81-90.
- [17] SEI/ASCE 7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia (USA): American Society of Civil Engineers.