

بررسی اثر محل قرارگیری و تعداد بازشو در عملکرد دیوار برشی مرکب

فرشاد بهزادی نیا* (کارشناس ارشد)

علیرضا رهایی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شهریه (تابستان ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲، ص. ۵۹-۶۹

استفاده از دیوارهای برشی مرکب به عنوان سیستم مقاوم لرزه‌یی در سازه‌ها در سال‌های اخیر گسترش یافته است، اما اطلاعات کاملی در مورد عملکرد آن‌ها به خصوص در موارد وجود بازشو در دسترس نیست. در مطالعه‌ی حاضر، در ابتدا به منظور اعتبارسنجی روش تحلیل، مدل دیوار برشی مرکب با درز آزمایش شده در دانشگاه برکلی، با مدل سازی در نرم افزار آباکوس تحلیل شد که مطابقت خوبی بین مدل آزمایشگاهی و تحلیلی مشاهده شد. سپس به بررسی اثر محل قرارگیری و تعداد بازشو در عملکرد دیوارهای مذکور پرداخته شده است. بدین منظور مدل‌هایی با بازشوهایی نزدیک به تیر یا ستون و بازشوهایی مستطیلی افقی یا عمودی تهیه و تحلیل شدند. در نهایت، روند نمودار بار- تغییر مکان دیوار برشی مرکب و دلایل تغییرات سختی دیوار مذکور بررسی شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که دیوار در حالت تک بازشو و بازشوی مرکزی، کمترین کاهش سختی و مقاومت و نیز توزیع متناسب تر تنش را دارد. ضمناً کمانش ورق فولادی و جاری شدن المان‌های دیوار از عوامل تغییر سختی آن هستند.

واژگان کلیدی: دیوار برشی مرکب، اثر محل بازشو، اثر تعداد بازشو، مقاومت، سختی.

f.behzadinia@aut.ac.ir
rahai@aut.ac.ir

۱. مقدمه

دیوارهای برشی بتن‌آرمه از کارآمدترین سیستم‌های مقاوم لرزه‌یی در سازه‌ها هستند که در سال‌های اخیر دیوارهای مذکور از مصالح فلزی نیز ساخته می‌شوند. ورق‌های فولادی با ایجاد تغییر شکل‌های خارج از صفحه و در انتها کمانش قطری، بارهای زلزله را تحمل می‌کنند. راه‌های گوناگونی برای تقویت دیوارهای برشی فولادی مطرح شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به استفاده از سخت‌کننده‌ها به ویژه در شرایطی که ملاحظات معماری و تأسیساتی، لزوم استفاده از بازشو در دیوار را ایجاد می‌کند، اشاره داشت. امروزه استفاده از دیوارهای برشی مرکب به عنوان یک راه حل جایگزین مطرح است و مطالعات مختلف رفتار قابل قبول دیوارهای مذکور را تأیید می‌کند.^[۱] وجود صفحه‌ی بتنی مجاور، مد کمانشی ورق فولادی را تغییر و در نتیجه، میزان مقاومت آن را افزایش می‌دهد.

در سال ۲۰۱۳، در مقایسه بین حالت شکست دیوار برشی بتنی با بازشوهایی منظم و نامنظم، نتایج نشان داد که دیوار با بازشوهایی نامنظم در مقایسه با دیوار با بازشوهایی منظم و با آرمان‌ورگ‌گذاری مشابه، سخت‌تر و در فشار، ظرفیت‌پذیری بیشتری دارد و دیوار با بازشوهایی نامنظم در سطحی از نیروهای لرزه‌یی و جابه‌جایی‌های

افقی خراب می‌شود که بزرگ‌تر از نیروها و جابه‌جایی‌های افقی ثبت شده در حالت خرابی دیوار با بازشو منظم است.^[۲] در یک مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی (۲۰۰۹)، نیز اثر فواصل گل‌میخ‌ها در عملکرد دیوار برشی مرکب بررسی شد و با توجه به نتایج، تغییر فاصله‌ی گل‌میخ‌ها، اثر کمی در تغییر مکان جانبی درون صفحه‌ی دیوار برشی مرکب دارد، ولی در کنترل تغییر شکل خارج صفحه بسیار مؤثر است. همچنین به دلیل تغییر مکان خارج صفحه و یا خرد شدن بتن، اثر فاصله‌ی گل‌میخ‌های بیشتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر بسیار ناچیز است. ضمن اینکه با افزایش فاصله‌ی گل‌میخ‌ها قابلیت جذب انرژی بیشتر می‌شود.^[۳] در طول سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱، یکی از تحقیقات مهم انجام شده در دانشگاه برکلی کالیفرنیا، بر روی دیوار برشی مرکب صورت گرفت که هدف اصلی آن، آزمایش رفتار چرخه‌یی دو نوع دیوار برشی مرکب (با و بدون درز) بود. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت دیوار بدون درز، کمی بالاتر از مقاومت نمونه‌ی با درز بود و همچنین خرابی پائل بتنی دیوار مرکب بدون درز بیشتر است.^[۴]

همچنین در سال ۲۰۱۲، مطالعه‌یی با عنوان اثر فاصله‌ی بولت‌ها در رفتار دیوار برشی مرکب انجام شد که در آن ۱۴ نمونه‌ی یک طبقه‌ی یک دهانه با فواصل متنوع بولت‌ها در نرم‌افزار آباکوس^۱ مدل سازی و تحلیل شد. نتایج نشان می‌داد که افزایش فاصله‌ی بین بولت‌ها، عملکرد لرزه‌یی سیستم را بهبود می‌بخشد. اما افزایش فاصله بین بولت‌ها باید محدود شود، زیرا افزایش احتمال کمانش ورق فولادی در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۴/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۱۸.

DOI: 10.24200/J30.2018.1364

زیربانی‌های بین بولت‌ها منجر به هیچ بهبودی در رفتار دیوار برشی نمی‌شود. با مقایسه‌ی نتایج در منطقه‌ی کشسان به وضوح مشاهده شد که سختی اولیه‌ی سیستم با وجود تغییر فواصل بین بولت‌ها تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.^[۵]

در مطالعه‌ی تحلیلی دیگری (۲۰۱۴)، اثر بازو دایره‌ی در رفتار دیوار برشی فولادی یک طبقه بررسی و رابطه‌ی نیز برای محاسبه‌ی مقاومت برشی صفحه‌ی فولادی با بازو ارائه شد که پیش‌بینی خوبی از مقاومت برشی کاهش‌یافته‌ی دیوار برشی فولادی با الگوهای متنوع بازوها، قطر متفاوت آن‌ها، و نسبت ابعاد ورق فولادی داشت.^[۶] در یک مطالعه‌ی عددی (۲۰۱۲) نیز رفتار دیوار برشی فولادی تقویت‌شده و تقویت‌نشده با بازوهای مستطیلی بررسی و نمونه‌های با ابعاد و محل بازوهای متفاوت انتخاب شدند. با توجه به نتایج، در هر دو نمونه‌ی تقویت‌شده و تقویت‌نشده، مقدار جذب انرژی سیستم با افزایش نسبت بازو به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. سرعت کاهش انرژی جذب‌شده در نمونه‌ی تقویت‌شده کمتر از نمونه‌ی تقویت‌نشده است و بازوایی که کمترین تداخل را با عملکرد میدان کششی دارد، ایده‌آل‌ترین بازو است.^[۷]

همچنین در سال ۲۰۱۲، مطالعه‌ی روی نمونه‌های دیوار برشی فولادی با و بدون بازو انجام شد و انواع یک و چند طبقه‌ی دیوار برشی فولادی با نسبت ابعاد و ویژگی‌های بازوهای متفاوت مطالعه و مشخص شد که نسبت شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی به سبب معرفی بازوهای تقویت‌شده، همیشه کاهش یافته است و نوع، ابعاد و محل بازوهای تقویت‌شده به خودی خود تأثیری در مقاومت سیستم ندارد.^[۸] در سال ۲۰۱۴ نیز در یک مطالعه‌ی تجربی، اثر دو بازو در رفتار سازه‌ی دیوارهای برشی فولادی بررسی شد و تفاوت بین سه نمونه، فاصله‌ی بین دو بازو و نزدیکی آن‌ها به ستون‌ها بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت برشی نهایی، سختی، و جذب انرژی در ۳ نمونه با بازو یکسان است و فاصله‌ی بین دو بازو، اثری در مقادیر مذکور ندارد. وجود بازو منجر به کاهش سختی اولیه و مقاومت برشی نهایی به ترتیب به میزان ۲۲ و ۳۶ درصد نسبت به نمونه‌ی بدون بازو شده است.^[۹]

همچنین در سال ۱۹۹۸، نتایج بارگذاری چرخه‌ی یک نمونه‌ی ۴ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی منتشر شد و نتایج نشان داد که قبل از خرابی، نمونه رفتار شکل‌پذیری بسیار دارد و خرابی در ستون، احتمالاً در اثر تمرکز تنش در محل اتصال به دستگاه آزمایش است. به هر حال حتی با وجود خرابی زود هنگام ستون، رفتار رفت و برگشتی نمونه، افزایش مقاومت، و شکل‌پذیری بسیار خوبی را نشان می‌دهد.^[۱۰] در سال ۱۹۹۸ مطالعاتی در آمریکا بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام شد و قسمت آزمایشگاهی آن شامل بارگذاری چرخه‌ی افقی در قسمت بام ۶ نمونه‌ی ۳ طبقه‌ی یک دهانه بود. بر اساس رفتار ۶ نمونه‌ی مذکور، نتیجه گرفته شد که وقتی یک صفحه‌ی فلزی بدون سخت‌کننده به عنوان دیوار برشی به کار می‌رود، رفتار غیرکشسان با جاری شدن دیوار آغاز می‌شود و مقاومت سیستم را تشکیل مفصل خمیری در ستون‌ها تعیین می‌کند. همچنین نتیجه‌گیری شد که وقتی صفحات نسبتاً نازک به کار می‌روند، مد خرابی را ناپایداری ستون‌ها تعیین می‌کند و میزان افزایش مقاومت سیستم در اثر افزایش ضخامت صفحات فولادی قابل اغماض است.^[۱۱]

در سال ۲۰۰۰، نیز برای ارزیابی عملکرد دیوارهای برشی فولادی، مطالعات چرخه‌ی آزمایشگاهی بر روی ۳ نمونه‌ی مختلف انجام شد: ۲ نمونه‌ی ۱ طبقه و ۱ نمونه‌ی ۴ طبقه. نمونه‌های ۱ طبقه با سختی اولیه‌ی کافی و شکل‌پذیری مناسب، رفتار مطلوبی داشتند. اما رفتار نمونه‌ی ۴ طبقه، مطلوب نبود. در نمونه‌های ۱ طبقه، سلسله‌ی تسلیم اعضا ایده‌آل بود. اما در نمونه‌ی ۴ طبقه، تسلیم ابتدا در المان‌های

مرزی اتفاق افتاد که مطلوب نبود. میدان کششی ناقص نیز در ورق پرکننده گزارش شد.^[۱۲]

همچنین در یک پژوهش آزمایشگاهی (۲۰۱۳)، رفتار لرزه‌ی دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با و بدون بازو بررسی شد. مقاومت، سختی، شکل‌پذیری، و جذب انرژی براساس نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ی معکوس بر روی ۳ نمونه ارزیابی شد. دو نمونه از دیوارها با بازو و یک نمونه بدون بازو ساخته شد. نتایج آزمایش نشان داد که دیوار برشی فولادی تقویت‌شده، رفتار لرزه‌ی رضایت‌بخش داشته است و همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقاومت و سختی دیوار در اثر ایجاد بازو کاهش یافته است.^[۱۳]

در سال ۲۰۱۱، نیز در یک مطالعه‌ی تجربی، رفتار دیوار برشی فولادی در شرایطی که فقط به تیر وصل شده بود، بررسی شد و نتایج نشان داد که نمونه‌ی مذکور، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی خوبی دارد. همچنین ظرفیت اتلاف انرژی نمونه با سخت‌کننده، بیشتر از نمونه بدون سخت‌کننده بود.^[۱۴]

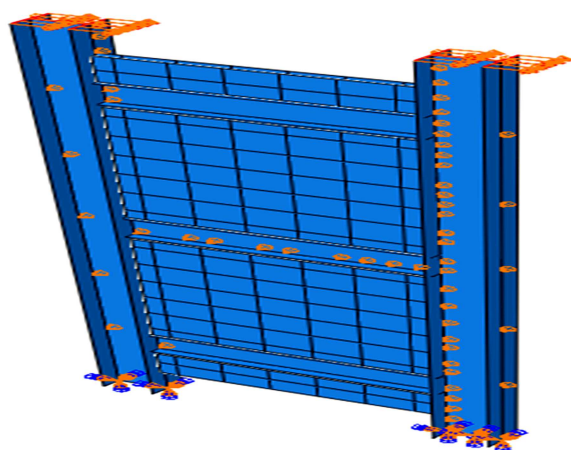
یک مطالعه‌ی تحلیلی (۲۰۱۵) نیز بر روی دیوارهای برشی فولادی ساده و موج‌دار با و بدون بازو انجام شد که در آن پارامترهای مورد مطالعه: ضخامت ورق، زاویه موج، ابعاد و محل بازو بودند. نتایج نشان داد که دیوار برشی فولادی با موج دوزنقه‌ی، سختی جانبی اولیه، جذب انرژی و شکل‌پذیری را افزایش، ولی مقاومت نهایی را کاهش می‌دهد. همچنین دیوار برشی فولادی موج‌دار نسبت به یک دیوار برشی فولادی ساده‌ی سخت‌نشده، مقاومت نهایی و نقطه‌ی زوال را به تعویق می‌اندازد که برای مقاومت لرزه‌ی یک مشخصه‌ی مطلوب است.^[۱۵]

همچنین در سال ۲۰۱۶، در یک مطالعه‌ی تحلیلی بر روی دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ی سوراخ‌دار، رفتار چرخه‌ی و توانایی جذب انرژی دیوارهای مذکور بررسی شد و نتایج مطالعه نشان داد که پارامترهایی نظیر: ضخامت و زاویه موج ورق و ابعاد بازو در عملکرد هیستریک دیوارها بسیار مؤثر هستند و افزایش ابعاد بازو، منجر به کاهش جذب انرژی و افزایش ضخامت ورق، منجر به بهبود عملکرد دیوار و افزایش جذب انرژی می‌شود.^[۱۶] در ادامه‌ی مطالعات ذکرشده، در برنامه‌ی پژوهشی حاضر، در ابتدا به اعتبارسنجی روش تحلیل پرداخته شده است. سپس اثر محل قرارگیری و تعداد بازو در عملکرد دیوار برشی مرکب مطالعه و در نهایت دلایل تغییر سختی دیوار بررسی شده است.

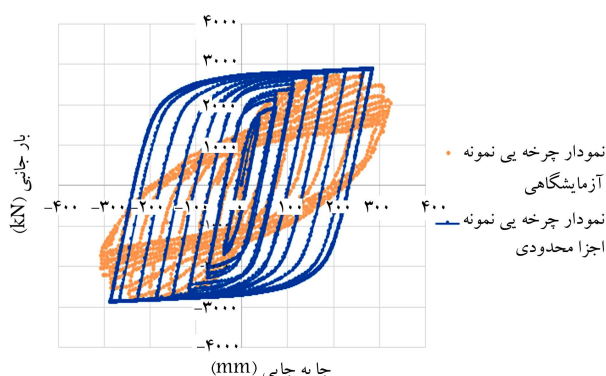
۲. اعتبارسنجی

در ابتدا به معرفی مختصری از دیوار برشی مرکب پرداخته شده است. دیوار برشی مرکب، شامل یک صفحه‌ی فولادی است که معمولاً در طرفین آن از پوشش بتنی استفاده می‌شود، البته پوشش بتنی مذکور می‌تواند فقط در یک طرف صفحه‌ی فولادی نیز قرار گیرد و اتصال بتن پوشش به صفحه‌ی فولادی با زانده‌های برشی (برش‌گیرها) مانند گل میخ و ... انجام شود. استفاده از سیستم‌های ذکرشده باعث افزایش سختی و شکل‌پذیری به صورت هم‌زمان و نیز موجب کاهش وزن ساختمان می‌شود. همچنین در مقابل بارهای لرزه‌ی، رفتار بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهند. سطح زیر منحنی بار - تغییر مکان سیستم‌های مرکب مذکور، نشان‌گر شکل‌پذیری بالای آن‌ها در مرحله‌ی غیرخطی و خمیری است. در شکل ۱، نمونه‌ی از یک دیوار برشی مرکب مشاهده می‌شود.

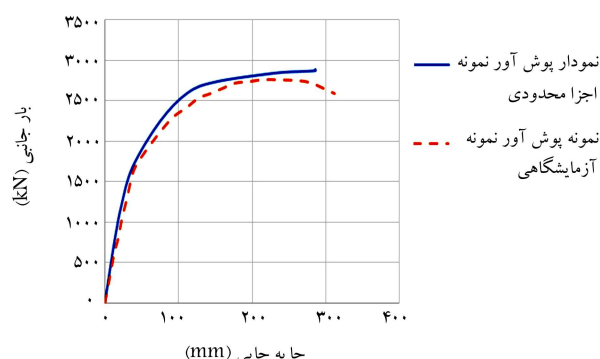
به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی در نرم‌افزار، از یک نمونه‌ی آزمایش‌شده در دانشگاه برکلی در کالیفرنیا (شکل ۲) استفاده شده است.^[۱] نمونه‌ی آزمایش دیوار



شکل ۳. شرایط مرزی مدل اعتبارسنجی در نرم افزار.



شکل ۴. مقایسه ی نمودار چرخه یی نمونه ی آزمایشگاهی و نمونه ی اجزاء محدودی.

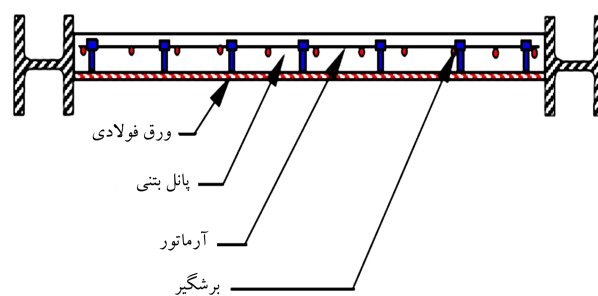


شکل ۵. مقایسه ی نمودار پوش آور نمونه ی آزمایشگاهی و نمونه ی اجزاء محدودی.

در شکل ۴، نمودار چرخه یی بار- تغییرمکان حاصل از آزمایشگاه و نرم افزار اجزاء محدودی و در نهایت شکل ۵، مقایسه ی پوش نمودار بار- تغییرمکان حاصل از دو نمونه ی مذکور مشاهده می شود. همان گونه که مشخص است، نمودار بار- تغییرمکان حاصل از مدل سازی مطابقت خوبی با نمودار حاصل از آزمون آزمایشگاهی دارد.

۳. مدل ها و روش پژوهش

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر بازشو، یک دیوار برشی مرکب از نوع با درز، ۱ طبقه ی ۱ دهانه، با ابعاد، مصالح و مقاطعی مشابه نمونه ی آزمایشگاهی مورد بحث



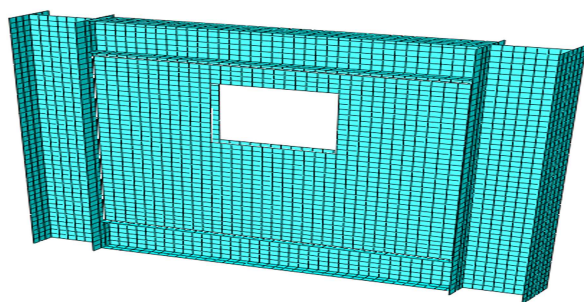
شکل ۱. نمونه یی از یک دیوار برشی مرکب.



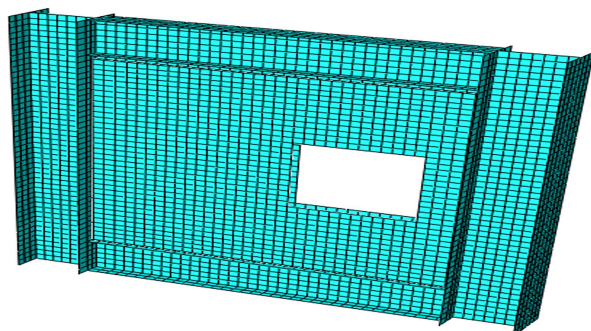
شکل ۲. نمونه ی آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب.

برشی مرکب ۳ طبقه و ۱ دهانه با مقیاس ۵/۱ و از نوع با درز به مقدار ۳۲ میلی متر است که نمودار بار- تغییرمکان نمونه ی مذکور با خروجی نرم افزار مقایسه شده است. فولاد به کار رفته در ورق فولادی از نوع ASTM A3۶ و تیرها و ستون ها از نوع ASTM A5۷۲ Grade ۵۰ و بتن دیوارها از نوع بتن پیش ساخته است که با استفاده از بولت ASTM A3۲۵ به قطر ۱۲/۷ میلی متر به ورق فولادی متصل شده است. بتن استفاده شده در دیوار با مقاومت مشخصه ی ۲۸ مگاپاسکال و اتصال تیر به ستون نیز از نوع گیردار بود. ابعاد ورق فولادی ۱۸۲۰ × ۱۸۰۰ میلی متر و ضخامت ورق فولادی و پانل بتنی به ترتیب ۴/۸ و ۷۵ میلی متر بود.

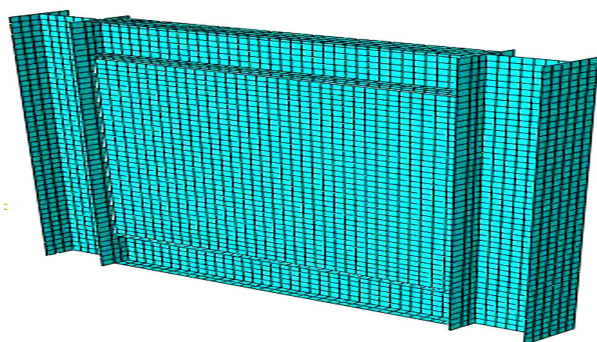
نمونه ی شرح داده شده ی اخیر با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است. برای مصالح فولادی، مدول کشسانی برابر با ۲۰۰۰۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع و ضریب پواسون ۰/۳ و برای بتن با توجه به مقاومت مشخصه، مدول کشسانی برابر با ۲۶۴۵۰ نیوتن بر میلی متر مربع و ضریب پواسون ۰/۲ در نظر گرفته شده است. برای تعریف رفتار بتن در نرم افزار از مدل خرابی خمیری بتن^۲ استفاده شده است. بارگذاری نمونه در نرم افزار به صورت کنترل جابه جایی معرفی شده است. بدین منظور با تعریف دامنه^۳ در ۵۰ سیکل در نرم افزار چرخه ی بارگذاری مطابق با آزمایشگاه به نمونه اعمال شده است. در همه ی نمونه های مورد بررسی در مطالعه ی حاضر، برای مدل سازی ورق فولادی، پانل بتنی، تیر و ستون از المان Shell, Homogeneous (S4R) و برای بولت ها از المان Beam, Constant (B3۱) استفاده شده است. ضمن اینکه در مدل سازی نمونه ها از مدل کردن ورق اتصال^۴ صفحه ی فولادی و المان های مرزی صرف نظر شده است. در نمونه ها، تمامی المان ها به جز لایه ی بتنی با فرایند Merge به هم متصل شده اند و برای تعریف Interaction موجود بین لایه ی بتنی و ورق فولادی از Hard Contact استفاده شده است. نمونه در قسمت پای ستون ها به صورت گیردار است و جان ستون ها و تیر میانی در جهت خارج صفحه، مقید شده اند. بارگذاری نیز به بالای ستون ها مطابق شکل ۳ اعمال شده است.



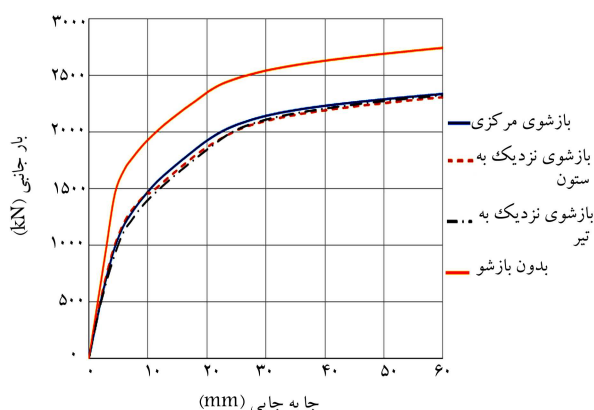
شکل ۸. دیوار با بازشو نزدیک به تیر.



شکل ۹. دیوار با بازشو نزدیک به ستون.



شکل ۱۰. دیوار بدون بازشو.



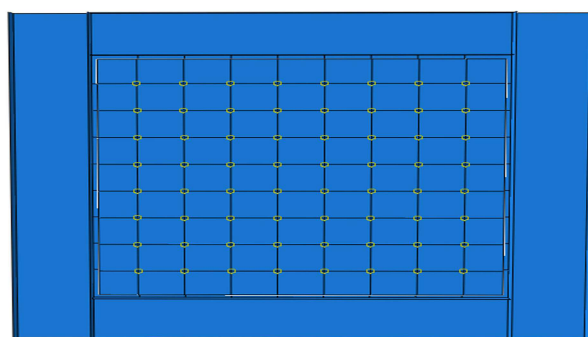
شکل ۱۱. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های با بازشوی مرکزی، نزدیک به تیر، نزدیک به ستون و بدون بازشو.

در بخش اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. در بخش اول مطالعه، به منظور بررسی اثر محل قرارگیری بازشو در رفتار دیوار برشی مرکب، ابتدا نمونه‌یی با بازشو که مساحت آن معادل ۱۰٪ مساحت صفحه‌ی فولادی بود و در مرکز دیوار قرار داشت، مدل‌سازی شد و سپس با هدف مطالعه‌ی اثر محل قرارگیری آن، دو نمونه با همان مقدار بازشو در نرم‌افزار ساخته شد که محل قرارگیری بازشو به ترتیب به ستون و تیر نزدیک بود. در بخش دوم مطالعه، نمونه‌یی با بازشو که مساحت آن معادل ۳۶٪ مساحت صفحه‌ی فولادی بود و در مرکز دیوار قرار داشت، مدل‌سازی شد و سپس با هدف مطالعه‌ی اثر تعداد بازشو در رفتار دیوار برشی مرکب، نمونه‌یی با دو بازشوی افقی ساخته شد که مجموع مساحت آن‌ها نیز ۳۶٪ مساحت دیوار بود. مطالعه‌ی حاضر بار دیگر با بررسی نمونه‌یی که دو بازشوی قائم با همان مجموع مساحت داشت، تکرار شد. در نهایت به روند نمودار بار- تغییر مکان دیوار برشی مرکب پرداخته شد. لازم به ذکر است در تمامی نمونه‌ها فواصل بولت‌ها ۲۰۰ میلی‌متر بود که به طور نمونه در شکل ۶، در نمونه‌ی بدون بازشو نمایش داده شده است. همچنین تغییر مکان ۶۰ میلی‌متر نیز معیار پایان آنالیز پوش‌آور است. نوع مش در تمامی نمونه‌ها از نوع چهار وجهی (Quad) و ابعاد مش ۵۰ × ۵۰ میلی‌متر بوده است.

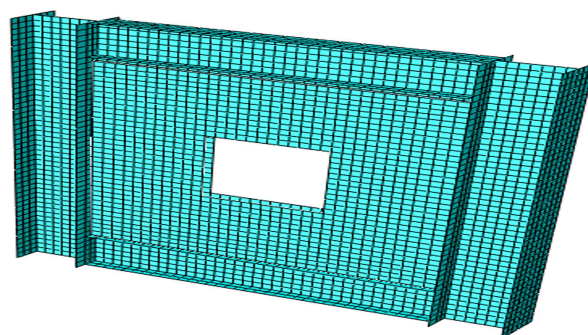
۱.۳. اثر محل بازشو

در بخش حاضر، به اثر محل بازشو در رفتار دیوار برشی مرکب پرداخته شده است. بدین منظور در بازشوی مربعی ۱۰٪ (نسبت مساحت بازشو به مساحت صفحه‌ی فولادی ۱/۱۰ است)، اثر بازشوی نزدیک به تیر و نزدیک به ستون که به فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متر از تیر یا ستون قرار دارند، در رفتار دیوار برشی مرکب بررسی و با نمونه با بازشوی مرکزی مقایسه و نمودار بار- تغییر مکان ۴ نمونه‌ی مذکور ارائه شده است (شکل‌های ۷ الی ۱۱).

مطابق شکل ۱۱، به عنوان نتیجه‌ی اولیه، وجود بازشو منجر به کاهش مقاومت و

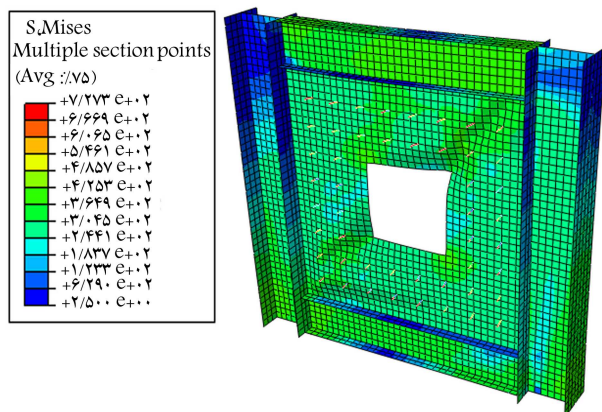


شکل ۶. نمایش فواصل بولت‌ها در نمونه‌ی بدون بازشو.

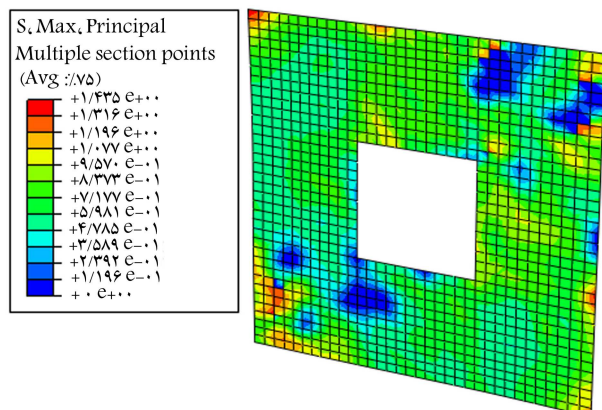


شکل ۷. دیوار با بازشو در مرکز.

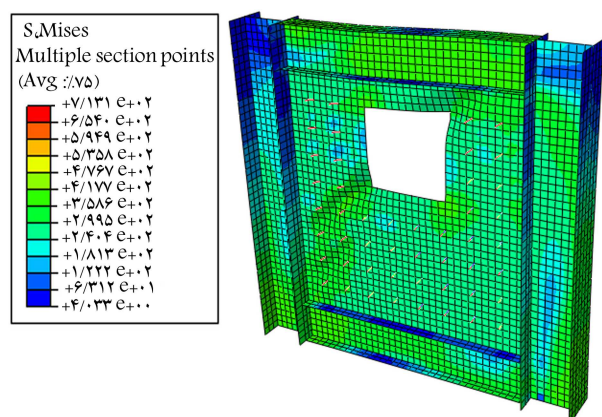
- بیشترین تنش ایجاد شده در المان صفحه‌ی فولادی و پانل بتنی دیوار در نمونه‌های با بازشو در اطراف بازشو و در نمونه‌ی بدون بازشو، اطراف محلی که صفحه‌ی فولادی دچار کماتش شده، اتفاق افتاده است.
- توزیع تنش در حالت بدون بازشو بهتر و در نمونه‌ی بازشوی مرکزی نسبت به دو نمونه‌ی بازشوی نزدیک به تیر و نزدیک به ستون، مطلوب‌تر صورت گرفته است.
- در المان ستون، بیشترین تنش در نمونه بدون بازشو و کمترین تنش در نمونه با بازشوی نزدیک به ستون است که اختلاف دو تنش مذکور $2/3\%$ بوده است.



شکل ۱۴. توزیع تنش کل دیوار با بازشوی مرکزی به جز پانل بتنی.



شکل ۱۵. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بازشوی مرکزی.



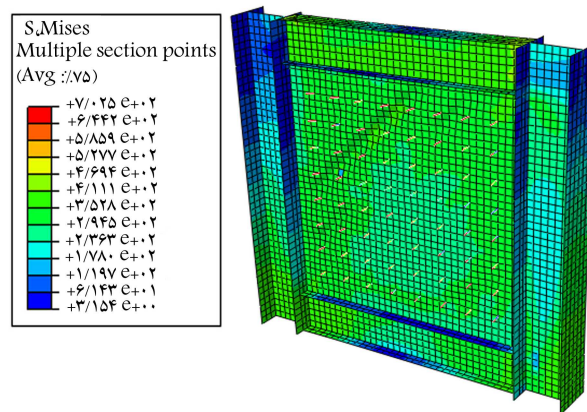
شکل ۱۶. توزیع تنش کل دیوار با بازشوی نزدیک به تیر به جز پانل بتنی.

سختی دیوار در مقایسه با نمونه‌ی بدون بازشو شده است. اختلاف مقاومت و سختی نمونه‌ی بدون بازشو و نمونه‌ی با بازشوی مرکزی به ترتیب برابر با ۱۵ و $23/4\%$ درصد بوده است. مقاومت و سختی دیوار در دو حالت بازشو نزدیک به تیر و بازشو نزدیک به ستون نسبت به نمونه‌ی بازشو در مرکز نیز کمتر شده است. در نمونه‌ی با بازشو نزدیک به تیر نسبت به نمونه‌ی با بازشوی مرکزی، کاهش مقاومت بسیار ناچیز و کاهش سختی به میزان $5/38\%$ بوده است. همچنین در نمونه‌ی بازشو نزدیک به ستون نسبت به نمونه با بازشوی مرکزی، کاهش مقاومت $1/5\%$ بوده و در سختی تغییری احساس نشده است. برای بررسی دقیق‌تر اثر محل بازشو، به اثر میدان کششی، جذب انرژی و تنش‌های ایجاد شده در نمونه‌ها پرداخته شده است (شکل‌های ۱۲ الی ۱۹).

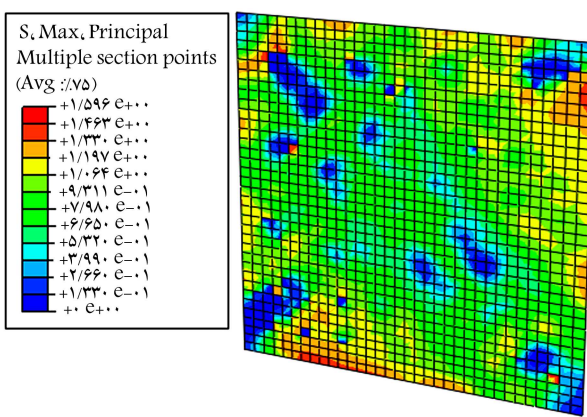
مقادیر پیشینه‌ی تنش‌های ایجاد شده در المان‌های تمامی نمونه‌ها برداشت و در جدول ۱ خلاصه شده است.

با توجه به جدول ۱ و شکل‌های ۱۲ الی ۱۹، این موارد برداشت شده است:

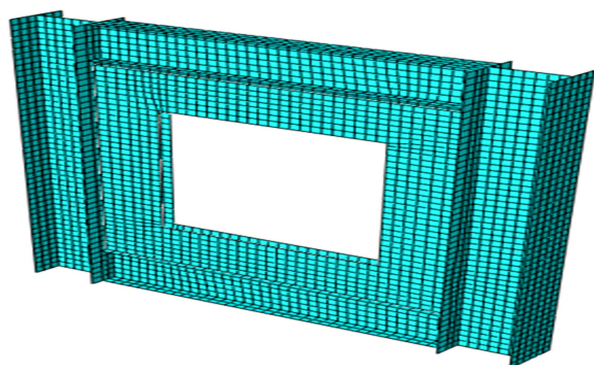
- در هر دو نمونه‌ی نزدیک به تیر و ستون، موج تشکیل شده در صفحه‌ی فولادی از راستای قطار اصلی خارج شده است.
- بیشترین تنش ایجاد شده در المان ستون دیوار در تمامی نمونه‌ها در پای ستون اتفاق افتاده است.
- بیشترین تنش ایجاد شده در المان تیر دیوار در تمامی نمونه‌ها در محل اتصال تیر و ستون اتفاق افتاده است.



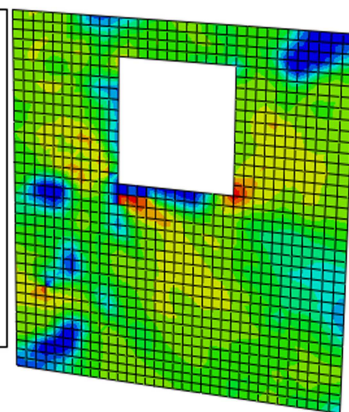
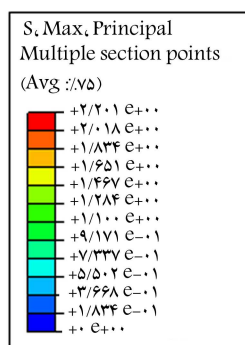
شکل ۱۷. توزیع تنش کل دیوار بدون بازشو به جز پانل بتنی.



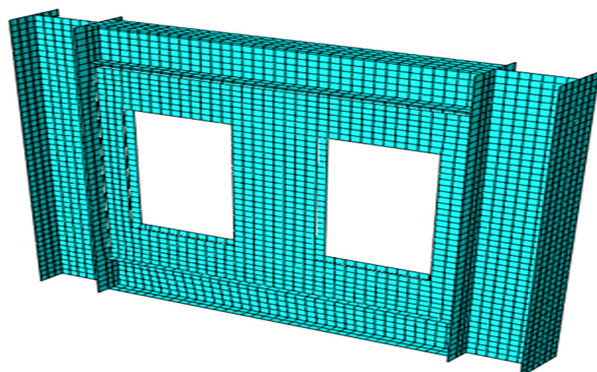
شکل ۱۸. توزیع تنش پانل بتنی دیوار بدون بازشو.



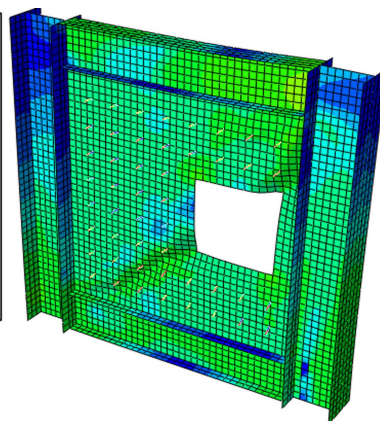
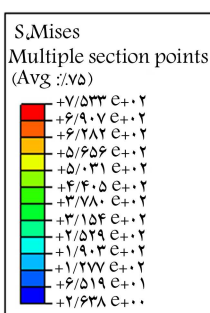
شکل ۲۰. دیوار با بازشوی مربعی تک.



شکل ۱۷. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بازشوی نزدیک به تیر.



شکل ۲۱. دیوار با بازشوهای عمودی.



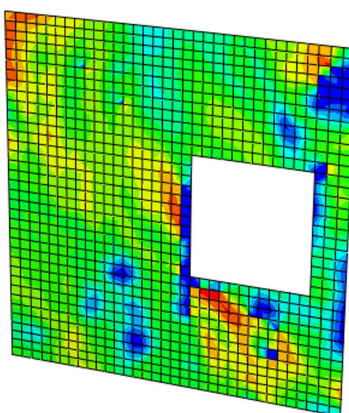
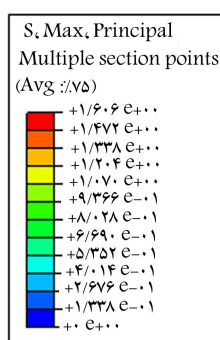
شکل ۱۸. توزیع تنش کل دیوار با بازشوی نزدیک به ستون به جز پانل بتنی.

- در المان پانل بتنی، بیشترین تنش در نمونه‌ی بازشوی نزدیک به تیر و کمترین تنش در نمونه‌ی با بازشوی مرکزی بوده است که اختلاف آن‌ها ۵۳٫۸٪ بوده است.
- نسبت جذب انرژی نمونه‌های با بازشوی مرکزی، با بازشوی نزدیک به تیر و با بازشوی نزدیک به ستون نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو به ترتیب برابر ۰٫۸، ۰٫۸ و ۰٫۸۱ بوده است که نشان می‌دهد بین نمونه‌های با بازشو، نمونه با بازشوی مرکزی بیشترین جذب انرژی را داشته است.

۲.۳. اثر تعداد بازشو

در بخش حاضر، به بررسی اثر تعداد بازشو در رفتار دیوار برشی مرکب پرداخته شده است. بدین منظور در بازشوی مربعی ۳۶٪ (نسبت مساحت بازشو به مساحت صفحه‌ی فولادی ۰٫۳۶ است)، با ثابت نگه داشتن مساحت بازشو و تعداد بولت، ۱ بازشو به ۲ بازشو در دو حالت توزیع در عرض دیوار (بازشوهای عمودی) و توزیع در ارتفاع دیوار (بازشوهای افقی) تبدیل شده است. عرض فاصله بین ۲ بازشو ۴۰۰ میلی‌متر بوده است (شکل‌های ۲۰ الی ۲۲). در شکل ۲۳، نمودار بار - تغییرمکان نمونه‌های مذکور در کنار نمونه‌ی بدون بازشو مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۲۳، مقاومت و سختی نمونه با تک بازشو نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو به ترتیب به مقدار ۳۳٫۸ و ۵۸٫۳ درصد کاهش پیدا کرده است. با تبدیل ۱ بازشو به ۲ بازشو، مقاومت و سختی نمونه مجدداً کاهش پیدا کرده است. در نمونه‌ی که بازشوها در عرض دیوار توزیع شده‌اند (شکل ۲۱)، مقاومت و سختی به ترتیب به میزان ۳٫۳ و ۸٫۹ درصد و در نمونه‌ی که در آن بازشوها در ارتفاع دیوار توزیع شده‌اند (شکل ۲۲)، مقاومت و سختی به ترتیب به میزان ۴٫۱ و ۱۶٫۷ درصد نسبت به نمونه با بازشوی تک، کاهش پیدا کرده‌اند. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع

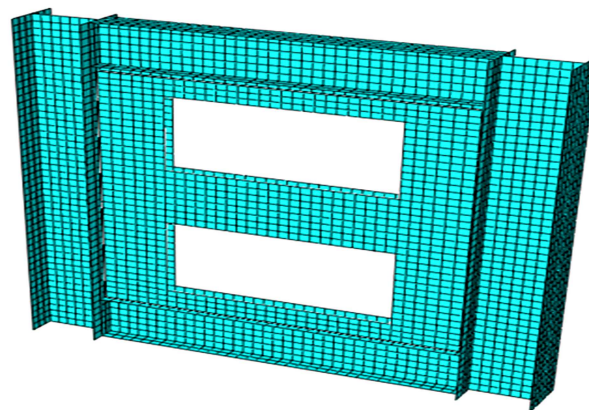
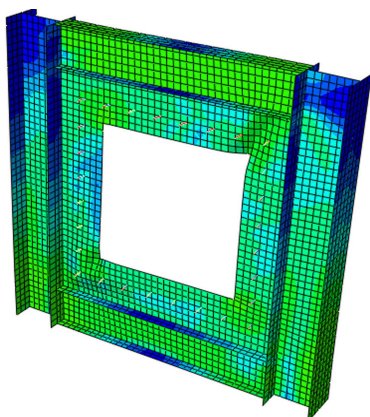
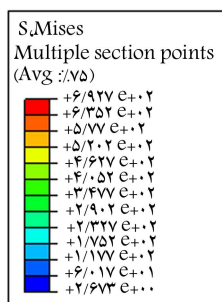


شکل ۱۹. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بازشوی نزدیک به ستون.

- در المان تیر، بیشترین تنش در نمونه‌ی بازشوی نزدیک به ستون و کمترین تنش در نمونه‌ی با بازشوی نزدیک به تیر اتفاق افتاده است که اختلاف دو تنش ذکر شده ۱۴٫۵٪ بوده است.
- در المان بولت، بیشترین تنش در نمونه‌ی بازشوی نزدیک به ستون و کمترین تنش در نمونه‌ی بدون بازشو بوده است که اختلاف آن‌ها ۷٫۲٪ به دست آمده است.
- در المان صفحه‌ی فولادی، بیشترین تنش در نمونه با بازشوی مرکزی و کمترین تنش در نمونه بدون بازشو بوده است که اختلاف دو تنش مذکور، ۸٫۷٪ به دست آمده است.

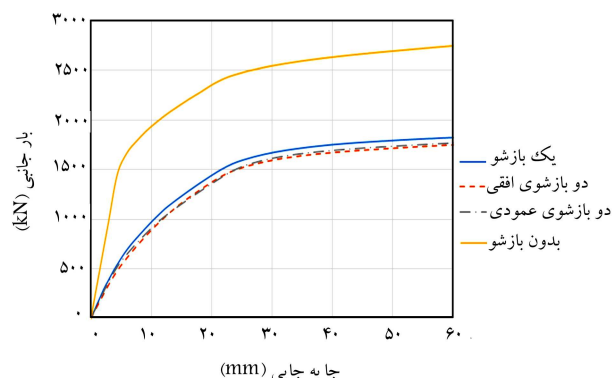
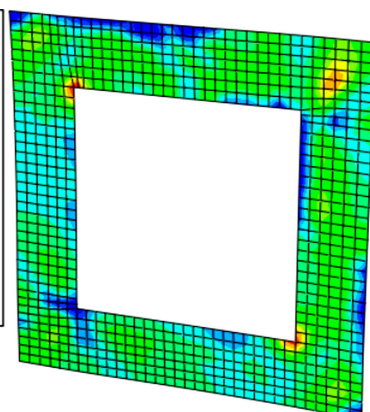
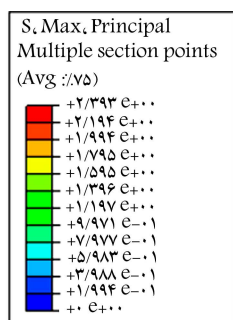
جدول ۱. بیشینه‌ی تنش‌های المان‌های دیوار - بر حسب مگاپاسکال.

المان	نمونه			
	ستون	تیر	بولت	صفحه‌ی فولادی
بدون بارشو	۳۹۷	۴۵۴	۷۰۲	۳۷۹
با بارشوی مرکزی	۳۹۱	۴۳۱	۷۲۷	۴۵۰
با بارشوی نزدیک به تیر	۳۸۹	۴۱۲	۷۱۳	۴۳۲
با بارشوی نزدیک به ستون	۳۸۸	۴۷۲	۷۵۳	۴۴۷



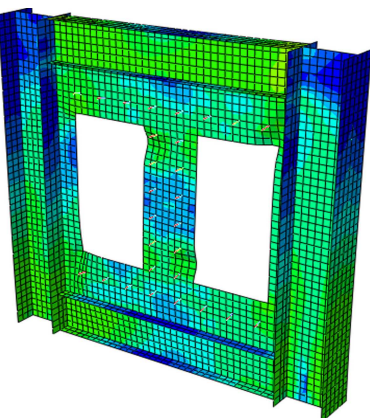
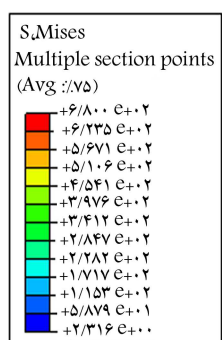
شکل ۲۲. دیوار با بارشوهای افقی.

شکل ۲۴. توزیع تنش کل دیوار با بارشوی تک به جز پانل بتنی.



شکل ۲۳. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های با ۱ و ۲ بارشو و بدون بارشو.

شکل ۲۵. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بارشوی تک.



شکل ۲۶. توزیع تنش کل دیوار با بارشوهای عمودی به جز پانل بتنی.

به اثر میدان کششی، جذب انرژی، و تنش‌های ایجادشده در نمونه‌ها پرداخته شده است (شکل‌های ۲۴ الی ۲۹). مقادیر بیشینه‌ی تنش‌های ایجادشده در المان‌های تمامی نمونه‌ها برداشت و در جدول ۲ خلاصه شده است.

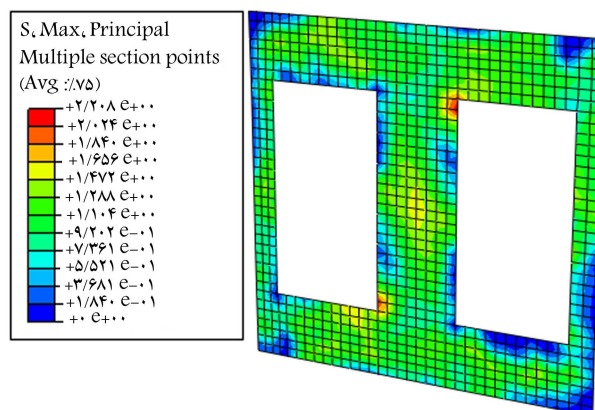
با توجه به جدول ۲ و شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۲۴ الی ۲۹، این موارد برداشت شده است:

- در نمونه‌های با بارشوهای افقی و عمودی، تشکیل میدان قطری با اختلال مواجه شده است.
- توزیع تنش در حالت بدون بارشو بهتر و در نمونه‌ی با بارشوی تک نسبت به دو نمونه با بارشوهای افقی و عمودی مطلوب‌تر صورت گرفته است.
- بیشترین تنش ایجادشده در المان ستون دیوار در تمامی نمونه‌ها در پای ستون اتفاق افتاده است.
- بیشترین تنش ایجادشده در المان تیر دیوار در تمامی نمونه‌ها در محل اتصال تیر و ستون اتفاق افتاده است.

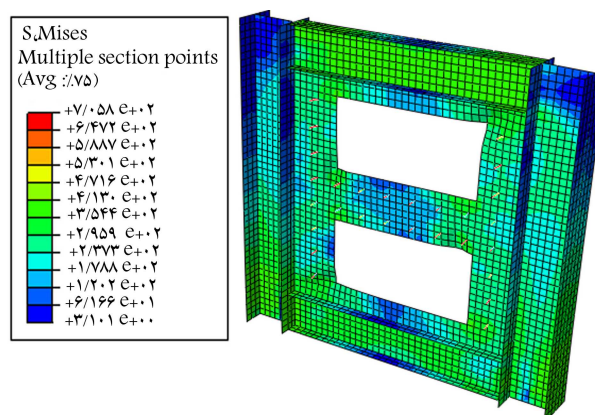
جدول ۲. بیشینه‌ی تنش‌های المان‌های دیوار - برحسب مگاپاسکال.

المان	نمونه			
	ستون	تیر	بولت	صفحه‌ی فولادی
بدون بازشو	۳۹۷	۴۵۴	۷۰۲	۳۷۹
با بازشوی مرکزی	۳۷۶	۴۰۹	۶۹۲	۴۴۹
با بازشوهای عمودی	۳۷۵	۴۳۷	۶۸۰	۴۱۰
با بازشوهای افقی	۳۷۵	۴۱۱	۷۰۵	۴۰۰

- بیشترین تنش ایجاد شده در المان صفحه‌ی فولادی و پانل بتنی دیوار در نمونه‌های با بازشو در اطراف بازشو و در نمونه بدون بازشو، اطراف محلی که صفحه‌ی فولادی دچار کماتش شده، اتفاق افتاده است.
- در المان ستون، بیشترین تنش در نمونه‌ی بدون بازشو و کمترین تنش در نمونه با بازشوهای افقی و نمونه با بازشوهای عمودی است که اختلاف این دو تنش ۵/۸٪ است.
- در المان تیر، بیشترین تنش در نمونه‌ی بدون بازشو و کمترین تنش در نمونه‌ی بازشوی مرکزی بوده که اختلاف دو تنش مذکور ۱۱٪ به‌دست آمده است.
- در المان بولت، بیشترین تنش در نمونه با بازشوهای افقی و کمترین تنش در نمونه‌ی با بازشوهای عمودی اتفاق افتاده است که اختلاف آن‌ها ۳/۶٪ بوده است.
- در المان صفحه‌ی فولادی، بیشترین تنش در نمونه با بازشوی مرکزی و کمترین تنش در نمونه‌ی بدون بازشو بوده است، که اختلاف آن‌ها ۱۸/۴٪ به‌دست آمده است.
- در المان پانل بتنی، بیشترین تنش در نمونه با بازشوی مرکزی و کمترین تنش در نمونه‌ی بدون بازشو بوده است، که اختلاف دو تنش مذکور ۵٪ به‌دست آمده است.
- نسبت جذب انرژی نمونه‌های با بازشوی مرکزی، با بازشوهای قائم و با بازشوهای افقی نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو به ترتیب برابر ۶/۶، ۵/۸ و ۵/۷ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد بین نمونه‌های با بازشو، نمونه با بازشوی مرکزی بیشترین جذب انرژی را داشته است.



شکل ۲۷. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بازشوهای عمودی.

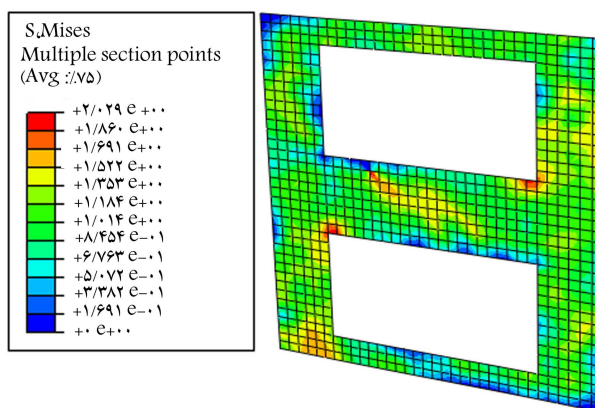


شکل ۲۸. توزیع تنش کل دیوار با بازشوهای افقی به‌جز پانل بتنی.

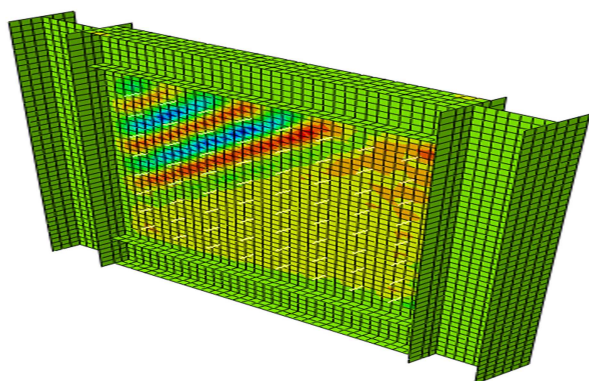
۳.۳. بررسی روند نمودار بار - تغییرمکان

در بخش حاضر، به منظور فهم عمیق‌تر از رفتار دیوار برشی مرکب در حین بارگذاری، به بررسی جامع روند تغییرات نمودار بار - تغییرمکان با تأکید بیشتر در تغییرات سختی دیوار پرداخته شده است. بدین منظور با توجه به شباهت کلی روند نمودارها به بررسی یک نمونه بسنده و نمونه‌ی بدون بازشو تحلیل شده است.

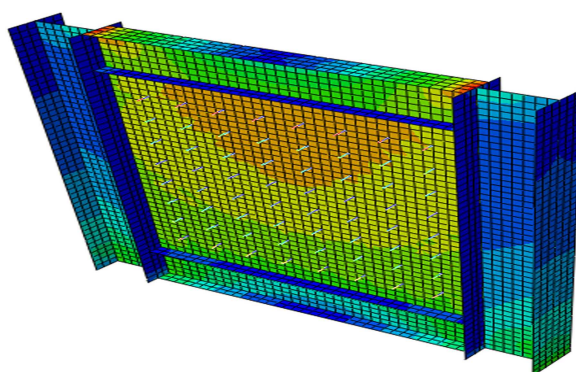
با توجه به نمودار بار - تغییرمکان دیوار بدون بازشو (شکل‌های ۱۱ یا ۲۳، نمودار مربوط به نمونه‌ی بدون بازشو)، اولین تغییر مشهود سختی در حدود تغییرمکان ۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ مشاهده می‌شود، توزیع تنش قبل و بعد از تغییرمکان مذکور به کلی تغییر کرده است که قبل از آن، توزیع تنش یکنواخت نبوده و دیوار تمرکز تنش داشته است، در صورتی که دقیقاً بعد از تغییرمکان ذکر شده، دیوار توزیع تنش یکنواخت‌تر داشته است. با بررسی وضعیت جاری شدن المان‌های دیوار مشاهده شد که شروع تسلیم شدن در نقاطی از دیوار، دقیقاً در همان محدوده اتفاق افتاده است (شکل‌های ۳۲ و ۳۳).



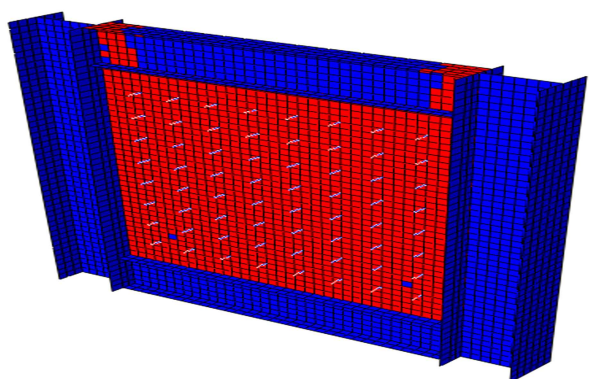
شکل ۲۹. توزیع تنش پانل بتنی دیوار با بازشوهای افقی.



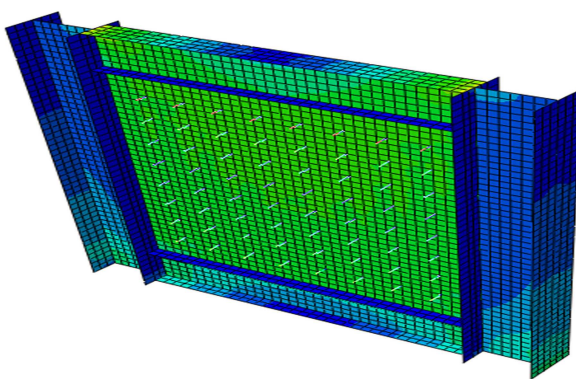
شکل ۳۴. موج برداشتن ورق در محدوده دومین تغییر سختی.



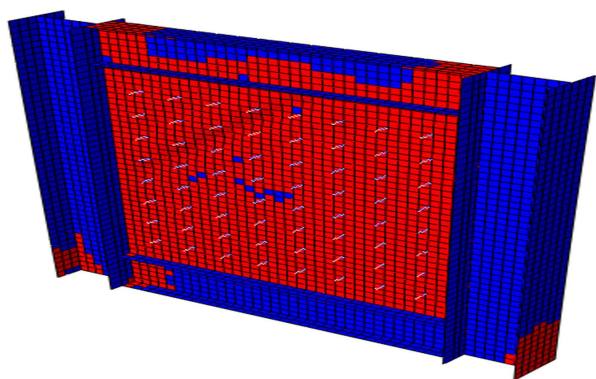
شکل ۳۵. وضعیت توزیع تنش قبل از اولین تغییر سختی.



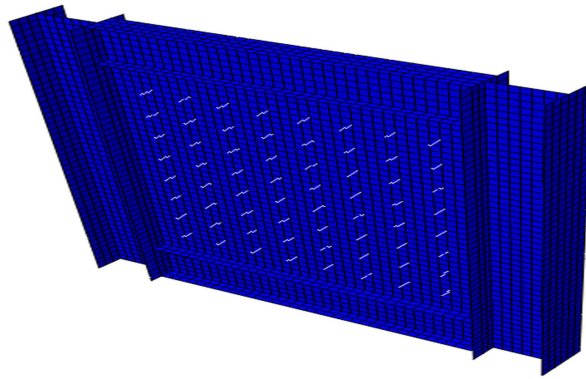
شکل ۳۶. وضعیت جاری شدن المان‌های دیوار قبل از دومین تغییر سختی.



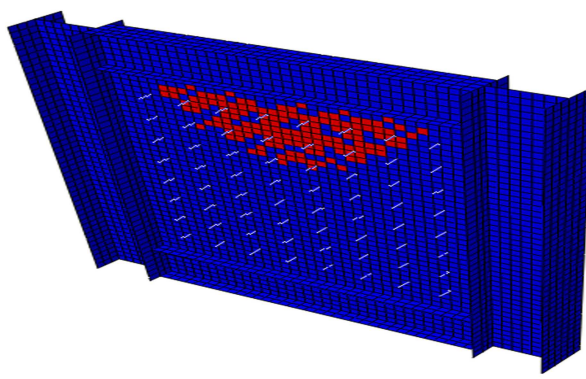
شکل ۳۷. وضعیت توزیع تنش بعد از اولین تغییر سختی.



شکل ۳۸. وضعیت جاری شدن المان‌های دیوار بعد از دومین تغییر سختی.



شکل ۳۹. وضعیت جاری شدن المان‌های دیوار قبل از اولین تغییر سختی.



شکل ۴۰. وضعیت جاری شدن المان‌های دیوار بعد از اولین تغییر سختی.

تغییر سختی مشهود بعدی دیوار مربوط به حدود تغییرمکان ۲۰ میلی‌متر است که در محدوده آن مشاهده می‌شود که ورق فولادی شروع به موج برداشتن کرده است (شکل ۳۴). از طرفی وضعیت تسلیم شدن المان‌ها نیز در محدوده مذکور، بحرانی‌تر شده و این مسئله در جان تیر فوقانی پیشرفت و به پای ستون‌ها نیز سرایت کرده است (شکل‌های ۳۵ و ۳۶).

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر محل قرارگیری بازشو و تعداد بازشو در عملکرد و همچنین دلایل تغییرات سختی دیوار برشی مرکب بررسی شده است. نمودار بار - تغییرمکان،

اتصال تیروستون در اطراف بازشو و در اطراف ناحیه‌ی دچارکمانش‌شده‌ی ورق فولادی اتفاق افتاده است.

۶. در بین نمونه‌های بدون بازشو، با بازشوی مرکزی، با بازشوی نزدیک به تیر و با بازشوی نزدیک به ستون، اختلاف بیشینه و کمینه‌ی تنش در المان ستون برابر $2/3\%$ ، در المان تیر $14/5\%$ ، در المان بولت $7/2\%$ ، در صفحه‌ی فولادی $18/7\%$ و در پانل بتنی برابر $53/8\%$ بوده است.

۷. در بین نمونه‌های بدون بازشو، با بازشوی مرکزی، بازشوهای افقی و عمودی اختلاف بیشینه و کمینه‌ی تنش در المان ستون برابر $5/8\%$ ، در المان تیر 11% ، در المان بولت $3/6\%$ ، در صفحه‌ی فولادی $18/4\%$ و در پانل بتنی برابر 50% بوده است.

۸. جذب انرژی نمونه‌ی بدون بازشو از همه بیشتر بوده و در بین نمونه‌های با بازشو، نمونه‌ی با بازشوی مرکزی بیشترین جذب انرژی را داشته است.

۹. از عوامل تغییرات سختی دیوار که در نمودار بار - تغییرمکان هر نمونه مشاهده می‌شود، می‌توان به تغییر الگوی توزیع تنش‌های ایجادشده در دیوار، شروع جاری‌شدن المان‌ها در نقاطی از دیوار و یا افزایش بیش از حد نقاط جاری‌شده در دیوار و سرایت به نقاط حساس مثل پای ستون و یا محل اتصال تیروستون، و شروع به کمانش و یا موج برداشتن ورق فولادی اشاره کرد.

ظرفیت تحمل بار، سختی، جذب انرژی و تنش‌های ایجادشده در نمونه نیز بررسی شده‌اند. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، این نتایج حاصل شده است:

۱. در اثر ایجاد بازشو، مقاومت و سختی دیوار برشی دیوار برشی کاهش پیدا کرده و محل قرارگیری بازشو در میزان کاهش سختی دیوار مؤثر بوده است؛ به این ترتیب که نزدیک شدن بازشو به تیرهای مرزی کاهش بیشتری در سختی نسبت به حالتی دارد که بازشو در نزدیکی ستون باشد.

۲. تبدیل بازشو به دو بازشوی معادل که در مجموع مساحتی برابر بازشوی اولیه دارند، از مقاومت و سختی دیوار کم می‌کند، زیرا تشکیل میدان کششی قطری را با اختلال بیشتری مواجه می‌سازد.

۳. حالتی که یک بازشوی مرکزی به دو بازشوی افقی تبدیل شود، نسبت به وجود دو بازشوی قائم، کاهش مقاومت و سختی بیشتری خواهد داشت.

۴. توزیع تنش در حالت بدون بازشو بهتر و در حالت بازشوی مرکزی نسبت به نمونه‌های با بازشوی نزدیک به تیر یا ستون و یا نسبت به بازشوهای افقی و عمودی، مطلوب‌تر صورت گرفته است.

۵. بیشترین تنش‌های ایجادشده در المان‌های مختلف دیوار در پای ستون، در محل

پانوشتها

1. ABAQUS
2. concrete damaged plasticity
3. amplitude
4. fish plate

منابع (References)

1. Astaneh-Asl, A. "Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls", Structural Steel Educational Council, 45 p. (2002).
2. Armaghani, A. and Naloussi, J. "The stiffness and ductility of composite shear wall with concrete layer in comparison with steel shear wall", 2nd National Conference of Iran on Concrete.
3. Mosoarca, M. "Failure analysis of RC shear walls with staggered openings under seismic loads", *Engineering Failure Analysis*, **41**, pp. 48-64 (2014).
4. Rahai, A. and Hatami, F. "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings", *J. of Constructional Steel Research*, **65**(7), pp. 1528-1537 (2009).
5. Arabzadeh, A. and Ahmadi, H. "Evaluating the effects of distance between bolts on the behavior of composite steel shear wall", *Civil Engineering (BHRC)*, **14**(1), pp. 145-159 (2012).
6. Bhowmick, A.K., Grondin, G. and Driver, R.G. "Non-linear Seismic Analysis of Perforated Steel Plate Shear Walls", *J. of Constructional Steel Research*, **94**, pp. 103-113 (2014).
7. Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A. and Bradford, M.A. "Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening", *J. of Constructional Steel Research*, **79**, pp. 91-100 (2012).
8. Hosseinzadeh, S. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *J. of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
9. Sabouri-Ghomi, S. and Mamazizi, S. "Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings", *Thin-Walled Structures*, **86**, pp. 56-66 (2015).
10. Driver, R.G., Kulak, A.E., Elwi, G.L. and Kennedy, D.J. "Cyclic Tests of Four-Story Steel Plate Shear Wall", *J. of Structural Engrg.*, **124**(2), pp. 112-120 (1998).
11. Elgaaly, M. "Thin steel plate shear walls behavior and analysis", *Thin-Walled Structures*, **32**(1-3), pp. 151-180 (1998).
12. Lubell, S. and Prion, H.G.L. "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *J. of Structural Engineering*, **126**(4), pp. 453-460 (2000).

13. Nie, J.G., Zhu, L., Fan, J.S. and Mo, Y.L. "Lateral resistance capacity of stiffened steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, **67**, pp. 155-167 (2013).
14. Lanhui, G., Qin, R., Xinbo, M. and Sumei, Z. "Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only", *Steel Structures*, **11**(4), pp. 467-479 (2011).
15. Farzampour, A. and Laman, A. "Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings", *J. of Constructional Steel Research*, **114**, pp. 258-268 (2015).
16. Bahrebar, M., M Kabir, M.Z., Zirakian, T., Hajsadeghi, M. and Lim, J.B.P "Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls", *J. of Constructional Steel Research*, **122**, pp. 584-594 (2016).