

ارزیابی عددی تأثیر شکل و محل بازشو بر رفتار دیوارهای برشی فولادی موج‌دار

نام و نام خانوادگی غلامحسین افتخار^۱، غلامرضا نوری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی-گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر سیستم‌های متعددی به عنوان سیستم باربر جانبی در ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. دیوارهای برشی فولادی موج‌دار یکی از این سیستم‌ها بوده که به صورت گسترده در ساختمان‌های موجود در مناطق زلزله‌خیز، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت اصلی دیوارهای برشی فولادی، شکل‌پذیری و همچنین مقاومت بالای آنها است. با ایجاد تغییراتی در هندسه دیوارهای برشی فولادی نظیر موج‌دار کردن آنها، می‌توان این مقاومت و شکل‌پذیری را افزایش داد. اما برخی مواقع به دلایلی چون شرایط معماری، مسائل اجرایی یا کاهش سختی دیوار، در آنها بازشو ایجاد می‌شود. به دلیل رفتار غیرخطی فیزیکی و هندسی، رفتار سازه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دارای بازشو پیچیده می‌باشد. در مقاله حاضر با استفاده از روش اجزاء محدود در محیط نرم‌افزاری ABAQUS که صحت نتایج آن توسط مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مورد تأیید قرار گرفته است، مطالعه‌ای گسترده‌ای پیرامون تأثیر شکل بازشو و محل قرارگیری آن در عملکرد دیوارهای برشی موج‌دار انجام شده است. معیار مقایسه رفتار سازه‌ای هر یک از نمونه‌های مطالعاتی ضریب رفتار (R) به دست آمده با استفاده از تحلیل بارافزون غیر خطی (*Push-Over*) برای هر یک از مدل‌ها است. نتایج نشان دادند که وجود بازشو در گوشه‌های دیوار برشی فولادی موج‌دار موجب بالارفتن ضریب رفتار تا $7/2$ 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.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی موج‌دار، بازشو، غیر خطی فیزیکی و هندسی، اجزاء محدود غیر خطی، ضریب رفتار

*نویسنده مسئول: غلامرضا نوری

پست الکترونیکی: r.nouri@khu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از سیستم‌های نوین و کارآمد که عمر آن حدوداً به چهار دهه می‌رسد و امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن صورت می‌گیرد، سیستم دیوار برشی فولادی است. این نوع مهاربند به‌عنوان اولین تجربه در سال ۱۹۷۰ توسط شرکت نیپون در توکیو ژاپن به‌عنوان سیستم مهاربند جانبی مورد استفاده قرار گرفت و بعدها مورد تحقیق و بررسی‌های بیشتری قرار گرفت. در این سیستم وظیفه تأمین سختی جانبی به عهده مقاومت کششی قطری ورق جان دیوار برشی فولادی بوده که حداقل لبه‌های بالایی و پایینی آن به بال تیرهای بالایی و پایینی، کاملاً متصل می‌باشند.

تاکنون مطالعات فراوانی پیرامون ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی فولادی انجام شده است. هر یک از این مطالعات جنبه خاصی از عوامل تأثیرگذار بر رفتار این نوع سیستم سازه‌ای را مورد توجه قرار داده‌اند. در همین راستا، در مطالعات آزمایشگاهی که توسط امامی و مفید (۲۰۱۲) [۱] و امامی و همکاران (۲۰۱۳) [۲] انجام شد، عملکرد دیوارهای برشی فولادی موج‌دار در مقایسه با دیوارهای برشی تخت مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش نشان داده شد که پدیده جمع‌شدگی^۱ دیوار موج‌دار در مقایسه با دیوارهای تخت بسیار کمتر است اما ناپایداری‌های اولیه در دیوارهای تخت به مراتب کمتر است.

یکی از عوامل هندسی که در رفتار دیوارهای برشی فولادی تأثیر بسیاری دارد، وجود بازشو در دیوار است. صبوری قمی و همکاران (۲۰۱۲) مقدار کاهش سختی دیوارهای برشی فولادی که دارای بازشو در قسمت‌های مختلف است را مورد بررسی قرار دادند [۳]. در این پژوهش اثر سخت‌کننده‌ها نیز در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که میزان کاهش سختی در دیوارهای برشی فولادی تخت دارای بازشو که سخت‌کننده هستند، به موقعیت سختی روی سطح دیوار وابسته نیست. در همین راستا، علوی و ناطقی (۲۰۱۳) عملکرد دیوارهای برشی فولادی تخت که دارای بازشوی دایره‌ای مرکزی سخت شده با سخت‌کننده‌های لبه‌ای و قطری را مورد ارزیابی قرار دادند [۴]. نتایج آزمایشگاهی حاصل از این پژوهش نشان دادند که با ایجاد سخت‌کننده در دیوارهای برشی تخت دارای بازشو می‌توان میزان جذب انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش داد و همچنین پدیده جمع‌شدگی را کاهش داد.

در ادامه پژوهش‌های صورت گرفته، قاسمی و حیدری (۲۰۱۴) مطالعات موردی گسترده‌ای را بر عملکرد دیوارهای برشی فولادی تخت در قاب‌های چند طبقه انجام دادند. این بررسی با اعمال بارهای افزایشنده و چرخه‌ای انجام گرفت [۵]. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این مطلب بود که در قاب‌های با تعداد طبقات بالاتر، تأثیر نسبت طول به عرض دیوار برشی فولادی در مقایسه با تأثیر مقطع ستون‌ها و تیرها (المان‌های مرزی) ناچیز است. به منظور گسترش مطالعات انجام شده، حسین‌زاده و تهرانی‌زاده (۲۰۱۴) تأثیر اندرکنش بین دیوار و قاب را در سیستم‌های ساختمانی دارای دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار دادند [۶].

عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار به صورت مطالعات آزمایشگاهی و عددی توسط وایگ (۲۰۱۴) مورد بررسی قرار گرفت [۷]. ضریب رفتار به عنوان یک معیار بررسی عملکرد لرزه‌ای با استفاده از تحلیل بارافزون توسط تامبولی و امین (۲۰۱۵) [۸] مورد توجه قرار گرفته و روش‌های مختلف به‌دست آوردن آن بیان شد. در مطالعات دیگری، عملکرد سازه‌های دیوارهای برشی موج‌دار دارای بازشوی مربعی در مرکز، با دیوارهای برشی فولادی تخت با بازشوی مشابه، مورد مقایسه قرار گرفت [۹، ۱۰ و ۱۱]. در پژوهش‌های ذکر شده، معیار مقایسه نتایج حاصل از تحلیل بارافزون و ارزیابی رفتار هیسترتیک دیوارها بود. دوو و همکاران (۲۰۱۶) کماتش برشی الاستیک دیوارهای برشی فولادی موج‌داری را مورد بررسی قرار دادند که نوع موج آن‌ها سینوسی بود [۱۲]. رهنورد و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مطالعات عددی به بررسی اهمیت پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد سیستم ترکیبی دیوار برشی بتنی- فولادی پرداختند [۱۳]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت بخش بتنی، احتمال کماتش دیوار فولادی کاهش پیدا می‌کند. استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی یکی از روش‌های رایج برای بهبود عملکرد و ارتقاء رفتار این نوع سیستم محسوب می‌گردد. به همین منظور قلهکی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر اندازه چشمه سخت‌کننده‌ها بر روی پارامترهای رفتاری غیرخطی این نوع سیستم و بویژه ضریب رفتار سیستم پرداخت [۱۴].

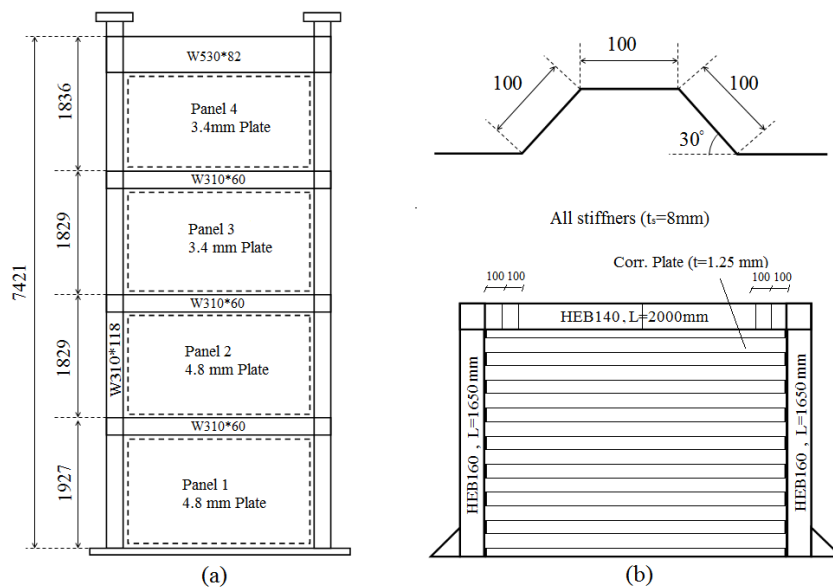
¹ pinching

سایو و هونگ (۲۰۱۷) یک قاب دوطبقه فولادی دارای دیوار برشی فولادی موج‌دار بدون بازشو را تحت بار چرخه‌ای قرار داده و رفتار هیسترتیک آن را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از این پژوهش بیانگر این بود که با استفاده شکل، اندازه و تعداد موج دیوار می‌توان کمناش الاستیک را به کمناش پلاستیک تبدیل کرده و میزان پایداری قاب را افزایش داده و از پدیده جمع‌شدگی در بارگذاری چرخه‌ای جلوگیری نمود. نورعلی شاهی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی فولادی تخت پرداختند که با چسباندن قطعه ورق‌های موج‌دار تقویت شده‌اند [۱۶]. رفتار هیسترتیک دیوارهایی که به این شکل تقویت شده بودند نشان داد که این عمل، میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی را بسیار افزایش داده و باعث کاهش چشمگیر پدیده جمع‌شدگی شده است. با استفاده از مطالعات عددی صورت گرفته در دیوارهای برشی فولادی اشکورانی و همکاران (۲۰۱۷) به ارائه یک روند بهینه برای طراحی ساختمان‌ها با سیستم دیوار برشی فولادی پرداختند [۱۷]. در این تحقیق یک دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده با چهار حالت دارای سخت‌کننده توسط آنالیزهای عددی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده با استفاده از روشهای عددی حاکی از آن بود که کوچک شدن اندازه زیرصفحات باعث افزایش محسوس شکل‌پذیری و ضریب رفتار سیستم می‌گردد. تانگ و گوو (۲۰۱۸) [۱۸] اثر سازه‌ای دیوارهای برشی موج‌دار دارای سخت‌کننده بدون بازشو را بر قاب‌های فولادی چندطبقه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نیز معیار ارزیابی عملکرد، تحلیل بارافزون بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که با استفاده از سخت‌کننده‌ها در دیوارهای برشی فولادی موج‌دار، هم می‌توان بار بحرانی حاصل از کمناش برشی و هم ظرفیت پس از کمناش ناشی از گسترش میدان کششی، را افزایش داد. در مطالعات انجام شده توسط قلهکی و همکاران (۲۰۱۸) ضریب اضافه مقاومت، ضریب شکل‌پذیری و ضریب رفتار سیستم‌های ساختمانی با دیوار برشی فولادی، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب رفتار این سیستم در حالت حدی برای سازه‌های بلند برابر ۸ و برای سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه در حدود ۹ می‌باشد. قلهکی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی دیگر ظرفیت و سختی برشی دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده تحت آرایش‌های مختلف سخت‌کننده اعم از افقی، قائم و ترکیبی به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داده و در نهایت روابطی پیشنهادی برای تعیین ضخامت ورق معادل بدون سخت‌کننده ارائه دادند تا با استفاده از روابط ارائه شده و روابط روش اندرکنش ورق با قاب بتوان دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده را طرح نمود [۲۰]. نتایج حاکی از پیش‌بینی مناسب ظرفیت و سختی سیستم دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده با استفاده از روابط پیشنهادی بوده و میزان خطا به کمتر از ۱۵ درصد محدود گردید. عملکرد سیستم ترکیبی دیوار برشی فولادی و قاب خمشی بتن‌آرمه توسط قلهکی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت [۲۱]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب رفتار سیستم در مقایسه با قاب بتن آرمه تنها و قاب بتن آرمه دارای دیوار برشی فولادی با اتصالات گل میخ، افزایش داشته است. در ادامه مطالعات ذکر شده، لو و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد دیوارهای برشی تخت فولادی با شکاف‌های طولی را با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [۲۲].

با توجه به مطالعه مراجع فوق به نظر می‌رسد که در مطالعات قبل دو اشکال عمده وجود دارد. اول اینکه در بسیاری از مطالعات، به دلیل استفاده از روش آزمایشگاهی، مطالعات موردی وسیع نبوده نتایج حاصل از آن‌ها کلیت لازم را ندارند. دوم اینکه با توجه به غیرخطی بودن مسئله، تأثیر شرایط موج‌دار بودن و بازشو داشتن دیوار، تغییرات شکل بازشو و تغییرات موقعیت قرارگیری بازشو در سطح دیوار به صورت همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله رفتار دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دارای بازشو با موقعیت‌ها و شکل‌های متغیر با استفاده از روش اجزاء محدود مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این روش با استفاده از مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع [۲۱] مورد تأیید و اعتبار سنجی قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی اثر وجود بازشو در دیوارهای برشی فولادی موج‌دار است. به منظور دستیابی به این مهم، هندسه بازشو در حالت‌های دایره‌ای و مربعی و به صورت متمرکز در نظر گرفته می‌شود. همچنین به این منظور در قالب نمونه‌های مطالعاتی گسترده، اثر جابجایی بازشو در سطح دیوار موج‌دار مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مدل‌سازی عددی و اعتبار سنجی

با توجه به اینکه مطالعات موردی انجام شده در این پژوهش که بر اساس روش عددی اجزاء محدود هستند لازم است که صحت نتایج حاصل از مدل سازی عددی اجزاء محدود که در محیط نرم افزار ABAQUS انجام شده است، مورد تأیید قرار گیرد. بدین منظور یک نمونه قاب چهارطبقه دارای دیوار برشی فولادی تخت بدون بازشو که توسط قاسمیه و همکاران [۶] مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت و یک نمونه قاب دارای دیوار برشی فولادی موج دار بدون بازشو که توسط امامی و مفید [۱] و امامی همکاران [۲] تحت مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفت، در نظر گرفته شده و این نمونه ها با استفاده از روش اجزاء محدود مجدداً مدل سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته اند. مشخصات هندسی مدل های آزمایشگاهی مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده اند. خصوصیات مکانیکی اجزاء فولادی به کار رفته در مدل های آزمایشگاهی ذکر شده نیز در جدول ۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱: نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی (a): تخت [۶] و (b): موج دار [۲] و

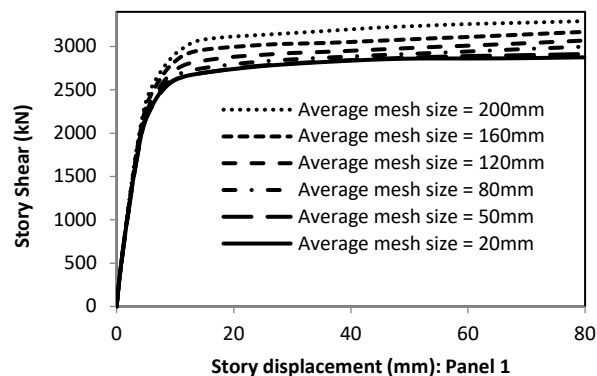
مدل آزمایشگاهی فوق با خصوصیات مکانیکی و هندسی ذکر شده بر اساس یک سری فرضیات اولیه در محیط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. در این مدل سازی از المان های پوسته ای چهارگره ای با انتگرال گیری کاهش یافته^۲ استفاده شده است که این حالت شرایط را برای مدل سازی صفحات نازک و ضخیم فراهم آورده است. یکی از نکات بسیار مهمی که در تحلیل پوش آور دیوارهای برشی فولادی مطرح است این است که هر دو حالت غیرخطی فیزیکی و هندسی در این تحلیل وجود دارد. حالت غیرخطی فیزیکی مربوط به پلاستیک شدن قسمت های زیادی از سازه است. به این منظور در مدل سازی اجزاء محدود، حالت پلاستیسیته سخت شدگی دوخطی ایزوتروپیک مورد استفاده قرار گرفته است. خط اول مربوط به ناحیه الاستیک تا رسیدن به تسلیم و خط دوم مربوط به ناحیه پلاستیک از حالت تسلیم تا حالت گسیختگی است. حالت غیرخطی هندسی نیز به دلیل کمانش برشی دیوار بسیار محسوس است. به منظور در نظر گرفتن کمانش برشی دیوار و تعقیب منحنی پوش آور در حالت پس کمانش، شرایط غیرخطی هندسی در نرم افزار فعال شده است. اما لازم به ذکر است که برای ایجاد کمانش برشی در دیوار سازه باید دارای یک نقص اولیه باشد. بدین منظور، با استفاده از ترکیب شکل های مدی کمانش سازه که از تحلیل خطی مقدار ویژه کمانش سازه به دست آمده است، نقص اولیه به دیوار اعمال شده است. به منظور انجام تحلیل حساسیت نتایج نسبت به اندازه متوسط اضلاع المان های چهارگره ای به کار گرفته شده در این مقاله، تحلیل پوش آور برای نمونه آزمایشگاهی (a) در محیط نرم افزار ABAQUS با استفاده از المان هایی با ابعاد متوسط ۲۰، ۵۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ میلیمتری، به صورت جداگانه انجام شده و نتایج بدست

² 4 Nodes shell element with reduced integration (S4R)

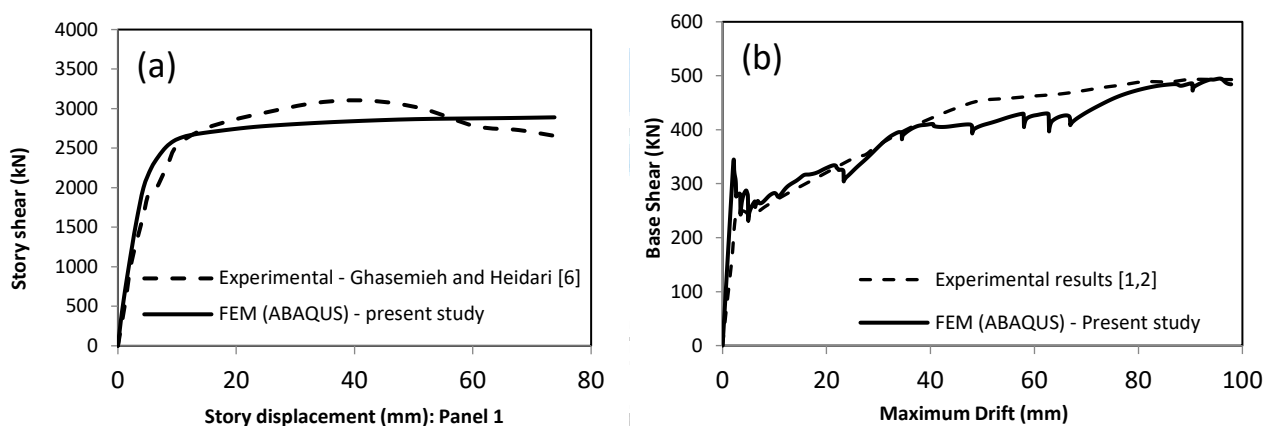
آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه در شکل ۲ قابل ملاحظه است. نتایج نشان می‌دهند که پاسخ در حالتی که ابعاد متوسط المان‌ها ۵۰ میلیمتر است تقریباً برابر با حالتی است که متوسط ابعاد المان ۲۰ میلیمتر است. این امر نشان می‌دهد که اندازه متوسط بهینه برای المان‌ها تقریباً ۵۰ میلیمتر است. به این ترتیب مدل‌های آزمایشگاهی (a) و (b) با همین ابعاد برای المان‌ها شبکه بندی شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. به منظور انجام تحلیل پوش‌آور، در مقاله حاضر از روش دینامیکی ضمنی استفاده شده است که زمان اعمال بارگذاری در آن ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده تا تأثیر نیروهای اینرسی به صفر میل کرده و حالت شبه استاتیکی ایجاد شود. تحلیل دینامیکی ضمنی برای حل مسائل استاتیکی و شبه استاتیکی که در آن حلگر استاتیکی نمی‌تواند پاسخ مسئله را بدست آورد بسیار کاربرد دارد (مانند تحلیل پوش‌آور با تغییر مکان بزرگ) و با توجه به اینکه در روند تحلیل پوش‌آور دیوارهای برشی فولادی ناپایداری‌های زیادی ناشی از کماتش برشی دیوار وجود دارد، از این حلگر استفاده شده است.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی [۱، ۲ و ۶]

اجزاء مدل آزمایشگاهی	مدول الاستیسیته - E (MPa)	تنش تسلیم - f_y (MPa)	تنش نهایی - f_u (MPa)	f_y/f_u	درصد افزایش طول
ورق تخت ۱ و ۲	۲۰۸۸۳۵	۳۴۱/۲	۴۵۶/۱	۰/۷۵	۳۴
ورق تخت ۳	۲۱۰۸۹۸	۲۵۷/۲	۳۴۴	۰/۷۵	۴۳
ورق تخت ۴	۲۰۳۰۷۹	۲۶۱/۵	۳۷۵/۳	۰/۷۰	۳۴
بال ستون	۲۰۴۴۰۴	۳۰۸/۴	۴۷۹/۲	۰/۶۴	۲۷
(a) جان ستون	۱۹۶۷۵۳	۳۴۰/۵	۴۸۸/۹	۰/۷۰	۲۳
بال تیر ۱ و ۲ و ۳	۲۰۷۶۵۸	۳۱۴/۵	۴۷۶	۰/۶۶	۲۷
جان تیر ۱ و ۲ و ۳	۱۹۶۵۲۵	۳۶۶/۳	۴۸۲/۱	۰/۷۶	۲۵
بال تیر ۴	۲۱۱۲۳۲	۳۴۵/۱	۴۹۲	۰/۷۰	۲۸
جان تیر ۴	۲۰۰۹۵۱	۳۵۴/۲	۴۹۳/۵	۰/۷۲	۲۶
ورق موج‌دار	۲۱۰۰۰۰	۲۰۷	۲۹۰	۰/۷۱	۴۱
(b) ستون	۲۱۰۰۰۰	۳۰۰	۴۴۳	۰/۶۷	۳۳
تیر	۲۱۰۰۰۰	۲۸۸	۴۵۶	۰/۶۳	۳۷



شکل ۲: مقایسه تحلیل پوش آور با استفاده از شبکه بندی با انواع ابعاد متوسط المان‌ها

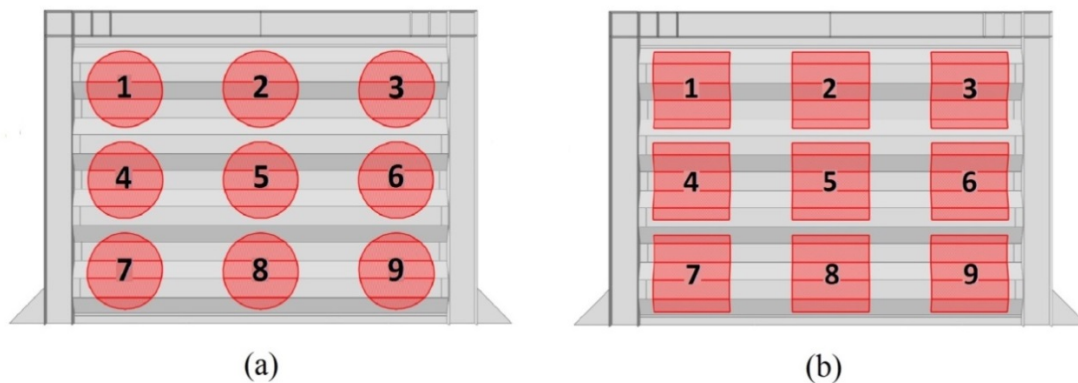


شکل ۳: مقایسه منحنی پوش آور حاصل از مطالعات آزمایشگاهی روش اجزاءمحدود (مطالعه‌ی حاضر) با استفاده از تحلیل دینامیکی ضمنی

با توجه به شکل ۳ و نزدیکی نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع [۲، ۱، ۶]، می‌توان به این نتیجه رسید که تمامی فرضیات حاکم بر مدل‌سازی اجزاءمحدود که در این مقاله به کار گرفته شده‌اند قابل تأیید بوده و در سایر مدل‌های مطالعاتی مدل‌سازی عددی براساس آن، بلامانع است. با توجه به اینکه سایر مدل‌های مطالعاتی براساس نمونه آزمایشگاهی (b) تعیین شده‌اند این نمونه نیز جزء مدل‌های مطالعاتی در مقاله حاضر به حساب آورده شده و به صورت ust-1-0 نام‌گذاری شده است. نام‌گذاری سایر مدل‌های مطالعاتی نیز در بخش بعد بیان شده است.

۳- فرضیات و مدل‌سازی

به منظور انجام مطالعات موردی، در مقاله حاضر ۱۸ مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. کلیه خصوصیات مکانیکی و هندسی اجزاء مرزی و ورق موج‌دار دیوار برشی فولادی مانند آنچه که در شکل ۱ و جدول ۱ بیان شد، بوده و وجه تمایز این مدل‌های مطالعاتی در نوع بازشوی موجود در آنها و همچنین موقعیت قرارگیری بازشو در سطح دیوار است. نوع بازشو و موقعیت قرارگیری بازشو در سطح دیوار برای نمونه‌های مختلف مطالعاتی، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. به منظور نام‌گذاری نمونه‌های مطالعاتی، حرف اول بیانگر دایره‌ای یا مربعی بودن بازشو است که در صورت وجود بازشوی دایره‌ای حرف c و بازشوی مربعی حرف s مورد استفاده قرار می‌گیرد. عبارت دوم ust بوده که به معنای لبه‌های سخت نشده بازشو است (یعنی لبه‌های آزاد). عبارت سوم عدد یک بوده یعنی قاب یک طبقه و عدد بعدی شماره موقعیت بازشو در شکل ۴ است. بنابراین به عنوان مثال نمونه مطالعاتی c-ust-1-9 بیانگر نمونه‌ای است که دیوار با مشخصات مکانیکی و هندسی ذکر شده در شکل ۳ مورد نظر بوده و بازشوی دایره‌ای با لبه‌های آزاد در موقعیت شماره ۹ (با توجه به شکل ۴) در آن تعبیه شده باشد. نام نمونه بدون بازشو نیز ust-1-0 در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: نمایی از شماره‌گذاری موقعیت‌های مختلف بازشو در سطح دیوار برشی فولادی موج‌دار در حالت (a) دایره‌ای (b) مربعی

۴- نتایج عددی

مدل‌های مطالعاتی که معرفی شدند، تحت تحلیل بارافزون قرار گرفته‌اند. در هریک از آنها هدف اصلی به‌دست آوردن منحنی ظرفیت بوده و این هدف با مدل‌سازی هریک از مدل‌های مطالعاتی در محیط نرم افزار ABAQUS محقق شده است. پس از اینکه برای هریک از نمونه‌های مطالعاتی منحنی بارافزون به‌دست آمد و ضریب رفتار برای هریک از مدل‌های مطالعاتی محاسبه شده و با حالت بدون بازشو مقایسه شده است. روش‌های مختلفی در تعیین ضریب رفتار وجود دارند. در این مقاله از روش شکل‌پذیری (روش یوانگ) استفاده شده است. بر اساس این روش بعد از انجام تحلیل بارافزون (پوش آور) و به دنبال آن دوخطی سازی منحنی پوش‌آور، تعیین ضریب رفتار انجام خواهد گرفت. این ضریب بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه است [۸، ۱۴، ۱۶، ۱۸].

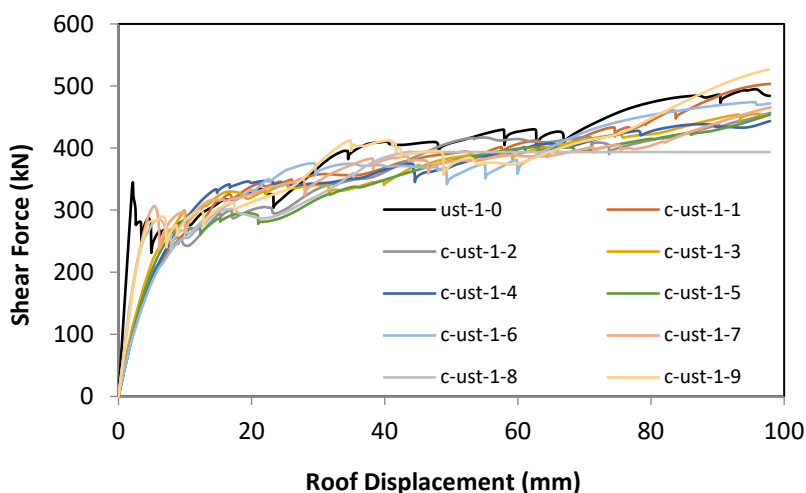
$$R = R_m \cdot \Omega = \frac{V_e}{V_y} \cdot \frac{V_y}{V_s} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، V_y برش پایه متناظر با حد تسلیم، V_e برش پایه متناظر با حد الاستیک که مقداری از برش پایه است که انرژی کرنشی ناشی از آن برابر با انرژی کرنشی الاستوپلاستیک (سطح زیر نمودار منحنی بارافزون) است. V_s نیز برش پایه متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک است. مقادیر V_e ، V_y و V_s با استفاده از دوخطی سازی منحنی بارافزون قابل محاسبه است. در رابطه‌ی (۱)، $R_m \cdot \Omega$ به ترتیب عبارت‌اند از ضریب اضافه مقاومت و ضریب شکل‌پذیری که از ضرب آن‌ها ضریب رفتار (R) محاسبه می‌شود [۸].

در ادامه این بخش، نتایج مربوط به تحلیل بارافزون برای هریک از مدل‌های مطالعاتی با استفاده از روش اجزاء محدود، نشان داده شده است.

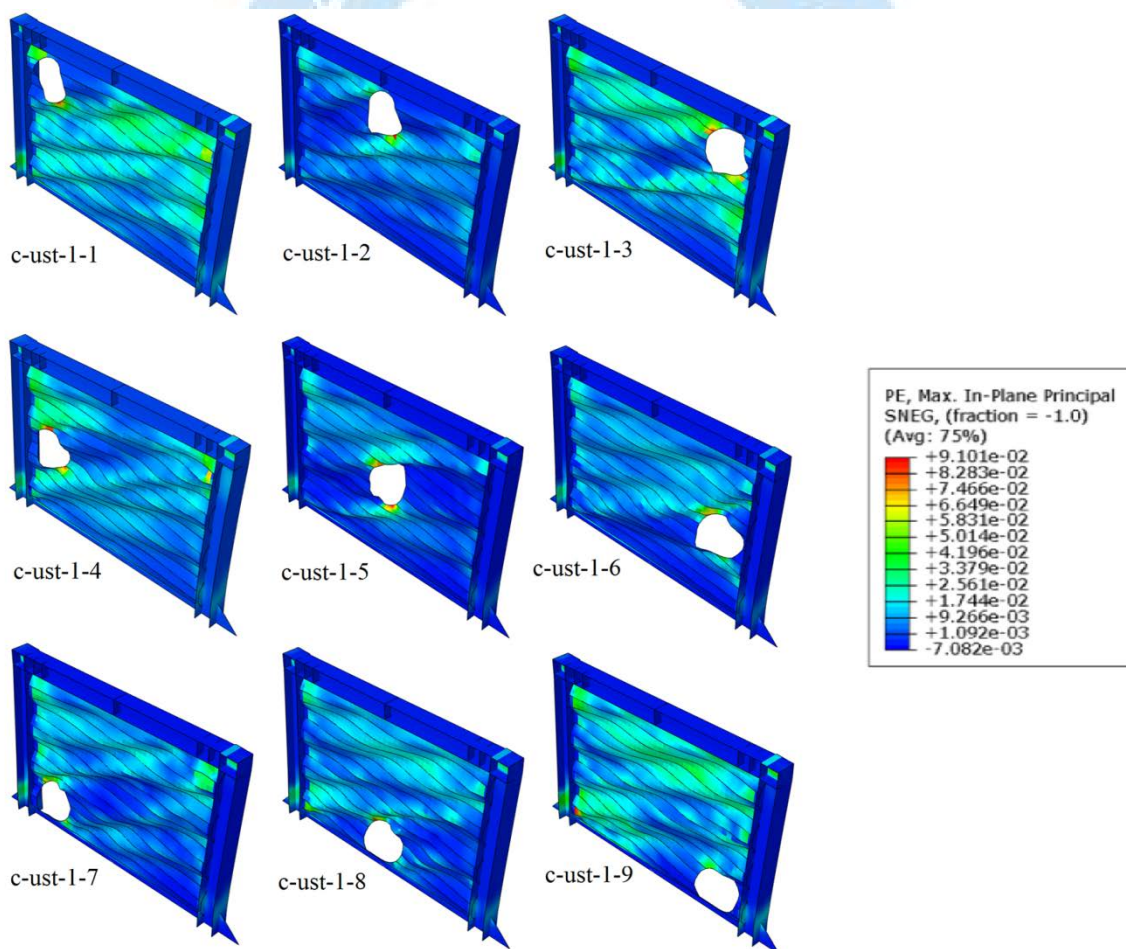
۴-۱- نمونه‌های مطالعاتی با بازشو دایره‌ای

از ۱۸ مدل در نظر گرفته شده، ۹ نمونه مطالعاتی مربوط به وجود بازشوه‌های دایره‌ای تحت تحلیل بارافزون قرار گرفته‌اند. در هریک از آنها هدف اصلی به‌دست آوردن منحنی ظرفیت دیوار است مدل‌های مطالعاتی پس از انجام تحلیل بارافزون، منحنی‌های بار-تغییر مکان مربوط به این نوع تحلیل (پوش آور) در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. تغییر شکل‌های ایجاد شده در این مدل‌های مطالعاتی به صورت کیفی در شکل ۶ قابل ملاحظه هستند.



شکل ۵: منحنی‌های بارافزون (پوش‌آور) برای تمام نمونه‌های مطالعاتی در حالت وجود بازشوی دایره‌ای

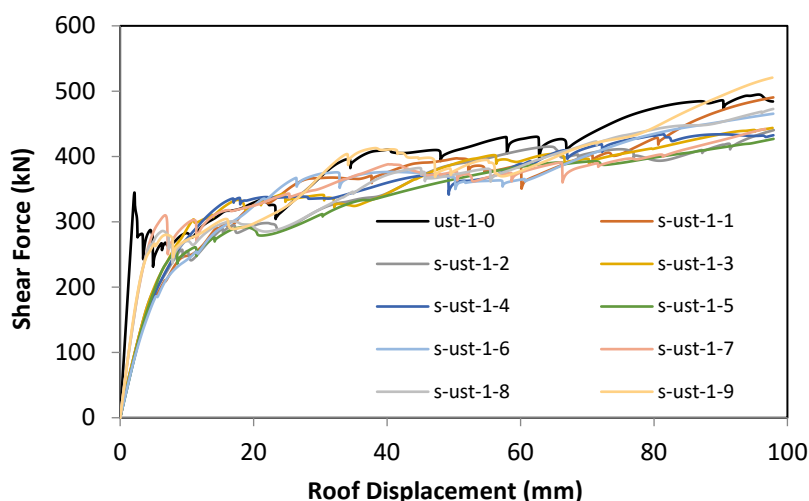
لازم به ذکر است که کانتورهای نشان داده در شکل ۶ نیز براساس توزیع تنش مایسز بوده که معیار اصلی گسترش پلاستیسیته در مصالح فولادی است. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، تغییر موقعیت بازشو با اینکه ابعاد و شکل آن تغییر نکرده، تأثیر قابل توجهی را بر روند گسترش تنش مایسز و پلاستیسیته در سطح دیوار داشته است. این تأثیر به صورت کمی در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است.



شکل ۶: تغییر شکل تمام مدل‌های دیوار برشی فولادی مربوط به دیوارهای با بازشوی دایره‌ای براساس کانتور توزیع کرنش‌های پلاستیک

۲-۴- نمونه‌های مطالعاتی با بازشوی مربعی

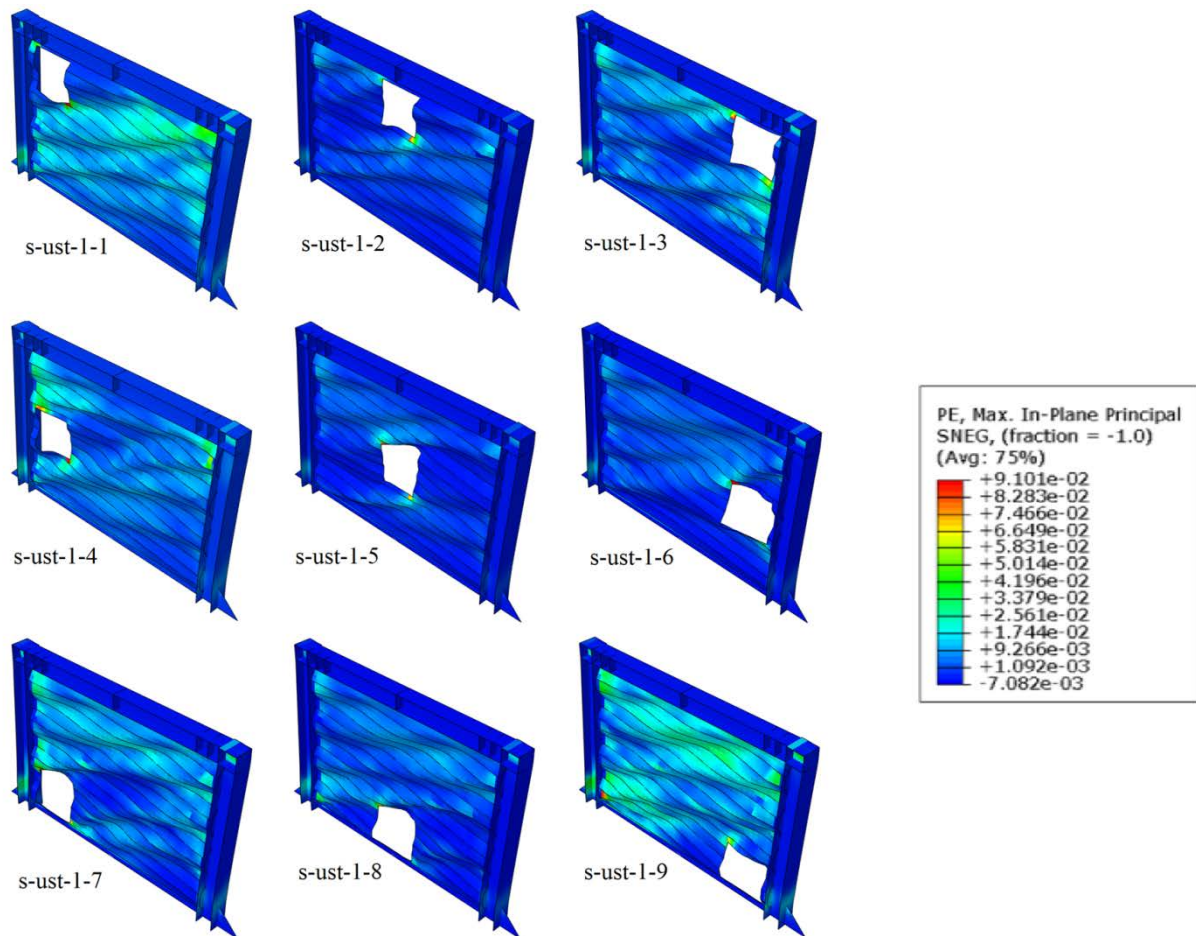
مدل‌های مطالعاتی دیگر، مربوط به وجود بازشوهای مربعی تحت تحلیل بارافزون قرار گرفته‌اند. منحنی ظرفیت برای مدل‌های حاضر نیز مانند ۹ نمونه مطالعاتی قبل، مدل‌های مطالعاتی از انجام تحلیل بارافزون به دست آمده و نتایج آن به صورت منحنی‌های بار-تغییر مکان در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. تغییر شکل ایجاد شده در این مدل‌های مطالعاتی نیز به صورت کیفی در شکل ۸ قابل ملاحظه هستند. لازم به ذکر است که کانتورهای نشان داده شده در شکل ۸ نیز مانند کانتورهای نشان داده شده در شکل ۶ براساس توزیع تنش مایسز بوده که معیار اصلی گسترش پلاستیسیته در مصالح فولادی است. همانطور که در شکل ۷ و شکل ۸ دیده می‌شود، مانند آنچه که در شکل ۶ برای نمونه‌های مطالعاتی مربوط به بازشو دایره‌ای نشان داده شد، تغییر موقعیت بازشوی مربعی نیز مانند بازشوی دایره‌ای با اینکه ابعاد و شکل آن تغییر نکرده، تأثیر قابل توجهی را بر روند گسترش تنش مایسز و پلاستیسیته در سطح دیوار داشته است. این تأثیر به صورت کمی در شکل ۷ قابل ملاحظه است.



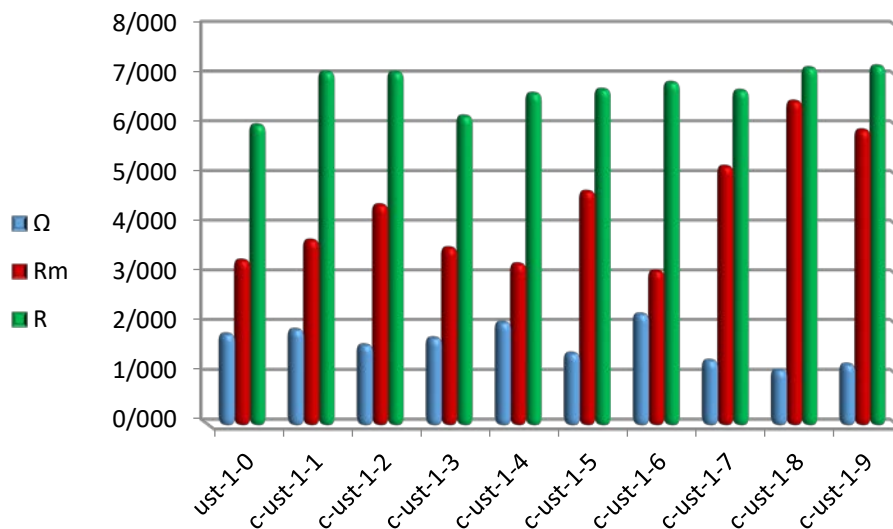
شکل ۷: منحنی‌های بارافزون (پوش‌آور) برای تمام نمونه‌های مطالعاتی در حالت وجود بازشوی مربعی

۵- تجزیه و تحلیل نتایج عددی

با انجام تحلیل بارافزون، رابطه بار-تغییر مکان برای هر یک از دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دارای بازشوهای مختلف بدست آمد. این نتایج اطلاعات اولیه هستند و با توجه به شکل ۵ و شکل ۷ به نظر می‌رسد که مقایسه رفتار سازه‌ای این مدل‌ها با یکدیگر بسیار پیچیده است. به همین دلیل این اطلاعات اولیه باید تجزیه و تحلیل شوند. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل منحنی‌های بارافزون وجود دارد. در مقاله حاضر با استفاده از هر منحنی بارافزون (پوش‌آور) سه ضریب بدست آمده است که عبارتند از ضریب شکل‌پذیری (R_m)، ضریب اضافه مقاومت (Ω) و ضریب رفتار (R). این ضرایب می‌توانند در تجزیه و تحلیل منحنی‌های بارافزون به دست آمده به عنوان یک معیار مناسب، مورد استفاده قرار گیرند. نحوه بدست آوردن این سه ضریب در رابطه (۱) بیان شد. با استفاده از منحنی‌های ظرفیت ضریب رفتار برای مدل‌های مطالعاتی براساس تغییر مکان هدف مورد انتظار از قابهای خمشی ویژه یعنی 0.3 ارتفاع قاب به دست آمده است. براساس مطالب ذکر شده، ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت برای نمونه‌های مطالعاتی دارای بازشوی دایره‌ای و مربعی به ترتیب در نمودارهای شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

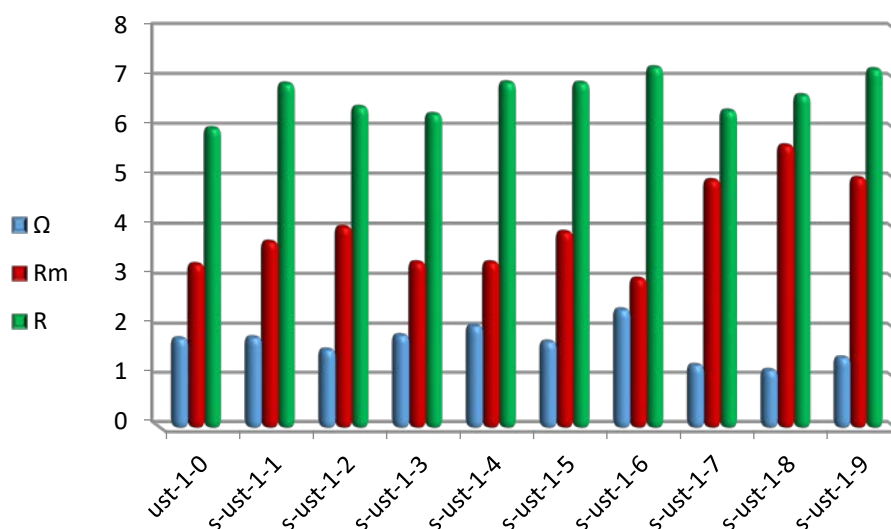


شکل ۸: تغییرشکل مدل‌های دیوار برشی فولادی مربوط به دیوارهای با بازشوی مربعی براساس کانتور توزیع کرنش‌های پلاستیک



شکل ۹: مقایسه ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت برای نمونه‌های مطالعاتی با بازشو دایره‌ای

با توجه به شکل ۹ و جدول ۲، زمانی که بازشوی دایره‌ای در دیوار وجود دارد، ضریب رفتار نسبت به حالتی که بازشو در ورق موج‌دار دیوار قرار ندارد، بیشتر شده و در بهترین حالت و از مقدار $6/0$ به $7/2$ رسیده است. دلیل این اتفاق را می‌توان اینطور تفسیر نمود که با وجود بازشو، پلاستیسیته زودتر در ورق موج‌دار گسترش پیدا کرده و کمانش ورق به جای اینکه قبل از گسترش پلاستیسیته اتفاق بیفتند بعد از آن به وقوع پیوسته و ناپایداری‌های حالت الاستیک در دیوار برشی ایجاد نمی‌شود. این اتفاق را می‌توان در شکل ۱۰ نیز ملاحظه نمود. بنابراین در هر حالتی از شکل هندسی بازشو، وجود آن منجر به بالا رفتن ضریب رفتار خواهد شد. اما نحوه افزایش این ضریب رفتار بستگی به دو عامل مهم دارد. عامل اول شکل بازشو و عامل دوم موقعیت قرارگیری آن در سطح ورق موج‌دار دیوار است (شکل ۴).



شکل ۱۰: مقایسه ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت برای نمونه‌های مطالعاتی با بازشو مربعی

شکل ۹ نشان می‌دهد که در حالت وجود بازشوی دایره‌ای اگر موقعیت بازشو در موقعیت‌های ۱ و ۲ (یعنی به ترتیب موارد c-ust-1-1 و c-ust-1-2) و موقعیت‌های ۸ و ۹ (یعنی به ترتیب موارد c-ust-1-8 و c-ust-1-9) موجب بیشترین ضریب رفتارها برای دیوار مورد نظر خواهد شد. در موقعیت‌های ۱ و ۲ ضرایب رفتار به ترتیب برابر با $7/1$ و $7/0$ و در موقعیت‌های ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $7/1$ و $7/2$ هستند. نکته قابل توجه در این است که بالا بودن ضریب رفتار برای موقعیت بازشو در موقعیت‌های ۱ و ۲ دلیلی متفاوت از حالت وجود بازشو در موقعیت‌های ۸ و ۹ دارد. در حالتی که بازشوی دایره‌ای در موقعیت‌های ۱ و ۲ قرار دارد (به ترتیب مدل‌های مطالعاتی c-ust-1-1 و c-ust-1-2) بالا بودن ضریب رفتار بازشو ناشی از بالا بودن ضریب اضافه مقاومت بازشو است. بنابراین می‌توان بیان نمود که در مدل c-ust-1-1 و c-ust-1-2 به علت اختلاف نسبتاً زیاد بین برش پایه معادل ایجاد اولین مفصل پلاستیک و برش پایه معادل تسلیم منجر به افزایش بیشتر ضریب رفتار نسبت به مدل‌های مطالعاتی دیگر شده است. اما در مورد مدل‌هایی که در آنها بازشو دایره‌ای در موقعیت‌های ۸ و ۹ قرار گرفته اند (یعنی به ترتیب مدل‌های مطالعاتی c-ust-1-8 و c-ust-1-9) بالاتر بودن ضریب رفتار ناشی از بالاتر بودن ضریب شکل‌پذیری این دو مدل مطالعاتی است. همین تفسیر برای وجود بازشوی مربعی در دیوار برشی فولادی موج‌دار قابل ملاحظه است. در این حالت زمانی که بازشوی مربعی در موقعیت‌های ۱ و ۴ قرار دارد (یعنی به ترتیب مدل‌های s-ust-1-1 و s-ust-1-4) ضرایب رفتار به ترتیب برابر $6/9$ و $7/0$ بوده و عملکردی مشابه به مدل‌های مربوط به وجود بازشوی دایره‌ای به ترتیب در موقعیت‌های ۱ و ۲ دارد (به ترتیب مدل‌های مطالعاتی c-ust-1-1 و c-ust-1-2). به همین صورت عملکردی مشابه بین مدل‌های مطالعاتی c-ust-1-6 و s-ust-1-9 (یعنی وجود بازشوی مربعی در موقعیت‌های ۶ و ۹) که به ترتیب ضرایب رفتاری برابر با $7/3$ و $7/2$ دارند، با مدل‌های c-ust-1-8 و c-ust-1-9 وجود دارد.

جدول ۲: مقادیر عددی ضرایب رفتار، شکل پذیری و اضافه مقاومت

صی	ust-1-0	c-ust-1-1	c-ust-1-2	c-ust-1-3	c-ust-1-4	c-ust-1-5	c-ust-1-6	c-ust-1-7	c-ust-1-8	c-ust-1-9
Ω	۱/۸	۱/۹	۱/۶	۱/۷	۱/۱۰	۱/۴	۲/۲	۱/۳	۱/۱	۱/۲
Rm	۳/۳	۳/۷	۴/۴	۳/۶	۳/۲	۴/۷	۳/۱	۵/۲	۶/۵	۵/۹
R	۶/۱۰	۷/۱	۷/۱	۶/۲	۶/۷	۶/۷	۶/۹	۶/۷	۷/۱	۷/۲
ust-1-0	s-ust-1-1	s-ust-1-2	s-ust-1-3	s-ust-1-4	s-ust-1-5	s-ust-1-6	s-ust-1-7	s-ust-1-8	s-ust-1-9	
Ω	۱/۸	۱/۸	۱/۶	۱/۹	۲/۱	۱/۸	۲/۴	۱/۳	۱/۲	۱/۴
Rm	۳/۳	۳/۸	۴/۱	۳/۴	۳/۴	۴	۳/۱	۵	۵/۷	۵/۱۰
R	۶/۱۰	۶/۹	۶/۵	۶/۳	۷	۶/۹	۷/۳	۶/۴	۶/۷	۷/۲

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر به عملکرد دیوار برشی فولادی موجدار با بازشو پرداخته شد. متغیرهای اصلی که مدل‌ها را از یکدیگر متمایز کردند عبارتند از شکل بازشو که در این مقاله دو حالت بازشو دایره‌ای و مربعی در نظر گرفته شد و همچنین محل قرار گیری بازشو که موقعیت‌های مختلف آن شماره گذاری شده و در شکل ۴ نمایش داده شد. روش به کار گرفته شده در این مقاله روش اجزاء محدود غیرخطی بوده و مدل‌سازی‌های عددی براساس این روش، در محیط نرم‌افزار اجزاءمحدود ABAQUS انجام شد. نحوه مدل‌سازی اجزاءمحدود به کار گرفته شده در این مقاله با نتایج آزمایشگاهی یکی از مدل‌ها (یعنی مدل ust-1-0) که مربوط به دیوار برشی فولادی موجدار بدون بازشو بوده و در مراجع [۲۰ و ۲۱] موجود است مقایسه شد و قرابت این دو نوع نتایج (عددی و آزمایشگاهی) بیانگر مدل‌سازی صحیح اجزاءمحدود به کار گرفته شده در این مقاله است. با استفاده از روش عددی ذکر شده، مطالعات عددی گسترده‌ای پیرامون وجود دو نوع بازشو و در موقعیت‌های مختلف روی سطح دیوار برشی فولادی موجدار انجام شد. معیار مقایسه رابطه بار-تغییرمکان که برای هر مورد مطالعاتی به دست آمد، ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت بود. با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی‌های بارافزون (پوش‌آور) به دست آمده برای هر نمونه مطالعاتی، براساس ضرایب ذکر شده نتایج به دست آمده از چهار جنبه دسته‌بندی شده و مورد بررسی قرار گرفت.

- از نظر بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود بازشو در دیوار برشی فولادی کنگره‌دار می‌توان بیان نمود که وجود بازشو برخلاف تصور اولیه می‌تواند در بالا بردن عملکرد لرزه‌ای یعنی بالابردن ضریب رفتار مفید واقع شود. در واقع وجود این بازشو (هر دو حالت دایره‌ای و مربعی) باعث می‌شود که کمانش برشی اولیه دیوار بعد از گسترش پلاستیسیته در سطح دیوار اتفاق افتاده و مانع از بروز ناپایداری‌ها در محدود الاستیک شود. با توجه به جدول ۲ این ضریب که در حالت بدون بازشو برابر با ۶/۱۰ است در حالت وجود بازشوه‌های مربعی یا دایره‌ای به ۷/۲ تا ۷/۳ نیز می‌رسد.
- جنبه دیگری از بررسی نتایج بدست آمده مربوط به تغییر موقعیت و همچنین شکل بازشو بوده که این عوامل می‌توانند مقدار ضریب رفتار را تا ۱۵٪ حالت بدون بازشو افزایش دهند. با تغییر موقعیت بازشوی دایره‌ای ضریب رفتار از ۶/۲ تا ۷/۲ و در حالت تغییر موقعیت بازشوی مربعی این ضریب از ۶/۳ تا ۷/۳ تغییر می‌کند.
- یکی دیگر از نتایج مهم به دست آمده بهترین موقعیت‌ها برای جانمایی بازشو دایره‌ای است. در حالت وجود بازشو دایره‌ای بیشترین ضریب رفتار زمانی ایجاد می‌شود که بازشو در موقعیت‌های ۱، ۲، ۸ یا ۹ قرار داشته باشد (یعنی در گوشه‌ها و در مجاورت وسط تیرها).
- در نهایت بهترین موقعیت‌ها برای جانمایی بازشو مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت وجود بازشو مربعی بیشترین ضریب رفتار زمانی ایجاد می‌شود که بازشو در موقعیت‌های ۱، ۴، ۶ یا ۹ قرار داشته باشد (یعنی در گوشه‌ها و در مجاورت وسط ستون‌ها).

مراجع

- [1] Emami, F., Mofid, M. (2012). On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 32 (2), 94-104.
- [2] Emami, F., Mofid, M., Vafai, A. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Engineering Structures*, 48, 750-762.
- [3] Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A., Bradford, M.A. (2012). Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening. *Journal of Constructional Steel Research*, 79, 91-100.
- [4] Alavi, E., Nateghi, F. (2013). Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 9-20.
- [5] Ghassemieh, M., Heidari, N. (2014). Parametric analysis of steel plated shear structures. *J. Cent. South Univ*, 21(5), 2083-2090.
- [6] Hosseinzadeh, S. A. A., and Mohsen Tehranizadeh, (2014). The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 88-99.
- [7] Vigh, L. G., Liel, A. B., Deierlein, G. G., Miranda, E., Tipping, S. (2014). Component model calibration for cyclic behavior of a corrugated shear wall. *Thin-Walled Structures*, 75, 53-62.
- [8] Tamboli, K., Amin, J. A. (2015). Evaluation of response reduction factor and ductility factor for RC braced frame. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2(3), 120-129.
- [9] Farzampour, A., Laman, J. A., Mofid, M. (2015). Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 258-268.
- [10] Bahrebar, M., Kabir, M. Z., Hajsadeghi, M., Zirakian, T., Lim, J. B. (2016). Structural performance of steel plate shear walls with trapezoidal corrugations and centrally-placed square perforations. *International Journal of Steel Structures*, 16(3), 845-855.
- [11] Bahrebar, M., Kabir, M. Z., Zirakian, T., Hajsadeghi, M., Lim, J. B. (2016). Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 584-594.
- [12] Dou, C., Jiang, Z. Q., Pi, Y. L., Guo, Y. L. (2016). Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall. *Engineering Structures*, 121, 136-146.
- [13] Rahnavard, R., Hassanipour, A., Mounesi, A. (2016). Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 441-456.
- [14] Gholhaki, M., Karimi, M., Pachideh, G. (2017). Investigation of Subpanel Size Effect on Behavior Factor of Stiffened Steel Plate Shear Wall. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, DOI: 10.22065/JSCE.2017.86522.1198.
- [15] Cao, Q., Huang, J. (2018). Experimental study and numerical simulation of corrugated steel plate shear walls subjected to cyclic loads. *Thin-Walled Structures*, 127, 306-317.
- [16] Nooralizadeh, A., Naghipour, M., Nematzadeh, M., Zamenian, H. (2017). Experimental evaluation of steel plate shear walls stiffened with folded sheets. *International Journal of Steel Structures*, 17(1), 291-305
- [17] Sadeghi Eshkevari, S., Dolatshahi, K. M., Mofid, M. (2017). Optimized design procedure for coupling panels in steel plate shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(1), e1301
- [18] Tong, J. Z., Guo, Y. L. (2018). Shear resistance of stiffened steel corrugated shear walls. *Thin-Walled Structures*, 127, 76-89.
- [19] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezaifar, O., Ghazvini, S. (2018). Specification of Response modification factor for Steel Plate Shear Wall by Incremental Dynamic Analysis Method (IDA). *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, DOI: 10.22065/JSCE.2018.100459.1346.
- [20] Gholhaki, M., Rezaifar, O., Ahmadnejad, F. (2018). Presentation of a new method for calculating the equivalent thickness to design stiffened steel shear walls using Plate frame interaction model. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, DOI: 10.22065/JSCE.2018.109765.1404.

- [21] Gholhaki, M., kheyroddin, A., Babaeizadeh, P. (2018). Assessment of Behavior Factor for Steel Plate Shear Wall with Reinforced Concrete Moment Surrounded Frame. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, DOI: 10.22065/JSCE.2018.84003.1165.
- [22] Lu, J., Yu, S., Xia, J., Qiao, X., Tang, Y. (2018). Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, 477-487.

