

An investigation into the effects of strip openings on the structural performance of perforated steel plate shear walls

Alireza Khaloo^{1*}, Sina Kavei², Hatf Abdoos³

1- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- PhD student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Steel Plate Shear Walls (SPSWs) are being increasingly utilized as one of the efficient lateral load-resisting systems in seismic zones. Adopting openings in the infill plate of SPSWs is sometimes essential owing to the architectural requirements, structural reasons, as well as constructional limitations. This study aims at investigating the influence of strip openings on the structural performance of perforated steel plate shear walls with different infill plate boundary conditions. In this regard, a variety of perforated SPSWs with vertical and horizontal strip openings are designed and then numerically simulated possessing different aspect ratios and opening features. The effects of the dimensions and orientations of the strip openings are evaluated through response parameters in terms of drift and stress ratios corresponding to the flexural strength, axial and shear forces. According to the simulation results, in general, introduction of the horizontal and vertical openings attenuates the stiffness of perforated SPSWs, and in turn, the drift response of the structure becomes more pronounce. A non-dimensionalized parameter is also introduced to indicate how the boundary conditions and opening dimensions affect the drift response of the structure. The results indicate that an increase in the width and length of the opening can exacerbate the induced stress values corresponding to the axial forces, flexural moments, and their combination in the columns and beams. In addition, the use of perforated SPSW with opening of less than 0.25m^2 can offer similar seismic performance as compared to that of SPWS with infill plate and without opening.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 July 2023

Revise Date: 05 October 2023

Accept Date: 21 November 2023

Keywords:

Steel Plate shear wall

Strip opening

Numerical modelling

Lateral bearing capacity

Boundary elements

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408516.3178>

*Corresponding author: Alireza Khaloo

Email address: khaloo@sharif.edu

بررسی تأثیر استفاده از بازشوهای نواری در عملکرد سازه و المان‌های مرزی دیوارهای برشی فولادی

علیرضا خالو^{۱*}، سینا کاوئی^۲، هاتف عبدوس^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

دیوارهای برشی فولادی با طراحی مطلوب به عنوان یک سیستم باربر جانبی کارآمد در سازه‌ها تلقی می‌شوند و یکی از مسائل مهم در این سیستم، ضرورت وجود بازشوها بوده که متأثر از دلایل اجرایی، محدودیت‌های معماری و الزامات سازه‌ای است. در این پژوهش، با ایجاد بازشو به صورت نوارهایی در کناره‌های دیوار برشی فولادی و جدا کردن بخشی از اتصال آن به ستون‌ها و تیرها، میزان اثرگذاری آن در تغییرات تنش‌های اعمالی به ستون‌های کنار دیوار و نیز اثر آن بر عملکرد لرزه‌ای سازه بررسی می‌شود. همچنین، برای بررسی تأثیر ایجاد بازشوهای نواری، بازشوهای مستطیلی با نسبت ابعادی متفاوت در چارچوب ۲۵ مدل مختلف و با شرایط اتصال گیرداری و مفصلی در نظر گرفته شده و سپس نسبت‌های مقاومت خمشی، نیروهای محوری و برشی و تغییر مکان نسبی جانبی سازه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد بازشوهای افقی تأثیر مخرب‌تری بر روی ستون‌ها و بازشوهای قائم اثر مخرب‌تری بر روی تیرها خواهند داشت. با تضعیف سیستم باربر جانبی با تعبیه بازشوهای نواری، تغییرات در تنش حاصل از نیروی محوری، لنگر و اندرکنش این دو در ستون‌ها، نتایج متفاوتی به همراه دارد، به طوری که در سازه با سیستم دوگانه، تضعیف دیوار برشی منجر به اضافه شدن نیروی بیشتری به قاب خمشی و به تبع آن، افزایش تنش‌های مذکور در ستون‌ها می‌شود و در اتصال مفصلی، به طور کلی تفاوت تنش‌های ستون محسوس نمی‌باشد. برای بازشوهای قائم، نسبت جابه‌جایی جانبی نسبی دیوارهای با بازشو به دیوار بدون بازشو در حالت اتصال گیرداری و مفصلی به ترتیب در بازه ۱/۰۲ تا ۱/۷۱ و ۱/۰۵ تا ۳/۰۹ بوده و برای بازشوهای افقی مقادیر فوق به ترتیب ۱/۲۲ تا ۶/۳۶ و ۱/۱۵ تا ۹/۹۸ می‌باشد و بیشینه مقادیر مربوط به بازشوهای سرتاسری است. همچنین، استفاده از بازشو با مساحت کمتر از ۰/۲۵ مترمربع منجر به کاهش محسوس عملکرد لرزه‌ای سازه نخواهد شد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، بازشوهای نواری، مدل‌سازی عددی، ظرفیت باربری جانبی، المان‌های مرزی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408516.3178	۱۴۰۳/۰۵/۳۱	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۰۷/۱۳	۱۴۰۲/۰۵/۰۹
10.22065/jsce.2023.408516.3178					
علیرضا خالو khaloo@sharif.edu				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه و در صنعت ساخت سازه‌ها، استفاده از دیوارهای برشی فولادی با توجه به کارایی آن در برابر بارگذاری‌های جانبی وارده به سازه‌ها مانند نیروهای ناشی از زلزله و باد گسترش یافته است [۱-۴]. در حالت کلی، این دیوارها از یک ورق فولادی نازک که توسط تیرها و ستون‌ها احاطه گردیده‌اند، تشکیل شده است که به تیرها و ستون‌های استفاده شده در این سیستم المان‌های مرزی^۱ می‌گویند. نحوه عملکرد دیوار برشی فولادی در هنگام بارگذاری جانبی بدین صورت است که ابتدا ورق جان به دلیل لاغری بسیار زیاد دچار کمانش شده و پس از آن، بارهای جانبی توسط صفحات عمود بر محور فشاری که تحت کشش خالص هستند، تحمل می‌گردد [۵،۶]. مقاومت در برابر بارهای جانبی پس از کمانش برشی ورق جان، توسعه میدان کششی در ورق جان نامیده می‌شود.

وجود دیوارهای برشی فولادی به همراه قاب خمشی علاوه بر فراهم نمودن درجات نامعینی زیاد در سازه، شکل‌پذیری بیشتری را نیز به همراه خواهد داشت [۷،۸]. به عنوان مهمترین عوامل مؤثر در انتخاب نوع سیستم باربر جانبی می‌توان به محدودیت‌های معماری، و نیز الزامات سازه‌ای مانند سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و میزان اتلاف انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای، مسائل اجرایی و اقتصادی اشاره نمود [۹-۱۴]. همچنین، در برخی موارد، به دلیل ملاحظات معماری و محدودیت‌های سازه‌ای، تعبیه بازشو در دیوارهای برشی فولادی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۱۵]. پژوهش‌های موجود در ادبیات فنی در بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی در سه گروه مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی قابل ارائه است که در ادامه به صورت مختصر به هر یک از آنها پرداخته می‌شود و تمرکز بیشتر بر روی بررسی اثر بازشوها در عملکرد دیوارهای برشی فولادی خواهد بود.

به عنوان یکی از اولین مطالعات انجام شده در این زمینه، در سال ۱۹۷۳ تاکاهاشی^۲ و همکاران [۱۶]، اثر یک بازشو به همراه سخت‌کننده در اطراف آن را بر روی سختی و ظرفیت باربری نهایی دیوار برش فولادی بررسی نمودند. رابرتز^۳ و صبور قمی [۱۷] در قالب مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۱۶ نمونه، تأثیر سوراخ دایروی ایجادشده به قطرهای ۶۰، ۱۰۵، و ۱۵۰ میلی‌متر در مرکز پانل دیوار برشی فولادی را بر عملکرد چرخه‌ای آن ارزیابی و یک ضریب کاهش محافظه‌کارانه به صورت $(1 - D/d)$ برای سختی و ظرفیت باربری نهایی این دیوارها بر حسب نسبت قطر سوراخ به ارتفاع دیوار (D/d) پیشنهاد نمودند. دیلمی و دفتری [۱۸] با استناد به نتایج مدلسازی اجزای محدود بر روی ۵۰ دیوار برشی فولادی با بازشو در وسط پانل، تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی ضخامت ورق پانل، نسبت ابعادی بهینه برای بازشوها و نیز درصد مساحت بازشو نسبت به پانل دیوار برشی را بر عملکرد آن ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج این مطالعه مشخص شد که به منظور تعیین نسبت بهینه برای ابعاد بازشوها، از میان ضخامت ورق پانل و درصد مساحت بازشو، عامل اول بیشترین اثرگذاری را دارد.

همچنین در چارچوب مطالعات آزمایشگاهی، ویان^۴ و همکاران [۱۹]، اثرگذاری آرایشی از سوراخ‌های متحدالفاصله ایجاد شده بر روی پانل دیوار برشی فولادی در رفتار چرخه‌ای آن ارزیابی گردید. پیک^۵ [۲۰] با استناد به نتایج مدل اجزای محدود دیوارهای برشی فولادی سوراخ‌دار، رابطه‌ای تجربی مبتنی بر تحلیل رگرسیونی جهت تخمین ظرفیت باربری جانبی این المان‌های سازه‌ای ارائه داد. پلگرینو^۶ و همکاران [۲۱] اثرات ناشی از ابعاد سوراخ‌ها، موقعیت و زاویه قرارگیری سوراخ‌ها، شکل هندسی سوراخ‌ها (دایروی و مستطیلی)، و ضریب لاغری پانل را در کمانش خطی و رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی مطالعه نمودند. در سال ۲۰۱۲، اثر بازشوه‌های مستطیلی بزرگ در عملکرد دیوارهای برشی فولادی توسط حسین‌زاده و تهران‌زاده [۲۲] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود و به صورت عددی بررسی گردید. ولی‌زاده و همکاران [۲۳] در یک مطالعه آزمایشگاهی، هشت نمونه با مقیاس یک‌ششم از دیوار برشی فولادی با بازشوی دایروی در مرکز را

¹ Boundary elements

² Takahashi

³ Roberts

⁴ Vian

⁵ Paik

⁶ Pellegrino

ساختند و عملکرد آنها را متأثر از تغییر ضخامت ورق پانل و ابعاد بازشو بررسی نمودند. بر اساس نتایج این مطالعه، وجود بازشو منجر به کاهش سختی اولیه و قابلیت اتلاف انرژی سازه شده و افزایش ابعاد بازشو این موضوع را تشدید می‌کند.

صبوری قمی و همکاران [۲۴] اثر ابعاد و موقعیت یک بازشوی مستطیلی را در شرایط با و بدون استفاده از سخت‌کننده بر رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی ارزیابی نمودند. به عنوان یکی از نتایج مهم این مطالعه، مشاهده شد که با افزایش نسبت ابعادی بازشو و در صورت عدم استفاده از سخت‌کننده، روند کاهش قابلیت اتلاف انرژی دیوار به صورت خطی است. همچنین، در چارچوب مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، تأثیر بکارگیری بازشوی دایروی در مرکز پانل دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های قطری توسط علوی و ناطقی الهی [۲۵] بررسی گردید. بر اساس نتایج این آزمایش، استفاده از سخت‌کننده‌ها منجر به افزایش تقریباً ۱۴ درصدی شکل‌پذیری سازه شده است.

در سال ۲۰۱۴، بومیک^۷ [۲۶] اثر بازشوی دایروی در مرکز پانل دیوار برشی فولادی را به صورت تحلیلی و عددی مطالعه و رابطه-ای جهت ارزیابی ظرفیت برشی المان‌های مرزی دیوارهای برشی فولادی یک دهانه و با چهار و شش طبقه ارائه نمود. صبوری قمی و همکاران [۲۷] با ساخت سه نمونه آزمایشگاهی در مقیاس یک‌سوم، اثر تعبیه دو بازشوی مستطیلی را در عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی مشخص نمودند. بر اساس نتایج این آزمایش، فاصله بین بازشوه‌های موجود تأثیر محسوسی بر ظرفیت برشی، قابلیت اتلاف انرژی و سختی دیوارها نداشته است. در پژوهشی دیگر، خلیل‌زاده و روشنی [۲۸] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی^۸ توانستند ظرفیت باربری و قابلیت اتلاف انرژی دیوارهای برشی فولادی با بازشو را با دقت مطلوبی، با میانگین خطای کمتر از ۶ درصد، تخمین بزنند. احمد خان و همکاران [۲۹] با استفاده از رگرسیون غیرخطی، مدل‌هایی را جهت تخمین میزان کاهش ظرفیت باربری و سختی دیوارهای برشی فولادی با بازشو ارائه دادند که از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

همچنین، ناصرینیا و شوکتی [۳۰] میزان اثرگذاری بازشوه‌های دایروی را بر عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی ارزیابی نمودند. در سال ۲۰۲۰، مرادی و همکاران [۳۱] بر اساس نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود ۱۱۰ دیوار و سپس با استفاده از روش شبکه عصبی توابع پایه‌ای شعاعی^۹، روابطی کاربردی جهت تخمین ظرفیت باربری دیوارهای برشی فولادی با بازشوی مستطیلی ارائه نمودند. بر اساس نتایج این پژوهش، در صورتی که مساحت بازشوی مستطیلی تعبیه‌شده تا ۱۵ درصد مساحت پانل باشد، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش ظرفیت باربری و قابلیت اتلاف انرژی دیوار ندارد. پاسلار^{۱۰} و همکاران [۳۲] اثر شرایط مرزی و ابعاد مختلف بازشو را در قالب شبیه‌سازی عددی ۳۰ مدل مختلف تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی نمودند. در پژوهشی دیگر، مو^{۱۱} و ینگ^{۱۲} [۳۳] عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده‌های مورب و بازشو/بازشوه‌های مستطیلی در نواحی المان‌های مرزی را به صورت آزمایشگاهی بررسی و سپس یک مدل عددی را که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد، ارائه نمودند.

در مطالعات آزمایشگاهی کردزنگنه و همکاران [۳۴]، هفت نمونه با مقیاس یک‌ششم ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. موقعیت و ابعاد بازشوی مستطیلی به عنوان پارامترهای این مطالعه بودند و در صورت استفاده از بازشوی مستطیلی با ابعادی معادل ۴۰۰، ۶۷۶، و ۱۰۲۴ درصد مساحت پانل، به ترتیب ۲۸، ۳۳، و ۴۶ درصد کاهش ظرفیت باربری مشاهده گردید. در سال ۲۰۲۱، درویشی و مفید [۳۵] عملکرد سازه‌های دیوارهای برشی فولادی با بازشوه‌های بزرگ و سخت‌نشده را در قالب مطالعات آزمایشگاهی و با ساخت سه نمونه در مقیاس یک‌دوم بررسی نمودند و در پژوهشی دیگر [۳۶]، اندرکنش قاب و ورق پانل فولادی را در سیستم دیوارهای برشی فولادی با بازشو به صورت عددی بررسی نمودند. در سال ۲۰۲۳، قبادی و غفارزاده [۳۷] مدل عددی جدیدی را به منظور شبیه‌سازی رفتار بار-

⁷ Bhowmick

⁸ Artificial Neural Network (ANN)

⁹ Radial Basis Function (RBF)

¹⁰ Paslar

¹¹ Mu

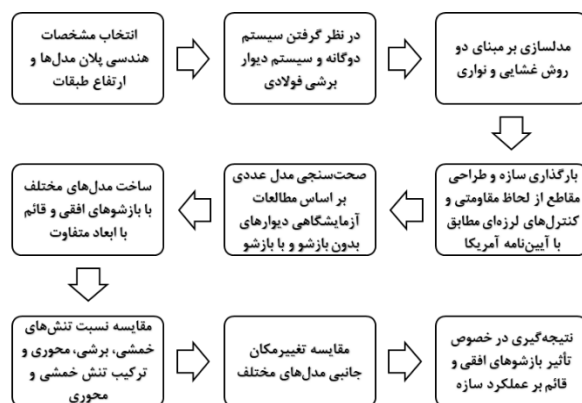
¹² Yang

تغییر مکان دیوارهای برشی فولادی بازشودار تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و تک‌سویه ارائه کردند که با استناد به نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشین از دقت مطلوبی برخوردار است.

از مهم‌ترین چالش‌ها هنگام استفاده از دیوارهای برشی فولادی، بزرگ بودن ابعاد المان‌های مرزی به‌خصوص ستون‌ها است. زیرا در زمان اعمال تنش‌های کششی که بعد از کماتش برشی ورق پدید می‌آیند (میدان کششی)، المان‌های مرزی باید در برابر این نیروی کششی، مقاومت و سختی کافی داشته و تسلیم نشوند. این موضوع ممکن است منجر شود که استفاده از دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با دیگر سیستم‌های باربر جانبی مانند مهاربندها، توجیه اقتصادی نداشته باشد. برای رفع این مسئله و به‌منظور کاهش نیروی وارده به ستون‌ها می‌توان در بخش‌هایی از دیوار، ورق فولادی را از المان‌های مرزی جدا نمود. همچنین، ممکن است ملاحظات معماری سازه و یا عبور لوله‌های تأسیساتی لزوم ایجاد بازشوها را تقویت کند. بنابراین، شناخت دقیق‌تر عملکرد سیستم دیوارهای برشی فولادی همراه با بازشو ضرورت پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که اگرچه با ایجاد بازشو ظرفیت جانبی سیستم کاهش می‌یابد، اما با ارائه تمهیداتی مانند افزایش ضخامت ورق و یا استفاده از مصالح فولادی با مقاومت بالا بتوان برخی از نقاط ضعف متأثر از آن را مرتفع نمود [۳۸].

در این پژوهش با ایجاد بازشوهای نواری در کناره‌های دیوار برش فولادی و جدا کردن بخشی از اتصال آن به ستون‌ها، میزان کاهش در تنش‌های اعمالی به ستون‌های کنار دیوار و اثر آن بر رفتار و عملکرد لرزه‌ای سازه بررسی می‌شود. بدین منظور برای بررسی اثر ایجاد بازشو نواری، یک قاب ۸ طبقه فولادی با سیستم قاب خمشی و دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی می‌شود. سپس، پاسخ سازه بر اساس پارامترهای رفتاری مانند نسبت تنش‌ها تحت بارگذاری‌های برشی، خمشی و ترکیب بارهای محوری و خمشی به همراه جابه‌جایی جانبی سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد و با تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری لازم صورت می‌پذیرد.

در ادامه این نوشتار، نخست به تشریح مدل‌ها و نحوه شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار ETABS پرداخته و در گام بعد، یافته‌های حاصل از مدل‌سازی ارائه شده است. سپس در بخشی مجزا، با موشکافی نتایج به‌دست آمده، دستاوردهای مهم این پژوهش اشاره و مورد بررسی و بحث قرار خواهد گرفت. در پایان، در بخش جمع‌بندی و نتیجه‌گیری، به کلیات روش انجام پژوهش و گزیده‌ای از یافته‌های آن به‌طور خلاصه اشاره خواهد شد. روندنمای فرایند انجام مطالعه در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: روندنمای فرایند مطالعه.

۲- مدل‌سازی

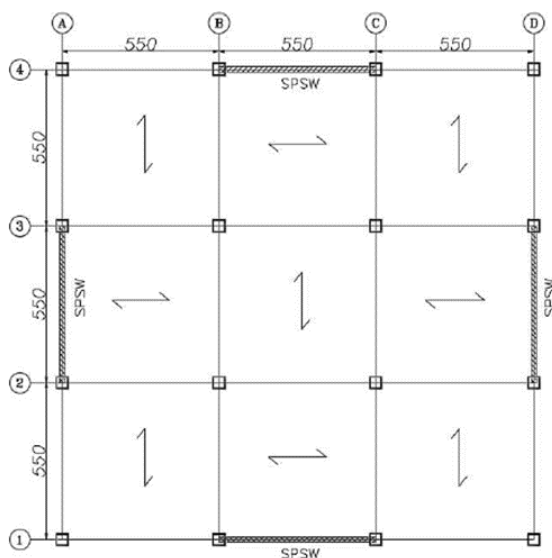
بر اساس آیین‌نامه AISC آمریکا [۳۹] برای شبیه‌سازی و تحلیل دیوارهای برشی فولادی، دو روش نواری و غشایی غیرهمسانگرد^{۱۳} پیشنهاد شده است. چرا که جهت مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی لازم است تا از مصالحی استفاده شود که در راستای قطری اعمال نیروی جانبی دارای مقاومت کششی باشند و در راستای عمود بر آن هیچ‌گونه مقاومتی نداشته باشند. از آنجایی که کشش در

¹³ Orthotropic Membrane Model

جهت قطری دارای جهت می‌باشد، محور محلی عضو غشایی بایستی متناسب با زاویه میدان کششی باشد. در روش غشایی ارتوتروپ، خصوصیات مصالح در محور منطبق با زاویه میدان کششی، خصوصیات واقعی و ثابت مصالح می‌باشد و سختی در جهت متعامد نیز بایستی مقداری ناچیز فرض شود تا این تنش محاسبه شده در قطر فشاری صفر گردد. همچنین توصیه شده است تا سختی برشی داخل صفحه عضو غشایی مقداری ناچیز (تقریباً صفر) در نظر گرفته شود. در غیر این صورت، ممکن است در تحلیل، نسبتی از لنگر واژگونی را به تنش قائم در صفحه جان انتقال دهد که مغایر با واقعیت بوده و صفحه جان نمی‌تواند در تحمل چنین نیروهایی مشارکت داشته باشد.

در این پژوهش، یک ساختمان ۸ طبقه دارای دیوارهای برشی فولادی که پلان آن در شکل ۲ نمایش داده شده است، به کمک نرم‌افزار ETABS و با استفاده از هر دو روش مذکور در مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی، به صورت عددی، در دو مرحله مجزا تحلیل شده است. در مرحله نخست، کلیه اتصالات مابین تیرها و ستون‌ها به صورت مفصلی در نظر گرفته شده و به این ترتیب سیستم باربر جانبی تنها شامل دیوارهای برشی سازه است. در مرحله دوم، اما اتصالات مابین تیرها و ستون‌ها در دهانه‌هایی که فاقد دیوار برشی فولادی است، به صورت گیرداری فرض شده و در نتیجه، سیستم باربر جانبی در این حالت از نوع سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی فولادی است.

در نحوه عملکرد دیوارهای برشی فولادی، فرض بر این بوده است که اعضای مرزی ورق دیوار که تیرها و ستون‌ها می‌باشند، سختی و مقاومت کافی دارند، به نحوی که در اثر اعمال تنش‌های کششی ناشی از رفتار بعد از کمانش ورق (میدان کششی) تسلیم نمی‌شوند و در پایداری کلی سازه خللی بوجود نمی‌آید. این فرض موجب می‌شود که ابعاد مقاطع به کار رفته در اعضای مرزی دیوار به خصوص ستون‌های کناری دیوار افزایش قابل توجهی پیدا کند، به نحوی که استفاده کردن از این سامانه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه به نظر نرسد. در این پژوهش، مد نظر است با ایجاد بازشوهای نواری در کناره‌های دیوار برش فولادی و جدا کردن بخشی از اتصال آن به ستون‌ها و تیرها، میزان تغییرات در تنش‌های اعمالی به ستون‌ها و تیرهای پانل دیوار و اثر آن بر عملکرد لرزه‌ای سازه بررسی شود.



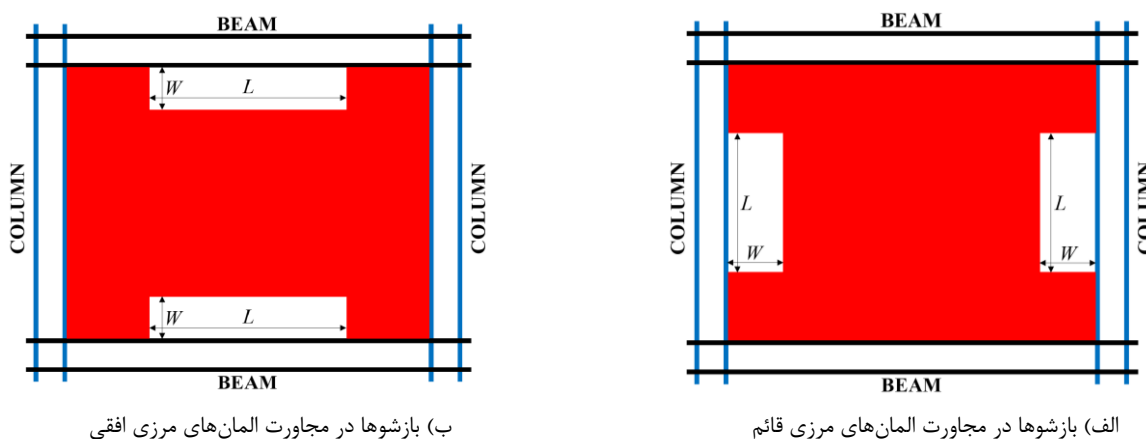
شکل ۲: تصویر پلان ساختمان هشت طبقه مدلسازی شده.

لازم به ذکر است که سازه مورد بررسی در شهر تهران و خاک زمین نوع II در نظر گرفته شده، ارتفاع کلیه طبقات آن ثابت و برابر ۳۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع کل سازه ۲۸ متر می‌باشد. سایر پارامترهای متناظر با ساختمان پروژه و مشخصات خاک منطقه بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۱ و به ترتیب برای سیستم دوگانه و سیستم دیوار برشی فولادی خلاصه شده و شیوه اعمال بارگذاری لرزه‌ای بر اساس ویرایش چهارم از ضوابط آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ [۴۰]، صورت گرفته است.

جدول ۱: مشخصات سیستم‌های سازه‌ای.

پارامتر	نماد	سیستم دوگانه	سیستم دیوار برشی
نسبت شتاب مبنای طرح به شتاب ثقل	A	۰/۳۵	۰/۳۵
ضریب اهمیت	I	۱	۱
ضریب رفتار سازه	R	۸	۷
دوره تناوب سازه (ثانیه)	T	۰/۷۶	۰/۷۶
ضریب اصلاح طیف	N	۱/۰۵	۱/۰۵
ضریب شکل طیف	B ₁	۱/۶۴	۱/۶۴
ضریب بازتاب	B	۱/۷۲	۱/۷۲
ضریب زلزله	C	۰/۰۷۵	۰/۰۸۶

در هر دو مرحله، بازشوهای نواری با ابعاد مختلف نیز در کناره‌های صفحه دیوارها دیده شده است. ضمناً، منظور از عبارت SPSW-W-L در کلیه شکل‌ها و جداول ارائه شده در این مطالعه، دیوار برشی فولادی (Steel Plate Shear Wall) با دو بازشو نواری در جداره آن به عرض W و طول L است (شکل ۳). در جدول ۲ نیز مقادیر بارهای وارده به سازه آورده شده است.



ب) بازشوها در مجاورت المان‌های مرزی افقی

الف) بازشوها در مجاورت المان‌های مرزی قائم

شکل ۳: دیوار برشی فولادی همراه با بازشوهای نواری در المان‌های مرزی.

جدول ۲: مشخصات بارهای ثقلی وارده به ساختمان.

ردیف	نوع بارگذاری	نماد بارگذاری	شدت بارگذاری (kg/m ²)
۱	مرده	Dead	۴۵۰
۲	زنده	Live	۲۰۰
۳	پارتیشن	Partition	۱۰۰
۴	دیوار	Wall	۶۰۰

همچنین، از روابط ۱ تا ۶ مندرج در جدول ۳، به منظور تعیین مقدار حداقل ضخامت ورق دیوار، حداقل ممان اینرسی ستون‌ها، حداقل ممان اینرسی تیرها، زاویه میدان کشش، فاصله و مساحت نوارها در فرایند مدل‌سازی‌ها استفاده شده است چرا که در ضوابط فعلی آیین‌نامه‌ها، روابط مشخصی برای دیوارهای با بازشوی نواری ارائه نشده و اندک روابط موجود نیز مربوط به دیوارهای برشی فولادی با آرایشی از سوراخ‌های دایروی است. لذا طراحی دیوارهای برشی فولادی برای مدل‌های توصیف‌شده مطابق با این روابط انجام خواهد گرفت.

جدول ۳: روابط کنترل طراحی و آنالیز دیوارهای برشی [۳۹،۴۱].

شماره	رابطه
(۱)	$t_w \geq \frac{V_u}{0.42\phi f_y L_{cf} \sin 2\alpha}$
(۲)	$I_c \geq 0.00307 \frac{t_w h^4}{L}$
(۳)	$I_{HBE} \geq 0.003 \frac{\Delta t_w L^4}{h}$
(۴)	$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)}$
(۵)	$\Delta_x = \frac{1}{n(L + h \tan \alpha)}$
(۶)	$A_s = \frac{t_w (L \cos \alpha + h \sin \alpha)}{n}$

که در آن، α زاویه میدان کششی تشکیل شده در ورق جان نسبت به محور قائم، L طول دهانه دیوار، t ضخامت ورق پانل دیوار، A_c سطح مقطع ستون، A_b سطح مقطع تیر، I_c سطح مقطع ستون، h ارتفاع دیوار، n تعداد نوارها، Δ_x طول هر قطعه از تیر، Δt_w اختلاف ضخامت پانل دیوار برشی در طبقه فوقانی و تحتانی، و L_{cf} فاصله دهانه آزاد ستون‌ها می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد، این پژوهش رفتار یک ساختمان ۸ طبقه با سیستم دیوار برشی فولادی دارای بازشو را بررسی نموده است. به این ترتیب، پس از طراحی و تعیین ضخامت ورق فولادی و عرض نوارها به مدل‌سازی در نرم‌افزار ETABS در دو حالت مدل نواری^{۱۴} و مدل غشایی غیرهمسانگرد پرداخته شده و تأثیر بازشوی نواری در دیوار برشی فولادی تعبیه‌شده داخل یک قاب ۸ طبقه، در دو حالت تحت سیستم باربر جانبی دیوار برشی فولادی و سیستم باربر جانبی ترکیبی دیوار برشی فولادی و قاب خمشی فولادی به دست آمده است.

با توجه به اینکه رفتار دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده بر پایه مقاومت پس‌کمانشی و سازوکار عمل میدان کششی در ورق‌های تقویت‌نشده ارزیابی می‌شود، بنابراین در نرم‌افزار ETABS در فرایند مدل‌سازی نواری، مقاومت فشاری در نظر گرفته نشده است. در مدل غشایی نیز با توجه به اختلاف بین مقاومت فشاری و کششی اعضای با ضخامت کم، به تعریف المان با مصالح غیرهمسان نیاز است، لذا محور محلی المان غشایی به گونه‌ای تنظیم شده است که زاویه آن‌ها با زاویه میدان‌های کمانشی در یک راستا قرار گیرند. بنابراین، محور محلی المان‌ها با توجه به زاویه میدان کششی دوران یافته و نسبت تنش طراحی مقاطع در مدل نواری و غشایی ارتوتروپ به دست آمده است که با توجه به خروجی‌ها مشاهده می‌گردد که نسبت تنش‌ها در هر دو حالت مدل نواری و غشایی ارتوتروپ به یکدیگر نزدیک بوده و انطباق قابل‌قبولی با یکدیگر دارند.

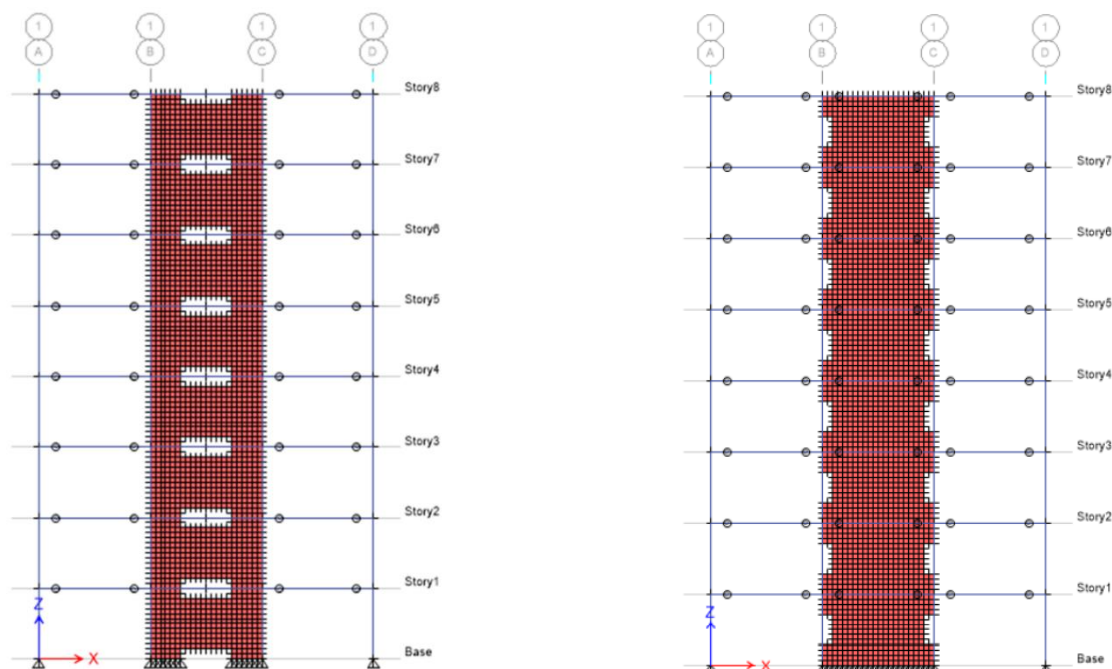
در ادامه، ۱۶ مدل با نسبت ابعادی مختلف از بازشوی قائم به همراه ۹ مدل با بازشوی افقی مختلف شبیه‌سازی شده و مقادیر نسبت تنش مقاومت خمشی، نیروی محوری و برشی و نیز مقدار تغییرمکان نسبی^{۱۵} آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند که مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌های مذکور در دو حالت با اتصال گیردار و مفصلی صورت گرفته است. لازم به ذکر است چنانچه اتصالات تیر به ستون مفصلی باشد،

¹⁴ Strip Model¹⁵ Drift

سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی فقط دیوار برشی فولادی بوده، اما در صورت گیرداری شدن اتصالات، سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی به صورت دوگانه، قاب خمشی فولادی همراه با دیوار برشی فولادی، می باشد. در جدول های ۴ و ۵، مشخصات مدل های ساخته شده در هر دو گام شبیه سازی (در نظر گرفتن اتصالات به صورت مفصلی و گیرداری) نمایش داده شده که در آن به ترتیب مقادیر عرض و طول بازشو برای هر یک از نمونه های بررسی شده با بازشوی قائم و افقی به تفکیک آورده شده است. همچنین در شکل ۴، تصویری از یکی از نمونه های ساخته شده با بازشوی قائم و افقی در نرم افزار ETABS ارائه گردیده است.

جدول ۴: مشخصات مدل های بررسی شده با بازشوی قائم.			
شماره مدل	نام مدل	عرض بازشو، W(cm)	طول بازشو، L(cm)
۱	Strip-0-0	۰	۰
۲	SPSW-0-0	۰	۰
۳	SPSW-0-50	۰	۵۰
۴	SPSW-0-150	۰	۱۵۰
۵	SPSW-0-250	۰	۲۵۰
۶	SPSW-0-350	۰	۳۵۰
۷	SPSW-25-50	۲۵	۵۰
۸	SPSW-25-150	۲۵	۱۵۰
۹	SPSW-25-250	۲۵	۲۵۰
۱۰	SPSW-25-350	۲۵	۳۵۰
۱۱	SPSW-50-50	۵۰	۵۰
۱۲	SPSW-50-150	۵۰	۱۵۰
۱۳	SPSW-50-250	۵۰	۲۵۰
۱۴	SPSW-50-350	۵۰	۳۵۰
۱۵	SPSW-75-50	۷۵	۵۰
۱۶	SPSW-75-150	۷۵	۱۵۰
۱۷	SPSW-75-250	۷۵	۲۵۰
۱۸	SPSW-75-350	۷۵	۳۵۰

جدول ۵: مشخصات مدل های بررسی شده با بازشوی افقی.			
شماره مدل	نام مدل	عرض بازشو، W(cm)	طول بازشو، L(cm)
۱	Strip-0-0	۰	۰
۲	SPSW-0-0	۰	۰
۳	SPSW-25-100	۲۵	۱۰۰
۴	SPSW-25-250	۲۵	۲۵۰
۵	SPSW-25-400	۲۵	۴۰۰
۶	SPSW-50-100	۵۰	۱۰۰
۷	SPSW-50-250	۵۰	۲۵۰
۸	SPSW-50-400	۵۰	۴۰۰
۹	SPSW-75-100	۷۵	۱۰۰
۱۰	SPSW-75-250	۷۵	۲۵۰
۱۱	SPSW-75-400	۷۵	۴۰۰



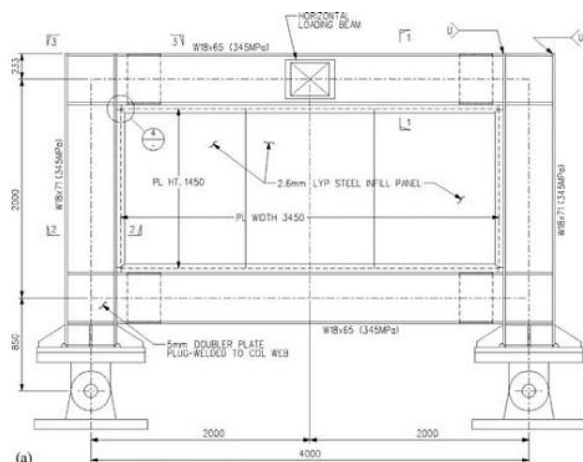
(ب) دارای بازشوهای افقی

(الف) دارای بازشوهای قائم

شکل ۴: تصویر نمونه‌های با بازشوهای قائم و افقی مدلسازی شده در نرم‌افزار ETABS.

۳- صحت‌سنجی مدل عددی

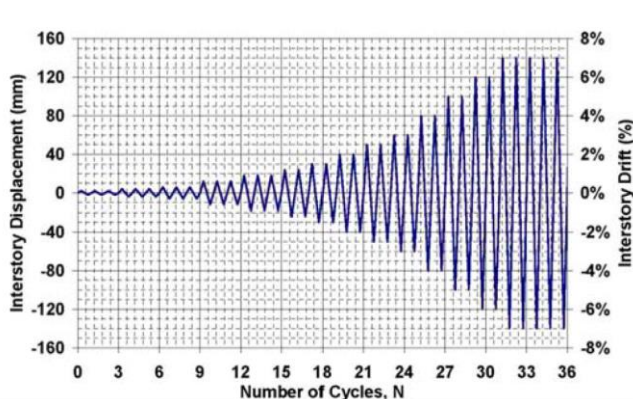
در این بخش، به منظور بررسی صحت مدل عددی دیوارهای برشی فولادی، از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده پیرامون دیوارهای برشی بدون بازشو و با بازشو استفاده شده و نتایج حاصل از روش‌های نواری و غشائی در تعیین پارامترهای پاسخ تعیین و مقایسه می‌شود. در گام اول و برای دیوارهای بدون بازشو، از مطالعات آزمایشگاهی ویان و همکاران [۱۹،۴۲] به عنوان مبنای صحت‌سنجی استفاده شده که در آن مشخصات مکانیکی مصالح فولادی این مطالعه، به همراه الگوی بارگذاری وارده به سازه بر اساس ATC-24 [۴۳] در شکل ۵ آورده شده است. در این آزمایش، اتصال تیرها به ستون‌ها از نوع گیردار و ضخامت ورق فولادی ۲/۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده و فاصله محورهای افقی (تیرها) و محورهای قائم (ستون‌ها) به ترتیب ۲ متر و ۴ متر می‌باشد.



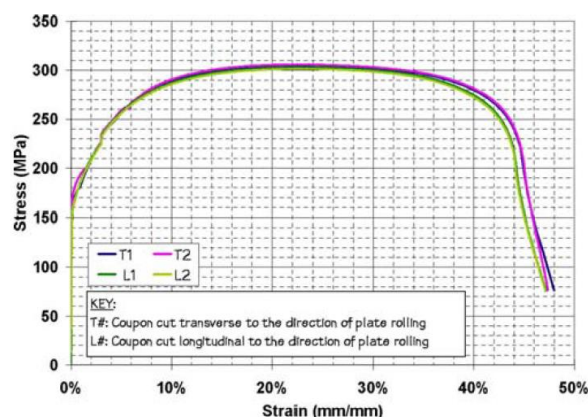
(ب) مشخصات نمونه آزمایشگاهی



(الف) چیدمان آزمایش



(د) الگوی بارگذاری چرخه‌ای



(ج) مشخصات مکانیکی مصالح فولادی

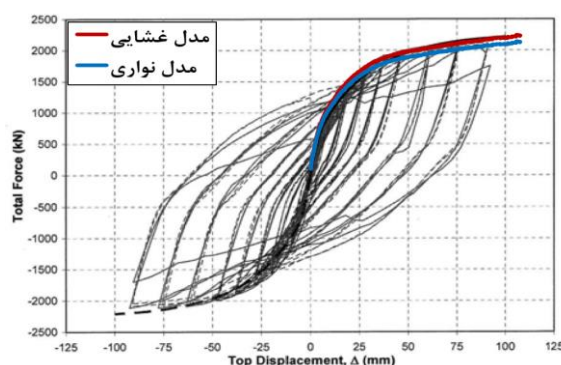
شکل ۵: مشخصات نمونه و جزئیات مطالعات آزمایشگاهی ویان و همکاران بر روی دیوارهای برشی بدون بازشو [۱۹،۴۲].

مشخصات مقاومتی مصالح مصرفی المان‌های مرزی (تیر و ستون) و نیز پانل دیوار برشی بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۶ در مدلسازی لحاظ شده است.

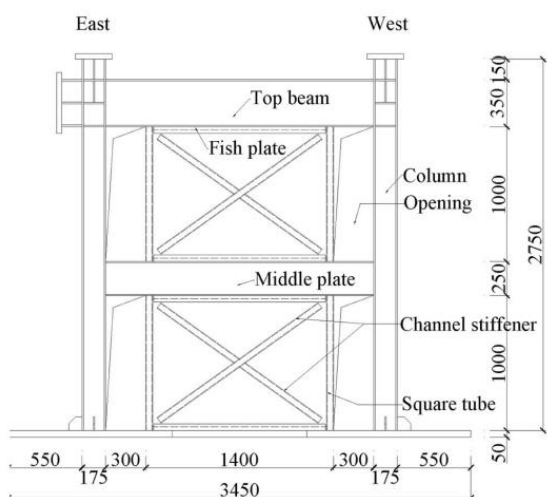
جدول ۶: مشخصات مکانیکی مصالح در مدل عددی.

پانل دیوار از فولاد LYS165		المان‌های مرزی (تیر و ستون) از فولاد A752		متغیر
تنش (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	کرنش	تنش (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	کرنش	
۱۶۵۱	۰	۳۴۵۱	۰	پلاستیسیته مصالح
۲۹۰۰	۰٫۱۰	۴۵۰۰	۰٫۰۸	
۳۰۵۰	۰٫۲۰	۴۸۰۰	۰٫۱۷	
$۲٫۱ \times ۱۰^۶$		$۲٫۱ \times ۱۰^۶$		مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی-متر مربع)
۰٫۳		۰٫۳		ضریب پواسون
۷۸۵۰		۷۸۵۰		چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)

پس از ساخت مدل عددی با مشخصات آزمایش انجام شده، منحنی بار افزون با استفاده از مدل‌های نواری و غشایی در شکل ۶ ترسیم و با منحنی حاصل از آزمایش مقایسه شد که با توجه به درصد خطای کمتر از ۱۰ درصد، مدل‌های عددی مبتنی بر روش‌های فوق مطابقت بسیار خوبی با یافته‌های آزمایشگاهی دارد و از دقت مطلوبی برخوردار هستند. لذا، هر دو روش نواری و غشایی می‌توانند در مطالعات پارامتریک این پژوهش بکار گرفته شوند.



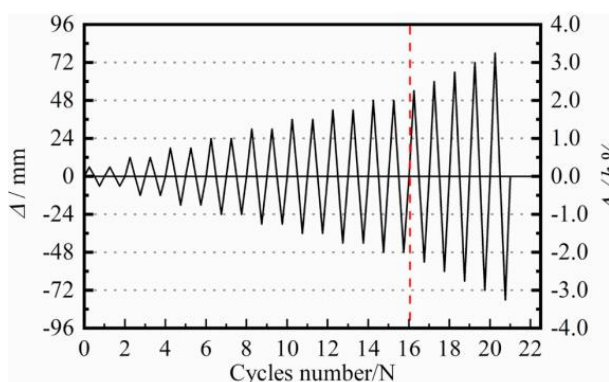
شکل ۶: صحت سنجی مدل عددی دیوارهای فولادی بدون بازشو بر اساس مطالعات آزمایشگاهی ویان و همکاران [۱۹،۴۲]. همچنین، در فرایند صحت سنجی مدل عددی دیوارهای فولادی با بازشو، از مطالعات آزمایشگاهی مو و یانگ [۳۳] که بر روی دیوارهای فولادی با بازشوی مستطیلی انجام گردیده، استفاده شده است. چیدمان آزمایش و مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه این آزمایش به همراه الگوی بارگذاری چرخه‌ای وارده به آن در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، ضخامت ورق فولادی ۳ میلی‌متر، تنش تسلیم و نهایی آن به ترتیب ۳۱۵/۷۴ و ۴۵۳/۹۸ مگاپاسکال، و کرنش شکست آن ۳۲/۷۳ درصد بوده و سایر مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در جدول ۷ خلاصه شده است که در آن تمامی ابعاد مقاطع بر حسب میلی‌متر هستند.



(ب) مشخصات نمونه آزمایشگاهی



(الف) چیدمان آزمایش



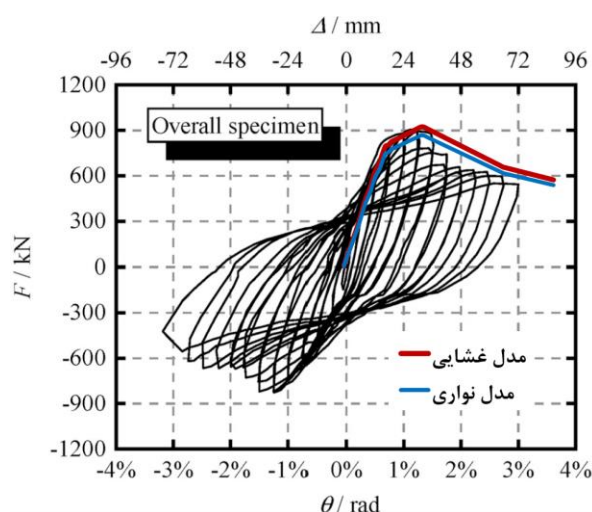
(ج) الگوی بارگذاری چرخه‌ای

شکل ۷: مشخصات نمونه و جزئیات مطالعات آزمایشگاهی مو و یانگ بر روی دیوارهای برشی با بازشوی مستطیلی در سال ۲۰۲۰ [۳۳].

جدول ۷: مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی مو و یانگ در سال ۲۰۲۰ [۳۳].

تیر فوقانی	تیر میانی	ستون	ورق پانل دیوار	سخت‌کننده قطری	سخت‌کننده طولی
H350×175×7×11	H250×125×6×9	H175×175×7.5×11	1300×950×3	[50×37×4.5	□50×4

با در اختیار داشتن اطلاعات فوق، منحنی بار افزودن حاصل از مدل عددی بر اساس روش‌های نواری و غشایی تعیین و با نتایج این آزمایش مقایسه شدند که نشانگر دقت قابل قبول شبیه‌سازی عددی صورت گرفته در جهت بررسی اثر بازشوهای مستطیلی در دیوارهای برشی فولادی است.



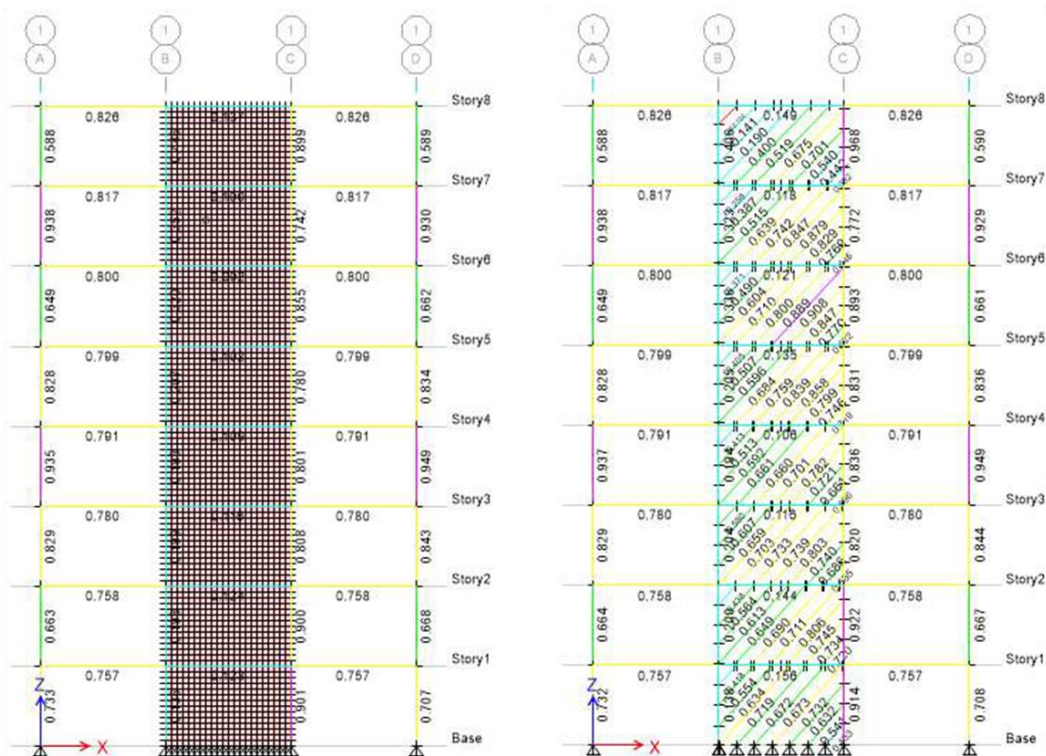
شکل ۸: صحت‌سنجی مدل عددی دیوارهای فولادی با بازشو بر اساس مطالعات آزمایشگاهی مو و یانگ در سال ۲۰۲۰ [۳۳].

با توجه به صحت‌سنجی صورت گرفته برای مدل‌های عددی بدون بازشو و با بازشو، لذا نتایج مطالعات پارامتریک این پژوهش قابل استناد خواهد بود.

۴- یافته‌ها و بحث پیرامون نتایج مدل‌سازی

در این بخش، نخست به تحلیل یافته‌ها و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها پرداخته می‌شود و در گام بعد، بر روی دستاوردهای حاصل بحث و بررسی صورت می‌گیرد. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، پس از طراحی، مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی در ETABS به دو روش نواری و غشایی غیرهمسانگرد انجام می‌شود.

با اعمال بار لرزه‌ای، نسبت تقاضا به ظرفیت (نسبت تنش) برای اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای مختلف سازه با سیستم باربر جانبی دیوار برشی فولادی با دیوارهای برشی مدل شده به صورت نواری و غشایی غیرهمسانگرد مطابق شکل ۹ خواهد بود. با توجه به این شکل، نتایج حاصل از این دو نوع مدل‌سازی مطابقت بسیار خوبی با یکدیگر دارند؛ بنابراین در مراحل بعدی، مدل‌سازی دیوار تنها با استفاده از روش غشایی انجام شده است.

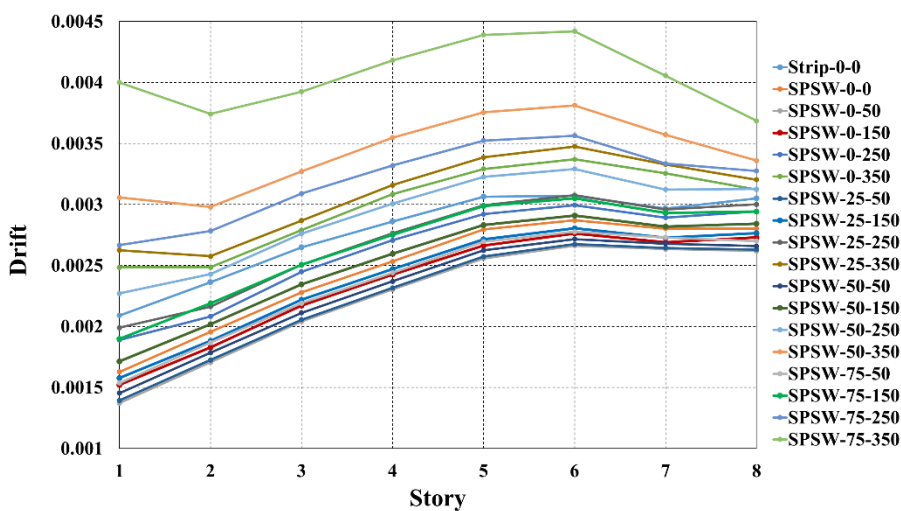


(ب) بازشوهای قائم روش غشائی ارتوتروپ

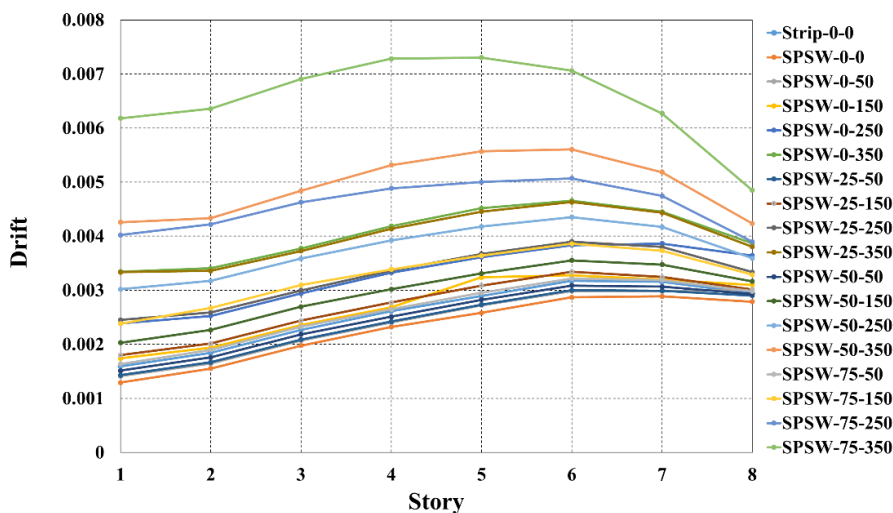
(الف) بازشوهای قائم روش نواری

شکل ۹: نسبت تنش مربوط به اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای سازه با دیوار برشی فولادی مدل شده.

به منظور بررسی اثر وجود بازشوهای نواری، سازه با مدل های دیوار برشی توصیف شده در بخش قبل (جدول های ۴ و ۵)، برای هر دو نوع سیستم باربر جانبی در نرم افزار ETABS تحلیل شده است. میزان جابه جایی جانبی نسبی طبقات در مدل های مختلف را می توان در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده نمود که برای دیوارهای برشی با بازشوی قائم و افقی و متناظر با اتصالات مفصلی و گیردار است. همچنین، در جدول پیوست، به عنوان نمونه، برخی از مقادیر مربوط به نسبت تنش خمشی، برشی، محوری و ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون محل اتصال دو محور C و ۱، برای مدل های مختلف سازه و دیوار برشی با بازشوهای قائم و افقی تحت بار لرزه ای ارائه شده است.

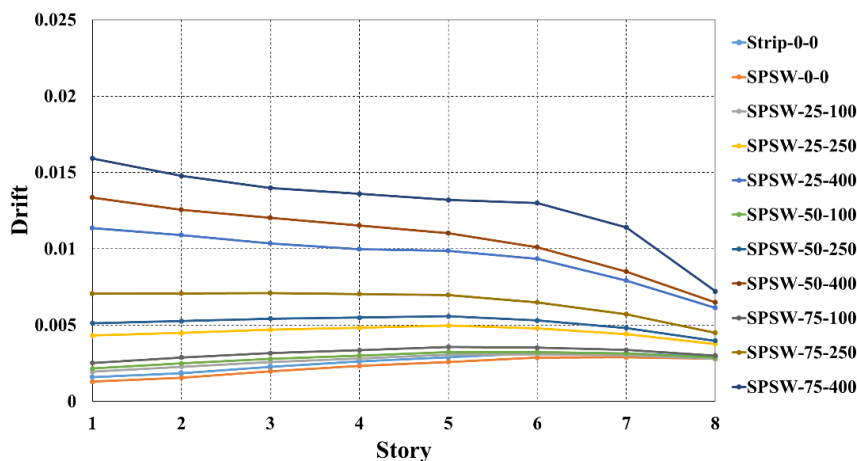


(الف) اتصال گیردار

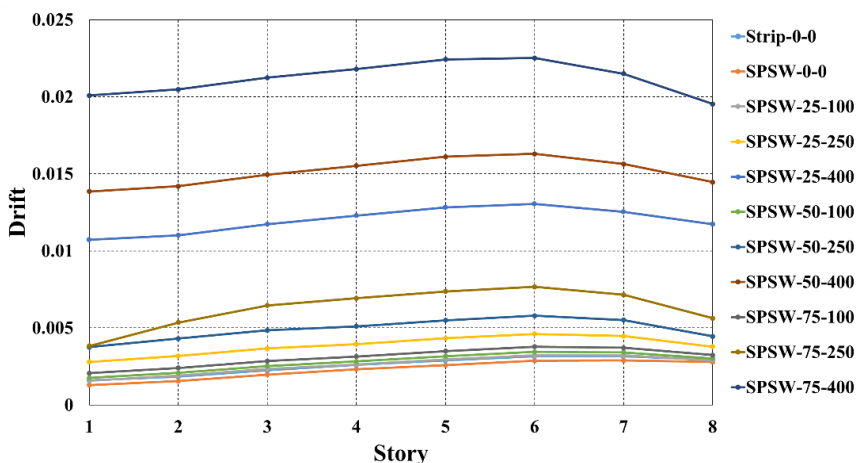


(ب) اتصال مفصلی

شکل ۱۰: مقایسه میزان جابه جایی جانبی نسبی در طبقات مختلف برای بازشوهای قائم با فرض: (الف) اتصال گیردار و (ب) اتصال مفصلی.



(الف) اتصال گیردار

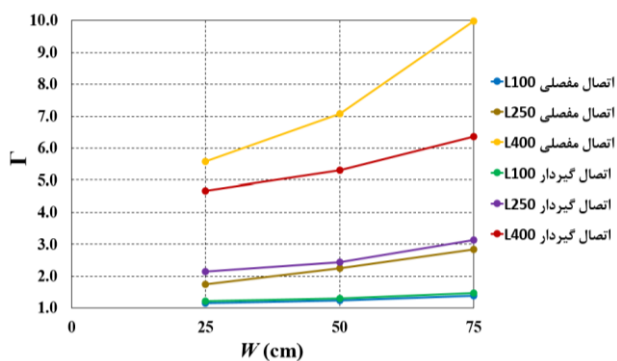


(ب) اتصال مفصلی

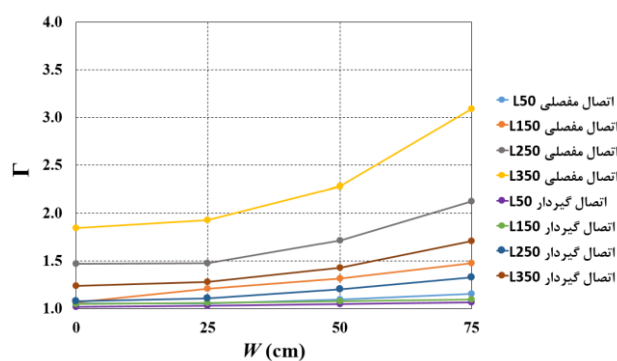
شکل ۱۱: مقایسه میزان جابه جایی جانبی نسبی در طبقات مختلف برای بازشوهای افقی با فرض: (الف) اتصال گیردار و (ب) اتصال مفصلی.

خلاصه اطلاعات کمی ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ را می‌توان در قالب موارد زیر مطرح نمود:

- با کاهش میزان اتصال دیوار به ستون‌ها، در نتیجه افزایش ابعاد بازشو، از زاویه میدان کششی کاسته می‌شود. این امر سبب افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش حاصل از اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در تیرها می‌شود.
 - با کاهش میزان اتصال دیوار به تیرها، در نتیجه افزایش ابعاد بازشو، زاویه میدان کششی افزایش و با افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش حاصل از اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها، عملکرد دیوار برشی تضعیف می‌شود. به-طور کلی، در سازه‌های با سیستم دوگانه، این امر سبب افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش حاصل از اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در تیرها می‌شود، اما تأثیر محسوس بر تنش‌های متناظر در تیرهای با اتصالات مفصلی نخواهد داشت.
 - کاهش اتصال دیوار برشی به ستون سبب کاهش انتقال نیروی ناشی از عملکرد میدان کششی دیوار به ستون می‌شود. در نتیجه از میزان برش در ستون‌ها کاسته می‌شود.
 - افزایش طول و یا عرض بازشو در دیوار برشی سبب کاهش مساحت مؤثر دیوار و میزان اتصال دیوار به ستون‌ها یا تیرها و در نتیجه تضعیف سیستم باربر جانبی می‌شود. بنابراین، در هر دو مدل، میزان جابه‌جایی جانبی نسبی طبقات افزایش می‌یابد.
 - با تضعیف سیستم باربر جانبی در اثر وجود بازشوه‌های قائم، تغییرات در تنش حاصل از نیروی محوری، لنگر و اندرکنش این دو نیرو، در ستون‌ها، در دو مدل روند متفاوتی دارد. در سازه با سیستم دوگانه، تضعیف دیوار برشی فولادی سبب تحمیل نیروی بیشتری به قاب خمشی و به دنبال آن افزایش تنش‌های مذکور در ستون‌ها می‌شود. با این حال، در مدل با اتصال مفصلی تیر به ستون، سیستم تیر و ستون نقشی در تحمل نیروهای جانبی ندارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که در این حالت تفاوت این تنش‌ها در ستون محسوس نمی‌باشد.
 - در حالی که اتصالات تیرها گیردار باشد، استفاده از بازشوه‌های نواری قائم و افقی منجر به افزایش مقاطع تیرها و ستون‌ها می‌گردد. لذا، استفاده از بازشوه‌های نواری در کناره‌های دیوار برشی با طول زیاد توصیه نمی‌شود.
 - در حالی که اتصالات تیرها مفصلی باشد، استفاده از بازشوی نواری قائم در کناره‌های دیوار برشی می‌تواند منجر به کاهش مقطع ستون‌ها و افزایش مقطع تیرها شود. همچنین، در این حالت، تعبیه بازشوه‌های نواری افقی در کناره‌های دیوار برشی می‌تواند به کاهش مقطع تیرها و افزایش مقطع ستون‌ها منجر شود.
- در ادامه، به منظور مقایسه بهتر چگونگی اثرگذاری نسبت ابعادی بازشوها، برای بازشوه‌های قائم و افقی در دو حالت گیرداری و مفصلی، تغییرات عرض بازشو به ازای طول ثابت آن ارزیابی می‌شود. مبنای این مقایسه بر اساس نسبت بی‌بعد شده جابه‌جایی جانبی نسبی طبقات در حالت با بازشو به حالت بدون بازشو (دیوار کامل) به عنوان مرجع بوده که با پارامتر Γ تعریف شده است. شکل ۱۲ (الف) و (ب) چگونگی تغییرات ضریب Γ را با ابعاد عرض بازشو نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای ترسیمی در شکل ۱۲ (الف)، در حالت بازشوی قائم سرتاسری در شرایط اتصال گیردار، با افزایش عرض بازشو از ۰ تا ۷۵ سانتی‌متر، در مقایسه با دیوار بدون بازشو به ترتیب نشانگر ۲۴، ۲۸، ۴۳ و ۷۱ درصد افزایش می‌باشد. برای اتصال مفصلی این اعداد به ترتیب ۸۵، ۹۳، ۱۲۸، و ۲۰۹ درصد افزایش می‌باشند. لذا در شرایط مفصلی در قیاس با شرایط گیرداری ضریب Γ حساسیت بیشتری به عرض بازشو داشته و با افزایش عرض بازشو تغییرات آن شدت می‌یابد.
- در حالت بازشوی سرتاسری افقی و مطابق شکل ۱۲ (ب)، ضریب Γ برای شرایط تکیه‌گاه گیرداری به ترتیب ۴۶۷، ۵۳۱، و ۶۳۶ بوده و در صورت وجود شرایط مفصلی در سازه، مقدار این ضریب به ترتیب ۵۷۵۸، ۷۰۸، و ۹۹۸ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت بازشوی افقی سازه سختی کمتری نسبت به بازشوی قائم داشته و به تبع آن، جابه‌جایی‌های جانبی بیشتری را تجربه می‌کند که اثر آن در مقادیر محاسباتی ضریب Γ نمایان است.



(ب) بازشوی افقی



(الف) بازشوی قائم

شکل ۱۲: تغییرات پارامتر Γ با افزایش عرض بازشو در دو حالت گیرداری و مفصلی.

همچنین، خلاصه این نتایج به صورت کیفی در جدول های ۸ و ۹ ارائه شده است:

جدول ۸: خلاصه اطلاعات ارائه شده برای دیوارهای برشی با بازشوی قائم.

جایه جایی - جایی نسبی	تیر			ستون				متغیر ابعادی بازشو	نوع اتصال
	V Major Ratio	M Major Ratio	PMM Ratio	V Major Ratio	M Major Ratio	P Ratio	PMM Ratio		
●	●	●	●	■	○	○	○	افزایش طول بازشو	اتصال گیردار
●	●	○	○	■	●	◆	●	افزایش عرض بازشو	
●	●	●	●	■	□	○	◆	افزایش طول بازشو	اتصال مفصلی
●	●	●	●	■	◆	◆	◆	افزایش عرض بازشو	

راهنما: نمادها بشرح زیر تعریف می شوند: (۱) افزایش می یابد (●)، (۲) روند کلی افزایشی است (○)، (۳) کاهش می یابد (■)، (۴) روند کلی کاهشی است (□) و (۵) تفاوت محسوسی نمی کند (◆).

جدول ۹: خلاصه اطلاعات ارائه شده برای دیوارهای برشی با بازشوی افقی.

جایه جایی - جایی نسبی	تیر			ستون				متغیر ابعادی بازشو	نوع اتصال
	V Major Ratio	M Major Ratio	PMM Ratio	V Major Ratio	M Major Ratio	P Ratio	PMM Ratio		
●	■	●	●	●	●	◆	●	افزایش طول بازشو	اتصال گیردار
●	●	●	●	◆	●	◆	●	افزایش عرض بازشو	
●	■	◆	■	●	●	◆	●	افزایش طول بازشو	اتصال مفصلی
●	◆	◆	◆	●	●	◆	●	افزایش عرض بازشو	

بنا بر آنچه گفته شد، ایجاد بازشوهای قائم در دیوار برشی فولادی می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش نیروی برشی وارده به ستون‌ها باشد. هرچند در صورت اتصال مفصلی بین تیر و ستون، تضعیف سیستم باربر جانبی سازه بر اثر ایجاد بازشو تأثیر چندانی بر سایر نیروهای وارده به ستون نخواهد داشت. در سیستم دوگانه این امر می‌تواند سبب افزایش تنش‌ها در ستون به جز تنش برشی شود. بنابراین، برای کاهش ابعاد ستون‌ها به‌طور ایمن، بهتر است ضعف سیستم باربر جانبی با افزایش ضخامت دیوار برشی جبران شود. در هر حال، ایجاد بازشو سبب بالا رفتن نیروهای وارده بر تیرها و افزایش سطح مقطع آن‌ها خواهد شد. ایجاد بازشوهای افقی نیز به دلیل محدودیت‌های معماری و عبور سیستم‌های تأسیسات امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با ایجاد بازشوهای افقی و جدا نمودن بخشی از اتصال دیوار برشی به تیر، زاویه میدان کششی افزایش می‌یابد و عملکرد میدان کششی تضعیف می‌گردد. از این رو، به‌طور کلی شاهد افزایش تنش‌ها به خصوص در ستون‌ها خواهیم بود.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی رفتار ساختمان‌های چند طبقه دارای بازشوهای نواری در دیوارهای برشی فولادی و اثرات لرزه‌ای آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. گرچه این بازشوها می‌توانند برای کاهش تنش‌های میدان کششی ایجاد گردند، اما به دلایل دیگری از جمله عبور تأسیسات و تأمین روشنایی در معماری نیز می‌توان از آن‌ها بهره جست. در این مطالعه، با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی ۲۵ دیوار برشی فولادی با بازشوهای نواری قائم و افقی با نسبت ابعادی مختلف می‌توان نتایج را بر تأثیر بازشوهای مختلف در دیوار برشی فولادی را بر اساس پارامترهای نسبت تنش مقاومت خمشی، نیروی محوری، نیروی برشی و PMM (نسبت تنش برای ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی) در تیرها، ستون‌ها و میزان تغییرمکان نسبی بشرح ذیل مطرح نمود:

- ۱) به طور کلی، ایجاد بازشوهای افقی و قائم موجب اخلاص در میدان‌های کششی و به تبع آن، عملکرد دیوار برشی خواهد شد. ایجاد بازشوهای افقی تأثیر مخرب‌تری بر روی ستون‌ها و از طرفی ایجاد بازشوهای قائم اثر مخرب‌تری بر روی تیرها خواهد داشت.
- ۲) با توجه به اینکه بازشوهای قائم تعبیه‌شده در سمت راست و چپ دیوار برشی فولادی ایجاد شده‌اند و در تماس با المان‌های قائم (ستون‌ها) هستند، بنابراین در میدان کششی حاصله تأثیر متناهی بر ستون‌ها داشته و باعث کاهش میزان نیروی وارده از میدان کششی به المان‌های قائم می‌شوند. این تأثیر در افزایش مقادیر نسبت تنش برای لنگر خمشی، نسبت تنش برای نیروی برشی و نسبت تنش برای ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در تیرها مشاهده می‌گردد که این موضوع هم در اتصالات گیردار و هم در اتصالات مفصلی به‌خوبی قابل رؤیت است.
- ۳) در صورت تعبیه بازشوهای افقی و جدا کردن اتصال دیوار برشی از تیرها، به دلیل افزایش زاویه میدان کششی در دیوار شاهد افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش حاصل از اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها خواهیم بود.
- ۴) با افزایش مساحت بازشوها، میزان مساحت ورق در دیوار برشی فولادی و میزان اتصال آن‌ها به المان‌های قائم کاهش می‌یابد و در پی آن سیستم باربری تضعیف می‌گردد. در نتیجه، میزان تغییرمکان نسبی جانبی در هر دو حالت با اتصالات گیردار و مفصلی افزایش می‌یابد.
- ۵) در اتصالات گیرداری که سیستم باربر جانبی به‌صورت ترکیبی از دیوار برشی فولادی و قاب خمشی فولادی است، در صورت افزایش مساحت بازشوهای قائم و افقی و در نتیجه آن، کاهش مساحت ورق دیوار برشی فولادی، میزان مشارکت دیوار برشی فولادی کاهش و بنابراین مشارکت قاب خمشی افزایش می‌یابد. این موضوع منجر به افزایش مقادیر نسبت تنش برای لنگر خمشی، نیروی محوری و ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها و تیرها می‌شود.
- ۶) با توجه به اینکه در اتصالات مفصلی سیستم باربر جانبی تنها به صورت دیوار برشی فولادی است، در صورت ایجاد بازشوهای قائم و جدا نمودن بخشی از اتصال دیوار با ستون و با افزایش مساحت بازشوها و در نتیجه آن کاهش مساحت ورق دیوار برشی فولادی، میزان مشارکت دیوار برشی فولادی کاهش می‌یابد و با توجه به عدم مشارکت قاب خمشی، مقادیر نسبت تنش برای لنگر

خمشی، نسبت تنش برای نیروی محوری و نسبت تنش برای ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها تغییر محسوسی نمی‌کند و تنها تغییر مکان نسبی افزایش می‌یابد.

(۷) در سازه با اتصالات مفصلی، در صورت ایجاد بازو افقی و جدا کردن بخشی از اتصال دیوار با تیر، تنش‌های بیشتری از میدان دیوار به ستون‌ها منتقل خواهد شد. لذا، شاهد افزایش نسبت تنش برای لنگر خمشی، نسبت تنش برای نیروی برشی و نسبت تنش برای ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها خواهیم بود.

(۸) در مدل با اتصالات گیردار و مفصلی، در صورت تعبیه بازوهای قائم و جدا کردن بخشی از اتصال دیوار با ستون، تنش‌های برشی ستون‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در صورت تأمین بازوهای افقی و جدا نمودن بخشی از اتصال تیر با ستون، تنش‌های برشی در ستون افزایش می‌یابد. لذا در صورت افزایش تنش‌های برشی در ستون‌ها، می‌توان با تعبیه بازوهای قائم آن‌ها را کاهش داد.

(۹) با تعریف پارامتر بی بعد I ، تأثیر ابعاد بازوها در چارچوب نسبت جابه‌جایی جانبی نسبی دیوارهای با بازو به مقدار نظیر آن برای دیوار بدون بازو تعیین گردید که بر اساس آن برای بازوهای قائم و در حالت‌های گیرداری و مفصلی این نسبت به ترتیب در بازه ۱/۰۲ تا ۱/۷۱ و ۱/۰۵ تا ۳/۰۹ و برای بازوهای افقی مقادیر فوق به ترتیب ۱/۲۲ تا ۶/۳۶ و ۱/۱۵ تا ۹/۹۸ می‌باشد. بیشینه این ضرایب متأثر از ایجاد بازوهای سرتاسری است.

(۱۰) بر اساس نتایج این مطالعه، استفاده از بازو با مساحت کمتر از ۰/۲۵ مترمربع منجر به کاهش عملکرد لرزه‌ای سازه نمی‌گردد و می‌توان عملکرد مطلوبی را در برابر بارهای جانبی حتی با وجود این بازوها از سازه انتظار داشت.

مراجع

- [1] Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. J. L., and Elwi, A. E. (1998), Cyclic test of four-story steel plate shear wall, *Journal of Structural Engineering*, 124(2), pp. 112–120.
- [2] Alinia, M. M. and Dastfan, M. (2006), Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members, *Journal of Construction Steel Research*, 62(7), pp. 730–738.
- [3] Purba, R. and Bruneau, M. (2015), "Seismic performance of steel plate shear walls considering two different design philosophies of infill plates. II: Assessment of collapse potential, *Journal of Structural Engineering*, 141(6), p. 4014161.
- [4] Gholhaki, M., Karimi, M., and Pachideh, G. (2019), Investigation of Subpanel Size Effect on Behavior Factor of Stiffened Steel Plate Shear Wall, *Journal of Structural and Constructional Engineering (JSCE)*, 5(Special Issue 4), pp. 73–87.
- [5] Gholhaki, M. and Pachideh, G. (2015), Investigating of damage indexes results due to presence of shear wall in building with various stories and spans, *International Journal of Review in Life Sciences*, 5(1), pp. 992–997.
- [6] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O., and Ghazvini, S. (2019), Specification of Response modification factor for Steel Plate Shear Wall by Incremental Dynamic Analysis Method [IDA], *Journal of Structural and Constructional Engineering (JSCE)*, 6(Special Issue 2), pp. 211–224.
- [7] Emami, F., Mofid, M., and Vafai, A. (2013), Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls, *Engineering Structures*, 48, pp. 750–762.
- [8] Emami, F. and Mofid, M. (2014), On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), pp. 94–104.
- [9] Elgaaly, M. (1998), Thin steel plate shear walls behavior and analysis, *Thin-Walled Structures*, 32(1–3), pp. 151–180.
- [10] Astaneh-Asl, A. (2001), *Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls*, Structural Steel Educational Council Moraga, CA.
- [11] Sabelli, R. and Bruneau, M. (2007), *Steel plate shear walls (AISC design guide)*, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Ill.
- [12] Park, H.-G., Kwack, J.-H., Jeon, S.-W., Kim, W.-K., and Choi, I.-R. (2007), Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading, *Journal of Structural Engineering*, 133(3), pp. 378–388.
- [13] Ghosh, S. and Kharmale, S. B. (2010), Research on steel plate shear wall: past, present and future, *Structural steel and castings: shapes and standards, properties and applications*. Nova Science Publishers Inc., Hauppauge, USA.

- [14] Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S. R. A. (2012), Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners, *Journal of Construction Steel Research*, 75, pp. 152–159.
- [15] Behbahanifard, M. R., Grondin, G. Y., and Elwi, A.-E. A. (2003), *Experimental and Numerical Investigation of Steel Plate Shear Walls*, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [16] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T., and Takagi, M. (1973), Experimental study on thin steel shear walls and particular bracings under alternative horizontal load, *Preliminary Report, IABSE, Symp. On Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal*, pp. 185–191.
- [17] Roberts, T. M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992), Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels”, *Thin-Walled Structures*, 14(2), pp. 139–151.
- [18] Vian, D. and Bruneau, M. (2006), TESTING OF SPECIAL LYS STEEL PLATE SHEAR WALLS, *4th International Conference on Earthquake Engineering Taipei, Taiwan*.
- [19] D. Vian, M. Bruneau, R. Purba, Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. II: Analysis and design recommendations, *J. Struct. Eng.* 135 (2009) 221–228.
- [20] Paik, J. K. (2007), Ultimate strength of perforated steel plates under edge shear loading, *Thin-Walled Structures*, 45(3), pp. 301–306.
- [21] Pellegrino, C., Maiorana, E., and Modena, C. (2009), Linear and non-linear behaviour of steel plates with circular and rectangular holes under shear loading, *Thin-Walled Structures*, 47(6–7), pp. 607–616.
- [22] Hosseinzadeh, S. A. A. and Tehranizadeh, M. (2012), Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls, *Journal of Construction Steel Research*, 77, pp. 180–192.
- [23] Valizadeh, H., Sheidaii, M., and Showkati, H. (2012), Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls, *Journal of Construction Steel Research*, 70, pp. 308–316.
- [24] Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A., and Bradford, M. A. (2012), Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening, *Journal of Construction Steel Research*, 79, pp. 91–100.
- [25] Alavi, E. and Nateghi, F. (2013), Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation, *Journal of Construction Steel Research*, 89, pp. 9–20.
- [26] Bhowmick, A. K. (2014), Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations, *Thin-Walled Structures*, 75, pp. 30–42.
- [27] Sabouri-Ghomi, S. and Mamazizi, S. (2015), Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings, *Thin-Walled Structures*, 86, pp. 56–66.
- [28] Khalilzadeh Vahidi, E. and Roshani, M. M. (2016), Prediction of load-carrying capacity in steel shear wall with opening using artificial neural network, *Journal of Engineering*, pp. 1–8.
- [29] Khan, N. A. and Srivastava, G. (2020), Models for strength and stiffness of steel plate shear walls with openings, *Structures*, pp. 2096–2113.
- [30] Nassernia, S. and Showkati, H. (2017), Experimental study of opening effects on mid-span steel plate shear walls, *Journal of Construction Steel Research*, 137, pp. 8–18.
- [31] Moradi, M. J., Roshani, M. M., Shabani, A., and Kioumars, M. (2020), Prediction of the load-bearing behavior of SPSW with rectangular opening by RBF network, *Applied Sciences*, 10(3), p. 1185.
- [32] Paslar, N., Farzampour, A., and Hatami, F. (2020), Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings, *Structures*, Elsevier, pp. 824–836.
- [33] Mu, Z. and Yang, Y. (2020), Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings, *Thin-Walled Structures*, 146, p. 106457.
- [34] Kordzangeneh, G., Showkati, H., Rezaeian, A., and Yekrangnia, M. (2021), Experimental cyclic performance of steel shear walls with single rectangular opening, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 30(2), p. e1821.
- [35] Darvishi, H. and Mofid, M. (2021), Structural performance assessment of large unstiffened openings in steel plate shear walls, *Engineering Structures*, 247, p. 112966.
- [36] Darvishi, H. and Mofid, M. (2021), Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls with perforated infill plates, *Scientia Iranica*, 28(6), pp. 3092–3111.
- [37] Ghobadi, F. and Ghaffarzadeh, H. (2023), Finite element model evolution of perforated steel plate shear walls under cyclic loading, *Structures*, pp. 286–298.
- [38] Farzampour, A., Laman, J. A., and Mofid, M. (2015), Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings, *Journal of Construction Steel Research*, 114, pp. 258–268.

- [39] AISC 341-22 (2022), *Seismic provisions for structural steel buildings*.
- [40] *Iraninan Code of Practice for Earthquake Resistant Design of Buildings (Standard 2800)* (2005).
- [41] Thorburn, L. J., Kulak, G. L., and Montgomery, C. J. (1983), Analysis of steel plate shear walls, *Structural Engineering Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, Report No.107*.
- [42] Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K.-C., and Lin, Y.-C. (2009), Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. I: Experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 135(3), pp. 211–220.
- [43] Applied Technology Council (ATC), (2002), *Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures*.

پیوست

داده‌های متناظر با نسبت تنش خمشی، برشی، محوری و ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون محل اتصال دو محور C و ۱، تحت بارگذاری لرزه‌ای وارده و برای دو حالت (الف) بازشوهای قائم، و (ب) بازشوهای افقی به عنوان نمونه آورده شده است.

(الف) بازشوهای قائم

Sample	اتصال گیردار						اتصال مفصلی						شماره طبقه		
	ستون			تیر			ستون			تیر					
	PMM Ratio	P Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio	P Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio		M Major Ratio	V Major Ratio
SPSW-۱-۱۰۰	-۰/۷۱	-۰/۴۷	-۰/۲۴	-۰/۱۶	-۰/۰۹	-۰/۰۹	-۰/۱۸	۱/۱۸	-۰/۹۶	-۰/۲۳	-۰/۲۹	-۰/۳۴	-۰/۳۳	-۰/۲۹	طبقه ۸
	-۰/۷۸	-۰/۷۳	-۰/۰۴	-۰/۱۴	-۰/۳۹	-۰/۳۷	-۰/۱۹	۱/۱۵	-۰/۵۴	-۰/۶۱	-۰/۱۸	۱/۶۰	۱/۵۳	۲/۴۵	طبقه ۷
	-۰/۸۷	-۰/۷۲	-۰/۱۵	-۰/۲۰	-۰/۵۳	-۰/۵۰	-۰/۲۷	۱/۰۰	-۰/۶۵	-۰/۳۵	-۰/۳۰	-۰/۵۰	-۰/۴۸	-۰/۸۸	طبقه ۶
	-۰/۷۶	-۰/۶۶	-۰/۱۰	-۰/۲۲	-۰/۶۲	-۰/۵۸	-۰/۳۱	-۰/۷۷	-۰/۷۱	-۰/۰۶	-۰/۲۰	-۰/۱۸	-۰/۱۸	-۰/۱۵	طبقه ۵
	-۰/۸۰	-۰/۷۵	-۰/۰۵	-۰/۲۳	-۰/۶۹	-۰/۶۵	-۰/۳۴	-۰/۸۴	-۰/۷۶	-۰/۰۸	-۰/۲۳	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۱۸	طبقه ۴
	-۰/۸۴	-۰/۷۹	-۰/۰۵	-۰/۲۳	-۰/۷۳	-۰/۶۹	-۰/۳۶	-۰/۸۴	-۰/۸۰	-۰/۰۴	-۰/۲۱	-۰/۲۶	-۰/۲۵	-۰/۱۶	طبقه ۳
	-۰/۸۷	-۰/۸۲	-۰/۰۵	-۰/۲۴	-۰/۷۶	-۰/۷۲	-۰/۳۸	-۰/۹۴	-۰/۸۸	-۰/۰۵	-۰/۱۸	-۰/۲۹	-۰/۲۸	-۰/۱۸	طبقه ۲
	-۰/۹۲	-۰/۹۰	-۰/۰۲	-۰/۱۷	-۰/۸۶	-۰/۸۱	-۰/۴۴	-۰/۸۹	-۰/۸۷	-۰/۰۲	-۰/۱۲	-۰/۲۹	-۰/۲۹	-۰/۱۶	طبقه ۱
SPSW-۲-۱۰۰	-۰/۸۳	-۰/۵۴	-۰/۳۰	-۰/۱۰	-۰/۱۰	-۰/۱۰	-۰/۲۴	-۰/۶۷	-۰/۶۳	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۲۴	طبقه ۸
	-۰/۹۰	-۰/۷۴	-۰/۱۶	-۰/۰۹	-۰/۶۶	-۰/۴۳	-۰/۲۹	-۰/۶۰	-۰/۵۶	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۲۸	-۰/۲۷	-۰/۳۷	طبقه ۷
	-۰/۹۶	-۰/۷۸	-۰/۱۹	-۰/۱۲	-۰/۶۲	-۰/۵۸	-۰/۲۰	-۰/۷۷	-۰/۷۳	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۳۴	-۰/۳۲	-۰/۴۶	طبقه ۶
	-۰/۸۶	-۰/۷۰	-۰/۱۶	-۰/۱۴	-۰/۷۴	-۰/۷۰	-۰/۲۷	-۰/۷۲	-۰/۶۸	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۳۷	-۰/۳۶	-۰/۵۵	طبقه ۵
	-۰/۸۸	-۰/۷۵	-۰/۱۴	-۰/۱۴	-۰/۸۲	-۰/۷۷	-۰/۵۴	-۰/۷۷	-۰/۷۴	-۰/۰۴	-۰/۰۷	-۰/۲۶	-۰/۳۵	-۰/۵۹	طبقه ۴
	-۰/۹۲	-۰/۷۹	-۰/۱۳	-۰/۱۴	-۰/۸۶	-۰/۸۱	-۰/۵۷	-۰/۸۲	-۰/۷۷	-۰/۰۵	-۰/۰۷	-۰/۵۲	-۰/۵۱	-۰/۶۵	طبقه ۳
	-۰/۹۴	-۰/۸۳	-۰/۱۱	-۰/۱۵	-۰/۹۲	-۰/۸۶	-۰/۶۲	-۰/۸۷	-۰/۸۶	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۵۹	-۰/۵۷	-۰/۷۵	طبقه ۲
	-۰/۹۷	-۰/۹۰	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۸	-۰/۰۲	-۰/۲۲	-۰/۸۹	-۰/۸۹	-۰/۰۱	-۰/۰۶	-۰/۶۲	-۰/۶۲	-۰/۷۲	طبقه ۱
SPSW-۳-۱۰۰	-۰/۶۸	-۰/۴۵	-۰/۲۳	-۰/۱۶	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۱۶	-۰/۸۵	-۰/۶۲	-۰/۲۳	-۰/۱۳	-۰/۱۶	-۰/۱۵	-۰/۲۲	طبقه ۸
	-۰/۷۹	-۰/۷۲	-۰/۰۷	-۰/۱۷	-۰/۳۱	-۰/۲۹	-۰/۱۵	-۰/۷۰	-۰/۵۷	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۰/۱۴	-۰/۱۴	-۰/۱۷	طبقه ۷
	-۰/۸۵	-۰/۶۹	-۰/۱۶	-۰/۲۵	-۰/۴۱	-۰/۳۸	-۰/۲۱	-۰/۸۲	-۰/۷۳	-۰/۰۹	-۰/۱۷	-۰/۱۷	-۰/۱۶	-۰/۱۹	طبقه ۶
	-۰/۷۵	-۰/۶۳	-۰/۱۲	-۰/۲۹	-۰/۴۶	-۰/۴۳	-۰/۲۴	-۰/۷۴	-۰/۶۷	-۰/۰۷	-۰/۱۹	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۲۳	طبقه ۵
	-۰/۷۹	-۰/۷۳	-۰/۰۶	-۰/۲۹	-۰/۵۰	-۰/۴۶	-۰/۲۷	-۰/۷۹	-۰/۷۳	-۰/۰۶	-۰/۲۲	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۲۴	طبقه ۴
	-۰/۸۳	-۰/۷۷	-۰/۰۶	-۰/۳۱	-۰/۵۲	-۰/۴۸	-۰/۲۹	-۰/۸۱	-۰/۷۶	-۰/۰۵	-۰/۲۱	-۰/۲۵	-۰/۲۴	-۰/۲۶	طبقه ۳
	-۰/۸۶	-۰/۸۱	-۰/۰۵	-۰/۳۱	-۰/۵۴	-۰/۵۰	-۰/۳۰	-۰/۸۹	-۰/۸۵	-۰/۰۴	-۰/۱۵	-۰/۲۶	-۰/۲۵	-۰/۲۸	طبقه ۲
	-۰/۹۴	-۰/۸۸	-۰/۰۶	-۰/۲۴	-۰/۶۱	-۰/۵۶	-۰/۳۴	-۰/۹۰	-۰/۸۶	-۰/۰۴	-۰/۱۴	-۰/۲۹	-۰/۲۸	-۰/۳۰	طبقه ۱
SPSW-۴-۱۰۰	۱/۰۱	-۰/۵۲	-۰/۴۹	-۰/۱۴	-۰/۱۷	-۰/۱۷	-۰/۳۱	-۰/۷۰	-۰/۶۰	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۴۱	-۰/۴۰	-۰/۴۴	طبقه ۸
	۱/۰۹	-۰/۷۳	-۰/۳۵	-۰/۱۳	-۰/۸۸	-۰/۸۶	-۰/۴۳	-۰/۶۶	-۰/۵۶	-۰/۱۰	-۰/۰۲	-۰/۶۸	-۰/۶۷	-۰/۴۹	طبقه ۷
	۱/۱۳	-۰/۸۰	-۰/۳۳	-۰/۱۵	۱/۱۳	۱/۱۱	-۰/۵۵	-۰/۸۱	-۰/۷۳	-۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۸۶	-۰/۸۵	-۰/۶۳	طبقه ۶
	-۰/۹۹	-۰/۷۲	-۰/۲۷	-۰/۱۷	۱/۲۹	۱/۲۶	-۰/۶۲	-۰/۷۳	-۰/۶۸	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۹۸	-۰/۹۶	-۰/۷۳	طبقه ۵
	۱/۰۰	-۰/۷۷	-۰/۲۳	-۰/۱۷	۱/۴۱	۱/۳۷	-۰/۶۹	-۰/۸۰	-۰/۷۴	-۰/۰۵	-۰/۰۴	۱/۰۰	-۰/۹۹	-۰/۸۲	طبقه ۴
	۱/۰۲	-۰/۸۱	-۰/۲۱	-۰/۱۷	۱/۴۹	۱/۴۶	-۰/۷۵	-۰/۸۶	-۰/۷۷	-۰/۰۸	-۰/۰۵	۱/۵۳	۱/۵۱	-۰/۸۹	طبقه ۳
	۱/۰۲	-۰/۸۵	-۰/۱۷	-۰/۱۸	۱/۶۴	۱/۶۰	-۰/۸۴	-۰/۹۱	-۰/۸۶	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۱/۷۰	۱/۶۷	-۰/۹۸	طبقه ۲
	۱/۱۰	-۰/۹۳	-۰/۱۷	-۰/۰۸	۱/۷۸	۱/۷۴	-۰/۹۴	-۰/۹۰	-۰/۸۸	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۱/۸۶	۱/۸۳	۱/۰۴	طبقه ۱

(ب) بازشوهای افقی

Sample	اتصال گیردار						اتصال مفصلی						شماره طبقه		
	ستون			تیر			ستون			تیر					
	PMM Ratio	P Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio	P Ratio	M Major Ratio	V Major Ratio	PMM Ratio		M Major Ratio	V Major Ratio
SPSW-۲۰-۲۰-۱۰۰	-۰/۷۹	-۰/۳۸	-۰/۴۰	-۰/۳۸	-۰/۱۴	-۰/۱۴	-۰/۰۸	۱/۰۶	-۰/۵۲	-۰/۵۳	-۰/۲۳	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۹	طبقه ۸
	-۰/۹۳	-۰/۶۷	-۰/۲۷	-۰/۴۲	-۰/۵۴	-۰/۵۳	-۰/۱۲	-۰/۸۰	-۰/۵۰	-۰/۳۰	-۰/۳۵	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۷	طبقه ۷
	-۰/۹۹	-۰/۷۲	-۰/۲۶	-۰/۶۲	-۰/۶۷	-۰/۶۵	-۰/۱۵	-۰/۹۱	-۰/۶۶	-۰/۲۵	-۰/۴۷	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۸	طبقه ۶
	-۰/۸۵	-۰/۵۹	-۰/۲۶	-۰/۷۳	-۰/۷۷	-۰/۷۶	-۰/۱۷	-۰/۸۲	-۰/۶۲	-۰/۲۰	-۰/۵۷	-۰/۱۰	-۰/۰۹	-۰/۱۰	طبقه ۵
	-۰/۸۹	-۰/۷۱	-۰/۱۸	-۰/۷۷	-۰/۸۴	-۰/۸۲	-۰/۱۹	-۰/۸۷	-۰/۶۸	-۰/۱۹	-۰/۶۷	-۰/۱۰	-۰/۰۹	-۰/۱۱	طبقه ۴
	-۰/۸۹	-۰/۷۶	-۰/۱۴	-۰/۸۳	-۰/۸۷	-۰/۸۵	-۰/۲۰	-۰/۸۳	-۰/۷۲	-۰/۱۱	-۰/۶۳	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۱۱	طبقه ۳
	-۰/۹۷	-۰/۸۰	-۰/۱۸	-۰/۸۴	-۰/۹۱	-۰/۸۹	-۰/۲۱	-۰/۹۲	-۰/۸۰	-۰/۱۳	-۰/۴۳	-۰/۱۵	-۰/۱۳	-۰/۱۳	طبقه ۲
	۱/۰۱	-۰/۸۶	-۰/۱۶	-۰/۷۱	-۰/۹۸	-۰/۹۶	-۰/۲۲	-۰/۹۰	-۰/۸۱	-۰/۱۰	-۰/۵۳	-۰/۱۵	-۰/۱۴	-۰/۱۲	طبقه ۱
SPSW-۲۰-۱۰-۱۰۰	-۰/۶۳	-۰/۴۰	-۰/۲۳	-۰/۲۶	-۰/۱۰	-۰/۰۹	-۰/۱۰	-۰/۹۵	-۰/۵۸	-۰/۳۸	-۰/۲۳	-۰/۱۱	-۰/۱۱	-۰/۱۷	طبقه ۸
	-۰/۸۳	-۰/۶۹	-۰/۱۳	-۰/۲۶	-۰/۳۷	-۰/۳۴	-۰/۱۴	-۰/۷۵	-۰/۵۴	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۰۹	-۰/۰۹	-۰/۱۴	طبقه ۷
	-۰/۸۸	-۰/۷۵	-۰/۱۳	-۰/۳۷	-۰/۴۳	-۰/۴۱	-۰/۱۷	-۰/۸۶	-۰/۷۰	-۰/۱۶	-۰/۲۴	-۰/۰۹	-۰/۰۹	-۰/۱۵	طبقه ۶
	-۰/۷۶	-۰/۶۷	-۰/۰۸	-۰/۴۴	-۰/۵۰	-۰/۴۷	-۰/۲۰	-۰/۷۷	-۰/۶۵	-۰/۱۲	-۰/۲۸	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۱۹	طبقه ۵
	-۰/۸۱	-۰/۷۳	-۰/۰۸	-۰/۴۵	-۰/۵۳	-۰/۵۰	-۰/۲۲	-۰/۸۲	-۰/۷۱	-۰/۱۱	-۰/۳۰	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۲۱	طبقه ۴
	-۰/۸۲	-۰/۷۷	-۰/۰۵	-۰/۴۸	-۰/۵۵	-۰/۵۱	-۰/۲۳	-۰/۸۱	-۰/۷۵	-۰/۰۷	-۰/۲۸	-۰/۱۲	-۰/۱۰	-۰/۲۳	طبقه ۳
	-۰/۸۷	-۰/۸۰	-۰/۰۷	-۰/۴۸	-۰/۵۷	-۰/۵۳	-۰/۲۴	-۰/۹۰	-۰/۸۳	-۰/۰۷	-۰/۲۲	-۰/۱۴	-۰/۱۲	-۰/۲۴	طبقه ۲
	-۰/۹۶	-۰/۸۷	-۰/۰۹	-۰/۳۹	-۰/۶۲	-۰/۵۷	-۰/۲۷	-۰/۹۲	-۰/۸۴	-۰/۰۸	-۰/۲۰	-۰/۱۴	-۰/۱۲	-۰/۲۷	طبقه ۱
SPSW-۲۰-۱۰-۱۰۰	۱/۲۰	-۰/۳۹	-۰/۸۱	-۰/۴۵	-۰/۲۳	-۰/۲۳	-۰/۱۱	۲/۰۸	-۰/۴۹	۱/۵۸	-۰/۷۷	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۵	طبقه ۸
	۱/۱۹	-۰/۵۸	-۰/۶۱	-۰/۵۶	۱/۱۱	۱/۱۱	-۰/۱۹	۱/۴۸	-۰/۴۸	۱/۰۰	۱/۰۳	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۶	طبقه ۷
	۱/۳۹	-۰/۶۴	-۰/۷۵	-۰/۸۶	۱/۵۰	۱/۴۹	-۰/۲۵	۱/۵۵	-۰/۶۴	-۰/۹۱	۱/۳۵	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۷	طبقه ۶
	۱/۲۰	-۰/۵۹	-۰/۶۰	۱/۰۵	۱/۸۳	۱/۸۳	-۰/۳۱	۱/۳۸	-۰/۶۱	-۰/۷۷	۱/۶۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	طبقه ۵
	۱/۱۷	-۰/۶۵	-۰/۵۲	۱/۱۶	۲/۰۸	۲/۰۸	-۰/۳۵	۱/۳۶	-۰/۶۸	-۰/۶۹	۱/۹۹	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	طبقه ۴
	۱/۱۹	-۰/۷۰	-۰/۴۹	۱/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	-۰/۳۸	۱/۲۲	-۰/۷۲	-۰/۵۰	۱/۸۶	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۰۸	طبقه ۳
	۱/۱۹	-۰/۷۵	-۰/۴۴	۱/۳۴	۲/۴۵	۲/۴۵	-۰/۴۲	۱/۳۷	-۰/۸۱	-۰/۵۶	۱/۳۴	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۰۸	طبقه ۲
	۱/۲۵	-۰/۸۳	-۰/۴۲	۱/۱۹	۲/۷۵	۲/۷۵	-۰/۴۶	۱/۲۲	-۰/۸۲	-۰/۴۰	۱/۶۷	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۰۹	طبقه ۱
SPSW-۲۰-۲۰-۲۰	-۰/۸۴	-۰/۳۸	-۰/۴۷	-۰/۴۳	-۰/۱۶	-۰/۱۶	-۰/۰۹	۱/۲۵	-۰/۵۷	-۰/۶۸	-۰/۴۷	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۸	طبقه ۸
	-۰/۸۸	-۰/۵۷	-۰/۳۱	-۰/۴۹	-۰/۷۱	-۰/۷۱	-۰/۱۲	-۰/۸۷	-۰/۵۳	-۰/۳۵	-۰/۳۹	-۰/۱۶	-۰/۱۵	-۰/۱۳	طبقه ۷
	۱/۰۰	-۰/۶۲	-۰/۳۸	-۰/۷۳	-۰/۹۳	-۰/۹۱	-۰/۱۶	-۰/۹۶	-۰/۶۸	-۰/۲۸	-۰/۵۱	-۰/۲۱	-۰/۱۹	-۰/۱۸	طبقه ۶
	-۰/۸۸	-۰/۵۸	-۰/۳۰	-۰/۸۶	۱/۱۱	۱/۰۹	-۰/۱۹	-۰/۸۵	-۰/۶۴	-۰/۲۲	-۰/۶۳	-۰/۲۶	-۰/۲۴	-۰/۲۳	طبقه ۵
	-۰/۸۷	-۰/۶۴	-۰/۲۳	-۰/۹۳	۱/۲۳	۱/۲۱	-۰/۲۲	-۰/۸۹	-۰/۷۰	-۰/۲۰	-۰/۷۴	-۰/۲۸	-۰/۲۵	-۰/۲۴	طبقه ۴
	-۰/۹۱	-۰/۶۹	-۰/۲۲	۱/۰۰	۱/۳۱	۱/۲۸	-۰/۲۳	-۰/۸۰	-۰/۷۱	-۰/۰۹	-۰/۶۹	-۰/۴۰	-۰/۳۶	-۰/۲۳	طبقه ۳
	-۰/۹۵	-۰/۸۰	-۰/۱۵	۱/۰۲	۱/۳۸	۱/۳۶	-۰/۲۵	-۰/۸۹	-۰/۷۶	-۰/۱۲	-۰/۴۴	-۰/۴۲	-۰/۳۸	-۰/۲۳	طبقه ۲
	-۰/۹۸	-۰/۸۶	-۰/۱۲	-۰/۸۶	۱/۵۰	۱/۴۷	-۰/۲۶	-۰/۹۶	-۰/۸۱	-۰/۱۶	-۰/۵۱	-۰/۳۴	-۰/۲۹	-۰/۱۸	طبقه ۱