

Effect of position, dimension and shape of opening with and without stiffener on seismic parameters of trapezoidally corrugated steel plate shear wall

Babak Behdarvandi Sheikhi¹, Fereshteh Emami^{2*}

1- MSc in structural Engineering, Department of Civil Engineering, science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 -Assistant professor, Department of Civil Engineering, science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

By development of science and technology, new structural systems have been developed and researched. In the last four decades, extensive studies have been done on the application of the steel plate shear wall systems. Steel plate shear walls are made and executed in various shapes. Trapezoidally corrugated steel plate shear wall is a relatively new structural system. In this paper, the effects of position, geometric shape, percentage, distance from the boundary elements and the use of the stiffener around the opening were investigated in the seismic parameters of the trapezoidally corrugated steel plate shear wall system including stiffness, strength, ductility and dissipation energy by using 46 models. The openings were geometrically square, vertical and horizontal rectangular, equal to 10, 14, and 18 percent area of the steel panel. This research was performed analytically using ABAQUS finite element software. The results of the study show that the square-shaped opening has better performance than the rectangular opening in all positions. Also, models with central opening have lower strength, initial stiffness and energy absorption rather than other models. Overall, the best position to create the opening in the corrugated plate is in the middle top of the plate and at the distance of 160 mm from the beam and also in the upper corner of the plate but without distance from the boundary elements. Another result of this research is that by using stiffener around the opening, initial stiffness and strength and energy absorption of the corrugated steel shear wall can increase until 41% and 25% and 24%, respectively. In addition among the different stiffeners, the plate with 60 mm width and 3 mm thickness has the best dimension for the stiffener around the opening.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 August 2020

Revise Date: 21 October 2020

Accept Date: 16 February 2021

Keywords:

Corrugated Steel Plate Shear wall

Opening

Stiffener

Stiffness

Strength

Ductility

Dissipation energy

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.242895.2212>

*Corresponding author: Fereshteh Emami

Email address: f-emami@srbiau.ac.ir

تأثیر موقعیت، اندازه و شکل هندسی بازشو بدون سخت کننده و با سخت کننده بر پارامترهای لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای

بابک بهداروندی شیخی^۱، فرشته امامی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

با ترویج و گسترش علم، سیستم‌های سازه‌ای نوین ابداع و مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته است. در چهار دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی کاربرد سیستم سازه‌ای دیوار برشی فولادی انجام شده است. دیوار برشی فولادی در اشکال مختلفی ساخته و اجرا می‌شود. دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای یک سیستم سازه‌ای نسبتاً جدید می‌باشد که در این مقاله با استفاده از ۴۶ مدل، به بررسی اثر موقعیت بازشو، شکل هندسی بازشو، درصد بازشو، فاصله بازشو از المان‌های مرزی و نیز استفاده از سخت کننده در اطراف بازشو بر پارامترهای لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای شامل سختی، مقاومت، شکل پذیری و جذب انرژی پرداخته شده است. بازشوها با شکل هندسی مربع و مستطیل قائم و افقی، و معادل با ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد مساحت سطح مقطع پانل فولادی در نظر گرفته شده است. این پژوهش به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس انجام شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بازشوی مربعی شکل در تمامی موقعیت‌ها نسبت به بازشوی مستطیلی شکل عملکرد بهتری دارد. همچنین نمونه‌های با بازشوی مرکزی دارای مقاومت، سختی اولیه و جذب انرژی کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر می‌باشد. در مجموع بهترین موقعیت برای ایجاد بازشو در ورق موجدار، در میانه بالایی ورق و به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از تیر و نیز در گوشه بالایی ورق اما بدون فاصله از المان‌های مرزی تیر و ستون می‌باشد. از دیگر نتایج این تحقیق آن بود که اضافه کردن سخت کننده در اطراف باز شو منجر به افزایش سختی اولیه تا ۴۱ درصد، مقاومت تا ۲۵ درصد و جذب انرژی تا ۲۴ درصد می‌شود. در ضمن از بین سخت کننده‌های متفاوت، ورق به عرض ۶۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر بهینه‌ترین ابعاد برای سخت کننده در اطراف بازشو است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی موجدار، بازشو، سخت کننده، سختی، مقاومت، شکل پذیری، جذب انرژی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.242895.2212	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/jsce.2021.242895.2212	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۳۹۹/۱۱/۲۸	۱۳۹۹/۱۱/۲۸	۱۳۹۹/۰۷/۳۰	۱۳۹۹/۰۵/۲۱	
فرشته امامی f-emami@srbiau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت بشر، طراحی و ساخت سازه‌های بلندمرتبه از اهمیت بالایی برخوردار است. ایده سیستم دیوار برشی فولادی از تیورق گرفته شده است که در آن، جان ورق بین دو بال آن محصور می‌باشد. در این سیستم سازه‌ای، ورق فولادی تحت اثر نیروی برشی کمانش می‌کند و در اثر آن میدان‌های کمانش قطری ایجاد می‌شود که در مقابل نیروی جانبی مقاومت می‌کند [۱]. مزیت اصلی دیوارهای برشی فولادی، شکل‌پذیری و همچنین مقاومت بالای آن‌ها می‌باشد که می‌توان با ایجاد تغییراتی در هندسه دیوارهای برشی فولادی نظیر موجدار کردن آن‌ها، می‌توان این مقاومت و شکل‌پذیری را افزایش داد [۲]. دیوارهای برشی فولادی در اشکال و مدل‌های مختلف بدون سخت‌کننده، با سخت‌کننده، مرکب و غیره مورد بررسی قرار گرفته است. یکی دیگر از نوآوری‌ها در زمینه سیستم‌های دیوار برشی فولادی به‌منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای آن، استفاده از ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای می‌باشد. یکی از عمده مشکلات دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، کمانش ورق فولادی به علت سختی ناچیز ورق در راستای عمود بر صفحه می‌باشد [۳]؛ که در نتیجه در هنگام حمل و اجرا با مشکلاتی همراه است. همچنین دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در هنگام بارگذاری، دچار کمانش برون صفحه‌ای می‌شود که در نتیجه منجر به بروز مشکلاتی در بهره‌برداری سازه می‌گردد. مزایای دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده نسبت به نمونه بدون سخت‌کننده زیاد است اما، در این سیستم به علت وجود سخت‌کننده‌های متعدد و جزئیات اجرایی زیاد، نیازمند دقت و صرف هزینه قابل توجه در فرآیند ساخت و جوشکاری آن است. لذا با توجه به نکات ارائه شده، در صورتی که بتوان کمانش ورق را بدون افزایش قابل‌ملاحظه هزینه‌ها مهار کرد، تا اندازه‌ای معایب مربوط به دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده قابل برطرف شدن است؛ که با توجه به این فرضیه دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای به‌عنوان یک راهکار مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

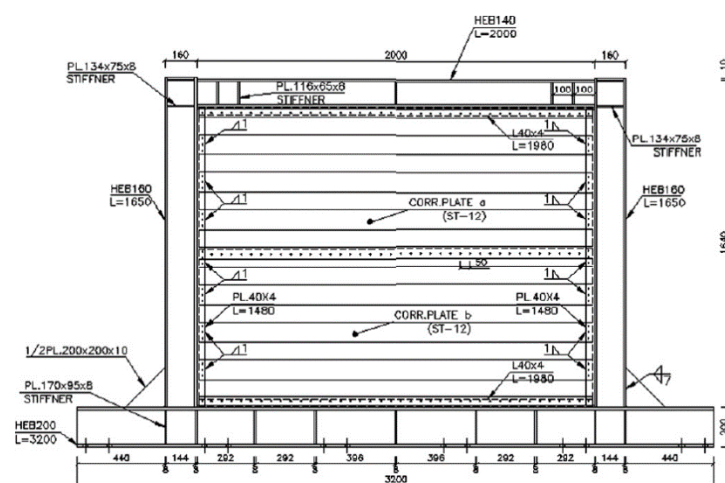
در سال ۲۰۱۳ امامی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای پرداختند. در این پژوهش آزمایشگاهی دو نمونه دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای افقی و قائم و همچنین به منظور مقایسه، یک دیوار برشی فولادی ساده مورد آزمایش قرار گرفت. در نمونه‌های موجدار، از ورق فولادی سرد نورد شده با زاویه موج ۳۰ درجه استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که ظرفیت برشی نمونه‌های دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مراحل ابتدایی بارگذاری بیشتر از نمونه دیوار برشی فولادی ساده است، اما در ادامه از مقدار برش پایه نمونه‌های موجدار نسبت به نمونه ساده کاسته شده است. مقاومت نهایی نمونه دیوار برشی فولادی ساده ۵۸۰ کیلو نیوتن است. در حالی که مقاومت نهایی نمونه‌های با موج افقی و قائم به ترتیب ۴۹۰ و ۵۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد. این نشان می‌دهد که مقاومت نهایی نمونه ساده تقریباً ۱۶ درصد از نمونه موجدار دوزنقه‌ای بیشتر شده است. اگرچه مقاومت نهایی نمونه با ورق ساده بیشتر از نمونه‌های موجدار دوزنقه‌ای می‌باشد اما ظرفیت جذب انرژی، نسبت شکل‌پذیری و سختی اولیه نمونه‌های موجدار به ترتیب ۵۲٪، ۴۰٪ و ۲۰٪ بیشتر از نمونه‌ی ساده می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در صورت طراحی و اجرای صحیح از سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالاتری نسبت به دیوار برشی فولادی معمولی برخوردار است [۵و۴]. در سال ۲۰۱۵ فرزام پور و همکاران به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با بازشو پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی پارامتریک و مقایسه عددی دیوار برشی فولادی ساده و موجدار دارای بازشو و بدون بازشو پرداختند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل ضخامت ورق، زاویه موج، اندازه بازشو و محل قرارگیری آن می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقاومت نهایی در حالت ورق ساده از مقاومت نهایی با ورق موجدار بیشتر می‌باشد. علاوه بر آن سختی و شکل‌پذیری نمونه‌های دارای ورق موجدار نسبت به ورق معمولی بیشتر است. در نمونه‌های دارای بازشو، سختی اولیه و شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی موجدار ۳۰ الی ۵۰ درصد بیشتر از دیوار برشی فولادی ساده است. ظرفیت جذب انرژی دیوار برشی فولادی موجدار به‌طور متوسط ۲۵ درصد بیشتر از دیوار برشی فولادی معمولی است [۶]. در سال ۲۰۱۷ حسین زاده و همکاران به بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه موج در دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با زوایای مختلف پرداختند. در این مطالعه آزمایشگاهی سه نمونه با زوایای موج ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه مورد تحلیل و

بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که جهت بررسی رفتار دوره‌ای نمونه‌ها، از بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتکل بارگذاری AC154 استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، مقاومت نهایی، سختی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار کاهش پیدا کرده است. به طوری که مقاومت نهایی در نمونه با زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به زاویه ۳۰ درجه به ترتیب ۲۲/۷ درصد و ۳۷ درصد کاهش پیدا کرده است و همچنین این مقدار کاهش برای سختی به ترتیب ۱۳ درصد و ۲۰ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش زاویه موج، بر پارامترهای لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای اثرات منفی می‌گذارد [۷]. در سال ۱۳۹۷ نوری و افتخار به بررسی عددی تأثیر شکل و محل بازشو بر رفتار دیوارهای برشی فولادی موجدار پرداختند. در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس، مطالعه‌ی گسترده‌ای پیرامون تأثیر شکل بازشو و محل قرارگیری آن در عملکرد دیوارهای برشی موجدار انجام شده است. در این پژوهش معیار مقایسه رفتار سازه‌های نمونه‌ها ضریب رفتار به دست آمده با استفاده از تحلیل بارافزون غیر خطی است. نتایج نشان دادند که وجود بازشو در گوشه‌های دیوار برشی فولادی موجدار باعث بالارفتن ضریب رفتار تا ۲/۷ خواهد شد و در این موقعیت شکل بازشو تأثیری بر مقدار ضریب رفتار ندارد. اما اگر موقعیت بازشو در مجاورت المان‌های مرزی قاب باشد، در حالت بازشوی دایره‌ای در مجاورت تیرها و در حالت بازشوی مربعی در مجاورت ستون‌ها، ضریب رفتار بیشتری ایجاد خواهد شد [۲]. در سال ۱۳۹۸ غلامی و وزیری به بررسی اثر اندرکنش دیوار و قاب در سیستم‌های دیوار برشی فولادی موجدار پرداختند. برای این منظور ۲۰ نمونه دیوار برشی فولادی با ورق موجدار، طراحی و سپس با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس تحلیل شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سختی اولیه این نوع از دیوار برشی‌ها بالا می‌باشد و مقاومت آن‌ها در دریافت حدود ۰/۱ درصد به بیشترین مقدار خود می‌رسد؛ اما پس از کماتش اندرکنشی در ورق، افت قابل توجهی در سختی و مقاومت دیوار برشی دیده می‌شود. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تا قبل از کماتش ورق، درصد بیشتری از نیروی برشی، توسط ورق تحمل می‌شود؛ اما پس از کماتش ورق، قاب درصد بیشتری از برش را تحمل می‌کند [۸]. در سال ۱۳۹۹ اسعدی و همکاران به بررسی لرزه‌ای چیدمان دیوار برشی فولادی موجدار با استفاده از منحنی‌های شکنندگی پرداختند. این پژوهش برای ساختمان‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه بررسی شد. در راستای دیوار برشی، تعداد ۵ دهانه موجود بوده که در چیدمان نوع اول، دیوارها در دهانه‌های ابتدا و انتها قرار داشته‌اند، در چیدمان نوع دوم دیوارها در دهانه‌های میانی و در چیدمان نوع سوم، در دو دهانه ابتدا و انتها به صورت شطرنجی مدل‌سازی شده‌اند. با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی فزاینده، منحنی‌های شکنندگی برای این قاب‌ها ارائه شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، در چیدمان‌های نوع دوم میانه شدت شتاب طیفی متناظر با سطوح خرابی، نسبت به دو نوع چیدمان دیگر در تمام سازه‌ها بیشتر بوده است. همچنین استفاده از دیوار برشی فولادی موجدار سرد نورد شده در سازه‌های کوتاه مرتبه تأثیر بیشتری در کاهش احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور داشته است [۹].

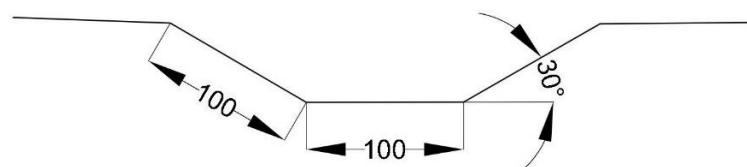
با توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای دارای بازشو، نیاز به تکمیل مطالعات پارامتریک در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق تأثیر اندازه، موقعیت، شکل هندسی بازشو و فاصله بازشو تا المان‌های مرزی و نیز وجود سخت‌کننده در اطراف بازشو مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای ارائه شده در تحقیق آزمایشگاهی امامی و همکاران [۵ و ۴] در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بارهای رفت و برگشتی، مدل اجزا محدود و رفتار آن راستی آزمایی گردید. سپس به بررسی اثر موقعیت، فاصله بازشو تا المان‌های مرزی، اندازه و شکل هندسی بازشو بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده و همچنین ابعاد (عرض و ضخامت) سخت‌کننده‌ها در اطراف بازشوها، بر پارامترهای لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای پرداخته شد. برای این منظور ۴۶ مدل در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شد و در نهایت با توجه به منحنی هیستریزس و منحنی ظرفیت مدل‌ها، پارامترهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

۲- صحت سنجی

برای صحت سنجی و اطمینان خاطر از نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود، یک نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار اجزا محدود آباکوس مدل سازی و تحلیل شد و در نهایت نتایج مدل اجزا محدود با نتایج نمونه آزمایشگاهی مقایسه شد. برای صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه توسط امامی و همکاران [۴] انتخاب شد. این نمونه آزمایشگاهی یک طبقه یک دهانه با مقیاس یک دوم ابعاد واقعی است که، فاصله آکس تا آکس ستون ها ۲۱۶۰ میلی متر و ارتفاع آن ۱۶۵۰ میلی متر می باشد. ستون ها از مقطع HEB160 و تیر بالایی از مقطع HEB140 ساخته شده است. ضخامت ورق فولادی ۱/۲۵ میلی متر با تنش تسلیم ۲۰۷ مگاپاسکال می باشد. جزئیات نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این نمونه آزمایشگاهی ورق فولادی با استفاده از ورق پشت بند به صورت هیبریدی به اعضای مرزی تیر و ستون متصل شده است. در این نمونه آزمایشگاهی زاویه موج برابر با ۳۰ درجه است و همچنین عرض ورق در هر قسمت موج مطابق با شکل ۲ برابر با ۱۰۰ میلی متر است.



شکل ۱: مشخصات هندسی و جزئیات نمونه آزمایشگاهی



شکل ۲: ابعاد و مشخصات هندسی ورق موجدار

۲-۱- نوع المان مورد استفاده جهت مدل سازی اجزا محدود

برای مدل سازی در نرم افزار آباکوس از المان پوسته‌ای^۱ S4R استفاده شده است. استفاده از المان پوسته‌ای را می توان برای نتایج مؤثر بکار گرفت. از آنجایی که با استفاده از المان پوسته‌ای نسبت به المان حجمی^۲ تعداد مش ها کاهش می یابد، می توان زمان محاسباتی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. المان حجمی المان استاندارد است که ضخامت اجزا در سرتاسر آن نمایان است اما المان پوسته‌ای در واقع یک مدل ساده سازی شده ریاضی از المان حجمی با شکل خاص است [۱۰].

1 Shell

2 Solid

۲-۲- معیار تسلیم

در این تحقیق برای بررسی وضعیت سازه از نقطه نظر تسلیم، از معیار تنش فون میسز^۳ استفاده شده است؛ که این معیار بر اساس تئوری تغییر شکل^۴ بیان می شود. در حالت کلی زمانی که سازه تحت اثر نیروی جانبی قرار می گیرد دارای دو نوع تغییر شکل حجمی و یا برشی است که علت اصلی تسلیم، تغییر شکل برشی است که به دلیل لغزش بین مولکولی اتفاق می افتد. برای ایجاد تغییر شکل در سازه نیاز به وارد کردن انرژی می باشد. بر مبنای تئوری تغییر شکل، اگر انرژی تغییر شکل موجود در واحد حجم سازه از انرژی تغییر شکل در آزمایش کشش ساده بیشتر باشد تسلیم رخ می دهد [۱۱]. به بیان دیگر تسلیم زمانی رخ می دهد که مقدار تنش فون میسز مطابق با رابطه ۱ از تنش تسلیم بدست آمده از آزمایش کشش ساده بیشتر شود. در این رابطه σ_v همان تنش فون میسز می باشد. در المان هایی که تحت اثر تنش های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند، تنش فون میسز مطابق با رابطه ۱ به دست می آید. [۱۲].

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (1)$$

که در این رابطه σ_{12} ، σ_{23} و σ_{31} تنش های برشی در صفحات می باشد.

۲-۳- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی مطابق جدول ۱ می باشد که با توجه به مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و با استفاده از روابط ارائه شده توسط رمبرگ و اسگود می توان رفتار مصالح در ناحیه غیرخطی را با تقریب مناسبی به دست آورد. روابط ارائه شده توسط رمبرگ و اسگود روشی متداول برای دستیابی به کرنش در ناحیه پلاستیک می باشد. با توجه به اینکه قانون هوک نمی تواند رفتار غیرخطی مصالح را به درستی تشخیص دهد و با توجه به اطلاعات جمع آوری شده در قرن ۱۹ و ۲۰ منجر به ارائه رابطه ۲ برای رفتار مصالح فولادی در ناحیه پلاستیک شد [۱۳].

جدول ۱: مشخصات مصالح نمونه آزمایشگاهی [۴]

نوع المان	مدول الاستیسیته	تنش تسلیم	تنش نهایی	ازدیاد طول	نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی
	Gpa	Mpa	Mpa	%	$\frac{F_y}{F_u}$
ورق فولادی	۲۱۰	۲۰۷	۲۹۰	۴۱	۰/۷۱
ستون	۲۱۰	۳۰۰	۴۴۳	۳۳	۰/۶۷
تیر	۲۱۰	۲۸۸	۴۵۶	۳۷	۰/۶۳

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \times \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (2)$$

که در این معادله σ تنش تسلیم، E مدول الاستیسیته و n از رابطه ۳ محاسبه می شود.

$$n = \frac{\ln(\varepsilon_{us} / 0.2)}{\ln(F_u / F_y)} \quad (3)$$

که در این رابطه ε_{us} کرنش گسیختگی، F_{tu} تنش گسیختگی و F_{ty} تنش تسلیم فولاد می باشد که کرنش گسیختگی از رابطه ۴ قابل محاسبه است.

³ von mises

⁴⁴ Distortion Energy Theory

$$\varepsilon_{us} = 100\left(\varepsilon_r - \frac{F_u}{E}\right) \quad (4)$$

که در این رابطه ε_r کرنش در لحظه انهدام می‌باشد. از آنجایی که در زمان استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل‌های غیرخطی به تنش کرنش واقعی فولاد نیاز است، تنش کرنش مهندسی مطابق روابط ۵ و ۶ به تنش کرنش واقعی تبدیل می‌شود [۱۴].

$$\varepsilon_{True} = \ln(1 + \varepsilon_{Engineering}) \quad (5)$$

$$\sigma_{True} = \sigma_{Engineering} (1 + \varepsilon_{Engineering}) \quad (6)$$

۲-۴- مونتاز و مشخصات حل‌گر

پس از معرفی المان‌ها و اختصاص مشخصات مصالح به آن‌ها، المان‌ها در کنار یکدیگر قرار گرفته و سپس برای اتصال به یکدیگر و شبیه‌سازی جوش، تمامی مدل باهم یکپارچه^۵ شده است. با توجه به این‌که میدان‌های کششی قطری در دیوار برشی فولادی پس از کمانش ورق فولادی تشکیل می‌شود، بایستی به درستی آن را شبیه‌سازی کرد. دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در حالت ایده آل دارای سختی اولیه و مقاومت بالایی است اما نواقص اولیه باعث کاهش این دو پارامتر می‌شود. در نتیجه برای انجام صحیح تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت رفت و برگشتی، باید قبل از تحلیل اصلی یک تحلیل کمانشی انجام شود و سپس با تغییر در ورودی مدل اصلی، تغییر شکل‌های ناشی از مدهای کمانشی را با اعمال ضرایبی به عنوان مدل هندسی اولیه تحلیل اصلی بکار رود. در واقع با این فرایند، نواقص اولیه‌ای که در نمونه آزمایشگاهی وجود داشت به مدل نرم‌افزاری معرفی می‌شود. سپس برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت رفت و برگشتی در نرم‌افزار آباکوس از حل‌گر استاندارد استفاده شد. با توجه به تحلیل هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی، در نرم‌افزار روش تحلیل ضمنی که یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل رفتار سیستم تحت بارگذاری‌های رفت و برگشتی می‌باشد، استفاده گشت که برای تحلیل دقیق هیستریزیس در تنظیمات حل‌گر از گزینه شبیه استاتیک استفاده شد [۱۵].

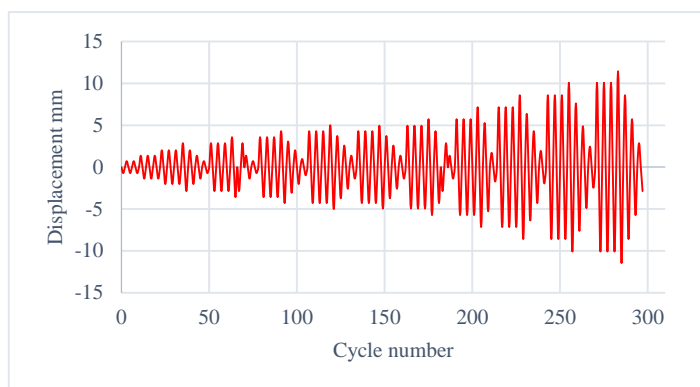
۲-۵- شرایط مرزی، بارگذاری و مش بندی

با توجه به شکل ۱، اتصال ستون و ورق فولادی به تیر صلب کف به صورت کاملاً گیردار است، لذا در مدل نرم‌افزاری درجات آزادی و دورانی در هر سه راستای اصلی مقید شده است. برای شبیه‌سازی مهار عمود بر صفحه در نمونه آزمایشگاهی به منظور رفتار دوبعدی قاب، تیر بالایی در نرم‌افزار در راستای عمود بر صفحه مقید شده است. جابجایی اعمالی بر مدل مطابق منحنی شکل ۳ می‌باشد. در این منحنی، محور افقی تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی و محور قائم میزان جابجایی را نشان می‌دهد. برای مش بندی از المان ۴ گرهی با اندازه ۷۰ میلی‌متر استفاده شده است. اندازه مش یکی از اثرگذارترین موارد در همگرایی نتایج می‌باشد. لذا استفاده و انتخاب اندازه نهایی مش بندی نیاز به تکرار دارد.

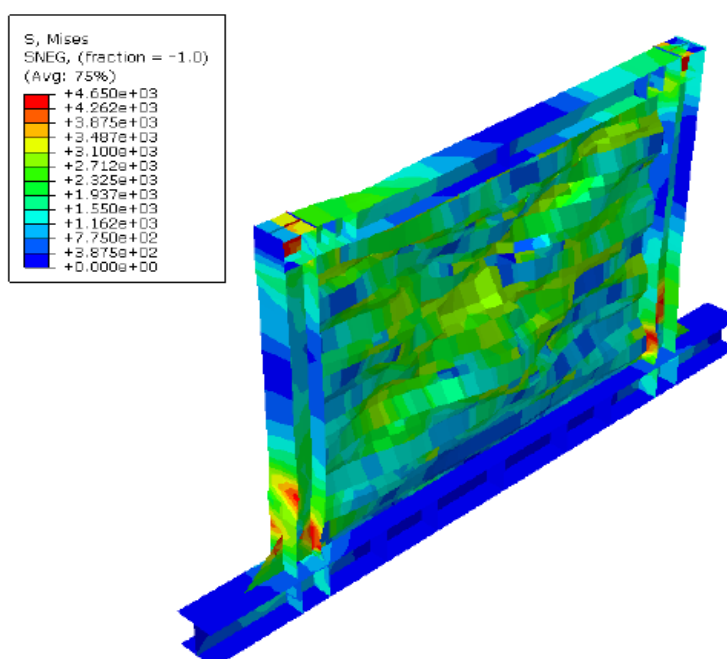
۲-۶- مقایسه نتایج

شکل ۴ توزیع تنش‌ها در انتهای تحلیل را نشان می‌دهد و همچنین مقایسه منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی با مدل اجزا محدود در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی هیستریزیس مدل اجزا محدود از همگرایی خوبی نسبت به منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی برخوردار است که این نشان از روش صحیح مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس دارد. اختلاف مقدار ماکزیمم نیرو در حالت اجزا محدود ۲/۱٪ نسبت به نمونه آزمایشگاهی است.

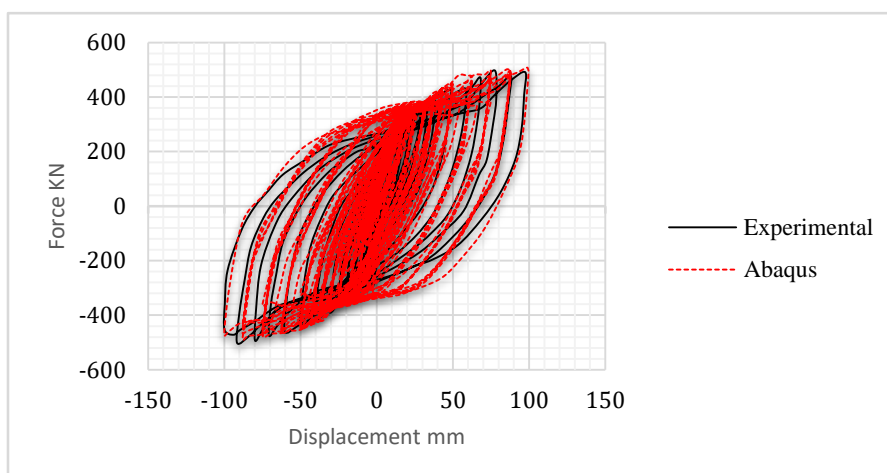
⁵ Merge



شکل ۳: بار رفت و برگشتی اعمالی به مدل



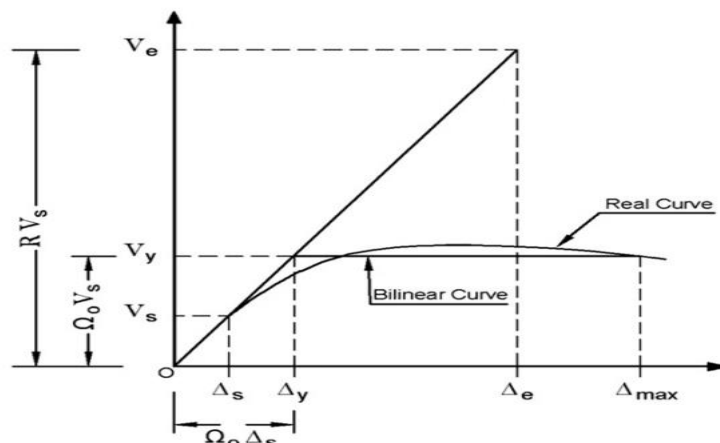
شکل ۴: توزیع تنش در مدل صحت سنجی شده در نرم افزار آباکوس



شکل ۵: مقایسه منحنی هیستریزس مدل اجزا محدود با نمونه آزمایشگاهی امامی و همکاران [۴]

۳- پارامترهای لرزه‌ای

پارامترهای لرزه‌ای در واقع شامل عواملی هستند که یا انرژی ورودی زلزله را جذب کرده و یا نیروی برشی وارد شده به ساختمان را کاهش می‌دهند. این پارامترها شامل سختی، مقاومت، ضریب شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و مهم‌ترین آن‌ها ضریب رفتار است. آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله با تکیه بر شکل‌پذیری سازه‌ها، نیروهای اعمال شده به وسیله‌ی زلزله بر سازه را با ضریب رفتار کاهش می‌دهند. این کاهش نیرو برگرفته از منحنی ظرفیت سازه و شکل ایده آل شده (دوخطی شده) آن مطابق روش یوانگ است. منحنی پاسخ واقعی و دو خطی یوانگ در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل محور قائم، برش پایه و محور افقی، تغییر مکان تراز بام می‌باشد. در این شکل V_y ، بار جاری شدگی در نقطه تسلیم مؤثر است و Δ_y تغییر مکان متناظر این بار است. V_s متناظر برش پایه ای است که اولین عنصر به مرحله پلاستیک می‌رسد و از این مرحله به بعد به طور قابل توجهی از مرحله الاستیک خارج شده و تحلیل خطی برقرار نمی‌باشد. این تراز نیرو معمولاً در آیین‌نامه‌هایی کاربرد دارد که از روش‌های بار نهایی استفاده می‌کنند. برخی آیین‌نامه‌هایی که در طراحی از روش تنش مجاز استفاده می‌کنند، بار V_W را به کار می‌برند. تغییر مکان متناظر بارهای V_s و V_W به ترتیب Δ_s و Δ_W نامیده می‌شوند. حداکثر تغییر مکان سازه Δ_{max} نامیده می‌شود [۱۷].



شکل ۶: منحنی ساده‌شده نیرو-تغییر مکان سازه

۳-۱- ضریب رفتار

برای طراحی اقتصادی سازه، در آیین‌نامه‌ها ضریبی به نام ضریب رفتار وجود دارد که با اعمال آن به نیروی زلزله، مقدار زلزله کاهش یافته که باعث طراحی بهینه می‌شود. در واقع ضریب رفتار از ظرفیت پلاستیک سازه که در طراحی استاتیکی در نظر گرفته نمی‌شود بهره می‌برد و با اعمال ضریب رفتار، رفتار سازه در حالت پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. یوانگ در سال ۱۹۹۱ با استفاده از نمودار منحنی ظرفیت سازه، رابطه γ را جهت محاسبه ضریب رفتار در طراحی به روش حدی معرفی کرد [۱۷].

$$R = R_{\mu} \Omega \quad (7)$$

که در این رابطه R_{μ} ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری و Ω ضریب اضافه مقاومت است.

۳-۲- ضریب اضافه مقاومت

زمانی که یکی از اعضای سازه به حد تسلیم برسد و در آن مفصل پلاستیک تشکیل شود، مقاومت سازه از دیدگاه طراحی در حالت بهره‌برداری به پایان می‌رسد؛ اما پدیده فوق به‌عنوان انهدام سازه و پایان مقاومت در سازه به حساب نمی‌آید؛ زیرا عضو موردنظر

همچنان می‌تواند با تغییر شکل غیر ارتجاعی، انرژی ورودی را جذب کند تا به مرحله گسیختگی و انهدام برسد. ضریب اضافه مقاومت از نسبت نیروی ماکزیمم به نیرو در اولین تسلیم مطابق رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$\Omega = \frac{V_y}{V_s} \quad (8)$$

در این رابطه V_y نیرو در حالت نهایی و V_s نیرو در اولین تسلیم است.

۳-۳- ضریب شکل پذیری

سازه‌ها بر اثر وجود شکل‌پذیری، مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله را با رفتار هیستریزس مستهلک می‌کنند، که مقدار این استهلاک انرژی به مقدار شکل‌پذیری کلی سازه بستگی دارد. با ساده‌سازی منحنی نیرو-تغییر شکل، شکل‌پذیری کلی سازه مطابق رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (9)$$

که در این رابطه Δ_{max} تغییر مکان نهایی و Δ_y تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم است.

۳-۴- ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری

نیومارک و هال در سال ۱۹۸۲، رابطه‌ای را پیشنهاد کردند که با استفاده از آن می‌توان ضریب کاهش نیرو ناشی از شکل‌پذیری را برای سیستم‌های ارتجاعی-خمیری یک درجه آزاد، به صورت زیر محاسبه کرد؛ که برای زمان‌های تناوب کمتر از ۰/۳ ثانیه مطابق با رابطه ۱۰، برای زمان‌های تناوب بین ۰/۱۲ تا ۰/۵ ثانیه مطابق با رابطه ۱۱ و نیز برای زمان‌های تناوب بزرگ‌تر از ۰/۵ ثانیه مطابق با رابطه ۱۲ قابل محاسبه است [۱۸].

$$R_\mu = 1 \quad (10)$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad (11)$$

$$R_\mu = \mu \quad (12)$$

۳-۵- مقاومت، سختی و جذب انرژی

در منحنی ظرفیت، به میزان نیرو در حالت بیشینه مقاومت گفته می‌شود که مطابق با شکل ۶ با V_y نشان داده می‌شود. هر عضو سیستم باربر لرزه‌ای به میزان سختی خود نیروی زلزله را تحمل می‌کند به عبارتی میزان بار لرزه‌ای وارده به هر عضو بر مبنای میزان سختی آن عضو است. در منحنی نیرو-تغییر مکان، سختی برابر با شیب منحنی در ناحیه خطی است. همچنین میزان جذب انرژی سیستم به رفتار سازه در ناحیه غیر ارتجاعی وابسته است. به بیان دیگر برای تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه باید انرژی زلزله به آن وارد شود و هرچه مفاصل پلاستیک بیشتری تشکیل شود، نیروی زلزله بیشتر اتلاف می‌شود. در منحنی نیرو تغییر مکان، سطح زیر منحنی برابر با میزان اتلاف انرژی است. برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در هر مدل، سطح زیر منحنی در هر سیکل محاسبه شده و در نهایت با یکدیگر جمع می‌شود که مجموع آن برابر با انرژی اتلاف شده است.

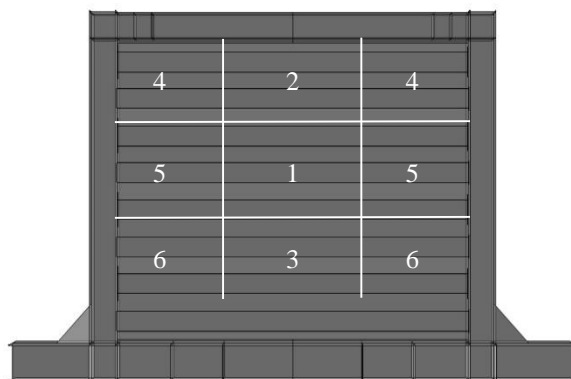
۴- معرفی مدل‌ها و متغیرها

به منظور بررسی عملکرد بازشو روی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در این مقاله ۴۶ مدل مورد بررسی قرار گرفته است که متغیرها بر روی مدل صحت سنجی اعمال شد. در ۱۸ مدل اول که در جدول ۲ نشان داده شده است، به بررسی موقعیت

و شکل هندسی بازشو پرداخته شده است. بازشوها به شکل مربع در ابعاد ۵۵۲ در ۵۵۲ میلی متر و نیز مستطیل افقی و مستطیل قائم در ابعاد ۳۹۰ در ۷۸۰ میلی متر می باشد که بیانگر ۱۰ درصد از مساحت کل ورق فولادی است. موقعیت بازشوها در شکل ۷ نشان داده شده است. فاصله لبه بازشو از اعضای مرزی تیر و ستون در این ۱۸ مدل، به اندازه ۱۶۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. برای رسیدن به نتایج مطلوب، در شش موقعیت هر سه مدل بازشو مدل سازی و تحلیل شد. در نهایت با بررسی ۱۸ مدل به موقعیت و شکل بهینه بازشو خواهیم رسید. در مدل های ۱۹ تا ۲۸ که در جدول ۳ نشان داده شده است، با توجه به پیدا کردن بهترین شکل هندسی در مرحله قبل، به بررسی اثر فاصله بازشو از لبه تیر و ستون در بازشوی مربعی شکل پرداخته شد. در هر موقعیت (به جز موقعیت ۱) یک بار فاصله ۱۶۰ میلی متری به ۶۰ میلی متر کاهش پیدا کرد و بار دیگر بازشو در لبه تیر و ستون ایجاد شد. در مدل های ۲۹ تا ۳۸ که در جدول ۴ نشان داده شده است، به بررسی اثر افزایش ابعاد بازشوی مربعی شکل به ۱۴ درصد با ابعاد ۶۵۳ میلی متر در ۶۵۳ میلی متر و ۱۸ درصد مساحت ورق فولادی با ابعاد ۷۴۰ در ۷۴۰ میلی متر و همچنین اثر سخت کننده در لبه بازشو در موقعیت ۲ و ۴ پرداخته شد. برای سخت کننده ها از ورق به عرض ۸۰ میلی متر و ضخامت ۲ میلی متر استفاده شد. در مدل های ۳۹ تا ۴۶ که در جدول ۵ آورده شده است، به بررسی اثر افزایش و کاهش عرض ورق سخت کننده به ۱۰۰ و ۶۰ میلی متر و نیز افزایش ضخامت ورق سخت کننده به ۳ و ۴ میلی متر در بازشوی مربعی شکل به اندازه ۱۸ درصد مساحت ورق فولادی در موقعیت ۲ پرداخته شد.

جدول ۲: بررسی اثر شکل هندسی و موقعیت بازشو

مدل	موقعیت	توضیحات	درصد بازشو
۱	۱	بازشو مربع	٪۱۰
۲		بازشو مستطیل قائم	
۳		بازشو مستطیل افقی	
۴	۲	بازشو مربع	
۵		بازشو مستطیل قائم	
۶		بازشو مستطیل افقی	
۷	۳	بازشو مربع	
۸		بازشو مستطیل قائم	
۹		بازشو مستطیل افقی	
۱۰	۴	بازشو مربع	
۱۱		بازشو مستطیل قائم	
۱۲		بازشو مستطیل افقی	
۱۳	۵	بازشو مربع	
۱۴		بازشو مستطیل قائم	
۱۵		بازشو مستطیل افقی	
۱۶	۶	بازشو مربع	
۱۷		بازشو مستطیل قائم	
۱۸		بازشو مستطیل افقی	



شکل ۷: موقعیت بازشوها در ورق فولادی

جدول ۳: بررسی اثر فاصله بازشو از لبه تیر و ستون

مدل	موقعیت	توضیحات	درصد بازشو
۱۹	۲	بازشو مربع بدون فاصله	٪۱۰
۲۰		بازشو مربع با فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه	
۲۱	۳	بازشو مربع بدون فاصله	
۲۲		بازشو مربع با فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه	
۲۳	۴	بازشو مربع بدون فاصله	
۲۴		بازشو مربع با فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه	
۲۵	۵	بازشو مربع بدون فاصله	
۲۶		بازشو مربع با فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه	
۲۷	۶	بازشو مربع بدون فاصله	
۲۸		بازشو مربع با فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه	

جدول ۴: بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در لبه بازشو

مدل	موقعیت	توضیحات	درصد بازشو
۲۹	۴	بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر	٪۱۰
۳۰		بازشو مربع	٪۱۴
۳۱		بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر	٪۱۸
۳۲		بازشو مربع	
۳۳	۲	بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر	٪۱۰
۳۴		بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر	٪۱۴
۳۵		بازشو مربع	
۳۶		بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر	
۳۷		بازشو مربع	٪۱۸
۳۸	بازشو مربع با سخت‌کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر		

جدول ۵: بررسی اثر ضخامت و عرض سخت کننده‌ها در لبه بازشو

مدل	موقعیت	توضیحات	درصد بازشو
۳۹	۲	بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۶۰ و ضخامت ۲ میلی متر	٪۱۸
۴۰		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۱۰۰ و ضخامت ۲ میلی متر	
۴۱		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۳ میلی متر	
۴۲		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۶۰ و ضخامت ۳ میلی متر	
۴۳		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۱۰۰ و ضخامت ۳ میلی متر	
۴۴		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۴ میلی متر	
۴۵		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۶۰ و ضخامت ۴ میلی متر	
۴۶		بازشو مربع با سخت کننده به عرض ۱۰۰ و ضخامت ۴ میلی متر	

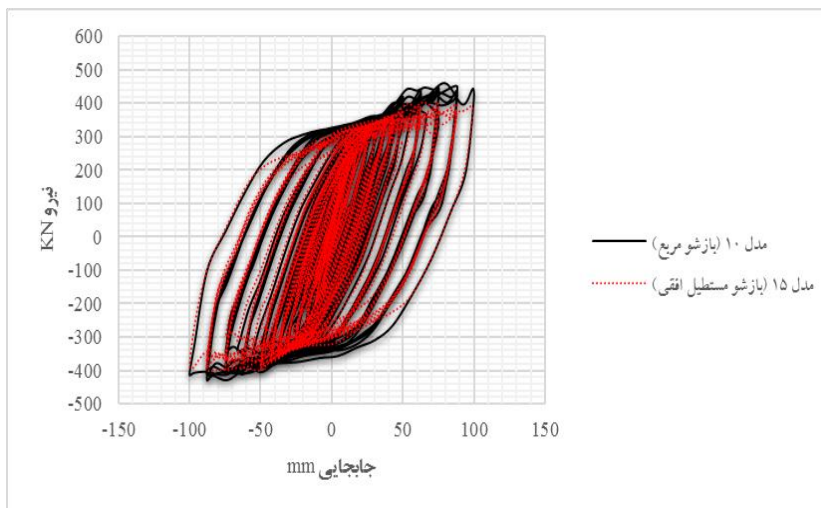
۵- مقایسه و تحلیل نتایج

به منظور دستیابی به موقعیت، شکل هندسی و درصد بهینه بازشو و همچنین بررسی فاصله بازشو تا المان های مرزی و اثر سخت-کننده‌ها در لبه بازشو تمامی مدل‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای که در مدل صحت سنجی استفاده شد، قرار گرفت. در ادامه بر اساس دسته‌بندی پیشین، به تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌ها پرداخته شده است.

۵-۱- اثر شکل هندسی و موقعیت بازشو بر عملکرد سیستم

همان طور که گفته شد مشخصات مدل‌های ۱ الی ۱۸ به منظور بررسی تاثیر شکل هندسی و موقعیت بازشو در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در موقعیت یک، مقاومت نهایی در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۴۰۸، ۴۰۳/۵ و ۴۰۸/۵ کیلو نیوتن است. بیشترین مقدار مربوط به مدل با بازشوی مستطیلی افقی است. در موقعیت دو، مقاومت نهایی در مدل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب برابر با ۴۱۵، ۴۰۴/۶ و ۴۱۲/۴ کیلو نیوتن می‌باشد که بیشترین مقدار مربوط به بازشوی مربع شکل است. در موقعیت سه، مقاومت نهایی در مدل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با ۴۴۹، ۴۱۷ و ۴۳۶ کیلو نیوتن است که مانند موقعیت قبل بیشترین مقدار مربوط به مدل دارای بازشوی مربعی است. نتایج منحنی هیستریزس در موقعیت چهار نشان می‌دهد که مقدار مقاومت نهایی در این موقعیت برای مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برابر با ۴۶۰، ۴۲۸/۵ و ۴۲۸/۸ کیلو نیوتن است. همچنین مقاومت نهایی مدل‌ها در موقعیت پنج برای مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برابر با ۴۲۵/۷، ۴۲۱/۵ و ۴۰۳ کیلو نیوتن است. در موقعیت شش مقاومت نهایی برای مدل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب برابر با ۴۴۳، ۴۲۶ و ۴۲۶ کیلو نیوتن است. با توجه به نتایج به دست آمده از مقاومت نهایی مدل‌ها مشاهده شد که بیشترین مقدار مربوط به مدل ۱۰ و کمترین مقدار مربوط به مدل ۱۵ است که ۱۴ درصد باهم اختلاف دارد و در شکل ۸ نشان داده شده است. در جدول ۶ تمامی پارامترهای لرزه‌ای مدل‌های ۱ الی ۱۸ با یکدیگر مقایسه شده است. با مقایسه سختی در مدل‌های مورد بررسی می‌توان دریافت که در تمامی موقعیت‌های بازشو مقدار سختی اولیه بازشوی مربعی از میانگین سختی اولیه دو مدل بازشوی مستطیلی افقی و مستطیل قائم بیشتر است که این اختلاف در موقعیت یک به مقدار ۴/۵٪ می‌باشد. در موقعیت دو این اختلاف ۹/۵٪ می‌باشد همچنین سختی اولیه ماکزیمم مربوط به موقعیت دو می‌باشد که مدل دارای بازشو مربعی شکل است (مدل ۴). میزان اختلاف سختی اولیه در موقعیت سه در حدود ۷٪ است و برای موقعیت‌های چهار، پنج و شش به ترتیب برابر با ۲٪، ۷٪ و ۶ درصد می‌باشد. همچنین کمترین مقدار سختی اولیه مربوط به مدل ۲ می‌باشد که در مقایسه با مدل ۴ در حدود ۳۰٪ اختلاف دارد. از مقایسه مقادیر انرژی جذب شده توسط مدل‌ها مشاهده می‌شود که همانند سختی اولیه، در مدل‌های دارای بازشوی مربعی نسبت به مدل‌های دارای بازشوی مستطیلی افقی و قائم مقدار انرژی اتلاف شده بیشتر است. درصد اختلاف انرژی اتلاف شده مدل با بازشو مربعی نسبت به میانگین مدل دارای بازشو مستطیلی افقی و مستطیل قائم در موقعیت یک ناچیز می‌باشد. در موقعیت دو و سه این اختلاف ۳٪ می‌باشد و در موقعیت چهار، پنج و شش به ترتیب ۴٪، ۲٪ و ۳/۵٪ می‌باشد. این نشان می‌دهد که شکل هندسی بازشو در وسط مدل تأثیری بر میزان جذب انرژی ندارد. بیشترین مقدار انرژی جذب شده مربوط

به مدل ۱۶ (بازشو مربعی شکل در موقعیت شش) و کمترین مقدار انرژی جذب شده مربوط به مدل ۵ (بازشو مستطیل قائم در موقعیت دو) است. همان طور که مشاهده می شود بازشو مربعی شکل بازهم از عملکرد بهتری برخوردار است.



شکل ۸: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل ۱۰ و ۱۵ (بیشترین و کمترین مقدار مقاومت نهایی)

۵-۲- اثر فاصله بازشو از لبه تیر و ستون

با توجه به عملکرد مطلوب بازشو مربعی در مرحله قبل، در این بخش به بررسی اثر فاصله بازشو مربعی شکل از لبه تیر و ستون پرداخته شد که مقایسه نتایج پارامترهای لرزه‌ای در جدول ۷ آورده شده است. در موقعیت دو، با حذف فاصله ۱۶۰ میلی‌متری مقاومت نهایی از عدد ۴۱۵ کیلو نیوتن به میزان ۴۵۲/۵ کیلو نیوتن افزایش پیدا کرده است و همچنین با کاهش فاصله به ۶۰ میلی‌متر مقاومت نهایی برابر با ۴۲۹/۲۴ کیلو نیوتن شده است. در موقعیت سه، مقدار مقاومت نهایی به حذف فاصله به اندازه ۴/۴ درصد افزایش پیدا کرده است. در موقعیت چهار این مقدار افزایش مقاومت نهایی با حذف فاصله بازشو از المان‌های مرزی به میزان ۳٪ افزایش پیدا کرده است. در موقعیت‌های پنج و شش به ترتیب این مقدار افزایش مقاومت نهایی برابر با ۳/۴ درصد و ۳/۵ درصد است. با بررسی مقدار مقاومت نهایی در هر سه حالت و در هر موقعیت می‌توان دریافت که بازشو چسبیده به المان‌های مرزی تیر و ستون دارای بیشترین مقاومت نهایی هستند. بیشترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل ۲۳ واقع در موقعیت چهار می‌باشد که برابر با ۴۷۴/۳۵ کیلو نیوتن است. این رویه در مورد سختی اولیه مدل-ها صادق نبوده است و بیشترین مقدار سختی اولیه مربوط به مدل ۲۰ می‌باشد که در موقعیت ۲ به فاصله ۶۰ میلی‌متر از لبه تیر قرار گرفته است و مقدار آن برابر با ۴۴/۲۳ کیلو نیوتن بر میلی‌متر است و همچنین کمترین میزان سختی اولیه مربوط به مدل ۲۶ می‌باشد که در موقعیت ۵ و به فاصله ۶۰ میلی‌متر از ستون قرار گرفته است و مقدار آن برابر با ۲۶/۹۲ کیلو نیوتن بر میلی‌متر است.

جدول ۶: مقایسه نتایج بررسی اثر موقعیت و شکل هندسی بازشو

نمونه	موقعیت	نوع بازشو	مقاومت نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	جذب انرژی (kN.mm) $\times 10^4$	اضافه مقاومت (Ω)	شکل پذیری (μ)	ضریب رفتار (R)
۱	۱	مربع	۴۰۸	۲۶/۶۲	۱۵۸/۵	۱/۵۴	۱۰/۹	۶/۵۵
۲		مستطیل قائم	۴۰۳/۵	۲۵/۳۵	۱۵۷/۷	۱/۳۶	۱۰/۰۵	۶/۴۴
۳		مستطیل افقی	۴۰۸/۵	۲۵/۶	۱۵۷	۱/۴۴	۹/۹۸	۶/۶۱
۴	۲	مربع	۴۱۵	۳۳	۱۵۸	۱/۴۴	۱۱/۲	۶/۹۶
۵		مستطیل قائم	۴۰۴/۶	۳۰/۵۸	۱۵۲/۶	۱/۳۷	۱۱/۷۵	۶/۹۵
۶		مستطیل افقی	۴۱۲/۴	۲۹/۷	۱۵۴/۲	۱/۴۱	۱۱/۴۵	۶/۹۷
۷	۳	مربع	۴۴۹	۳۰/۵	۱۷۰/۳	۱/۴۱	۱۱/۴۵	۶/۹۸
۸		مستطیل قائم	۴۱۷	۲۸/۳	۱۶۲/۸۶	۱/۴۳	۱۱/۲۵	۷/۰۳
۹		مستطیل افقی	۴۳۶	۲۸/۷	۱۶۶/۸۸	۱/۳۷	۱۱/۶۲	۶/۹۷
۱۰	۴	مربع	۴۶۰	۳۲/۶	۱۶۵/۷	۱/۴	۱۱/۵۱	۶/۹۶
۱۱		مستطیل قائم	۴۲۸/۵	۳۲/۳۴	۱۶۱/۷	۱/۴۱	۱۱/۳۷	۷
۱۲		مستطیل افقی	۴۲۸/۸	۳۱/۳۹	۱۵۷	۱/۴۲	۱۱/۳۶	۷
۱۳	۵	مربع	۴۲۵/۷	۳۰/۳۸	۱۶۳/۴	۱/۴۳	۱۱/۰۶	۶/۸۹
۱۴		مستطیل قائم	۴۲۱/۵	۲۷/۶	۱۶۲	۱/۳۸	۱۱/۲۹	۶/۹۴
۱۵		مستطیل افقی	۴۰۳	۲۹/۱۳	۱۵۸/۱۳	۱/۳۵	۱۱/۵۵	۷/۰۲
۱۶	۶	مربع	۴۴۳	۳۲/۲	۱۷۵/۴	۱/۳۹	۱۱/۵۴	۷/۰۵
۱۷		مستطیل قائم	۴۲۶	۳۱/۵	۱۷۰	۱/۴۳	۱۱/۴۶	۶/۹۸
۱۸		مستطیل افقی	۴۲۶	۲۹/۳	۱۶۸/۸	۱/۴۵	۱۱/۶۵	۷/۱۲

جدول ۷: مقایسه نتایج بررسی اثر فاصله بازشو از لبه تیر و ستون

مدل	موقعیت	درصد بازشو	مقاومت نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	جذب انرژی (kN.mm) $\times 10^4$	اضافه مقاومت (Ω)	شکل پذیری (μ)	ضریب رفتار (R)
۴	۲	٪۱۰	۴۱۵	۳۳	۱۵۸	۱/۴۴	۱۱/۲	۶/۹۶
۱۹			۴۵۲/۵	۳۲/۶	۱۶۲/۵۲	۱/۵۲	۹/۷۷	۷/۰۲
۲۰			۴۲۹/۲۴	۴۴/۲۳	۱۶۰/۸۳	۱/۳۷	۱۳/۸	۷/۴۸
۷	۳	٪۱۰	۴۴۹	۳۰/۵	۱۷۰/۳	۱/۴۱	۱۱/۴۵	۶/۹۸
۲۱			۴۶۸/۷۶	۴۳/۸۸	۱۷۸/۱۸	۱/۳۴	۱۲/۳۷	۷/۰۴
۲۲			۴۶۲	۲۷/۸	۱۷۴/۶۳	۱/۷۳	۸/۵۸	۷/۶۲
۱۰	۴	٪۱۰	۴۶۰	۳۲/۶	۱۶۵/۷	۱/۴	۱۱/۵۱	۶/۹۶
۲۳			۴۷۴/۳۵	۴۳/۸۸	۱۶۹/۵	۲/۷	۱۳/۳۷	۱۵/۰۳
۲۴			۴۶۵/۷۲	۳۲/۳	۱۶۶/۱۵	۲/۵۲	۹/۸	۱۱/۸
۱۳	۵	٪۱۰	۴۲۵/۷	۳۰/۳۸	۱۶۳/۴	۱/۴۳	۱۱/۰۶	۶/۸۹
۲۵			۴۴۰/۴	۲۸/۲۸	۱۶۹/۰۷	۲/۴۵	۸/۴۸	۱۰/۵۱
۲۶			۴۴۲/۸۷	۲۶/۹۲	۱۶۶/۹۵	۱/۵۵	۵/۴	۵/۱۴
۱۶	۶	٪۱۰	۴۴۳	۳۲/۲	۱۷۵/۴	۱/۳۹	۱۱/۵۴	۷/۰۵
۲۷			۴۵۸/۶۶	۴۳/۲۷	۱۸۳/۰۶	۱/۲۹	۱۲/۴	۶/۷
۲۸			۴۵۷/۲	۴۰/۲۵	۱۸۲/۶۶	۱/۴۲	۱۱/۳۷	۷

در موقعیت چهار و شش با توجه به اینکه بازشو در نزدیکی اتصال تیر به ستون قرار گرفته است، با حذف فاصله لبه بازشو از المان‌های مرزی سختی به میزان ۳۴ درصد افزایش پیدا کرده است. در مورد میزان انرژی جذب شده توسط سیستم، با حذف فاصله بازشو از المان‌های مرزی مقدار آن افزایش پیدا کرده است که بیشترین مقدار جذب انرژی در مدل ۲۷ واقع در موقعیت ۶ رخ داده است. کمترین میزان جذب انرژی مربوط به مدل ۴ می‌باشد که در فاصله ۱۶۰ میلی‌متری از المان‌های مرزی واقع شده است. مقدار اختلاف آن‌ها ۱۵/۸ درصد می‌باشد. بیشترین مقدار ضریب اضافه مقاومت مربوط به مدل ۲۳ و کمترین آن مربوط به مدل ۲۷ می‌باشد که به میزان ۱/۱ برابر افزایش پیدا کرده است. در موقعیت دو و پنج یعنی جایی که بازشو در نزدیکی تیر و یا ستون قرار دارد، با کاهش فاصله لبه بازشو از تیر و یا ستون، شکل پذیری کاهش پیدا کرده است اما در موقعیت‌های گوشه یعنی موقعیت ۴ و ۶ با حذف فاصله، شکل پذیری به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار شکل پذیری مربوط به مدل ۲۳ و کمترین مقدار مربوط به مدل ۲۶ می‌باشد. همچنین بیشترین ضریب رفتار مربوط به مدل ۲۳ که برابر با ۱۵/۰۳ می‌باشد و کمترین مقدار شکل پذیری مربوط به مدل ۲۶ است که برابر با ۵/۱۴ می‌باشد.

۳-۵- اثر استفاده از سخت‌کننده در لبه بازشو و اندازه بازشو

با توجه به بهترین عملکرد از نقطه نظر پارامترهای لرزه‌ای و نیز در نظر گرفتن شرایط اجرا در این قسمت بر روی بازشوه‌های مربعی در موقعیت ۲ و ۴ (موقعیت دو در میانه ورق و به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از تیر بالا و موقعیت چهار در گوشه بالای ورق و بدون فاصله از المان‌های مرزی تیر و ستون) به بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در لبه بازشو و نیز اندازه بازشو پرداخته شد که مقایسه نتایج پارامترهای لرزه‌ای در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در موقعیت چهار، با استفاده از ورق سخت‌کننده یکسان در بازشو ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد مقاومت نهایی نسبت به مدل بدون سخت‌کننده به ترتیب به میزان ۳/۷٪، ۱۱٪ و ۱۳٪ افزایش پیدا کرده است. در موقعیت ۲ این میزان افزایش به ترتیب برابر با ۹/۴٪، ۲۵/۵٪ و ۲۴/۳٪ می‌باشد. بیشترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل ۳۶ است که برابر با ۴۹۷/۷۸ کیلو نیوتن می‌باشد و کمترین مقدار مربوط به مدل ۳۷ است که برابر با ۳۸۳/۲۴ کیلو نیوتن می‌باشد. بیشترین مقدار افزایش سختی در موقعیت دو با میزان بازشو ۱۴ درصد است که نتایج نشان می‌دهد سختی اولیه با اضافه کردن سخت‌کننده به لبه بازشو به میزان ۹۱/۵٪ افزایش پیدا کرده است. با افزایش ابعاد بازشو و نیز استفاده از سخت‌کننده، ضریب اضافه مقاومت کاهش پیدا کرده است که بیشترین مقدار ضریب افزایش مقاومت مربوط به مدل ۲۳ در موقعیت چهار می‌باشد که فاقد سخت‌کننده است که نسبت به نمونه مشابه به اندازه ۴۸ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین در مورد ضریب شکل پذیری و ضریب رفتار نیز صادق می‌باشد که با اضافه شدن ابعاد بازشو و اضافه کردن سخت‌کننده، این دو ضریب به ترتیب به میزان ۲۶ و ۵۵ درصد کاهش پیدا کرده است. این نشان می‌دهد که با استفاده از سخت‌کننده مقاومت نهایی، سختی اولیه و جذب انرژی افزایش یافته است اما ضریب اضافه مقاومت، ضریب شکل پذیری و در نتیجه ضریب رفتار کاهش پیدا کرده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ابعاد بازشو با سخت‌کننده می‌توان پارامترهای لرزه‌ای و در نتیجه عملکرد سیستم را بهبود بخشید.

۴-۵- اثر ضخامت و عرض سخت‌کننده‌ها در لبه بازشو

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های قبل در این قسمت به بررسی عرض ورق سخت‌کننده و نیز ضخامت آن در بازشو مربع شکل در موقعیت دو که در میانه ورق و به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از تیر بالایی قرار دارد با میزان بازشو ۱۸ درصد پرداخته شده است و مقایسه نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر مقاومت نهایی مدل‌ها می‌توان دریافت که بیشترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل ۴۴ می‌باشد که در آن از ورق سخت‌کننده به عرض ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است که پس از آن با افزایش عرض ورق سخت‌کننده به اندازه ۱۰۰ میلی‌متر، مقاومت نهایی به میزان ۲/۳٪ کاهش پیدا کرده است که این نشان می‌دهد از منظر مقاومت نهایی بیشترین اندازه قابل قبول ورق سخت‌کننده ۸۰ میلی‌متر می‌باشد. کمترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل ۳۹ است که در آن از ورق به عرض ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در نتیجه با افزایش عرض ورق و ضخامت آن مقاومت نهایی به میزان ۱۴/۸ درصد افزایش پیدا کرده است. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد و اندازه ورق سخت‌کننده، سختی اولیه نیز افزایش

پیدا کرده است که این میزان افزایش برابر با ۸۴/۴٪ می باشد. میزان جذب انرژی مطابق با مقاومت نهایی است به طوری که بیشترین انرژی جذب شده در مدلی است که در آن از ورق سخت کننده به عرض ۸۰ و ضخامت ۴ میلی متر استفاده شده است.

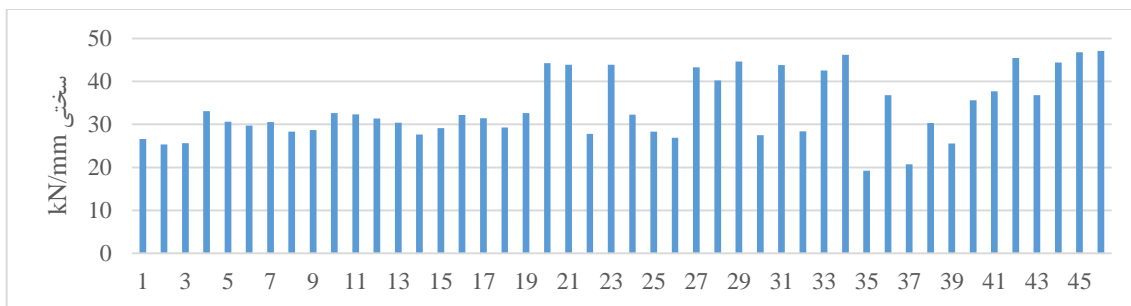
جدول ۸: مقایسه نتایج بررسی اثر استفاده از سخت کننده در لبه بازشو

مدل	موقعیت	درصد بازشو	مقاومت نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	جذب انرژی (kN.mm)X10 ⁴	اضافه مقاومت (Ω)	شکل پذیری (μ)	ضریب رفتار (R)
۲۳	۴	٪۱۰	۴۷۴/۳۵	۴۳/۸۸	۱۶۹/۵	۲/۷	۱۳/۳۷	۱۵/۰۳
۲۹			۴۹۱/۹	۴۴/۶	۱۸۷/۳۴	۱/۴۱	۹/۸۲	۶/۷۵
۳۰		٪۱۴	۴۴۶/۱	۲۷/۴۵	۱۶۷/۰۱	۱/۴۱	۹/۸۲	۶/۵۷
۳۱			۴۹۶/۶	۴۳/۸	۱۹۴/۸۶	۱/۳۸	۹/۹۶	۶/۹۸
۳۲		٪۱۸	۴۲۹	۲۸/۳۹	۱۵۷/۳۲	۱/۴۴	۹/۳۵	۶/۶۹
۳۳			۴۸۴/۸۴	۴۲/۵	۱۸۲/۶۲	۱/۴	۹/۴۷	۷/۱۲
۱۹	۲	٪۱۰	۴۵۲/۵	۳۲/۶	۱۶۲/۵۲	۱/۵۲	۹/۷۷	۷/۰۲
۳۴			۴۹۵/۱۳	۴۶/۱۹	۲۰۹/۸۶	۱/۴۹	۸/۰۸	۶/۶۵
۳۵		٪۱۴	۳۹۶/۵۸	۱۹/۲	۱۵۲/۵	۱/۴۳	۸/۷۴	۷/۰۲
۳۶			۴۹۷/۷۸	۳۶/۷۷	۲۱۱/۴۱	۱/۵۱	۸/۹۸	۷/۳۱
۳۷		٪۱۸	۳۸۳/۲۴	۲۰/۷۴	۱۴۸/۹	۱/۳۶	۸/۰۵	۶/۶۹
۳۸			۴۷۶/۵	۳۰/۳۵	۲۰۱	۱/۵۱	۸/۴۵	۶/۹۱

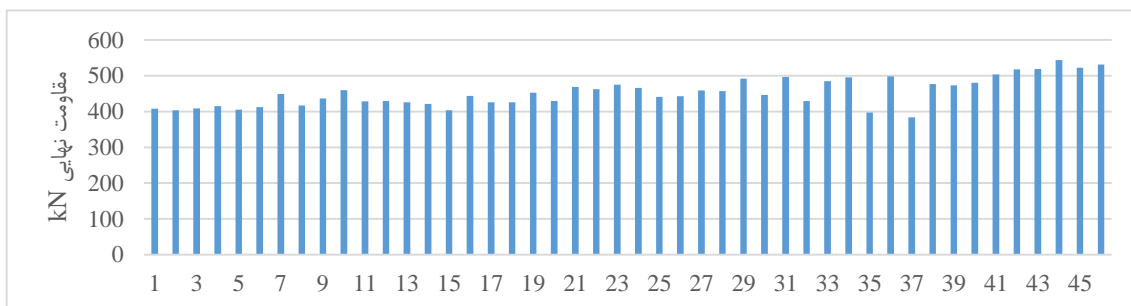
اختلاف مقدار بیشینه و کمینه جذب انرژی برابر با ۱۲/۴٪ می باشد. ضریب اضافه مقاومت در ضخامت های ۲ و ۳ میلی متر با افزایش عرض ورق سخت کننده افزایش پیدا کرده است؛ اما در ضخامت ۴ میلی متر با افزایش عرض ورق، این پارامتر کاهش پیدا کرده است. درصد اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار ضریب اضافه مقاومت برابر با ۷/۱٪ می باشد. با افزایش ضخامت ورق سخت کننده، شکل پذیری افزایش پیدا کرده است. کمترین میزان شکل پذیری مربوط به مدل ۳۹ و بیشترین آن مربوط به مدل ۴۶ می باشد. در حالت کلی ضریب رفتار با افزایش ابعاد بازشو کاهش پیدا کرده است. با مقایسه ضرایب رفتار مدل ها می توان دریافت که بیشترین ضریب رفتار مربوط به ورق سخت کننده به عرض ۱۰۰ و ضخامت ۲ میلی متری است که مقدار آن برابر با ۱۰/۶ می باشد. در شکل های ۹ تا ۱۲ به ترتیب مقایسه سختی اولیه، مقاومت نهایی، ضریب شکل پذیری و جذب انرژی برای کلیه مدل ها نشان داده شده است. کمترین مقدار سختی مربوط به مدل ۳۵ و بیشترین مقدار مربوط به مدل ۴۶ می باشد که به ترتیب برابر با ۱۹/۲ و ۴۷ کیلو نیوتن بر میلی متر است. همچنین کمترین و بیشترین مقدار مقاومت نهایی به ترتیب مربوط به مدل ۳۷ و ۴۴ است که برابر با ۳۸۳ و ۵۴۳/۵ کیلو نیوتن است. کمترین میزان ضریب شکل پذیری مربوط به مدل ۲۶ که برابر با ۵/۴ و بیشترین مقدار مربوط به مدل ۲۰ که برابر با ۱۳/۸ است.

جدول ۹: مقایسه نتایج بررسی اثر ضخامت و عرض سخت کننده ها در لبه بازشو

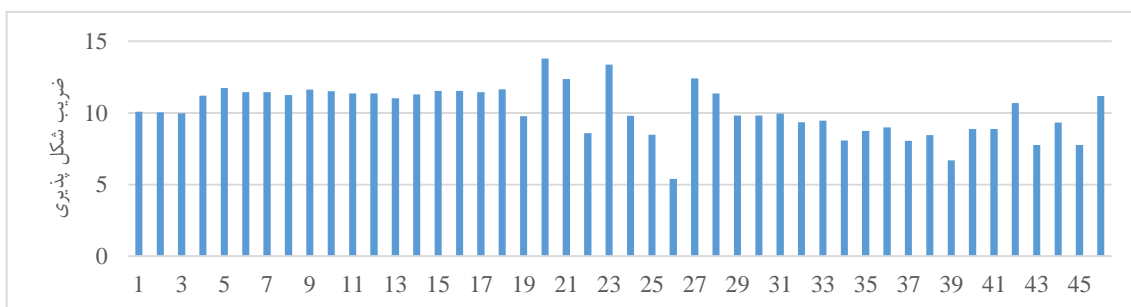
مدل	موقعیت	درصد بازشو	مقاومت نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	جذب انرژی (kN.mm)X10 ⁴	اضافه مقاومت (Ω)	شکل پذیری (μ)	ضریب رفتار (R)
۳۸	۲	٪۱۸	۴۷۶/۵	۳۰/۳۵	۲۰۱/۰۳۶	۱/۵۱	۸/۴۵	۶/۹۱
۳۹			۴۷۳/۱۷	۲۵/۵۲	۲۰۱/۰۲	۲/۱۵	۶/۷	۷/۳۵
۴۰			۴۷۹/۹	۳۵/۵۹	۲۰۴/۱۹	۲/۵	۸/۸۹	۱۰/۶
۴۱			۵۰۳/۱۷۸	۳۷/۶۵	۲۱۶/۵۶	۱/۸۶	۸/۸۸	۸
۴۲			۵۱۷/۲	۴۵/۴۰	۲۱۷/۳۲	۱/۹۹	۱۰/۶۸	۹/۳۲
۴۳			۵۱۸/۱۸	۳۶/۷۷	۲۲۲/۶۱	۲/۱۲	۷/۷۶	۸/۴
۴۴			۵۴۳/۳۸	۴۴/۴۲	۲۲۵/۹۷	۲/۲	۹/۳۲	۹/۴
۴۵			۵۲۱/۸	۴۶/۷۷	۲۲۱/۴۳	۲/۰۲	۷/۷۷	۸/۰۵
۴۶			۵۳۰/۸۳	۴۷/۰۷	۲۱۹/۵۱	۱/۴۶	۱۱/۱۸	۷/۱۴



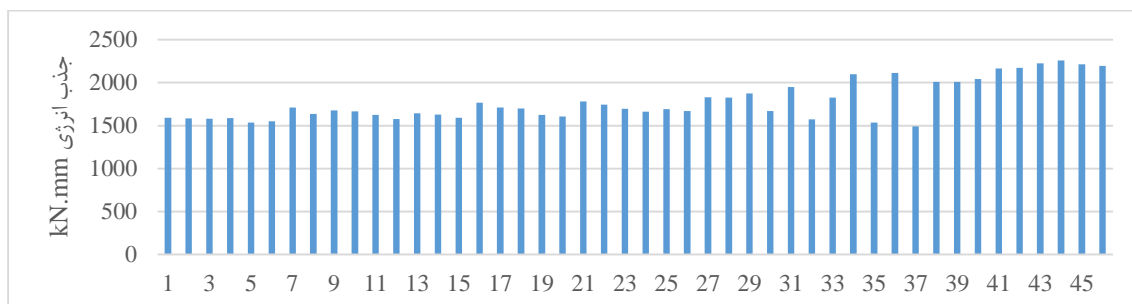
شکل ۹: مقایسه سختی اولیه در مدل‌ها



شکل ۱۰: مقایسه مقاومت نهایی در مدل‌ها



شکل ۱۱: مقایسه ضریب شکل پذیری در مدل‌ها



شکل ۱۲: مقایسه جذب انرژی در مدل‌ها

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت رفت و برگشتی به بررسی اثر موقعیت و شکل هندسی بازشو، فاصله بازشو از المان‌های مرزی تیر و ستون و در نهایت اثر استفاده از سخت‌کننده‌ها و ابعاد (عرض و ضخامت) آن‌ها در لبه اطراف بازشوها پرداخته شد. با مقایسه پارامترهای لرزه‌ای و بررسی نتایج در این مدل‌ها نتایج ذیل ارائه شده است:

- ۱- از نظر شکل هندسی، بازشوی مربعی دارای بهترین عملکرد در دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای است.
 - ۲- در وسط دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای شکل هندسی اثر چندانی بر رفتار سازه ندارد و همین امر باعث شده است تا در این موقعیت ضریب رفتار نسبت به موقعیت‌های دیگر کمتر باشد.
 - ۳- موقعیت و شکل هندسی بازشو تأثیر بسزایی بر روی سختی اولیه دارد به طوری که بیشترین سختی اولیه برای حالتی است که بازشو مربعی در موقعیت میانی بالای ورق (موقعیت دو) قرار دارد که در این حالت سختی اولیه ۲۴ درصد نسبت به بازشو در وسط در موقعیت یک افزایش پیدا کرده است.
 - ۴- شکل هندسی بازشو به تنهایی اثر چندانی بر روی ضریب رفتار و انرژی جذب شده توسط دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای ندارد.
 - ۵- فاصله بازشو از المان‌های مرزی با عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای رابطه مستقیم دارد به طوری که بیشترین مقادیر پارامترهای لرزه‌ای در زمانی رخ می‌دهد که بازشو به تیر و ستون چسبیده است.
 - ۶- با استفاده از سخت‌کننده در لبه بازشو می‌توان بدون کاهش مقاومت، اندازه بازشو را افزایش داد.
 - ۷- با بررسی کلی مدل‌ها مشاهده شد با اضافه کردن سخت‌کننده می‌توان مقاومت نهایی را به میزان قابل توجهی افزایش داد، که بیشترین مقاومت نهایی مربوط به مدل ۴۴ که برابر با ۵۴۳/۳۸ کیلو نیوتن است و کمترین مقدار مربوط به مدل ۳۷ می‌باشد. هر دو این مدل‌ها دارای بازشو به میزان ۱۸ درصد مساحت ورق فولادی است.
 - ۸- بیشترین و کمترین میزان جذب انرژی به ترتیب مربوط به مدل‌های ۳۷ و ۴۴ می‌باشد که با اضافه کردن سخت‌کننده در بازشو ۱۸ درصد در موقعیت ۲ به میزان بهینه، جذب انرژی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سخت‌کننده‌ها از خرابی زود هنگام جلوگیری کرده و باعث می‌شود تا تمام قسمت‌های ورق فولادی وارد ناحیه پلاستیک شده و در جذب انرژی مشارکت داشته باشد.
 - ۹- از مقایسه کلی ضرایب اضافه مقاومت می‌توان دریافت که بیشترین و کمترین مقادیر آن در بازشو ۱۰ درصد و بدون فاصله از المان‌های مرزی به ترتیب در مدل‌های ۲۳ و ۲۷ رخ داده است که این نشان‌دهنده اهمیت اثر موقعیت بازشو در ضریب اضافه مقاومت است. در هر دو مدل بازشوها در گوشه و چسبیده به المان مرزی است اما بیشترین مقدار مربوط به مدلی است که در گوشه بالا قرار گرفته است.
 - ۱۰- بیشترین ضریب رفتار مربوط به مدلی است که بازشو بدون فاصله از تیر و ستون در گوشه ورق در محل اتصال تیر به ستون قرار گرفته است. همچنین بیشترین ضریب شکل‌پذیری مربوط به مدلی است که در میانه و در زیر تیر قرار گرفته است (موقعیت ۲). لذا در ساختمان‌های بلندمرتبه می‌توان موقعیت بازشوها را در گوشه و میانه بالای ورق در نظر گرفت.
- در مجموع با توجه به موارد مذکور می‌توان دریافت که بازشوی مربعی، مناسب‌ترین شکل هندسی بازشو برای دیواربرشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای است و همچنین بهترین موقعیت برای ایجاد بازشو در ورق موجدار، در میانه ورق و به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از تیر بالا و در گوشه بالای ورق و بدون فاصله از المان‌های مرزی تیر و ستون می‌باشد. ورق به عرض ۶۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر بهینه‌ترین ابعاد برای سخت‌کننده در لبه اطراف بازشو است. نکته قابل توجه اینکه با اضافه کردن سخت‌کننده ای با این مشخصات، اطراف بازشوی مربعی در میانه ورق و به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از تیر بالا و با سطح مقطع معادل ۱۸ درصد سطح مقطع پانل فولادی می‌توان مقاومت دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای را نسبت به نمونه مشابه فاقد بازشو به میزان ۱/۹۵ درصد افزایش داد.

مراجع

- [1] Salehi Rad, Farhad; Faramarzadeh, Vahid; Ferdousi, Adel. (2017). Analytical investigation of tension fields effects on plastic moment of intermediate beams in steel plate shear walls. *Journal of structural and construction engineering*, 5(2), P. 160-171.
- [2] Nouri, Gholamreza; Eftekhari, Gholamhossein. (2018). Numerical Study on the Effects of Opening Shape and Location on Structural Behavior of Corrugated Steel Shear Walls. *Journal of structural and construction engineering*, doi: 10.22065/jsce.2018.137204.1605.
- [3] Rahmzadeh, Ahmad; Ghassemieh, Mehdi; Park, Yeonho; Abolmaali, Ali. (2016). Effect of stiffeners on steel plate shear wall systems. *Steel and Composite Structures*, 20(3), P. 545-569.
- [4] Emami, Fereshteh. (2013). *Experimental and Analytical Studies on Hysteretic Behavior of Trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls*. Ph.D. Dissertation. Sharif University of Technology, Civil Engineering.
- [5] Emami, Fereshteh; Mofid, Massood; Vafai, Abolhassan. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Journal of Engineering Structures*, 48, P. 750-762.
- [6] Farzampour, Alireza; Laman, Jeffrey A; Mofid, Massod. (2015). Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, P. 258-268.
- [7] Hosseinzadeh, Leila; Emami, Fereshteh; Mofid, Masood. (2017). Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(2).
- [8] Gholami, Mohammad; Vaziri, Ehsan. (2019). The wall-frame interaction effect in corrugated steel shear walls systems. *Journal of structural and construction engineering*, doi: 10.22065/jsce.2019.179369.1832.
- [9] Asadi, Azita; Tajammolian, Hamed; Forotani, Azadeh. (2020). Seismic Assessment of Corrugated Steel Shear Walls with Different Configurations Based on Fragility Curves. *Journal of structural and construction engineering*, doi: 10.22065/jsce.2020.206152.1982.
- [10] Akin, J. Ed. (2010). *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*. World Scientific, Houston, Texas: Rice University, P. 48-50.
- [11] Logan, Daryl L. (2018). *A First Course in the Finite Element Method*. 6th ed. Mason, OH, United States: Cengage Learning, Inc, P. 331-343.
- [12] Mises, R.V. (1913) *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. (Mechanics of Solid Bodies in Plastic Deformation State.)* Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen (Mathematisch-physikalische Klasse).
- [13] M. Jeyakumar; T. Christopher. (2013) Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(6), P. 1415-1421.
- [14] Sabouri-Ghomi, Saied; Gholhaki, Majid. (2008). Discussion of "Framed Steel Plate Wall Behavior under Cyclic Lateral Loading" by Hong-Gun Park, Jae-Hyuk Kwack, Sang-Woo Jeon, Won-Ki Kim, and In-Rak Choi. *Journal of Structural Engineering*, 134(10), P. 1680-1681.
- [15] Smith, M. (2009). ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [16] American Society of Civil Engineers. (2013). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. doi:10.1061/9780784412916.
- [17] Uang, C.M. (1991). Establishing R (or R_w) and C_d Factors for Building Seismic Provisions. *Journal of structural Engineering*, P. 19-28.
- [18] Newmark, N.M; Hall, W.J. (1982). Earthquake spectra and design. *Journal of Earthquake Engineering*, P. 214-232.