

بررسی تأثیر شکل، ابعاد و موقعیت بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر

مسعود پور حسن شهری^۱، علی منصوری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

چکیده

در دیوار برشی فولادی متعارف، ورق فولادی به همه عضوهای مرزی متصل می‌باشد، ولی در دیوار برشی فولادی متصل به تیر، ورق فولادی به ستون‌ها اتصال ندارد. جداسازی ورق فولادی از ستون‌ها، سبب کاهش لنگر خمشی در ستون‌ها می‌شود که این موضوع از گسترش رفتار غیرخطی در این اعضا و شکست زود هنگام آنها جلوگیری می‌کند. در این پژوهش، اثر مشخصات بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود، مورد مطالعه قرار گرفته است. نخست، مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود راستی‌آزمایی شد. سپس، اثر پارامترهای شکل، ابعاد و موقعیت بازشو و همچنین ضخامت ورق فولادی، با تحلیل مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تغییر شکل بازشو از دایره به مربع، باعث افزایش مقدارهای سختی نخستین، مقاومت بیشینه و انرژی مستهلک‌شده گردید. افزایش ابعاد بازشو، باعث ایجاد انحراف در مسیر میدان کشش، از روی قطر به سمت گوشه‌های بازشو و افت عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی شد. بحرانی‌ترین موقعیت بازشو مربوط به حالتی بود که بازشو در مرکز پانل قرار داشت؛ چنین شرایطی بیشترین اختلال را در انتقال بار از طریق عمل میدان کشش ایجاد می‌کرد. سرانجام، با استفاده از نتایج تحلیل مدل‌های مختلف، روشی برای تخمین سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی متصل به تیر دارای بازشو، با استفاده از ضرایب کاهش سختی و مقاومت، بر مبنای مقدارهای متناظر در دیوار برشی بدون بازشو پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی متصل به تیر، بازشو، عمل میدان کشش، سختی، مقاومت، ضریب کاهش.

*نویسنده مسئول: علی منصوری

پست الکترونیکی: a.mansouri@qiet.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰

عملکرد مطلوب دیوارهای برشی فولادی تحت بارهای لرزه‌ای، سبب کاربرد گسترده آنها در ساختمان‌ها در کشورهای ژاپن، آمریکا و کانادا، در دهه‌های اخیر شده است [۱]. لذا پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی رفتار دیوار برشی فولادی و پیشنهاد روش‌های نوین برای طراحی آن، در سال‌های اخیر انجام شده است. شربتدار و مونسی [۲] رفتار سیستم دیواربرشی فولادی تقویت شده با سخت‌کننده‌های افقی و قائم و ستون‌های مرزی با مقطع قوطی شکل پر شده از بتن را، با روش مدل‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. قلهکی و همکاران [۳] نیز با بهره‌گیری از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود، روش جدیدی برای طراحی دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده ارائه نمودند. قلهکی و همکاران [۴] همچنین با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی، ضرایب رفتار ۸ و ۹ را به ترتیب برای سازه‌های بلند و کوتاه، با سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهاد دادند.

در سیستم دیوار برشی فولادی، ورق فولادی به عضوهای مرزی، شامل تیرها و ستون‌ها متصل است و نیروهای کششی و برشی را به این اعضا منتقل می‌کند. این امر سبب ایجاد تقاضای محوری و خمشی در ستون‌ها می‌شود و ستون‌ها می‌بایست برای نیروهای نسبتاً بزرگی طراحی شوند، تا از گسترش رفتار غیرخطی و شکست آنها و در نتیجه فروریزش کلی سازه جلوگیری شود. لذا غالباً مقاطعی با ابعاد بزرگ برای ستون‌ها مورد نیاز می‌باشد. یکی از روش‌هایی که برای کاهش لنگر خمشی در ستون‌ها پیشنهاد شده است، جداسازی ورق فولادی از این اعضا می‌باشد. این کار می‌تواند منجر به طراحی مقاطع اقتصادی‌تری برای ستون‌ها شود؛ هرچند جداسازی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت جانبی سیستم نیز گردد، که این مسأله را نیز می‌توان با راهکارهایی مانند افزایش ضخامت ورق یا استفاده از فولاد با مقاومت بالا حل نمود [۵] و [۶]. مطالعات آزمایشگاهی گو و همکاران [۵] بر روی سه نمونه دیوار برشی فولادی متصل به تیر، نشان داد لبه‌های آزاد ورق فولادی که به ستون متصل نشده‌اند، تغییرشکل خارج از صفحه قابل ملاحظه‌ای دارند؛ لذا مناسب است جهت کنترل این موضوع در لبه‌های آزاد ورق، از سخت‌کننده‌های لبه‌ای استفاده شود.

از کلیک و کلایتون [۷] در پژوهشی رفتار و عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از تحلیل اجزای محدود، یک مدل ساده نواری برای شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای ورق فولادی پیشنهاد کردند و رابطه‌هایی برای زاویه میدان کشش ایجادشده و مقاومت نوارها ارائه نمودند. از کلیک و کلایتون [۶] همچنین، در مطالعه دیگری بر روی رفتار سیستم مذکور، با بهره‌گیری از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود، معادلاتی برای محاسبه ظرفیت برشی ورق فولادی و نیروهای داخلی ایجادشده در تیر شامل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی ارائه دادند.

جهان‌پور و همکاران [۸] روشی تحلیلی، برای محاسبه ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌متصل پیشنهاد دادند. در این سیستم، ورق فولادی به تیرهای اصلی و ستون‌های کوچک ثانویه متصل می‌شود. ستون‌های ثانویه در داخل دهانه و با فاصله کمی از ستون‌های اصلی قرار می‌گیرند. آنها به منظور کنترل روش پیشنهادی، نتایج آن را با نتایج مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود مقایسه کرده و همخوانی خوبی مشاهده نمودند. جهان‌پور و محرمی [۹] همچنین در ادامه پژوهش قبلی، با استفاده از روش تحلیلی، رفتار ستون‌های ثانویه مذکور را مورد ارزیابی قرار دادند و سرانجام روشی برای تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌متصل پیشنهاد نمودند.

گو و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دوطبقه دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با ستون‌های فولادی پر شده با بتن انجام دادند. در یکی از نمونه‌ها امکان کمانش ورق فولادی وجود داشت و در دو نمونه دیگر با اجرای یک لایه بتن از این موضوع جلوگیری شده بود. نتایج نشان داد نمونه دارای لایه بتن نسبت به نمونه بدون این لایه، مقاومت بیشتر و شکل‌پذیری کمتری دارد. شکسته‌بند و همکاران [۱۱] در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر دو پارامتر وجود بازشو و نوع فولاد ورق را بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر، مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج به‌دست‌آمده استفاده از فولاد با مقاومت بالا^۱ (HYS)، می‌تواند جبران‌کننده کاهش ظرفیت برشی سیستم، به علت جداسازی ورق از ستون‌ها باشد. شکسته‌بند و همکاران [۱۲] همچنین در مطالعه آزمایشگاهی

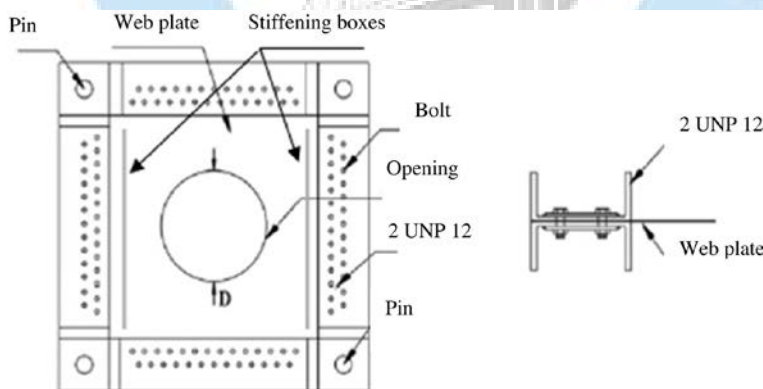
¹ High yield strength

دیگری رفتار دیوارهای برشی فولادی معمولی را با دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر مقایسه کردند. در پژوهش ذکر شده شکل پذیری دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر، حدود ۱/۵ برابر دیوارهای برشی فولادی معمولی به دست آمد.

در این پژوهش تأثیر مشخصات بازشو، بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از راستی‌آزمایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، با در نظر گرفتن مدل‌های عددی با مشخصات متفاوت، اثر پارامترهای شکل بازشو، ابعاد بازشو، موقعیت بازشو و ضخامت ورق فولادی بررسی شده است. همچنین روشی برای تخمین سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی متصل به تیر دارای بازشو، بر پایه‌ی استفاده از ضرایب کاهش سختی و مقاومت، بر اساس مقادیر متناظر در نمونه بدون بازشو پیشنهاد شده است.

۲- مدل‌سازی عددی و راستی‌آزمایی

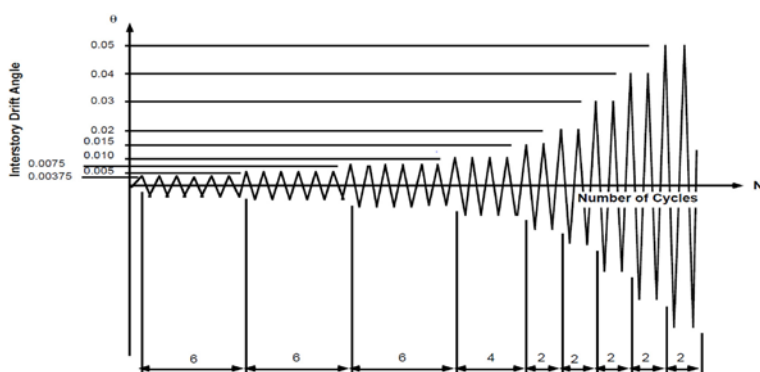
به منظور بررسی اثر بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. همچنین راستی‌آزمایی مدل عددی مورد استفاده، با مقایسه نتایج آن با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود انجام شده است. به این منظور از نتایج آزمایشات انجام شده توسط شکسته‌بند و همکاران [۱۱] استفاده شده است. آزمایشات این پژوهشگران بر روی نمونه‌های یک‌طبقه و یک‌دهانه تحت بار جانبی چرخه‌ای انجام شده است. فاصله مرکز تا مرکز تیرها و ستون‌ها از یکدیگر معادل ۶۲۰ میلی‌متر بوده است. ورق فولادی نیز دارای ارتفاع ۵۰۰، عرض ۴۶۰ و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بوده است. مقطع تیرها و ستون‌ها 2UNP120 بوده و اتصال آنها به یکدیگر مفصلی بوده است. با توجه به هدف پژوهش نمونه SSW-BO-2 که دارای یک بازشوی دایره‌ای با قطر ۱۸۰ میلی‌متر بود، برای راستی‌آزمایی نتایج عددی انتخاب شد. از فولاد با مقاومت تسلیم بالا (HYS) برای ورق دیوار برشی این نمونه استفاده شده بود. همچنین در هر لبه آزاد قائم ورق، از دو عدد BOX30×20×2 به عنوان سخت‌کننده استفاده شده بود. فاصله سخت‌کننده‌های مذکور از ستون نیز معادل ۲۰ میلی‌متر بوده است. همچنین، سخت‌کننده‌ها از بالا و پایین به تیر متصل نبوده و ۲۰ میلی‌متر فاصله داشته‌اند. شکل ۱ نمای کلی نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



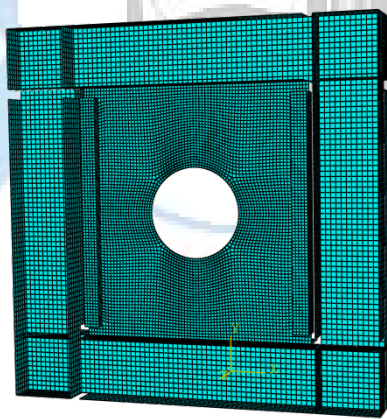
شکل ۱: نمای کلی نمونه آزمایشگاهی [۱۱].

فولاد مورد استفاده در تیرها و ستون‌ها به ترتیب دارای مقاومت تسلیم و نهایی ۳۴۵ و ۳۶۰ مگاپاسکال بوده و ورق فولادی با مقاومت تسلیم بالا (HYS) نیز به ترتیب دارای مقاومت تسلیم و نهایی ۳۳۸ و ۴۲۳ مگاپاسکال بوده است. مدول الاستیسته و ضریب پواسون فولاد نیز به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ بوده است. معیار تسلیم فون-مایسز، قانون جریان همبسته و سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی برای مصالح در نظر گرفته شد. بار جانبی مشابه پژوهش آزمایشگاهی، به صورت کنترل‌شونده توسط تغییر شکل و مطابق پروتکل بارگذاری شکل ۲ به مدل اعمال شد.

برای کلیه اعضای قاب و ورق فولادی از المان پوسته‌ای S4R استفاده شد. المان مذکور چهارگره‌ای و با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته بوده و دارای شش درجه آزادی در هر گره می‌باشد. به منظور تعیین اندازه المان‌ها، آنالیز حساسیت انجام شد. بدین منظور با انجام تحلیل‌های مختلف، بر روی مدل‌های با ابعاد متفاوت المان، ابعاد المان به گونه‌ای انتخاب شد که کوچک‌تر کردن آن تأثیری بر نتایج نداشته باشد. شکل ۳ مدل عددی نمونه SSW-BO-2 را نشان می‌دهد. در آزمایش انجام‌شده تیر پایینی به صورت گیردار به زمین متصل شده بود، لذا در مدل عددی نیز کلیه درجات آزادی ناحیه مذکور بسته شد. همچنین تغییرشکل خارج از صفحه قاب نیز در آزمایش مهار شده بود، لذا تغییرمکان خارج از صفحه بالای نمونه نیز بسته شد. یک نقص هندسی اولیه^۱ بر مبنای مود اول فرکانسی، با مقدار حداکثر یک میلی‌متر تغییرمکان خارج از صفحه ورق، نیز در نمونه در نظر گرفته شد.



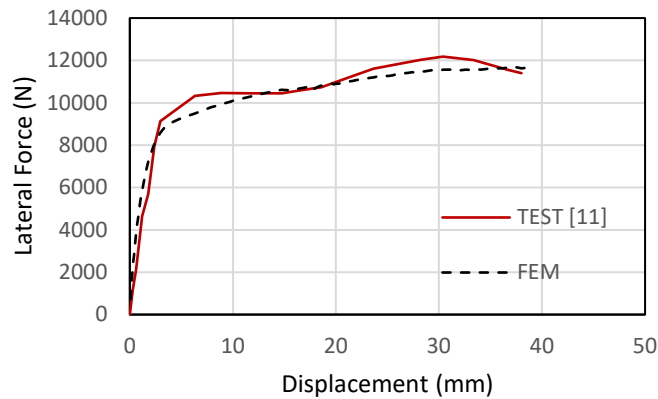
شکل ۲: پروتکل بارگذاری جانبی [۱۱].



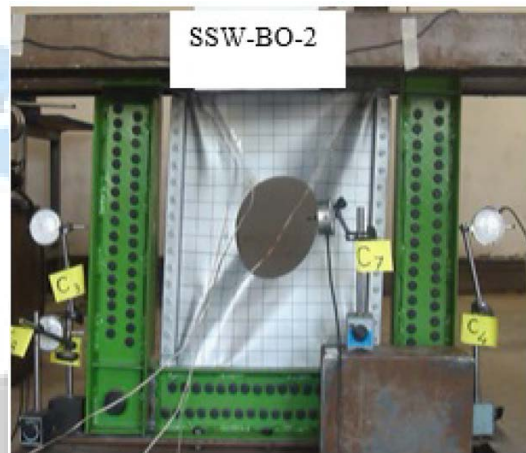
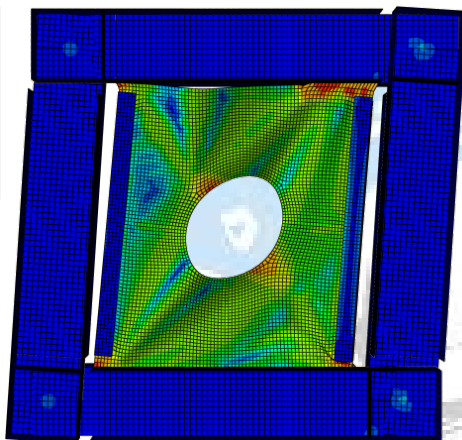
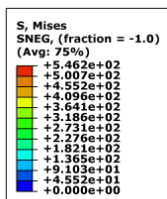
شکل ۳: مدل عددی نمونه آزمایشگاهی در آباکوس.

پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل عددی، منحنی بار-تغییرمکان مدل عددی با پوش منحنی هیستریزس آزمایشگاهی در شکل ۴ مقایسه شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج عددی و آزمایشگاهی انطباق مناسبی با یکدیگر دارند. همچنین شکل تغییرشکل‌یافته نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی و کانتور تنش فون-مایسز نیز در شکل ۵ ارائه شده‌اند. در اینجا نیز تطابق خوبی بین رفتار مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود، باربری ورق فولادی از طریق عمل میدان کشش انجام شده است. همچنین در مدل عددی تمرکز تنش در گوشه‌های ورق مشاهده شد که این موضوع نیز با مشاهدات آزمایشگاهی مطابقت دارد.

¹ Imperfection



شکل ۴: مقایسه منحنی بار-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی [۱۱] و مدل عددی.



شکل ۵: مقایسه رفتار نمونه آزمایشگاهی [۱۱] و مدل عددی (واحد تنش: MPa).

۳- مطالعات پارامتری

به منظور بررسی اثر بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، تعداد ۱۰ مدل عددی با مشخصات مختلف مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای موقعیت بازشو، شکل بازشو، ابعاد بازشو و ضخامت ورق فولادی دیوار برشی، در مدل‌های مختلف متغیر در نظر گرفته شده‌اند. سایر مشخصات هندسی، مشخصات مصالح و پروتکل بارگذاری جانبی در این مدل‌ها، مشابه نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌اند. مدل B1 نمونه مرجع آزمایشگاهی دارای بازشوی دایره است که نتایج آن به منظور راستی‌آزمایی مدل عددی در بخش قبل ارائه گردید. مدل B2 دارای بازشوی مربع مرکزی، با مساحت برابر با نمونه مرجع است. مقایسه نتایج این دو نمونه می‌تواند اثر شکل بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر را نشان دهد. مدل‌های B2، B3، B4 و B5 دارای بازشوی مربع مرکزی با ابعاد مختلف می‌باشند که مقایسه رفتار آنها، اثر ابعاد بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی را نشان می‌دهد. مدل‌های B2، B8 و B9 دارای بازشوی مربع با مساحت برابر نمونه مرجع می‌باشند که در آنها بازشو به ترتیب در وسط، بالا و پایین پانل فولادی قرار گرفته‌اند. با مقایسه رفتار نمونه‌های مذکور، اثر موقعیت قائم بازشو مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌های B2، B6 و B7 نیز دارای بازشوی مربع یکسان و ضخامت ورق متفاوت هستند و با مقایسه رفتار آنها اثر این پارامتر بررسی شده است. مدل B10 نیز بدون بازشو در نظر گرفته شده است تا امکان بررسی اثر وجود بازشو بر مقادیر مقاومت و سختی نمونه‌ها وجود داشته باشد.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های عددی مورد مطالعه

نام مدل	موقعیت بازشو	شکل بازشو	طول ضلع یا قطر بازشو (mm)	نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل	ضخامت ورق (mm)
B1	مرکز	دایره	۱۸۰	۰/۱۱	۰/۵
B2	مرکز	مربع	۱۶۰	۰/۱۱	۰/۵
B3	مرکز	مربع	۱۰۷	۰/۰۵	۰/۵
B4	مرکز	مربع	۱۵۲	۰/۱۰	۰/۵
B5	مرکز	مربع	۱۸۶	۰/۱۵	۰/۵
B6	مرکز	مربع	۱۶۰	۰/۱۱	۰/۲۵
B7	مرکز	مربع	۱۶۰	۰/۱۱	۰/۷۵
B8	بالا	مربع	۱۶۰	۰/۱۱	۰/۵
B9	پایین	مربع	۱۶۰	۰/۱۱	۰/۵
B10	بدون بازشو	بدون بازشو	۰	۰	۰/۵

۴- بحث و بررسی نتایج

تحلیل کلیه مدل‌های ارائه شده در بخش ۳، تحت بار جانبی انجام شد و مشخصه‌های رفتاری مدل‌ها شامل سختی نخستین، مقاومت بیشینه و انرژی مستهلک شده (سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان) مطابق جدول ۲ به دست آمد. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، به تفکیک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲: مشخصه‌های رفتاری مدل‌های عددی

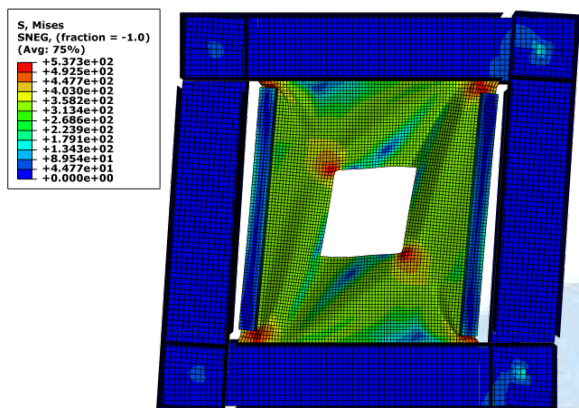
نام مدل	سختی نخستین (kN/mm)	مقاومت بیشینه (kN)	انرژی مستهلک شده (kN.mm)
B1	۲/۵۱	۱۱/۷	۴۰۵
B2	۲/۶۱	۱۳/۱	۴۴۲
B3	۴/۱۴	۱۶/۶	۵۹۲
B4	۳/۰۱	۱۳/۷	۴۵۳
B5	۲/۴۶	۱۱/۳	۴۰۰
B6	۱/۳۰	۶/۸	۲۲۷
B7	۴/۴۲	۲۰/۱	۷۷۲
B8	۳/۱۰	۱۳/۴	۴۶۰
B9	۳/۲۰	۱۳/۳	۴۶۲
B10	۵/۱۰	۱۹/۸۵	۸۳۰

۴-۱- اثر شکل بازشو

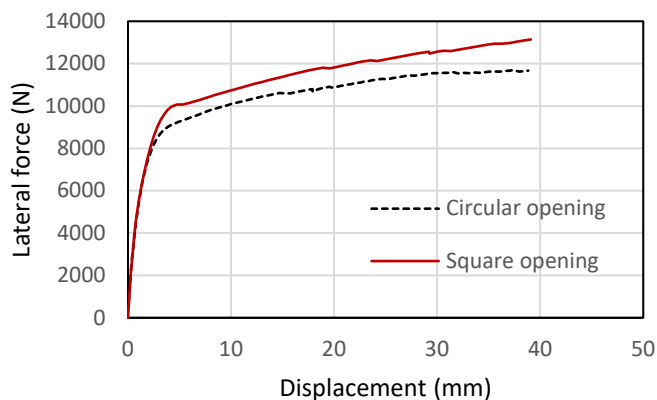
مدل مرجع B1 مطابق پژوهش آزمایشگاهی شکسته‌بند و همکاران [۱۱] دارای یک بازشو با شکل دایره بوده است. از آنجا که ایجاد بازشو در دیوار برشی، غالباً بنا به ملاحظات معماری و به منظور ایجاد پنجره یا درب، با شکل مربع یا مستطیل انجام می‌شود، در این بخش با تغییر شکل بازشو، اثر این پارامتر بر رفتار دیوار برشی فولادی متصل به تیر، مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه B2 دارای یک بازشوی مربع، با طول ضلع ۱۶۰ میلی‌متر می‌باشد که دقیقاً در وسط پانل قرار دارد. ابعاد این بازشو به گونه‌ای انتخاب شده است که مساحت آن با مساحت بازشوی دایره‌ای برابر باشد. در هر دو نمونه ذکر شده، نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل، $\frac{A_o}{A_p}$ ، معادل ۰/۱۱ می‌باشد.

مقایسه منحنی بار-تغییر مکان مدل‌های مذکور، در شکل ۶ (الف) و مشخصه‌های رفتاری مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. مطابق نتایج به دست آمده، تغییر شکل بازشو از دایره به مربع به ترتیب باعث ۰/۴٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۹٪ افزایش در مقادیر سختی نخستین، مقاومت بیشینه و

استهلاک انرژی شده است. کانتور تنش فون-مایسز نمونه دارای بازشوی مربع، در شکل ۶ (ب) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود مکانیزم باربر جانبی ورق فولادی، همچنان عمل کشش قطری بوده است و تغییر شکل بازشو، اثری بر نحوه انتقال بار جانبی نداشته است. هرچند مقایسه توزیع تنش در سطح ورق دارای بازشوی مربع، با نمونه مرجع با بازشوی دایره (شکل ۵) نشان‌دهنده آن است که در بازشوی مربع، تمرکز تنش بیشتری در گوشه‌های بازشو رخ داده است که این موضوع می‌تواند باعث پارگی ورق در این ناحیه شود.



(ب)



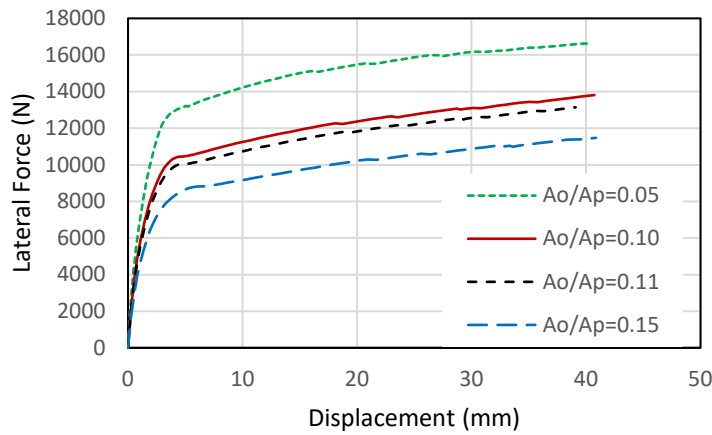
(الف)

شکل ۶: اثر شکل بازشو، (الف) مقایسه منحنی بار-تغییر مکان مدل‌های دارای بازشوی مربع و دایره، (ب) نحوه توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل B2.

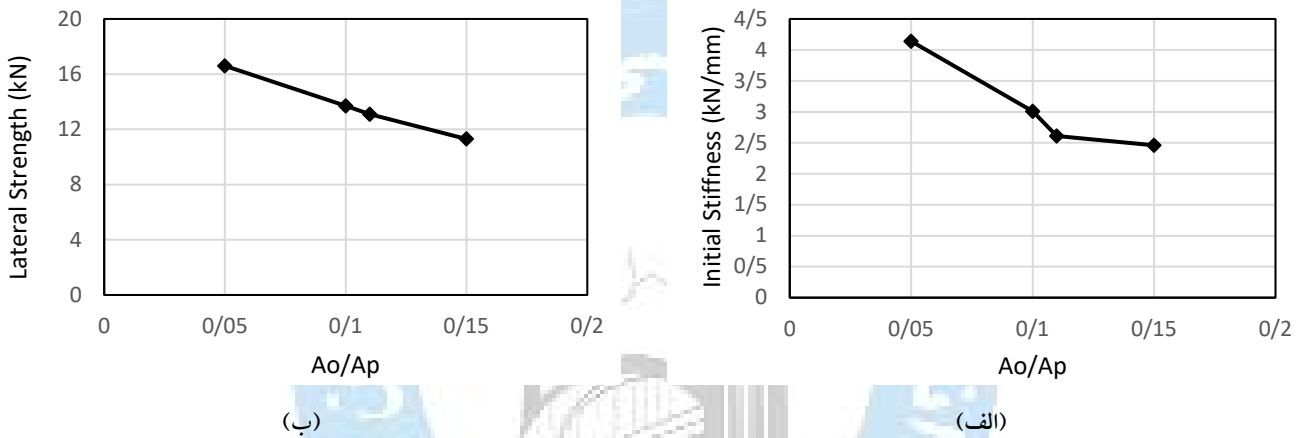
۴-۲- اثر ابعاد بازشو

به منظور بررسی اثر ابعاد بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، علاوه بر نمونه B2 سه نمونه دیگر با بازشوی مربع واقع در مرکز پانل، در نظر گرفته شدند. نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل، در مدل‌های B3، B4 و B5 به ترتیب معادل ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ در نظر گرفته شد و طول ضلع بازشو در آنها به ترتیب معادل ۱۰۷، ۱۵۲ و ۱۸۶ میلیمتر لحاظ شد.

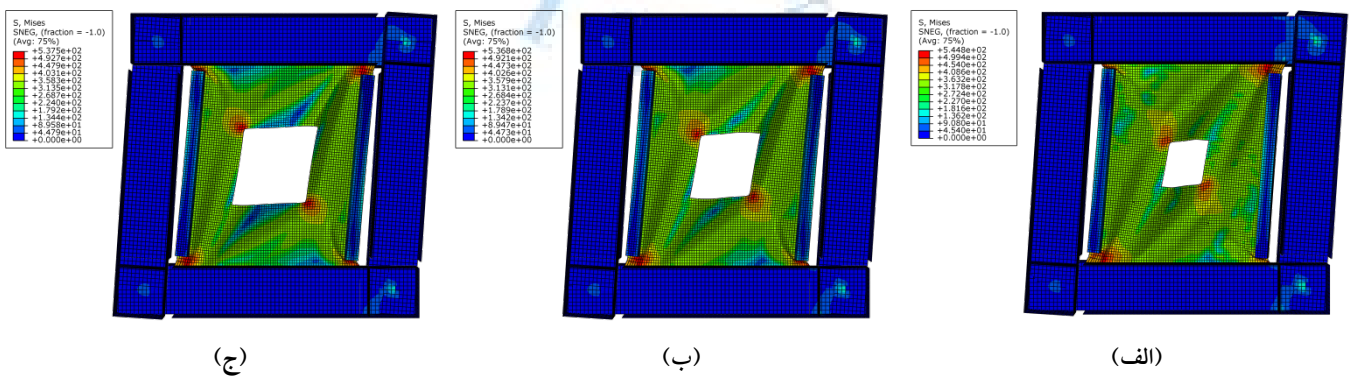
منحنی بار-تغییر مکان مدل‌های ذکر شده در شکل ۷ و مشخصه‌های رفتاری آنها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش ابعاد بازشو باعث کاهش مقادیر سختی نخستین، مقاومت و استهلاک انرژی شده است. همچنین در شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (ب) به ترتیب مقادیر سختی نخستین و مقاومت بیشینه نمونه‌ها، بر حسب نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل ترسیم شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش ابعاد بازشو با یک روند تقریباً خطی، باعث کاهش مقادیر سختی نخستین و مقاومت جانبی شده است. شکل ۹ نیز توزیع تنش فون-مایسز در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در هر سه نمونه میدان کشش ایجاد شده است و بدین شکل، نمونه بار جانبی اعمالی را تحمل کرده است. با توجه به اینکه در این نمونه‌ها بازشو در مرکز پانل و بر روی قطر آن قرار گرفته است، افزایش ابعاد بازشو باعث تضعیف عمل میدان کشش و انحراف مسیر انتقال بار از روی قطر اصلی به گوشه‌های بازشو شده است. در همه نمونه‌ها تمرکز تنش در گوشه‌های بازشو و گوشه‌های بالا و پایین پانل مشاهده شد و مقادیر بیشینه تنش ایجاد شده در نمونه‌ها، با وجود ظرفیت باربری جانبی متفاوت تقریباً یکسان است.



شکل ۷: نمودارهای بار-تغییر مکان مدل‌های با ابعاد بازشوی مختلف.



شکل ۸: اثر ابعاد بازشو بر پارامترهای رفتاری مدل‌ها، (الف) سختی نخستین، (ب) مقاومت جانبی.

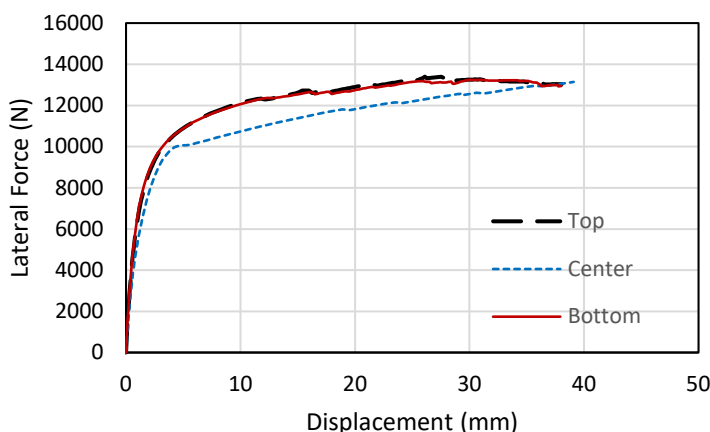


شکل ۹: توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل‌های با ابعاد مختلف بازشو، (الف) مدل B3، (ب) مدل B4، (ج) مدل B5.

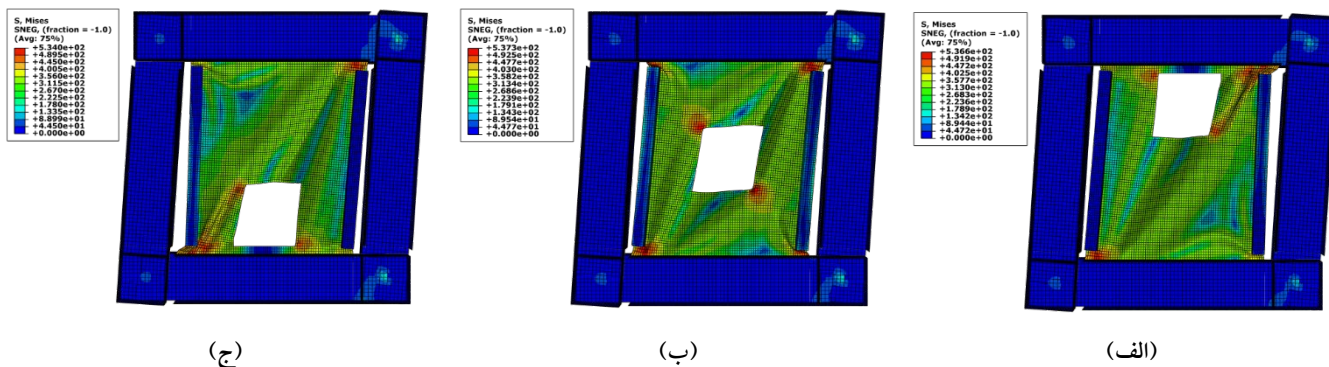
۴-۳- اثر موقعیت بازشو

موقعیت بازشو یکی از پارامترهایی است که می‌تواند بر رفتار لرزه‌ای نمونه و مقدار پارامترهای رفتاری آن تأثیرگذار باشد، لذا اثر آن در این بخش مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور سه موقعیت متفاوت در راستای قائم برای بازشو در نظر گرفته شده است. مدل‌های B8 و B9 مشابه نمونه B2 دارای بازشوی مربع با طول ضلع ۱۶۰ میلی‌متر (۱۱٪ مساحت پانل) می‌باشند و در آنها بازشو به ترتیب در بالا و پایین پانل قرار گرفته است.

منحنی بار-تغییرمکان نمونه‌ها در شکل ۱۰ و مشخصه‌های رفتاری آنها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۱۰ نمودارهای بار-تغییرمکان مدل‌های دارای بازشو در بالا و پایین، تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند. با توجه به اینکه موقعیت بازشو در این دو نمونه، نسبت به خط افقی مرکزی نمونه متقارن است، چنین نتیجه‌ای منطقی است. در واقع ورق فولادی از بالا و پایین تحت نیروی برشی برابر و با جهت‌های عکس قرار دارد، لذا در خصوص دو بازشو در بالا و پایین پانل و با فاصله قائم برابر از خط افقی مرکزی نمونه، رفتار یکسانی مورد انتظار است. در نمونه دارای بازشوی مرکزی با توجه به جدول ۲ مقادیر سختی، مقاومت و استهلاک انرژی، کمتر از دو نمونه دیگر به دست آمده است. این موضوع با توجه به وضعیت تغییرشکل یافته ورق در شکل ۱۱ قابل تشریح است. در هر سه نمونه باربری جانبی ورق با عمل میدان کشش انجام شده است. در نمونه دارای بازشوی مرکزی، بازشو دقیقاً بر روی قطر نمونه قرار گرفته است، لذا باعث انحراف مسیر انتقال بار شده است. لکن در دو نمونه دیگر با توجه به فاصله مرکز بازشو از قطر پانل، انحراف کمتری در مسیر انتقال بار ایجاد شده است و انتقال بار جانبی به شکل مناسبتری انجام شده است.



شکل ۱۰: نمودارهای بار-تغییرمکان مدل‌های با موقعیت‌های بازشوی مختلف.

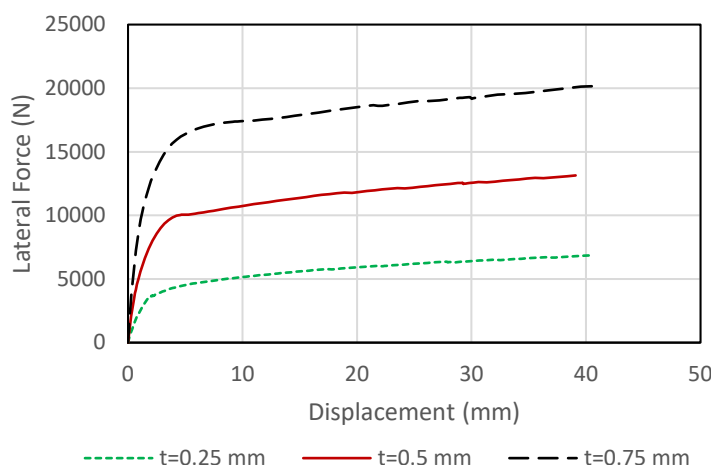


شکل ۱۱: توزیع تنش فون-مایسیز (MPa) در مدل‌های با موقعیت‌های مختلف بازشو، (الف) مدل B8، (ب) مدل B2، (ج) مدل B9.

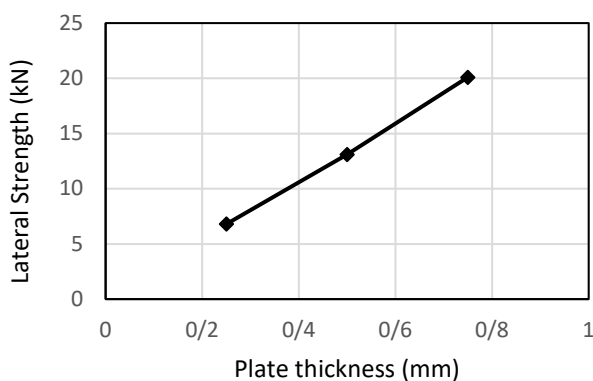
۴-۴- اثر ضخامت ورق فولادی

در این بخش به بررسی اثر تغییر ضخامت ورق فولادی، بر روی رفتار مدل‌های دارای بازشو مربع مرکزی پرداخته شده است. بدین منظور سه مدل B6، B2 و B7 به ترتیب با ضخامت‌های ورق ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ میلی‌متر مدل شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نسبت مساحت بازشو مربعی به مساحت پانل در این مدل‌ها، معادل ۰/۱۱ بوده است. لازم به ذکر است سایر مشخصات سه نمونه کاملاً مشابه یکدیگر بوده است.

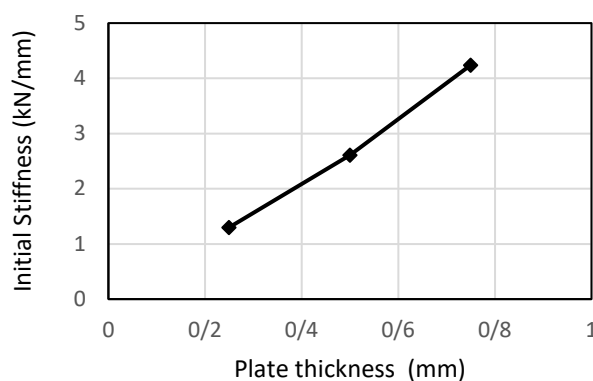
منحنی‌های بار-تغییر مکان مدل‌ها در شکل ۱۲ و مقدارهای مشخصه‌های رفتاری آنها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، افزایش ضخامت ورق فولادی باعث بهبود قابل توجه عملکرد دیوار برشی فولادی متصل به تیر شده است. لذا در مواردی که نیاز به اجرای بازشو در ورق فولادی وجود داشته باشد، می‌توان کاهش مقادیر سختی و مقاومت سیستم به دلیل وجود بازشو را با افزایش ضخامت ورق جبران نمود. شکل ۱۳ (الف) و ۱۳ (ب) هم به ترتیب رابطه سختی نخستین و مقاومت بیشینه نمونه را بر حسب ضخامت ورق فولادی نشان می‌دهند. بر اساس این شکل، افزایش ضخامت ورق با یک رابطه خطی باعث افزایش مقادیر سختی و مقاومت شده است. علت این امر این است که اولاً مقادیر سختی و مقاومت سیستم، صرفاً به مشخصات ورق فولادی وابسته هستند و قاب فولادی با توجه به اتصال مفصلی تیر-ستون، نقشی در سختی و مقاومت جانبی سیستم مذکور ندارد، ثانیاً با توجه به روابط تحلیلی موجود جهت محاسبه سختی و مقاومت جانبی ورق فولادی، ارتباط بین این پارامترها و ضخامت ورق خطی است [۱۱].



شکل ۱۲: نمودارهای بار-تغییر مکان مدل‌های با ضخامت ورق مختلف.



(ب)



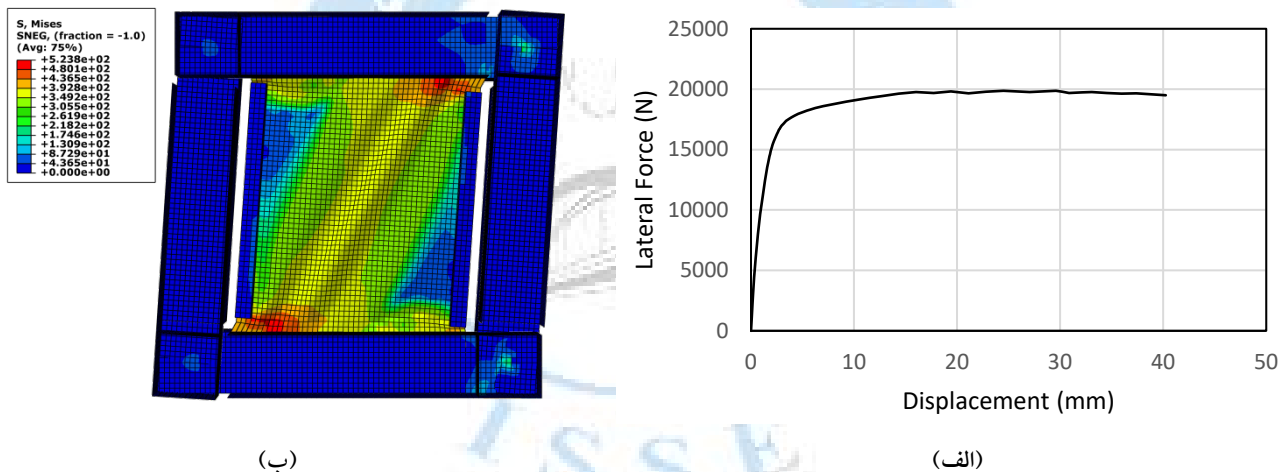
(الف)

شکل ۱۳: اثر ضخامت ورق بر پارامترهای رفتاری مدل‌ها، (الف) سختی نخستین، (ب) مقاومت جانبی.

۵- تخمین سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی متصل به تیر دارای بازشو

به منظور تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر، نیاز به رابطه‌هایی برای محاسبه مقادیرهای سختی و مقاومت آنها وجود دارد. در ادبیات فنی رابطه‌هایی جهت محاسبه این پارامترها در نمونه‌های بدون بازشو وجود دارد. مطالعه حاضر نشان داد که وجود بازشو باعث کاهش مقادیرهای سختی و مقاومت می‌شود، لذا پیشنهاد روشی ساده برای تخمین سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو مورد نیاز خواهد بود. یکی از روش‌هایی که پژوهشگران برای محاسبه سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو استفاده می‌کنند، لحاظ ضرایب کاهش مقاومت و سختی برای این نمونه‌ها، به منظور در نظر گرفتن اثر بازشو می‌باشد. به عبارتی سختی و مقاومت نمونه دارای بازشو، برابر حاصلضرب مقادیر مربوطه در نمونه بدون بازشو و ضرایب کاهش در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نیز بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی انجام‌شده، ضرایب کاهش جداگانه‌ای برای سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو پیشنهاد شده است.

مدل B10 بدون بازشو و با مشخصات نمونه آزمایشگاهی مرجع، به منظور تخمین سختی و مقاومت سیستم بدون بازشو، مدلسازی و تحلیل شده است. منحنی بار-تغییر مکان نمونه و کانتور تنش فون-مایسز به ترتیب در شکل‌های ۱۴(الف) و ۱۴(ب) ارائه شده‌اند. رفتار نمونه بدون بازشو و مقادیرهای مشخصه‌های رفتاری (جدول ۲) انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نمونه بدون بازشوی شکسته‌بند و همکاران [۱۱] دارند. مطابق شکل ۱۴(ب) باربری جانبی سیستم، با عمل میدان کشش انجام شده و تمرکز تنش در گوشه‌های بالا و پایین ورق فولادی مشاهده شده است.



شکل ۱۴: نتایج تحلیل نمونه بدون بازشو، (الف) منحنی بار تغییر مکان، (ب) نحوه توزیع تنش فون-مایسز (MPa).

به منظور پیشنهاد ضرایب کاهش سختی و مقاومت به دلیل وجود بازشو، مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های مختلف (جدول ۲) مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز تشریح شد پارامترهای مختلفی شامل شکل، ابعاد و موقعیت بازشو بر مقدار پارامترهای ذکر شده تأثیرگذار بوده‌اند. لکن پارامتری که بیشترین تأثیر را در این خصوص داشته است، ابعاد بازشو و نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل، $\frac{A_o}{A_p}$ ، بوده است؛ لذا ضرایب کاهش مربوطه بر اساس این پارامتر پیشنهاد شده‌اند. بدین منظور نسبت سختی و مقاومت نمونه دارای بازشو به سختی و مقاومت نمونه بدون بازشو، بر حسب نسبت مساحت بازشو به مساحت پانل، برای نمونه‌های با ضخامت ورق $\frac{1}{5}$ میلیمتر، به ترتیب در شکل‌های ۱۵(الف) و ۱۵(ب) ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که طبق نتایج بخش ۴-۴ سختی و مقاومت سیستم صرفاً به ورق فولادی مرتبط است و قاب نقش چندانی در مقادیر مذکور نداشته است، بنابراین در واقع مقادیر ارائه در شکل ۱۵، نسبت سختی و

مقاومت پانل دارای بازشو به پانل بدون بازشو می‌باشند. مقادیر سختی و مقاومت نمونه دارای بازشو به ترتیب از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه می‌باشند:

$$K_o = R_K \times K_s \quad (1)$$

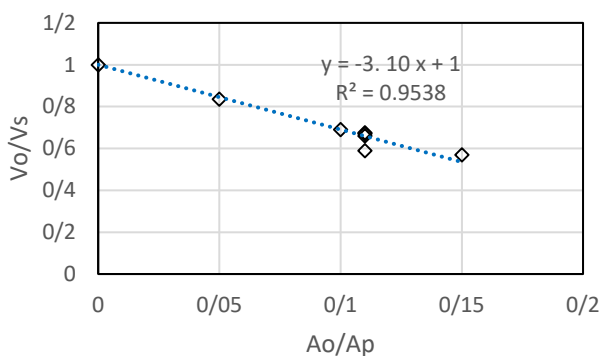
$$V_o = R_S \times V_s \quad (2)$$

در این رابطه‌ها K_o و K_s به ترتیب سختی نمونه بدون بازشو و دارای بازشو، و V_o و V_s به ترتیب مقاومت نمونه بدون بازشو و دارای بازشو و R_K و R_S به ترتیب ضرایب کاهش سختی و مقاومت به دلیل حضور بازشو می‌باشند.

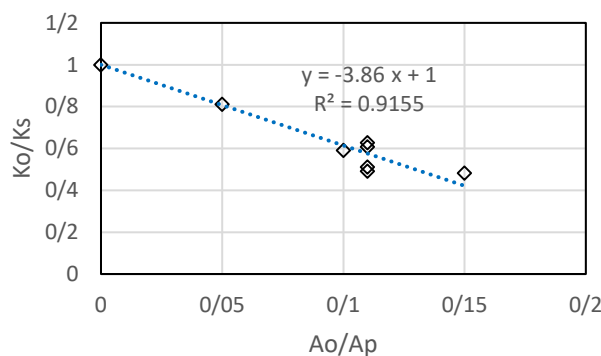
طبق شکل ۱۵ می‌توان رابطه‌ای خطی بین ضرایب کاهش سختی و مقاومت به دلیل حضور بازشو و نسبت سطح بازشو به سطح پانل در نظر گرفت. با برازش خطی داده‌های موجود، روابط (۳) و (۴) به ترتیب به عنوان ضرایب کاهش سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی متصل به تیر، به دلیل حضور بازشو پیشنهاد می‌شوند:

$$R_K = 1 - 3.86 \frac{A_o}{A_p} \quad (3)$$

$$R_S = 1 - 3.10 \frac{A_o}{A_p} \quad (4)$$



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: تعیین ضرایب کاهش به دلیل حضور بازشو، (الف) ضریب کاهش سختی، (ب) ضریب کاهش مقاومت.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر مشخصات بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. مهمترین نتایج به دست آمده به قرار زیر هستند:

۱- تغییر شکل بازشو از دایره به مربع با مساحت برابر، به ترتیب باعث ۰.۴٪، ۰.۱۲٪ و ۰.۹٪ افزایش در مقادیر سختی نخستین، مقاومت بیشینه و استهلاک انرژی گردید. همچنین تمرکز تنش بیشتری در گوشه بازشوی مربع نسبت به اطراف بازشوی دایره مشاهده شد که این مسأله می‌تواند باعث پارگی موضعی ورق در این ناحیه شود.

۲- افزایش ابعاد بازشو باعث تضعیف عمل میدان کشش در ورق فولادی و انحراف مسیر انتقال بار از روی قطر اصلی، به سمت گوشه‌های بازشو شده و در نتیجه با یک روند تقریباً خطی، باعث کاهش مقادیر سختی و مقاومت جانبی نمونه‌ها شده است.

۳- بحرانی‌ترین موقعیت قرارگیری بازشو در پانل موقعیت مرکزی است، در این حالت بازشو بر روی قطر اصلی قرار گرفته و بیشترین تداخل را در انتقال بار جانبی، از طریق عمل میدان کشش ایجاد می‌کند. همچنین در خصوص بازشوهایی واقع در بالا و پایین پانل که با فاصله قائم برابر از خط افقی مرکزی نمونه واقع شده بودند، رفتار یکسانی مشاهده شد.

۴- افزایش ضخامت ورق با یک رابطه خطی، باعث افزایش قابل ملاحظه مقادیر سختی و مقاومت گردید، لذا افت مقادیر سختی و مقاومت دیوار برشی به دلیل حضور بازشو، به سادگی با افزایش ضخامت ورق قابل جبران است.

۵- مقادیر مقاومت و سختی نمونه‌های دارای بازشو با استفاده از مقادیر متناظر نمونه‌های بدون بازشو و ضرایب کاهش سختی و مقاومت قابل تخمین هستند. مهمترین عاملی که در کاهش مقادیر سختی و مقاومت نمونه دارای بازشو تأثیرگذار است، نسبت سطح بازشو به سطح پانل می‌باشد، لذا در این پژوهش رابطه‌هایی برای محاسبه ضرایب کاهش سختی و مقاومت مربوطه، در دیوار برشی فولادی متصل به تیر، بر حسب نسبت سطح بازشو به سطح پانل ارائه شده است.

مراجع

- [1] Sabelli, R. and Bruneau, M., (2006). *AISC Design Guide 20: Steel plate shear walls*. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc., 5-13.
- [2] Sharbatdar, M. and Munesi, A. (2017). Cyclic and Push-over ductile behavior of steel shear wall strengthened with stiffeners and steel column filled with concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, In press, doi: 10.22065/jsce.2017.80816.1124
- [3] Gholhaki, M., Rezayfar, O. and 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*, In press, doi: 10.22065/jsce.2018.109765.1404
- [4] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O. and 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*, In press, doi: 10.22065/jsce.2018.100459.1346
- [5] Guo, L., Rong, Q., Ma, X., and Zhang, S. (2011). Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only. *International Journal of Steel Structures*, 11(4), 467-479. doi: 10.1007/s13296-011-4006-7
- [6] Ozelik, Y., and Clayton, P. M. (2018). Seismic design and performance of SPSWs with beam-connected web plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 142, 55-67. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.12.004
- [7] Ozelik, Y., and Clayton, P. M. (2017). Strip model for steel plate shear walls with beam-connected web plates. *Engineering Structures*, 136, 369-379. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.01.051
- [8] Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakoochak, A. (2011). Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls. *Journal of constructional steel research*, 67(6), 1022-1030. doi: 10.1016/j.jcsr.2011.01.007
- [9] Jahanpour, A. and Moharrami, H. (2015). Evaluation of behavior of the secondary columns in semi-supported steel shear walls. *Thin-Walled Structures*, 93, 94-101. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.015
- [10] Guo, L., Rong, Q., Qu, B. and Liu, J. (2017). Testing of steel plate shear walls with composite columns and infill plates connected to beams only. *Engineering Structures*, 136, 165-179. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.01.027
- [11] Shekastehband, B., Azaraxsh, A. and Showkati, H. (2017). Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(1), 154-168. doi: 10.1016/j.acme.2016.09.006
- [12] Shekastehband, B., Azaraxsh, A. A. and Showkati, H. (2018). Experimental seismic study on shear walls with fully-connected and beam-only-connected web plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 204-215. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.11.013