

بررسی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی ویژه با بازشو

حمیدرضا کاظمی نیا کرانی (دانشجوی دکتری)

ابوالفضل عربزاده* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۵۹-۴۹

دیوارهای برشی فولادی را می‌توان به دو دسته‌ی تقویت شده و تقویت نشده (دیوار برشی فولادی ویژه) تقسیم‌بندی کرد. تاکنون مطالعاتی در زمینه‌ی دیوار برشی فولادی انجام شده است، ولی هنوز به دلیل ابهاماتی که وجود دارد، در بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی از جمله آیین‌نامه‌ی کشور ایران (مبحث دهم) ارائه نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا طراحی دیوار برشی یک ساختمان ۱۰ طبقه انجام و پس از انتخاب طبقه‌ی فوقانی سازه‌ی طراحی شده، به بررسی اثر موقعیت بازشو در دوره‌ی تناوب، نیروی کمانشی و مقاومت دیوار پرداخته شده است. تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازشو درکناره‌های ورق باعث افزایش ۳/۲۸ درصدی دوره‌ی تناوب مد اول شده است. حال آنکه همان بازشو در گوشه‌ها و میانه‌ی ورق تأثیر چندانی نداشته است. بازشو روی قطرهای دیوار باعث کاهش ۲۶/۷۵ درصدی بار کمانشی دیوار شده و ایجاد بازشو در مرکز دیوار تأثیر بیشتری در کاهش مقاومت دیوار داشته است، به طوری که توانسته است ۱۰/۸۱٪، مقاومت دیوار را کاهش دهد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، بازشو، تحلیل مودال، تحلیل کمانشی، تحلیل استاتیکی غیرخطی.

kazemnia.hamidreza@gmail.com
arabzade@modares.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، دیوارهای برشی فولادی به دلیل سختی درون‌صفحه‌ی نسبتاً بالا، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی مناسب، مصرف کمیته‌ی مصالح به کار رفته، حجم فضای اشغال‌شده‌ی کمتر و تعویض یا تقویت آسان آن‌ها باعث شده‌اند که توجه مهندسان و پژوهشگران را به خود جلب کنند. دیوارهای برشی فولادی انواع مختلفی دارند که یکی از آن‌ها دیوار برشی فولادی با ورق جان نازک سخت‌نشده است که به دیوار برشی فولادی ویژه معروف است. به دلیل ضخامت کم دیوارهای مذکور، بار کمانشی آن‌ها بسیار ناچیز است و مقاومت‌شان در مقابل بارهای جانبی، پس از کمانش آن انجام می‌گیرد. پس از وقوع کمانش قطری در ورق جان و از کار افتادن آن، نیروهای کششی قابل توجهی در راستای عمود بر جهت کمانش در ورق جان توسعه می‌یابند که قادر خواهند بود با نیروهای ناشی از زلزله به خوبی مقابله کنند. همچنین نیروهای کششی ایجادشده‌ی مذکور، برالمان‌های مرزی نیروهایی وارد می‌کنند که المان‌های مرزی باید براساس آن‌ها نیز طراحی شوند.

در دیوار برشی مذکور، ظرفیت فشاری ورق جان بسیار ناچیز است، ولی مقاومت کششی آن که همراه با تغییرشکل‌های فزاینده‌ی زیاد است، زیاد است. رفتار دیوار برشی فولادی با ورق جان نازک را می‌توان به یک قاب مهاربندی شده شبیه‌سازی * نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۴/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۱۵.
DOI: 10.24200/J30.2018.1408

کرد، که اعضاء قطری آن فقط در کشش کار می‌کنند. نوع دیگر دیوارهای برشی فولادی، دیوار برشی با ورق جان سخت‌شده است. برخلاف دیوارهای برشی ویژه (نازک و بدون سخت‌کننده)، دیوارهای برشی با ورق سخت‌کننده قادر خواهند بود نیروهای فشاری قابل ملاحظه‌ی را تحمل کنند و در مقابل آن‌ها به سرعت کمانش نکنند. ظرفیت دیوار برشی سخت‌شده مربوط به ظرفیت قبل و پس از کمانش است، در حالی که ظرفیت دیوار برشی فولادی ویژه فقط مربوط به ظرفیت پس از کمانش بوده و ظرفیت قبل از کمانش آن بسیار ناچیز است.

مطالعات اولیه بر روی دیوارهای برشی فولادی به صورتی بود که به ورق جان اجازه‌ی کمانش داده نمی‌شد. این ایده بسیار محافظه‌کارانه بود، در حالی که ظرفیت فراکمانشی سیستم بسیار بالاست. روش‌های طراحی اخیر بر مبنای استفاده از ظرفیت فراکمانشی سیستم استوار بوده و از ظرفیت قبل از کمانش صرف‌نظر می‌شده است. در پژوهشی در انگلستان (۱۹۹۱)، آزمایش‌های رفت و برگشتی بر روی ۱۶ پانل نازک تقویت‌نشده در مقیاس کوچک جهت بررسی مشخصات بار- تغییر مکان انجام شد و نمونه‌ها شامل ورق‌های فولادی بودند که با استفاده از پیچ به یک قاب متصل شده بودند. همچنین اتصال اعضاء قاب به صورت مفصلی در نظر گرفته شده بود. جهت بررسی آثار بازشو، بعضی از پانل‌ها سوراخ داشتند. نتایج به دست آمده نشان داد که تمامی پانل‌ها، شکل‌پذیری کافی داشتند و همچنین با افزایش ابعاد بازشو، مقاومت و سختی آن‌ها به طور خطی کاهش یافته است.^[۱]

در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در سال ۱۹۹۸، به منظور بررسی رفتار یک نمونه‌ی ۴ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی که با مقیاس ۱ به ۲ ساخته شده بود، بارهای افقی یکسانی در تراز طبقات و بار ثقلی هم‌زمان در بالای ستون‌ها اعمال و پیشنهاد شد که برای جلوگیری از کماتش موضعی بال ستون، باید در قسمت‌هایی از آن که انتظار می‌رود رفتار کاملاً خمیری در دیوار رخ دهد، از سخت‌کننده استفاده شود. در هر حال حتی با گسیختگی زود هنگام پای ستون در نمونه‌ی مذکور، رفتار تناوبی آن اضافه مقاومتی در حدود ۱ و ضریب شکل‌پذیری بیش از ۶ را نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌ی آزمایشی با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل شد و انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایش به دست آمد.^[۳]

همچنین در یک مطالعه‌ی تحلیلی بر روی اتصالات قاب و بررسی متصل شدن یا متصل نشدن ورق فولادی به ستون‌ها (۱۹۹۴)، یک سری نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش اجزاء محدود تحت بار یکنواخت در تراز طبقات تحلیل شدند و بار ثقلی بر روی آن‌ها اعمال نشد. نتیجه‌ی به‌دست آمده نشان داد که بهتر است جهت تأمین ایمنی ستون‌ها و کوچک‌تر شدن ابعاد آن‌ها، ورق فولادی به ستون‌های مجاور متصل نشود و اتصال تیر به ستون به صورت مفصلی، تأثیر زیادی در سختی قاب - دیوار برشی نمی‌گذارد.^[۴]

پژوهش‌های نسبتاً کاملی نیز بر روی دیوار برشی با فولاد نرم انجام و گزارش‌هایی در ارتباط با رفتار چرخه‌ی دیوار برشی ساخته‌شده از فولاد با حد تسلیم پایین ارائه شده است. عموماً نقطه‌ی تسلیم راجع فولاد با حد تسلیم پایین، حدوداً نصف حد تسلیم فولاد A36 و کرنش نهایی آن بیش از دو برابر کرنش نهایی فولاد A36 است. این ویژگی باعث می‌شود که فولاد زودتر تسلیم شود و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بیشتری در پی داشته باشد. نمونه‌های در نظر گرفته‌شده، دیوارهای فولادی یک طبقه‌ی بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده بودند که در بالا و پایین به تکیه‌گاه‌هایی متصل بودند و تحت نیروهای برشی چرخه‌ی قرار گرفتند. پانل‌ها در حدود 1.2×1.2 متر و با ضخامت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های انجام‌شده این مطلب را تأیید می‌کند که استفاده از فولاد با چنین مشخصاتی باعث تسلیم شدن زودتر ورق فولادی می‌شود و قابلیت جذب انرژی بیشتر را به دنبال دارد. همچنین استفاده از چنین فولادی باعث به‌وجود آمدن منحنی‌های هیستریزس بسیار منطقی می‌شود. نتایج آزمایش دیوارهای برشی فولادی کم‌مقاومت در ژاپن به شکل مهمی در استفاده‌ی بهتر از فولاد در مقاومت دینامیکی بارهای جانبی کمک کرده‌اند.^[۵-۷]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۵)، نیز به اثر سخت‌کننده‌ها در رفتار دیوار برشی فولادی پرداخته و مشخصات هندسی آن‌ها برای تبدیل کماتش کلی به کماتش موضعی بررسی شده است. نتایج نشان دادند که مدل‌ها با سخت‌کننده‌ی انعطاف‌پذیر، مودی شبیه مود کلی ورق دارند؛ در حالی که مدل‌ها با سخت‌کننده‌ی صلب، مودی با کماتش موضعی دارند. همچنین بهترین نوع سخت‌کننده، سخت‌کننده‌ی است که مقاومت خمشی کافی و صلیبیت پیچشی ناچیز داشته باشد. به عبارت دیگر، سخت‌کننده‌ی شبیه مقاطع T شکل، مؤثرترین نوع سخت‌کننده است.^[۸]

برخی پژوهشگران هم به مطالعه‌ی بیشتر دیوارهای برشی فولادی سخت‌نشده و سخت‌شده، استهلاک انرژی و شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی و نیز تأثیر المان‌های مرزی در رفتار کلی دیوار برشی فولادی پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها حاکی از آن بوده است که سختی پیچشی المان‌های مرزی تأثیر زیادی در افزایش بار کماتش کشسان دیوار برشی دارد و در مقاومت پس از کماتش، اثر چندانی ندارد.^[۹-۱۱] همچنین در دیوار برشی فولادی معمولی که ورق فولادی به ستون‌های کناری متصل شده باشد، نیروی زیادی به ستون‌ها وارد خواهد شد. در پژوهشی در سال

(۲۰۱۱)، به منظور رفع مشکل ذکرشده، سیستم باربر جانبی و ثقلی را از یکدیگر جدا و دیوار برشی فولادی جدیدی به نام دیوار برشی فولادی نیمه‌تکیه‌گاه ارائه کردند. در دیوار برشی مذکور، صفحه‌ی دیوار به ستون‌های اصلی قاب که بارهای ثقلی را تحمل می‌کنند، متصل نمی‌شود و در عوض، به ستون‌های فرعی که بارهای قائم را تحمل نمی‌کنند، متصل می‌شود. تشکیل مفصل خمیری نیز در ستون‌های دیوار برشی فولادی جدید، نه فقط پایداری را تهدید نمی‌کند، بلکه شکل‌پذیری و جذب انرژی را افزایش می‌دهد.^[۱۱]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)، نیز برای بررسی دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با بتن و مقایسه‌ی سیستم‌های قاب خمشی، دیوار برشی فولادی و دیوار برشی مرکب، چند مدل دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با بتن در آزمایشگاه سازی دانشگاه تربیت مدرس ساخته و بررسی شدند. آزمایش‌ها شامل دیوارهای یک طبقه با مقیاس ۱:۴ و سه طبقه با مقیاس ۱:۳ بودند. نتایج نشان دادند که با اضافه شدن ورق فولادی به قاب صلب، همه‌ی پارامترهای سیستم لرزه‌ی بهبود یافته‌اند و سختی دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با بتن، به ویژه قبل از تسلیم ورق، به علت وجود بتن بیشتر از سختی دیوار برشی فولادی بوده است و نیز جذب انرژی دیوار برشی مرکب به صورت چشم‌گیری بیشتر از مدل‌های قاب خمشی و دیوار برشی فولادی است.^[۱۲]

همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۴، چهار دیوار برشی فولادی که از لایه‌ی بتنی جهت افزایش سختی خارج از صفحه در آن‌ها استفاده شده بود، تحلیل عددی و آزمایشگاهی شدند. نمونه‌های آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ ساخته شدند و تحت بار چرخه‌ی قرار گرفتند. پارامترهای مورد بررسی، اثر ضخامت لایه‌ی بتنی مجاور ورق فولادی و فاصله‌ی برش‌گیرهای متصل‌کننده‌ی ورق و لایه‌ی بتنی بودند. لازم به ذکر است که تفاوت بین ۴ نمونه‌ی مورد مطالعه، ضخامت دیوار و فاصله‌ی بین برش‌گیرها بود. نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام‌شده، تطابق خوبی با هم داشتند و در هر ۴ نمونه، خرابی پیش‌رونده با ترک و تخریب بتن در پاشنه‌ی دیوار اتفاق افتاده بود. همچنین در ۴ نمودار نیرو - جابه‌جایی، له‌شدگی و کاهش سختی اولیه مشاهده شده است.^[۱۳]

در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، در طراحی ساختمان فولادی با و بدون دیوار برشی فولادی، برخی از ابهامات طراحی دیوارهای مذکور رفع و نیروهای داخلی ایجادشده در اعضا سازه مقایسه شدند و نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت و عرض دیوار برشی فولادی، جابه‌جایی و تغییر مکان نسبی طبقات کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد بازشو باعث افزایش جابه‌جایی طبقات می‌شود. با افزایش ابعاد بازشو، لنگر خمشی، نیروی محوری و برشی اعضا افزایش می‌یابد و بازشوهایی که عرض بیشتر نسبت به ارتفاع دارند، اقتصادی‌تر هستند.^[۱۴] مطالعاتی که در گذشته بر روی دیوار برشی فولادی انجام شده است، کمتر به بررسی آثار بازشو در دوره‌ی تناوب و بار کماتشی پرداخته‌اند و تأثیر انحناء بررسی نشده است. در نوشتار حاضر، موارد مذکور مطالعه شده‌اند.

۲. معادلات حاکم بر کماتش برشی صفحات

در بخش کنونی به بررسی کماتش صفحات تحت نیروهای برشی و همچنین معادلات حاکم بر آن‌ها پرداخته شده است. هنگامی که یک صفحه تحت نیروی برشی قرار گیرد، تنش‌های اصلی در جهت عمود بر هم و با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به تنش‌های برشی به وجود می‌آیند که یکی از آن‌ها فشاری و دیگری کششی است. زمانی که تنش‌های فشاری به حد تسلیم برسند، صفحه کماتش می‌کند. از سوی دیگر،

بعد از کماتش را نشان می‌دهد. با قرار دادن رابطه‌های ۱ و ۵ در رابطه‌ی ۷، می‌توان ظرفیت برشی را به صورت رابطه‌ی ۸ بیان کرد:

$$V = \left[\frac{k_t \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 + \frac{1}{2} \times \sigma \times \sin 2\alpha \right] \times Lt_w \quad (8)$$

۲.۲. ضوابط آیین‌نامه‌ی AISC در مورد دیوار برشی صفحه‌یی

ویژه

از آنجایی که در نوشتار حاضر، طراحی دیوار برشی فولادی براساس آیین‌نامه‌ی AISC^[۱۶] انجام شده است، بنابراین در بخش کنونی، ضوابط مربوط به آیین‌نامه‌ی مذکور در خصوص دیوار برشی فولادی ارائه شده است که در آن برای طراحی ورق جان دیوار برشی از رابطه‌ی توربورن و کولاک^[۱۷] برای سطح مقطع بابدند معادل مطابق رابطه‌ی ۹ استفاده شده است:

$$A_b = \frac{t_w L \sin^2 2\alpha}{2 \sin \varphi \sin 2\varphi} \quad (9)$$

که در آن، L ، t_w ، α و φ به ترتیب: ضخامت ورق، طول دهانه، زاویه‌ی نواریهای کششی با راستای قائم و زاویه‌ی بابدند معادل هستند.

پس از تجزیه‌ی نیروی بابدند معادل ($V = F_y \times A_b \times \sin \varphi$) در راستای افقی و مساوی قرار دادن α و φ ، رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$V = 0.75 F_y t_w L \sin 2\alpha \quad (10)$$

آیین‌نامه‌ی AISC از ضریب ۰/۴۲ به جای ضریب ۰/۵۰ در رابطه‌ی ۱۰ استفاده کرده است ($\frac{0.5}{1.2} = 0.42$) که دلیل آن اعمال ضریب اضافه‌ی مقاومت ۱/۲ ورق جان است. مقاومت برشی اسمی که آیین‌نامه‌ی مذکور پیشنهاد کرده است، به صورت رابطه‌ی ۱۱ است:

$$V_n = 0.42 F_y t_w L \sin 2\alpha \quad (11)$$

در صورتی که روش طراحی تنش مجاز باشد، آنگاه مقاومت برشی به صورت رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$V_a = \frac{V_n}{\Omega} \quad (\Omega = 1.67) \quad (12)$$

آیین‌نامه‌ی مذکور، کمینه‌ی ممان اینرسی المان‌های قائم دیوار را به صورت رابطه‌ی ۱۳ پیشنهاد می‌کند:

$$I_c \geq \frac{0.70 \times 31 t_w h^3}{L} \quad (13)$$

همچنین کمینه‌ی ممان اینرسی المان‌های افقی بر حسب اختلاف ضخامت طبقه‌ی پایین و بالای آن به صورت رابطه‌ی ۱۴ بیان شده است:

$$I_b \geq \frac{0.70 \times 31 \Delta t_w L^3}{h} \quad (14)$$

۳. مدل‌های اجزاء محدود و مشخصات مصالح

برای مدل‌سازی اجزاء محدود دیوارهای برشی فولادی از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است.^[۱۸] در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل مودال، کماتشی و استاتیکی غیرخطی

تنش‌های کششی سعی در کشیدن صفحه به دو گوشه‌ی مرتبط به خود می‌کنند، در نتیجه کماتش حاصل یک کماتش قطری خواهد شد.

۱.۲. ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی

براساس روابط ۱ الی ۳، مقدار تنش برشی بحرانی و ضرایب کماتشی مربوط به آن برای حالات چهار طرف ساده و گیردار قابل محاسبه است:^[۱۵]

$$\tau_{cr} = \frac{k_t \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} K_t = 5.35 + \frac{4}{\varphi^2} & \text{if } \varphi > 1 \\ K_t = 4 + \frac{0.58}{\varphi^2} & \text{if } \varphi < 1 \end{cases} \quad \text{لبه‌ی ساده} \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_t = 8.98 + \frac{0.6}{\varphi^2} & \text{if } \varphi > 1 \\ K_t = 5.6 + \frac{1.98}{\varphi^2} & \text{if } \varphi < 1 \end{cases} \quad \text{لبه‌ی گیردار} \quad (3)$$

که در آن‌ها، E ، ν ، t و b به ترتیب: تنش برشی کماتشی، ضریب کماتشی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون، ضخامت و عرض ورق هستند و φ نیز نسبت طول به عرض ورق (a/b) است.

ظرفیت نهایی دیوارهای برشی فولادی را می‌توان به دو بخش: ظرفیت قبل و بعد از کماتش ورق تقسیم کرد. در ادامه، روابط مربوط به ظرفیت نهایی ورق ارائه شده است.^[۱۵] شکل ۱، نواریهای کششی و همچنین نحوه‌ی توزیع تنش در نواریهای نام برده را نشان می‌دهد.

با نوشتن رابطه‌ی تعادل نیرو در جزء مثلثی در شکل ۱، تنش‌های موجود به صورت روابط ۴ الی ۶ به دست می‌آیند:

$$\sigma_{11} = \sigma \times \cos^2 \alpha \quad (4)$$

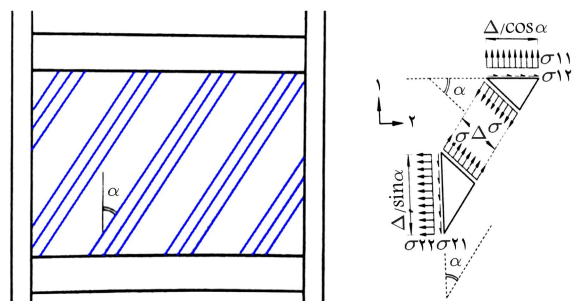
$$\sigma_{12} = \frac{1}{2} \times \sigma \times \sin 2\alpha \quad (5)$$

$$\sigma_{22} = \sigma \times \sin^2 \alpha \quad (6)$$

با توجه به مطالب ذکرشده، می‌توان ظرفیت برشی دیوار را به صورت رابطه‌ی ۷ بیان کرد:

$$V = \tau_{cr} \times Lt_w + \sigma_{12} \times Lt_w \quad (7)$$

که در آن، L و t_w به ترتیب طول دهانه و ضخامت ورق جان دیوار هستند. در رابطه‌ی ۷، بخش اول نشان‌دهنده‌ی ظرفیت قبل از کماتش و بخش دوم ظرفیت



شکل ۱. نحوه‌ی توزیع تنش در نواریهای کششی پس از کماتش ورق فولادی.

جدول ۱. پارامترها جهت محاسبه ضریب زلزله.

$A = 0.35$	بیشینه‌ی شتاب
$I = 1.2$	ضریب اهمیت
$R = 1.0$	ضریب رفتار
$T = 0.64 \text{ Sec}$	دوره‌ی تناوب
$C = 0.90$	ضریب زلزله
$V = 807.37 \text{ Ton}$	برش پایه

مدل در نظر گرفته شده، قابی یک دهانه و یک طبقه بود که طول دهانه‌ی آن (داخل به داخل ستون‌ها) ۳ متر و ارتفاع آن نیز (داخل به داخل تیرها) ۳ متر در نظر گرفته شده بود. در نتیجه‌ی طراحی دیوار برشی فولادی مورد مطالعه در طبقه‌ی آخر سازه (طبقه‌ی مورد نظر جهت بررسی)، ضخامت ورق جان ۲ میلی‌متر و ابعاد تیر و ستون آن $IPB280$ به دست آمد. لازم به یادآوری است که جهت جلوگیری از کماتش موضعی بال ستون در محل اتصال تیر به ستون، در راستای بال تیر، سخت‌کننده‌هایی در نظر گرفته شدند. همچنین پایین‌ترین قسمت مدل در ۳ جهت مهار شد و به منظور مهار جانبی دیوار نیز بالاترین قسمت آن در راستای خارج از صفحه بسته شد. بار در نظر گرفته شده در بالاترین قسمت دیوار و به صورت داخل صفحه اعمال شده است.

۳.۳. مشخصات مصالح

برای ورق جان، تیر و ستون‌ها و سخت‌کننده‌ها، از مدل دوخطی فولاد استفاده شده است. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در جدول ۵ ارائه شده است.

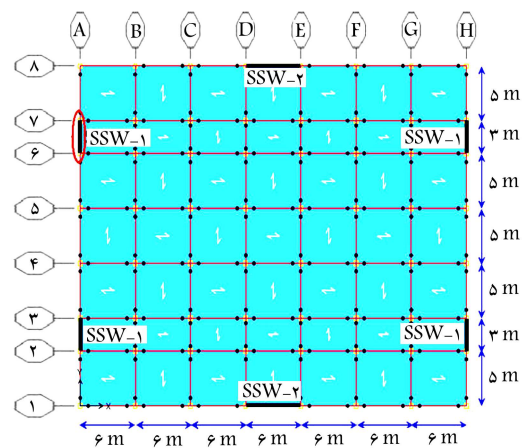
۴. صحت‌سنجی مدل‌های اجزاء محدود

در بخش کنونی، برای اطمینان از درستی مدل المان محدود و توانایی آن برای تخمین صحیح رفتار واقعی دیوار برشی، چند مدل دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار آباکوس مدل و تحلیل شدند و نتایج آن‌ها با نتایج آزمایش‌های انجام شده در مطالعات پیشین مقایسه شده است. در ادامه، مقایسه‌های انجام شده ارائه شده است.

۱.۴. مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی دکتر صبوری و همکاران

دکتر صبوری و همکارانش (۲۰۱۲)^[۱۹] مطالعات تئوری و آزمایشگاهی بر روی ۲ نمونه‌ی دیوار برشی یک طبقه با و بدون سخت‌کننده انجام دادند. در پژوهش حاضر، نمونه‌ی یک طبقه‌ی بدون سخت‌کننده‌ی صبوری و همکاران انتخاب، در نرم‌افزار مدل و سپس تحلیل شد و پس از آن نتایج آزمایشگاهی آن با نتایج مطالعه‌ی حاضر مقایسه شد. مشخصات دیوار برشی مذکور در نوشتار صبوری و همکارانش ارائه شده است. شکل ۳، تغییرشکل و تنش ایجاد شده در اثر اعمال بار در بالای دیوار مدل شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی اختلاف نمودار نیرو - جابه‌جایی مدل ساخته شده در نوشتار حاضر و نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی دکتر صبوری و همکاران است. با توجه به نتایج مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی صبوری و همکاران و نتایج حاصل از نمونه‌ی ساخته شده مشاهده شد که نتایج، اختلاف اندکی با هم داشتند که بر صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس دلالت دارد.



شکل ۲. پلان ساختمان مورد مطالعه.

توسط نرم‌افزار مذکور انجام شده است. برای مدل‌سازی ورق فولادی جان، تیرها و ستون‌ها و همچنین سخت‌کننده‌ها، از المان پوسته‌ی سه بعدی (S4R) استفاده شده است. المان مذکور توانایی بررسی رفتار هر دو پوسته‌ی ضخیم و نازک را دارد. ناگفته نماند که در مطالعه‌ی حاضر، جوش مدل نشده است.

۱.۳. نحوه‌ی طراحی مدل دیوار برشی فولادی

به منظور بررسی پارامترهای مختلف در دیوار برشی، در ابتدا دیوار برشی فولادی مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ی AISC طراحی و پس از آن به مطالعه‌ی پارامتریک طبقه‌ی انتهایی ساختمان مدنظر پرداخته شده است. مدل در نظر گرفته شده، یک ساختمان ۱۰ طبقه بود که پس از طراحی سازه، بالاترین طبقه انتخاب و بررسی‌ها بر روی آن بخش انجام شده است. ارتفاع طبقات ساختمان مذکور ۳ و ارتفاع کلی آن ۳۰ متر است. ساختمان مورد مطالعه جزء ساختمان‌های با درجه‌ی اهمیت زیاد (گروه ۲) در نظر گرفته شده است.

همچنین فرض شده است که ساختمان بر روی زمین نوع II قرار گرفته باشد. بار مرده و زنده‌ی اعمالی بر کف‌ها به جز پشت‌بام کیلوگرم بر مترمربع و همچنین بار مرده و زنده در پشت‌بام به ترتیب ۵۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. در شکل ۲، پلان در نظر گرفته شده برای ساختمان مورد مطالعه به همراه دیوارهای برشی فولادی آن نشان داده شده است. دیوار برشی مورد نظر در محورهای (A۶-A۷) انتخاب و مطالعات بر روی آن انجام شده است.

با توجه به مشخصات سازه و بارهای اعمالی بر کف هر کدام از طبقات، نیروی برشی هر طبقه و نیز با توجه به روابط موجود در آیین‌نامه‌ی AISC، ضخامت ورق جان هر کدام از طبقات به دست می‌آیند. البته جهت محاسبه‌ی ضخامت ورق، زوایای نوارهای کششی مورد نیاز است که پس از سعی و خطا، زوایای نوارهای کششی نهایی به دست خواهند آمد. پس از نهایی شدن ضخامت ورق هر کدام از طبقات، با توجه به روابط ۱۳ و ۱۴، ابعاد تیر و ستون به دست می‌آید. در ادامه، خلاصه‌ی نتایج طراحی دیوار برشی فولادی در جدول‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است.

۲.۳. هندسه‌ی کلی مدل اجزاء محدود

به منظور بررسی پارامترهای مختلف، طبقه‌ی آخر سازه که مراحل طراحی آن در بخش ۱.۳ ارائه شد، انتخاب و در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل و تحلیل شد.

جدول ۲. طراحی ضخامت ورق جان.

طبقه	وزن طبقه (Ton)	نیروی برشی طبقه (Ton)	α (Degree)	ضخامت (mm)	(USE)
۱۰	۷۶۸٫۱۸	۱۲۷٫۳۷	۴۰٫۷	۱٫۷۸	۲
۹	۹۱۱٫۴	۲۶۳٫۳۷	۴۰٫۰	۳٫۶۹	۴
۸	۹۱۱٫۴	۳۸۴٫۲۶	۳۹٫۵	۵٫۴۰	۶
۷	۹۱۱٫۴	۴۹۰٫۰۳	۳۸٫۶	۶٫۹۴	۷
۶	۹۱۱٫۴	۵۸۰٫۷۰	۳۸٫۲	۸٫۲۵	۹
۵	۹۱۱٫۴	۶۵۶٫۲۶	۳۷٫۹	۹٫۳۴	۱۰
۴	۹۱۱٫۴	۷۱۶٫۷۰	۳۷٫۷	۱۰٫۲۲	۱۱
۳	۹۱۱٫۴	۷۶۲٫۰۴	۳۷٫۵	۱۰٫۸۹	۱۱
۲	۹۱۱٫۴	۷۹۲٫۲۶	۳۷٫۵	۱۱٫۳۲	۱۲
۱	۹۱۱٫۴	۸۰۷٫۳۷	۳۷٫۳	۱۱٫۵۷	۱۲

جدول ۳. طراحی ستون‌های طبقات ساختمان.

طبقه	دهانه (cm)	ارتفاع (cm)	ضخامت (USE)	ممان اینرسی المان قائم (cm ^۴)	ستون (section)
۱۰	۳۰۰	۳۰۰	۲	۱۶۷۴۰٫۰	IPB۲۸۰
۹	۳۰۰	۳۰۰	۴	۳۳۴۸۰٫۰	IPB۳۴۰
۸	۳۰۰	۳۰۰	۶	۵۰۲۲۰٫۰	IPB۴۰۰
۷	۳۰۰	۳۰۰	۷	۵۸۵۹۰٫۰	IPB۴۵۰
۶	۳۰۰	۳۰۰	۹	۷۵۳۳۰٫۰	IPB۴۵۰
۵	۳۰۰	۳۰۰	۱۰	۸۳۷۰۰٫۰	IPB۵۰۰
۴	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۹۲۰۷۰٫۰	IPB۵۰۰
۳	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۹۲۰۷۰٫۰	IPB۵۰۰
۲	۳۰۰	۳۰۰	۱۲	۱۰۰۴۴۰٫۰	IPB۵۰۰
۱	۳۰۰	۳۰۰	۱۲	۱۰۰۴۴۰٫۰	IPB۵۰۰

جدول ۴. طراحی تیرهای طبقات ساختمان.

طبقه	دهانه (cm)	ارتفاع (cm)	ضخامت (USE)	ممان اینرسی المان قائم (cm ^۴)	ستون (section)
۱۰	۳۰۰	۳۰۰	۲	۱۶۷۴۰٫۰	IPB۲۸۰
۹	۳۰۰	۳۰۰	۴	۱۶۷۴۰٫۰	IPB۲۸۰
۸	۳۰۰	۳۰۰	۶	۱۶۷۴۰٫۰	IPB۲۸۰
۷	۳۰۰	۳۰۰	۷	۸۳۷۰٫۰	IPB۲۸۰
۶	۳۰۰	۳۰۰	۹	۱۶۷۴۰٫۰	IPB۲۸۰
۵	۳۰۰	۳۰۰	۱۰	۸۳۷۰٫۰	IPB۲۴۰
۴	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۸۳۷۰٫۰	IPB۲۴۰
۳	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۰٫۰	IPB۲۴۰
۲	۳۰۰	۳۰۰	۱۲	۸۳۷۰٫۰	IPB۲۴۰
۱	۳۰۰	۳۰۰	۱۲	۰٫۰	IPB۲۴۰

جدول ۵. مصالح مصرفی در مدل اجزاء محدود.

تنش تسلیم (F_y) (MPa)	تنش نهایی (F_u) (MPa)	کرنش نهایی (Strain at Ultimate) (%)	مدول کشسانی (E) (GPa)	قالب
۳۶۰	۵۲۰	۱۵	۲۱۰	قالب
۲۷۰	۴۲۰	۲۰	۲۱۰	ورق

ولی زاده و همکاران مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی و نتایج حاصل از نمونه‌ی ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس، مشاهده می‌شود که نتایج اختلاف ناچیزی با هم دارند و نرم‌افزار مذکور قادر به در نظر گرفتن فشردگی در مدل‌هاست.

۵. نتایج

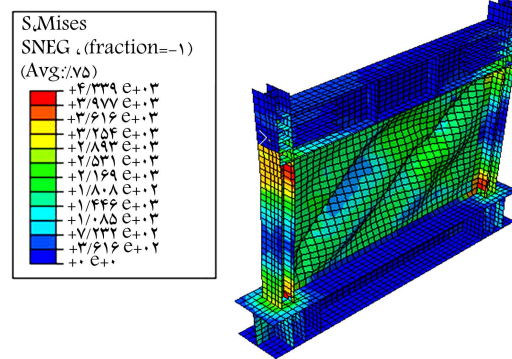
در بخش حاضر، به نتایج دیوار برشی فولادی با بازشوهاى مختلف پرداخته شده است. بررسی‌هایی که در بخش کنونی انجام شده است، عبارت‌اند از: اثر وجود انحنا در گوشه‌های بازشوها، تأثیر موقعیت بازشو در دوره‌ی تناوب، بارکمانشی و مقاومت دیوار. در ادامه، به ارائه‌ی جزئیات هر کدام از حالات مذکور پرداخته شده است.

۱.۵. اثر انحنا در بازشوها

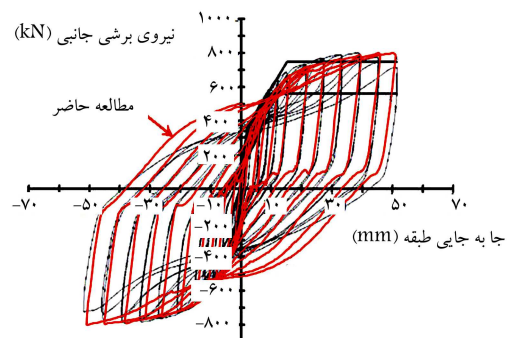
یکی از مشکلاتی که بازشوها در دیوار برشی فولادی به وجود می‌آورند، ایجاد ترک به دلیل تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوهاست. این موضوع در دیوارهای برشی فولادی ویژه (بدون سخت‌کننده) بیشتر مطرح می‌شود. جهت جلوگیری از ایجاد ترک می‌توان در اطراف بازشوها، سخت‌کننده‌هایی در نظر گرفت که از ایجاد ترک جلوگیری کنند. یکی دیگر از راه‌های جلوگیری از تمرکز تنش و ایجاد ترک، ایجاد انحنای اطراف گوشه‌های بازشو به جای تیزگوشه بودن آن‌هاست. با تغییرات شعاع انحنای گوشه‌های بازشو، سطح مفید بازشو و مقاومت دیوار برشی تغییر می‌کند.

در بخش حاضر، به بررسی آثار انحنا در مقاومت دیوار برشی فولادی پرداخته شده و هدف از آن به دست آوردن بیشینه‌ی شعاع انحنایی است که کمترین تأثیر را در مقاومت و سطح مفید بازشو داشته باشد. به عبارت دیگر، به منظور عدم ایجاد ترک در اطراف بازشو، باید انحنایی در نظر گرفته شود که کمترین کاهش را در سطح بازشو داشته باشد و چندان تأثیری در مقاومت دیوار نداشته باشد. شکل ۶، ابعاد مدل‌های در نظر گرفته‌شده را نشان می‌دهد.

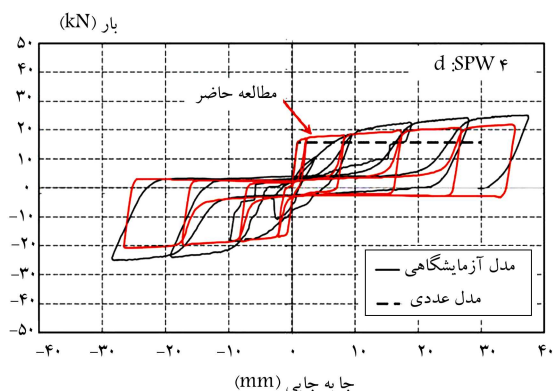
به منظور بررسی اثر شعاع انحنا در مقاومت دیوار برشی، ۱۲ مدل اجزاء محدود سامان‌دهی شده است. یکی از نمونه‌ها بدون بازشو و بقیه‌ی مدل‌ها با بازشوهایی مختلف در نظر گرفته شده‌اند. شعاع انحنا از صفر تا ۰/۵ متر متغیر است. البته شکل بازشو با شعاع انحنای ۰/۵ متر به صورت دایره‌یی بوده است. شکل ۷، کاترور تنش ایجادشده در یکی از مدل‌ها با شعاع انحنای ۰/۲ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. مدل‌های دیوار برشی فولادی مختلف با شعاع انحنای گوناگون تحت بار مونوتونیک توسط نرم‌افزار آباکوس تحلیل غیرخطی شده‌اند. نمودار مربوط به بار - جابه‌جایی



شکل ۳. تغییر شکل و تنش ایجادشده در اثر اعمال بار.



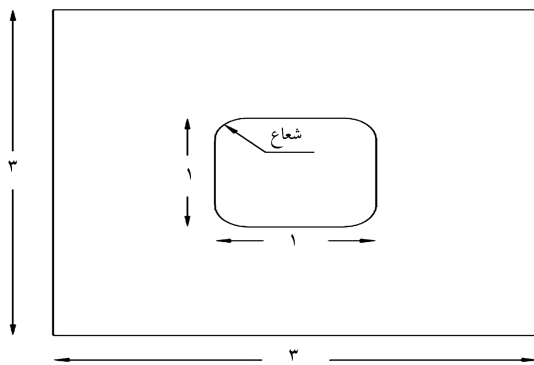
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با مدل آزمایشگاهی دکتر صبوری و همکاران [۱۹]



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با مدل آزمایشگاهی ولی زاده و همکاران [۲۰]

۲.۴. مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی دکتر ولی زاده و همکاران

از آنجایی که موضوع نوشتار در مورد اثر بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی است، در نتیجه در بخش کنونی لزوم صحت‌سنجی یک نمونه‌ی دیوار برشی با بازشو احساس شده است. مهم‌ترین مورد از مدل‌سازی دیوار برشی با بازشو، فشردگی^۲ است. بنابراین در ادامه، یکی از نمونه‌های مورد آزمایش ولی زاده و همکاران [۲۰] انتخاب و مدل‌سازی آن در نرم‌افزار انجام شده است. در نوشتار حاضر، مدل SPW۴، که ورق جان آن ۰/۷ میلی‌متر و قاب آن مفصلی است، در نظر گرفته شده و مدل‌سازی آن انجام شده است. قابل ذکر است که قطر سوراخ دایره‌یی آن ۲۵ میلی‌متر است که در مرکز ورق است. در شکل ۵، مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی حاضر و مدل آزمایشگاهی

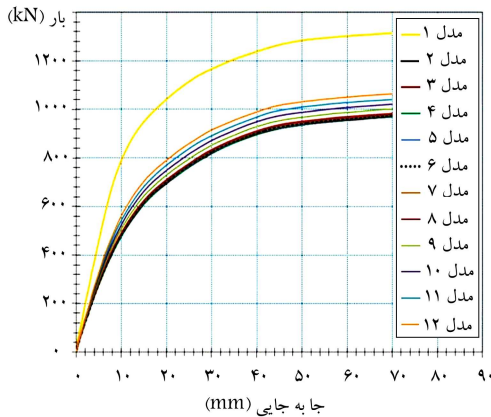


شکل ۶. ابعاد در نظر گرفته‌شده در نرم‌افزار آباکوس.

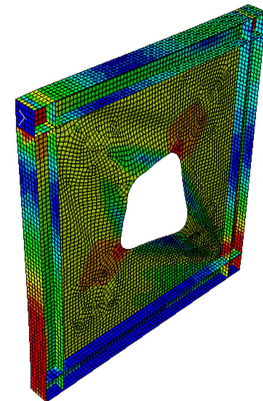
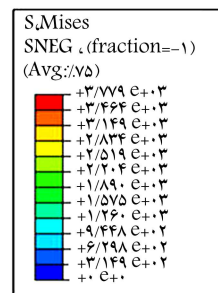
جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج مدل‌ها با شعاع انحنا مختلف.

نام مدل	شعاع انحنا (cm)	سطح بازشو (cm ²)	مقاومت دیوار (kN)	درصد کاهش نیرو *	درصد اختلاف **
۱	-	۰	۱۳۱۳/۹۵	٪۰	-
۲	۰	۱۰۰۰۰	۹۶۹/۵۸	٪۲۶	٪۰/۰۰
۳	۱	۹۹۹۹	۹۶۹/۸۴	٪۲۶	٪۰/۰۳
۴	۲	۹۹۹۷	۹۷۰/۸۶	٪۲۶	٪۰/۱۳
۵	۴	۹۹۸۶	۹۷۳/۸۱	٪۲۶	٪۰/۴۴
۶	۶	۹۹۶۹	۹۷۷/۱۱	٪۲۶	٪۰/۷۸
۷	۸	۹۹۴۵	۹۷۹/۵۲	٪۲۵	٪۱/۰۲
۸	۱۰	۹۹۱۴	۹۸۳/۳۱	٪۲۵	٪۱/۴۲
۹	۲۰	۹۶۵۷	۱۰۰۰/۹۶	٪۲۴	٪۳/۲۴
۱۰	۳۰	۹۲۲۷	۱۰۲۰/۷۱	٪۲۲	٪۵/۲۷
۱۱	۴۰	۸۶۲۷	۱۰۴۱/۵۷	٪۲۱	٪۷/۴۲
۱۲	۵۰	۷۸۵۴	۱۰۶۳/۲۱	٪۱۹	٪۹/۶۶

* منظور از درصد کاهش نیرو، عبارت است از کاهش بیشینه‌ی نیروی مدل‌ها نسبت به حالت بدون بازشو.
** منظور از درصد اختلاف، عبارت است از درصد اختلاف مدل‌های با انحنا نسبت به حالت بدون انحنا.



شکل ۸. تغییرات نیرو - جابه‌جایی مدل‌های اجزاء محدود با شعاع انحنا مختلف.



شکل ۷. تنش ایجاد شده در دیوار برشی تحت بار جانبی.

۲.۵. اثر موقعیت بازشو در مقاومت دیوار برشی

بدون شک موقعیت بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی بسیار مؤثر است. در بخش کنونی به بررسی موقعیت بازشو پرداخته شده است. بدین منظور ۳۷ مدل اجزاء محدود با بازشوهایی مختلف یک دیوار برشی فولادی با ابعاد و مشخصاتی که در بخش ۳ ارائه شد، سامان‌دهی و تحلیل شدند. به منظور بررسی دقیق‌تر موقعیت بازشو، بازشوی مربعی به ابعاد 50×50 سانتی‌متر در سرتاسر دیوار جابه‌جا و ظرفیت هر کدام از مدل‌ها استخراج شده است. در شکل ۹، شماری هر کدام از مدل‌ها در موقعیت بازشوی آن‌ها مشاهده می‌شود. براساس موقعیت بازشوهایی نشان داده شده در شکل ۹، در جدول ۷ مقدار دوره‌ی تناوب مد اول، نیروی کمناشی و ظرفیت هر کدام از مدل‌های مذکور ارائه شده است. لازم به ذکر است که مدل ۱ مربوط به دیوار برشی فولادی بدون بازشو است.

در جدول ۷، T_1 ، B_1 و F_{max} به ترتیب دوره‌ی تناوب مد اول، نیروی کمناشی اولین مد و بیشینه‌ی ظرفیت حاصل از تحلیل غیرخطی مدل‌های اجزاء محدود هستند. برای مقایسه‌ی پارامترهای مذکور دیوار برشی فولادی با بازشو و بدون بازشو

۱۲ مدل در نظر گرفته شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۶، خلاصه‌ی نتایج مربوط به مدل‌های اجزاء محدود ارائه شده است.

شکل ۸ و جدول ۶، نتایج مربوط به اثر شعاع انحنا در مقاومت دیوار برشی فولادی را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار و جدول مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنا و کاهش سطح بازشو، بیشینه‌ی نیروی اعمالی افزایش می‌یابد. ایجاد بازشوی مربعی و دایره‌یی به ترتیب باعث کاهش ۲۶ و ۱۹ درصدی مقاومت نسبت به حالت بدون بازشو می‌شود. هدف اصلی بررسی اثر انحنا در مقاومت دیوار برشی فولادی، پیدا کردن بیشترین شعاع انحناست که کمترین تأثیر را در تغییر مقاومت داشته باشد، به گونه‌یی که ایجاد انحنا فقط مانع از ایجاد ترک شود و در مقاومت دیوار با بازشوی بدون انحنا تأثیری نداشته باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود که با ایجاد شعاع انحنا ۲۰ سانتی‌متری، مقدار افزایش مقاومت تقریباً ۳٪ است. در نتیجه، جهت ممانعت از ایجاد ترک می‌توان به جای گوشه‌های تیز از شعاع انحنا ۲۰ سانتی‌متری که ۲۰٪ اضلاع بازشو است، استفاده کرد.

جدول ۷. نتایج مدل‌ها با موقعیت بارشوهای مختلف.

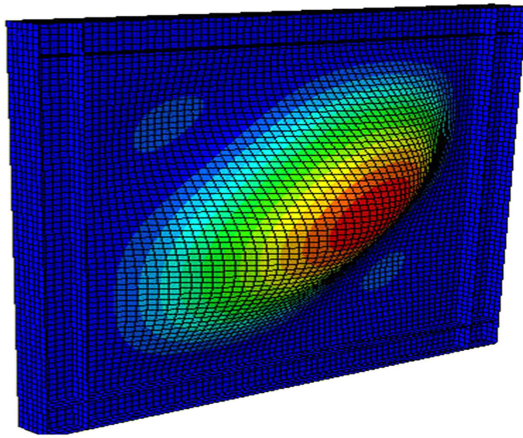
نام مدل	تحلیل مودال		تحلیل کماتشی		تحلیل غیرخطی	
	T_1	D_1 (%)	B_1 (kN)	D_2 (%)	F_{max} (kN)	D_2 (%)
Model-۱	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۶۸	۰٫۰۰	۱۳۱۳٫۹۵	۰٫۰۰
Model-۲	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۴۵	۳٫۰۸	۱۲۲۵٫۰۹	۶٫۷۶
Model-۳	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۷٫۰۲	۸٫۷۱	۱۲۱۴٫۴۶	۷٫۵۷
Model-۴	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۶۴	۰٫۶۱	۱۲۲۵٫۰۱	۶٫۷۷
Model-۵	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۶٫۸۶	۱۰٫۷۷	۱۲۳۷٫۲	۵٫۸۴
Model-۶	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۶٫۱۱	۲۰٫۴۷	۱۲۵۳٫۴۹	۴٫۶۰
Model-۷	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۵۵	۱۴٫۷۹	۱۲۸۰٫۵۹	۲٫۵۴
Model-۸	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۶٫۸۶	۱۰٫۷۷	۱۲۱۷٫۰۶	۷٫۳۷
Model-۹	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۳۳	۱۷٫۶۰	۱۱۸۵٫۶۲	۹٫۷۷
Model-۱۰	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۰۳	۸٫۵۵	۱۱۸۶٫۲۶	۹٫۷۲
Model-۱۱	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۱۸	۱۹٫۶۱	۱۱۹۷٫۲۹	۸٫۸۸
Model-۱۲	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۵٫۶۳	۲۶٫۷۵	۱۲۲۱٫۲۹	۷٫۰۵
Model-۱۳	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۶٫۰۷	۲۱٫۰۳	۱۲۵۸٫۹۱	۴٫۱۹
Model-۱۴	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۵۸	۱٫۳۴	۱۲۲۴٫۶۲	۶٫۸۰
Model-۱۵	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۷۷	۱۱٫۸۸	۱۱۸۱٫۷۹	۱۰٫۰۶
Model-۱۶	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۶۸	۱۳٫۱۲	۱۱۷۱٫۸۶	۱۰٫۸۱
Model-۱۷	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۵٫۹۳	۲۲٫۸۷	۱۱۷۹٫۵۵	۱۰٫۲۳
Model-۱۸	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۰۵	۲۱٫۳۳	۱۲۰۶٫۳۶	۸٫۱۹
Model-۱۹	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۶٫۶۶	۱۳٫۳۳	۱۲۴۷٫۳۶	۵٫۰۷
Model-۲۰	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۱۳	۷٫۲۶	۱۲۳۹٫۱۴	۵٫۶۹
Model-۲۱	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۴۳	۱۶٫۳۵	۱۱۹۶٫۵۹	۸٫۹۳
Model-۲۲	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۰۲	۲۱٫۶۶	۱۱۷۸٫۴۴	۱۰٫۳۱
Model-۲۳	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۶۱	۱۴٫۰۴	۱۱۸۰٫۶۹	۱۰٫۱۴
Model-۲۴	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۳۸	۳٫۹۱	۱۲۰۱٫۰۴	۸٫۵۹
Model-۲۵	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۴۳	۳٫۳۷	۱۲۴۰٫۷۹	۵٫۵۷
Model-۲۶	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۶٫۶۶	۱۳٫۲۹	۱۲۵۹٫۸۳	۴٫۱۲
Model-۲۷	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۲۲	۱۹٫۰۱	۱۲۲۳٫۰۷	۶٫۹۲
Model-۲۸	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۶٫۵۱	۱۵٫۲۹	۱۲۰۴٫۳۳	۸٫۳۴
Model-۲۹	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۳۴	۴٫۵۴	۱۱۹۸٫۲۷	۸٫۸۰
Model-۳۰	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۰۵	۸٫۳۰	۱۲۰۶٫۳۱	۸٫۱۹
Model-۳۱	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۷٫۶۱	۱٫۰۱	۱۲۳۸٫۶۳	۵٫۳۷
Model-۳۲	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۰۷	۸٫۰۵	۱۲۹۰٫۸۴	۱٫۷۶
Model-۳۳	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۶٫۸۰	۱۱٫۵۵	۱۲۶۵٫۹۸	۳٫۶۵
Model-۳۴	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۲۲	۶٫۰۲	۱۲۴۹٫۰۱	۴٫۹۴
Model-۳۵	۱۶٫۳۹	۳٫۲۸	۷٫۶۶	۰٫۳۰	۱۲۳۷٫۲۵	۵٫۸۴
Model-۳۶	۱۶٫۱۳	۱٫۶۱	۷٫۶۷	۰٫۱۷	۱۲۲۸٫۱۸	۶٫۵۳
Model-۳۷	۱۵٫۸۷	۰٫۰۰	۷٫۶۸	۰٫۰۴	۱۲۳۹٫۴۶	۵٫۶۷

در صورتی که بازشو در مرکز دیوار واقع شده باشد، دوره‌ی تناوب مربوط به مد اول چندان تغییری نمی‌کند و بازشو در کناره‌ها، بیشتر باعث تغییر در دوره‌ی تناوب مد اول می‌شود. در شکل ۱۰، نواحی که بیشترین تأثیر در افزایش دوره‌ی تناوب را دارند، مشاهده می‌شوند.

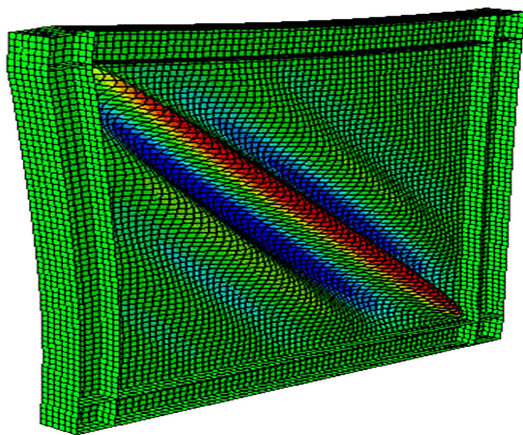
با توجه به شکل ۱۰، نواحی شماره‌ی ۱ تأثیر چندانی در تغییر دوره‌ی تناوب ندارند. نواحی شماره‌ی ۲ و ۳ به ترتیب باعث افزایش ۱٫۶۱ و ۳٫۲۸ درصدی

در ستون‌های D_1 ، D_2 و D_3 از جدول مذکور، درصد اختلاف نتایج دیوار برشی با و بدون بازشو ارائه شده است.

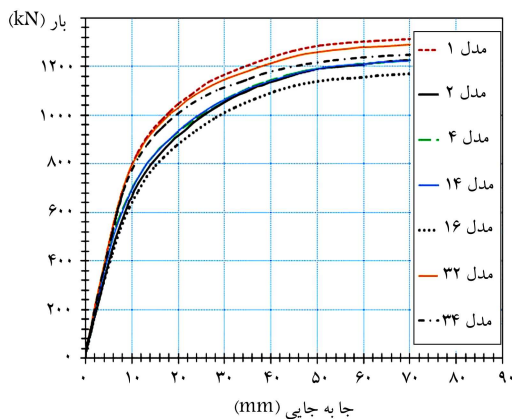
از نتایج ارائه شده در جدول ۷ به وضوح مشخص است که بازشو، پارامترهای دیوار برشی فولادی را تغییر داده است و موقعیت آن در مقدار تغییر پارامترها بسیار مؤثر است. کلاً می‌توان این‌گونه بیان کرد که بازشو در دیوار برشی فولادی باعث افزایش دوره‌ی تناوب مد اول می‌شود. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود،



شکل ۱۱. کانتور تغییرشکل یافته‌ی ورق جان دیوار در اثر کمانش.



شکل ۱۲. کانتور تغییرشکل خارج از صفحه‌ی دیوار.

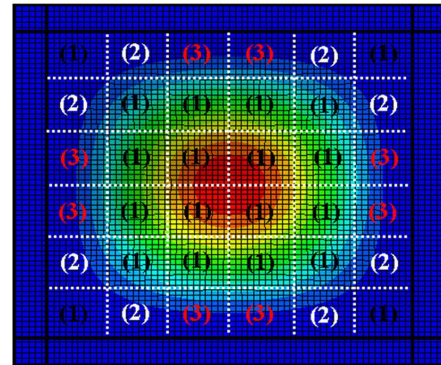


شکل ۱۳. نمودار نیرو- جابه‌جایی مدل‌های دیوار برشی فولادی با بازشوهای مختلف.

آنجایی که محدوده‌ی میانی ورق جان، بیشترین جابه‌جایی را دارد، در نتیجه بیشترین تنش غشایی در اثر ناحیه‌ی مذکور به وجود می‌آید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محدوده‌ی میانی ورق جان دیوار، بیشترین نقش را در مقاومت دیوار ایفا می‌کند. جهت مقایسه‌ی رفتار دیوارهای برشی فولادی با موقعیت بازشوهای گوناگون، در شکل ۱۳، نمودار نیرو- جابه‌جایی چند مدل معرفی شده‌ی مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مدل ۳۲ که در پایین دیوار بازشو قرار

۲	۳	۴	۵	۶	۷
۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵
۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱
۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷

شکل ۹. موقعیت بازشوهای $5^\circ \times 5^\circ$ سانتی متری در دیوار برشی.



شکل ۱۰. تقسیم‌بندی نواحی مختلف تأثیرگذار در دوره‌ی تناوب.

دوره‌ی تناوب مد اول شده‌اند. از آنجایی که نواحی ۲ و ۳ بازشوهایی هستند که در مرز بین نواحی تغییرشکل یافته و تغییرشکل نیافته (تغییرشکل خارج از صفحه مدنظر است) قرار گرفته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت بازشوهایی که در مرز بین نواحی تغییرشکل یافته و تغییرشکل نیافته قرار دارند، تأثیر بیشتری در افزایش دوره‌ی تناوب دارند.

نتایج مربوط به بارکمانشی نشان می‌دهد که ایجاد بازشو باعث کاهش نیروی کمانشی دیوار برشی فولادی می‌شود. بازشو بر روی قطرهای دیوار بیشترین تأثیر را در کاهش بارکمانشی دارند. به گونه‌یی که ایجاد بازشو باعث کاهش ۲۶/۷۵٪ بار کمانشی دیوار می‌شود. در کل می‌توان گفت بازشوهایی که در محدوده‌ی ناحیه‌ی تغییرشکل یافته در اثر کمانش ورق جان دیوار برشی فولادی قرار دارند، بیشترین تأثیر را در تغییر بارکمانشی دارند. شکل ۱۱، کانتور تغییرشکل یافته‌ی ورق جان دیوار را در اثر کمانش نشان می‌دهد.

بازشوها علاوه بر کاهش بارکمانشی، باعث کاهش مقاومت دیوار برشی فولادی می‌شوند. درصد کاهش مقاومت بستگی به موقعیت بازشو دارد. هر چه بازشو به مرکز دیوار نزدیک‌تر باشد، بیشتر باعث کاهش مقاومت دیوار برشی فولادی می‌شود. بازشوی ایجادشده در مدل شماره‌ی ۱۶ که در مرکز ورق جان دیوار در نظر گرفته شده است، باعث کاهش تقریبی ۱۱٪ مقاومت دیوار شده است. شکل ۱۲، کانتور تغییرشکل خارج از صفحه‌ی دیوار تحت بار در بالای آن را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۲، دلیل اینکه بازشو در مرکز دیوار، بیشتر باعث کاهش مقاومت می‌شود، این است که در مرکز دیوار، تغییرشکل‌های خارج از صفحه بیشتر هستند. در اثر اعمال بار، ورق کمانش می‌کند و در اثر کمانش ورق، یک سری تنش‌های غشایی کششی به وجود می‌آید. راستای تنش‌های غشایی به وجود آمده عمود بر راستای تغییرشکل به‌وجود آمده در اثر کمانش هستند. هر چه تغییرشکل خارج از صفحه در نقطه‌ی از ورق بیشتر باشد، تنش غشایی بیشتری به وجود می‌آید. از

چه شعاعی تغییرات قابل قبولی در رفتار دیوار داشته باشد و کمتر باعث کاهش سطح مفید بازشو شود؛ و از طرف دیگر، انحنا مذکور از آغاز ترک‌های زود هنگام در گوشه‌ی بازشو جلوگیری کند. با ایجاد شعاع انحنا ۲۰ سانتی‌متری، مقدار افزایش مقاومت تقریباً ۳٪ است. بنابراین می‌توان جهت ممانعت از ایجاد شعاع انحنا بی به اندازه‌ی ۲۰٪ اندازه‌ی ابعاد بازشو ایجاد کرد. همچنین ایجاد بازشوی مربعی و دایره‌یی به ترتیب باعث کاهش ۲۶ و ۱۹ درصدی مقاومت نسبت به حالت بدون بازشو می‌شود.

۲. بازشو در کنارهای دیوار نسبت به وسط پانل آن، بیشتر باعث تغییر در دوره‌ی تناوب دیوار می‌شود. در واقع بازشو در مرکز دیوار، چندان اثری در دوره‌ی تناوب ندارد.

۳. وجود بازشو در دیوار برشی فولادی و بر روی قطره‌های دیوار، باعث کاهش بیشتر بار کمانشی می‌شود. به گونه‌یی که در مدل ۱۲ که بازشو بر روی قطر آن قرار دارد، بیشترین کاهش بار کمانشی اتفاق افتاده است.

۴. ایجاد بازشو نیز باعث کاهش مقاومت دیوار می‌شود. البته در دیوارهای برشی فولادی، ایجاد بازشو در مرکز دیوار بیشتر باعث کاهش مقاومت می‌شود. این امر را می‌توان به دلیل تغییر مکان‌های خارج از صفحه‌ی بیشتری که در مرکز دیوار ایجاد می‌شود، دانست. هر چه بازشو از مرکز دیوار فاصله گیرد، درصد کاهش مقاومت کم می‌شود.

دارد، مقاومتی نزدیک به دیوار برشی بدون بازشو دارد. کمترین مقاومت مربوط به دیوار با بازشو در مرکز است (مدل ۱۶). همچنین مدل‌های ۲، ۴ و ۱۴، مقاومت یکسانی دارند.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، معادلات حاکم بر کمانش برشی و ضوابط آیین‌نامه‌ی AISC در مورد طراحی دیوار برشی فولادی شرح داده شده است. در ادامه، روند طراحی دیوار برشی به‌طور مختصر ارائه شده است. پس از انتخاب یک طبقه از مدل دیوار برشی طراحی شده در یک ساختمان ۱۰ طبقه، به مطالعه‌ی پارامتریک دیوار مذکور پرداخته شد. به منظور کنترل نتایج نرم‌افزار آباکوس، از نتایج برخی پژوهش‌ها، استفاده شد. [۲۰، ۱۹] اختلاف بین نتایج مطالعه‌ی حاضر و نتایج پژوهش‌های مذکور، بسیار اندک است. در مطالعه‌ی حاضر، آثار موقعیت بازشو در دوره‌ی تناوب، نیروی کمانشی و مقاومت دیوار برشی فولادی بررسی شده است. بدین منظور مدل‌های اجزاء محدود با بازشوهایی مختلفی در نرم‌افزار آباکوس ساخته شدند و تحت بار جانبی در بالای دیوار قرار گرفتند. خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده به این شرح ارائه شده است:

۱. با افزایش شعاع انحنا گوشه‌ی بازشوها و کاهش سطح بازشو، مقاومت دیوار افزایش می‌یابد. هدف از بررسی‌ها این است که نشان دهد از یک طرف، در

پانویس‌ها

1. Abaqus
2. pinching

منابع (References)

1. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels", *Thin-Walled Structures Journal*, **12**(2), pp. 145-162 (1991).
2. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. "Cyclic test of four-story steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), pp. 112-120 (1998).
3. Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E. and Kennedy, D.J.L. "FE and simplified models of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), pp. 121-130 (1998).
4. Xue, M. and Lu, L. "Interaction of infilled steel shear wall panels with surrounding frame members", *Proceedings of 1994 Annual Task Group Technical Session, Structural Stability Research Council: Report on Current Research Activities*, Lehigh University, Bethlehem, PA (1994).
5. Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, Sh., Akazawa, T. and Saburi, K. "Energy dissipation behavior of shear panels made of low yield

steel", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(12), pp. 1299-1313 (1994).

6. Nakashima, M. "Strain-hardening behavior of shear panels made of low yield steel, I: Test", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **121**(12), pp. 1742-1749 (1995).
7. Nakashima, M., Akawaza, T. and Tsuji, B. "Strain-hardening behavior of shear panels made of low yield steel, II: Model", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **121**(12), pp. 1750-1757 (1995).
8. Alinia M. "A Study into optimization of stiffeners in plates subjected to in-plane shear loads", *Thin-Walled Structures*, **43**(4), pp. 845-860 (2005).
9. Alinia M. and Dastfan M. "Behavior of thin steel plate shear walls regarding frame members", *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(7), pp. 730-738 (2006).
10. Alinia M. and Dastfan M. "Cyclic behavior deformability and rigidity of stiffened steel shear panels", *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(4), pp. 554-563 (2007).
11. Jahanpour A., Moharrami H. and Aghakoochak A. "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(6), pp. 1022-1030 (2011).
12. Arabzadeh, A., Soltani, M. and Ayazi, A. "Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings", *Thin-Walled Structures Journal*, **49**(7), pp. 842-854 (2011).

13. Epackachi, S., Nguyen, N.H., Kurt, E.G., Andrew, S. and Varma, A.H. "In-plane seismic behavior of rectangular steel-plate composite wall piers", *Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers*, ST.1943-541 X.0001148 (2014).
14. Patil, A.N. and Dahake, A.G. "Design of steel plate shear wall with opening for steel building", *Journal of Structural Engineering and Management*, **1**(2), pp. 17-24 (2014).
15. Alinia, M.M., *Theory of Plates and Shells*, Ashtiyani, Second Edition (2000).
16. AISC. "Seismic provisions for structural steel building", American Institute of Steel Construction, INC., Chicago (2005).
17. Thorburn, I.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. "Analysis of steel plate shear walls", Structural Engineering Report No. 107, Department Of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
18. *ABAQUS/Standard Theory Manual*, Version 6.13-1, Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc, (HKS) (2013).
19. Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S.R.A. "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, **75**, pp. 152-159 (2012).
20. Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. "Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **70**, pp. 308-316 (2011).