

اثر محل بازشوی متمرکز در کاهش ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی

مجید قلهکی* (دانشیار)

محمد جلیلزاده افشاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۳۳-۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۳-۲۵

پتانسیل بالای دیوارهای برشی فولادی در جذب انرژی و شکل‌پذیری زیاد آنها باعث شده است که جهت تحمل بارهای جانبی، به ضخامت‌های بسیار کم به خصوص در طبقات فوقانی نیاز داشته باشند، که در محاسبات گاهی به کسری از میلی‌متر می‌رسد. از آنجا که ممکن است ورق‌های فولادی با چنین ضخامت‌هایی در بازار موجود نباشد، استفاده از ورق با ضخامت بالاتر از نیاز طراحی، ولی با ایجاد بازشو برای کاهش سختی، یکی از راه‌حل‌های منطقی است. از سوی دیگر، وجود بازشو به لحاظ ملاحظات معماری نظیر تعبیه‌ی پنجره و نورگیری امری بدیهی و اجتناب‌ناپذیر است. در این نوشتار، ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی در اثر وجود بازشو در نقاط مختلف، به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، رابطه‌ی نیمه تجربی و بی‌بعد شده جهت تخمین دقیق میزان کاهش مقاومت دیوار با بازشو در هر نقطه‌ی دلخواهی از ورق ارائه شده است.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، مقاومت حد کشسان، میدان کشش قطری، بازشو.

mgholhaki@semnan.ac.ir
m.jalilzadeh.afshari@yahoo.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، جهت اطمینان از نحوه‌ی عملکرد لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی، پژوهش‌های آزمایشگاهی وسیعی تحت بارهای چرخه‌یی و یک جهته بر روی دیوارهای برشی فولادی صورت گرفته است، که نتایج آن نشان‌گر سختی زیاد، مقاومت کافی، شکل‌پذیری فوق‌العاده و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای این سیستم لرزه‌بر بوده است. با توجه به اینکه از دیوارهای برشی فولادی علاوه بر سازه‌های نواحی، در بهسازی لرزه‌ی سازه‌های موجود نیز استفاده می‌شود، لذا مطالعه‌ی دیوارهای برشی فولادی از منظر تحلیلی همواره مورد علاقه‌ی پژوهشگران بوده است.

در یک‌سری مطالعات آزمایشگاهی (۱۹۹۲)^[۱]، که جهت بررسی اثر بازشو در رفتار پانل‌های برشی فولادی با تعبیه‌ی روزه‌های دایره‌یی شکل در مرکز ورق تحت بارهای چرخه‌یی انجام شده است، برای ساخت هر پانل، ورق فولادی به اعضاء مرزی پیچ شده و اعضاء مرزی افقی و قائم نیز با اتصالات ساده به هم متصل شده‌اند. بار چرخه‌یی از طریق گوشه‌های قطری توسط ماشین هیدرولیکی به ظرفیت ۲۵ تن اعمال شده است. عمق پانل‌ها ۳۰۰ میلی‌متر، عرض آنها ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر، و ضخامت ورق‌ها نیز ۸۳/۰ تا ۲۳/۱ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. برای تنش تسلیم ورق‌ها مقادیر ۲۱۹ و ۱۵۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بازشوهای دایره‌یی به قطرهای ۱۰۵، ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در مرکز ورق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بر پایه‌ی نتایج آزمایش، مقاومت و سختی پانل در اثر بازشو مطابق رابطه‌ی ۱ کاهش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۱۱، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۳.

می‌یابد:

$$\frac{V_{yr}}{V_y} = \frac{K_{wr}}{K_w} = \left(1 - \frac{D}{b}\right) \quad (1)$$

که در آن، D قطر بازشو، b عرض پانل، V_{yr}/V_y و K_{wr}/K_w به ترتیب نسبت‌های مقاومت و سختی پانل با بازشو به نمونه‌ی متناظر بدون بازشو است. همچنین در مطالعه‌ی ذکر شده اشاره شده است که رابطه‌ی ۱ برای بازشو در مرکز ورق، بیشترین اثرکاهندگی را دارد. لذا در صورت قرارگیری بازشو در سایر قسمت‌های ورق، استفاده از رابطه‌ی مذکور بسیار محافظه‌کارانه است و پارامتر D در رابطه‌ی ۱ برای بازشوهایی با شکل‌های مربع و یا مستطیل برابر قطر دایره‌ی محیطی بازشو مربع مستطیلی خواهد بود.^[۲]

همچنین در سال ۲۰۱۲ در مطالعات اجزاء محدود^[۳] میزان افت مقاومت و سختی پانل برشی در اثر وجود تک‌بازشوی مستطیلی در پانل‌های سخت شده و نازک مورد بررسی قرار گرفته و عنوان شده است که افت مقاومت و سختی در اثر ایجاد بازشو در پانل‌های بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده، روندی متفاوت از یکدیگر خواهند داشت.^[۴] در بررسی‌های آزمایشگاهی مشابه، با ایجاد دو بازشوی مستطیلی متقارن نسبت به مرکز ورق، سختی و ظرفیت برشی دیوارهای برشی سوراخ‌دار سخت شده مطالعه شده است.^[۴] همچنین در پژوهش‌های دیگری (۲۰۰۹)^[۵]، انجام مطالعات عددی به روش اجزاء محدود به اصلاح رابطه‌ی ۱ در پانل‌های

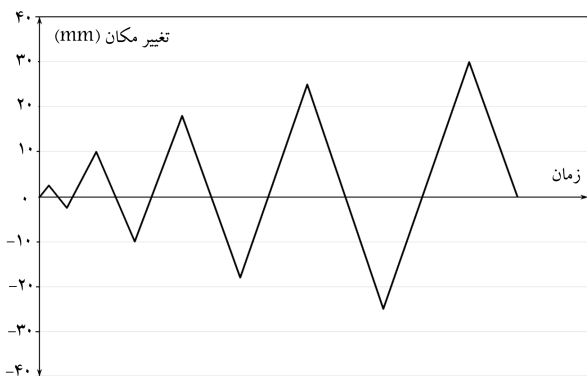
برشی فولادی درون قاب خمشی با تیرهای با مقاطع کاهش یافته^۱، تحت بارشویهای گسترده در سراسر ورق پرداخته شده است.

در سالهای ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ نیز با یک مطالعه اجزاء محدود، تأثیر صلیبیت اعضاء مرزی در رفتار کمانش برشی و فراکمانشی پانل مورد بررسی قرار گرفته است، که حاصل آن تأثیر مستقیم سختی پیچشی اعضاء مرزی در افزایش بارکمانشی و عدم تأثیر آن در مقاومت فراکمانشی بوده است. [۷-۹] همچنین در سال ۲۰۱۲، تأثیر ایجاد بارشویهای بزرگ مستطیلی سخت شده با سخت کننده های مرزی و محلی در شکل پذیری، سختی، و ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی به وسیله مطالعات اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۰] در پژوهش دیگری در همان سال، اثر ابعاد بارشو و نیز ضریب لاغری ورق فولادی در رفتار لرزه‌یی دیوارهای برشی فولادی به کمک مطالعات آزمایشگاهی و تحت بارهای چرخه‌یی مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از متحنی‌های هیستریزس حاصل از نمونه‌های مورد بررسی، میزان جذب انرژی پانل‌های بارشودار بررسی شده است. [۱۱]

مطالعات آزمایشگاهی مشابه و جامعی در همین خصوص نیز برای بررسی رفتار لرزه‌یی دیوارهای برشی نازک و سخت شده بدون بارشو و با وجود بارشو در سال ۲۰۰۱ انجام و نتایج در قالب ارائه‌ی ضوابط طراحی براساس عملکرد لرزه‌یی دیوارهای برشی فولادی بیان شده است. [۱۲]

جدول ۱. مشخصات هندسی و مقاومتی ورق‌های پرکننده.

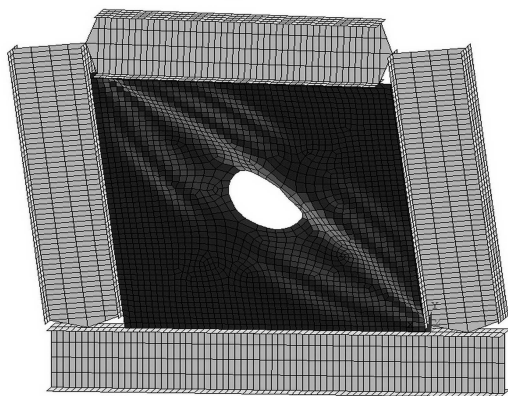
نمونه‌ی آزمایشگاهی	ضخامت ورق (mm)	قطر بارشو (mm)	تنش تسلیم (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)
SPW۲	۰٫۷	۱۰۰	۱۸۰	۳۰۰
SPW۸	۰٫۳۷	۲۵۰	۲۹۹	۳۷۵



شکل ۲. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان اعمالی به نمونه‌های آزمایشگاهی.



الف) نمونه آزمایشگاهی SPW ۲



ب) مدل اجزاء محدود.

شکل ۳. تغییر شکل مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

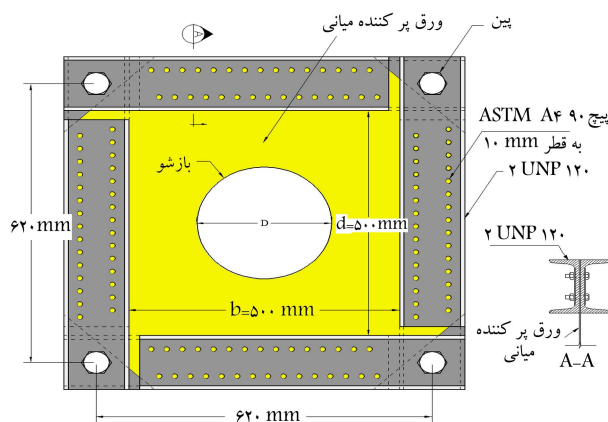
روش اجزاء محدود اتصال تیر به ستون به صورت مفصلی و با مثلی کردن جان تیر و اتصال آن به بال ستون مدل‌سازی شده و از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی اتصال مفصلی پای ستون به تیر عمیق کف نیز استفاده شده است (شکل ۳ ب). از المان ۴Shell گره‌یی (۴ Node ۱۸۱) در نرم‌افزار ANSYS برای مدل‌سازی ورق و قاب پیرامونی استفاده شده است. همچنین برای تیر و ستون‌های محیطی از پروفیل IPB۳۰۰ و برای تیر عمیق تحتانی از پروفیل IPB۴۰۰ استفاده شده است.

۲. حساسیت شبکه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌سازی

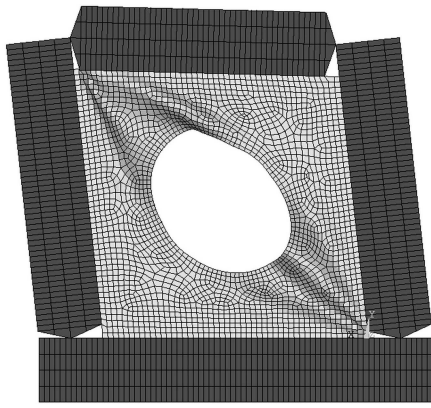
دو نمونه‌ی آزمایشگاهی SPW۲ و SPW۸ در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، [۱۱] با توجه به اینکه اعضاء مرزی به دلیل اتصال مفصلی، سهمی در تحمل بار جانبی نداشته و کلیه بار اعمالی به ورق دیوار اعمال شده است (که هدف خاص پژوهش حاضر است) و نیز با توجه به شباهت زیاد با مدل‌های مورد نظر این نوشتار، برای انجام آنالیز حساسیت شبکه‌بندی و اعتبارسنجی انتخاب شده‌اند. مشخصات هندسی و مقاومتی مصالح به‌کاررفته در نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی، به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.

بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت چرخه‌یی و با اعمال جابه‌جایی نسبی ۲ به نمونه‌ها از ۰٫۵٪ در محدوده‌ی خطی تا بیشینه‌ی ۶٪ محدوده‌ی غیرخطی، با سرعت پایین به منظور اجتناب از مدهای دینامیکی صورت گرفته است. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان اعمال شده به نمونه‌ها مطابق شکل ۲ است.

مدل‌های آزمایشگاهی ذکر شده، قاب پیرامونی مفصلی دارند. بر این اساس در



شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی.



شکل ۶. تغییر شکل مدل اجزاء محدود نمونه‌ی SPW۸.

از تطابق مناسب نحوه‌ی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان می‌دهد چنانچه ابعاد مش‌بندی از حدی ریزتر شود، دقت محاسبات افزایش زیادی نداشته و در عوض زمان تحلیل‌ها به شدت افزایش می‌یابد. لذا بر این اساس شبکه‌ی مش به ابعاد 15×15 سانتی‌متر، که تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، انتخاب شده و در ادامه‌ی روند مدل‌سازی‌های از ابعاد شبکه‌بندی مذکور استفاده شده است.

۳. مدل‌سازی نمونه‌های مورد بررسی

از آنجا که هدف این پژوهش بررسی میزان دقیق کاهش مقاومت دیوار برشی در اثر ایجاد بازشو در نقاط مختلف ورق نسبت به مقاومت نمونه‌ی بدون بازشو است، مدل‌سازی صحیح و دقیق پانل بدون بازشو و کنترل صحت مقاومت حاصل با مقادیر مورد انتظار از روابط تئوریک امری بدیهی است. از این جهت، با توجه به دهانه‌های معمول ساختمان‌ها، یک دیوار برشی فولادی به عرض 500 و ارتفاع 300 سانتی‌متر و ضخامت $2/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قاب پیرامونی ورق، یک قاب با اتصال ساده است و سختی تیرها و ستون‌ها به گونه‌ی است که ورق کاملاً تحت برش خالص باشد. جهت انتخاب مقاطع مناسب برای ستون‌ها و تیر محیطی از روابط موجود در آئین‌نامه‌ی $AISC 360-10$ [۱۳] در خصوص طرح اولیه‌ی تیر و ستون مطابق روابط ۲ الی ۴ استفاده شده است:

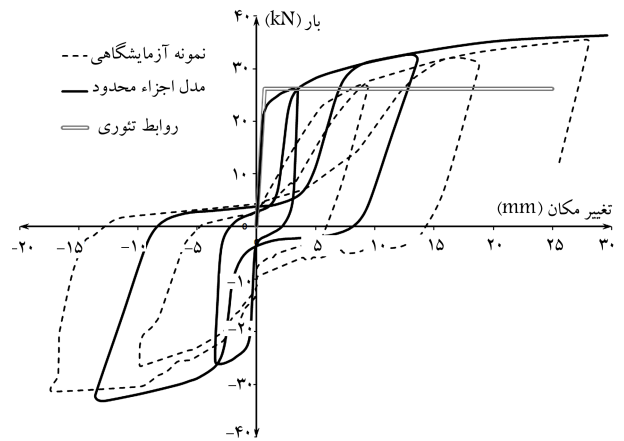
$$I_C \geq 0.700307 \frac{t_w \cdot d^3}{b} \quad (2)$$

$$M_{pb} > \frac{\sigma_{ty} \cdot t_w \cdot b^2 \cdot \cos^2 \alpha}{b} \quad (3)$$

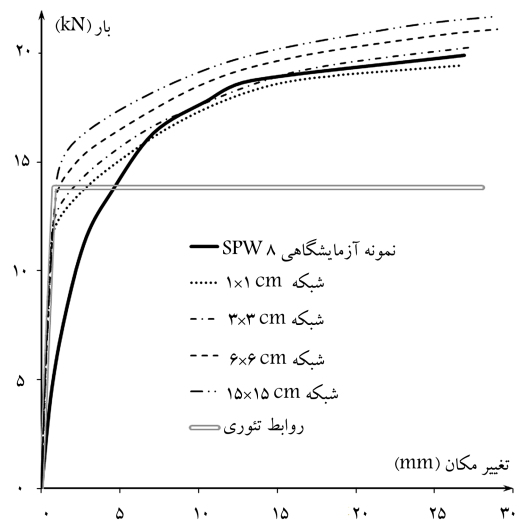
$$\tan^2 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w \cdot b}{\sqrt{A_c}}}{1 + t_w \cdot d \left(\frac{1}{A_b} + \frac{d^2}{\sqrt{I_c} \cdot b} \right)} \quad (4)$$

که در آن‌ها، I_C ممان اینرسی ستون، t_w ضخامت ورق، d ارتفاع ورق، b عرض ورق، M_{pb} لنگر خمیری تیر، σ_{ty} تنش تسلیم کششی، α زاویه‌ی میدان کشش قطری با خط قائم، A_c سطح مقطع ستون، و A_b سطح مقطع تیر است. بر این اساس مطابق شکل ۷، برای دیوار با ابعاد مذکور، تیرها و ستون‌ها از نوع $IPB300$ طراحی و مدل‌سازی شده‌اند.

فولاد مورد استفاده در تمامی اعضاء از نوع $ST37$ با مدول کشسانی 210 گیگاپاسکال و تنش تسلیم 240 مگاپاسکال با منحنی تنش - کرنش دو خطی ایده‌آل بدون سخت‌شوندگی (کشسان - کاملاً خمیری) بوده است. از آنجا که حذف تیر تحتانی موجب کاهش محسوس زمان تحلیل‌ها می‌شود، لذا در مدل‌سازی‌ها، تیر



شکل ۴. منحنی هیستریزس مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی SPW۲.



شکل ۵. آنالیز حساسیت شبکه‌بندی.

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی، ابتدا مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌ی $SPW2$ (شکل ۴ الف) انجام شده و مدل تحت بار چرخه‌ی قرار گرفته است.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنالیز مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است، که حاکی از تطابق مناسب نحوه‌ی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است. نکته‌ی قابل ذکر در خصوص اختلاف ملموس سختی کشسان مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی، عدم مدل‌سازی اتصالات ورق پُرکننده‌ی میانی به اعضاء مرزی است، که باعث می‌شود سختی مدل از مقدار متناظر نمونه‌ی آزمایشگاهی بیشتر باشد. در برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی (۲۰، ۲۱) [۱۱] گسیختگی مدل در اثر پارگی ورق در محل پیچ‌های اتصال بوده است، اما این در حالی است که رفتار چرخه‌ی مدل اجزاء محدود به سبب عدم تسلیم اجزاء اتصال ادامه یافته و سختی مدل را بالاتر از سختی نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان داده است. انطباق کامل سختی کشسان مدل تحلیلی با سختی مورد انتظار از روابط مؤید صحت مطلب ذکر شده است.

به منظور انجام آنالیز حساسیت مش‌بندی (شبکه‌بندی)، ابعاد مش مختلف مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده و مدل دوم اعتبارسنجی ($SPW8$) تحت بار جانبی یک جهته قرار گرفته است (شکل ۶). مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود و منحنی پوش نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است، که حاکی

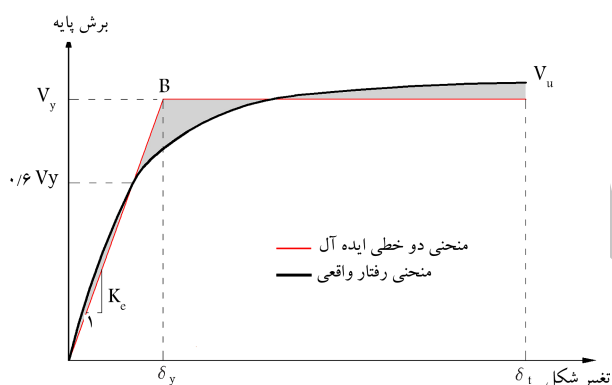
۵. بررسی و تحلیل نتایج

مدل رفتاری مورد استفاده در پروژه، مدل رفتار دو خطی نیرو - تغییرمکان سازه با فرض رفتار کشسان - کاملاً خمیری (بدون سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی) پس از تسلیم است. برای ساده‌سازی مدل رفتار غیرخطی، نقطه‌ی B مطابق شکل ۹ باید چنان انتخاب شود که سطح زیر مدل رفتار دو خطی برابر سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی باشد.

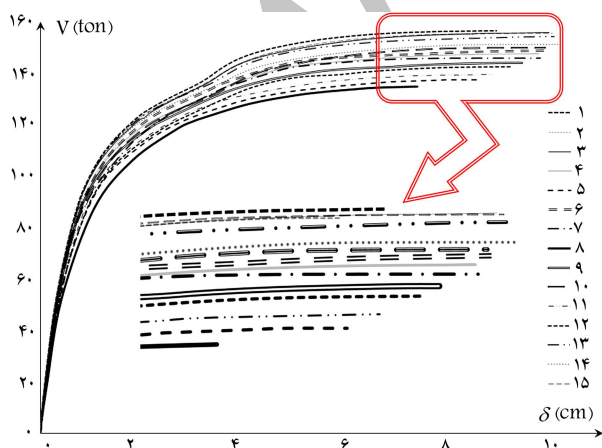
در شکل ۹، V_y مقاومت حد کشسان، V_u مقاومت حد نهایی نظیر تغییرمکان هدف، K_e سختی مؤثر حد کشسان، δ_y تغییرمکان نظیر تسلیم و δ_u تغییرمکان هدف است.

۱.۵. تحلیل منحنی‌های نیرو - تغییرمکان حاصل از آنالیز مدل‌ها

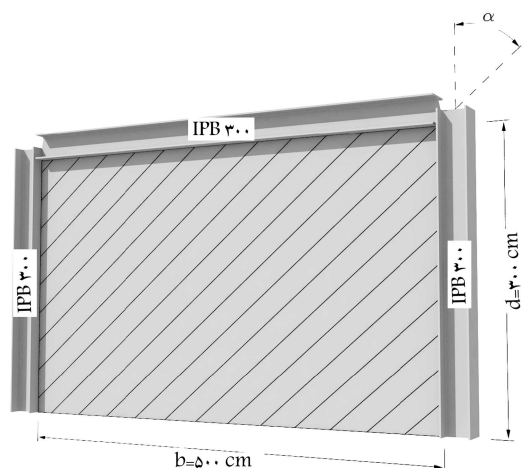
نتایج حاصل از آنالیز ۱۵ مدل مورد بررسی، مطابق شکل ۱۰ گویای این حقیقت است که هر اندازه محل قرارگیری بازشو به محدوده‌ی شکل‌گیری میدان کشش قطری ورق نزدیک‌تر شود، مقاومت نمونه افت بیشتری خواهد داشت. به همین دلیل مدل شماره ۸، که دقیقاً در مرکز ورق و به عبارتی در محل شروع شکل‌گیری میدان کشش قطری به جهت تنش‌های برشی بیشینه قرار گرفته است، کمترین مقاومت و مدل شماره ۱، که در دورترین نقطه از میدان کشش قطری واقع شده است، بیشترین مقاومت را دارند، به گونه‌یی که تفاوت چندانی بین مقاومت نمونه‌ی ۱ با مدل بدون بازشو مشاهده نمی‌شود.



شکل ۹. مدل رفتاری انتخابی جهت بررسی ظرفیت پانل برشی.



شکل ۱۰. روند تغییر رفتار پانل در اثر تغییر محل بازشو.



شکل ۷. ابعاد و مشخصات پانل برشی.

تحتانی حذف و شرایط مرزی مفصلی مستقیم در پای ستون و دیوار اعمال شده است.

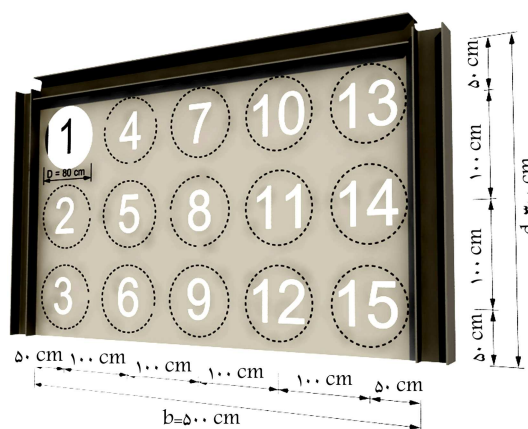
مطابق روابط تئوری موجود،^[۱۴] ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$V_y = \frac{1}{\gamma} f_y \cdot b \cdot t_w \cdot \sin(2\alpha) \quad (5)$$

با توجه به مقدار زاویه‌ی α محاسبه شده از رابطه‌ی ۴، که حدود $47/2$ درجه است، ظرفیت برشی تئوری دیوار برابر $149/6$ تن محاسبه شده است. براساس آنالیز مدل اجزاء محدود پانل بدون سخت‌کننده، ظرفیت برشی ورق برابر $145/6$ تن به دست آمده است، که در مقایسه با مقدار تحلیلی $149/6$ تن، خطای حدود $2/7\%$ را نشان داده است، که حاکی از دقت مناسب ابعاد شبکه‌بندی و روند مدل‌سازی است.

۴. معرفی مدل‌ها براساس چیدمان بازشو

به منظور بررسی رفتار پانل‌های بازشودار، تعداد ۱۵ مدل با بازشوهایی به قطر 80 سانتی‌متر در محل‌هایی مطابق شکل ۸ تهیه و تحت بار جانبی قرار گرفته است.



شکل ۸. نام‌گذاری مدل‌های انتخابی جهت بررسی ظرفیت پانل برشی.

مختصات طبیعی و اغناء شرایط مرزی مناسب قابل دست‌یابی است. برای این منظور دستگاه مختصات جدید ξ و η مطابق شکل ۱۴ در مرکز ورق به صورت روابط ۶ و ۷ تعریف شده است:

$$\xi = \frac{x}{(b/2)} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{y}{(d/2)} \quad (7)$$

که در آن‌ها، x و y نسبت به مختصات طبیعی مرکز ورق به ترتیب از $b/2$ تا $-b/2$ و از $d/2$ تا $-d/2$ متغیر بوده و متعاقباً ξ و η نیز هر یک مقادیری بین -1 تا 1 خواهند داشت.

با در نظر گرفتن بیشترین افت مقاومت (D/b) از رابطه ۱ برای قرارگیری بازشو در مرکز ورق و یا به عبارتی در مرکز مختصات تعریف شده ($\xi = \eta = 0$)، رابطه‌ی نهائی مبین درصد کاهش مقاومت مدل‌ها با بازشو نسبت به مدل بدون بازشو به صورت رابطه ۸ حاصل شده است:

$$\Delta V_y = \left| (1 - \xi^2)(1 - \eta^2)(1 - 4\xi^2) \right| \left(\frac{D}{b} \right) \times 100 \quad (8)$$

۶. کنترل صحت رابطه‌ی ارائه‌شده برای درصد افت

مقاومت پانل‌های مورد بررسی

جهت کنترل و مقایسه‌ی درصد افت مقاومت مدل‌ها ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی ۸ با مقادیر متناظر حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود، با استفاده از مقادیر مندرج در جدول ۲، درصد کاهش مقاومت مدل‌های مورد بررسی نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو مطابق جدول ۳ محاسبه شده است.

مطابق جدول ۳، به‌عنوان مثال درصد افت مقاومت مدل ۵ برابر 12.71% حاصل شده است. مقدار مذکور با $-0.4 = (-100 \times 25) = \xi$ و $\eta = 0$ و جایگذاری در رابطه‌ی پیشنهادی ۸ برابر با 13.99% به دست آمده است، که حکایت از دقت مناسب رابطه‌ی ۸ در تخمین درصد کاهش مقاومت دارد. جهت کنترل

مقادیر مقاومت حد کشسان مدل‌ها حاصل از منحنی نیرو- تغییرمکان دو خطی معادل، در جدول ۲ براساس ترتیب نام‌گذاری مدل‌ها مطابق شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

مشاهده‌ی مقادیر جدول ۲ نیز مؤید این امر است که با دور شدن محل بازشو چه به صورت افقی و چه به صورت قائم از مرکز ورق، افت مقاومت مدل‌ها به دلیل کاهش دخالت بازشو در شکل‌گیری میدان کشش قطری کمتر می‌شود. تغییرشکل خارج از صفحه‌ی نمونه‌ها حاصل از انجام آنالیز پوش‌آور کلیه‌ی مدل‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از دیگر نکات قابل توجه در روند بررسی محل بازشو، تغییر محسوس زاویه‌ی شکل‌گیری میدان کشش قطری (α) است، چنانکه در مدل‌هایی مانند مدل‌های ۱ و ۱۵، این زاویه بسیار نزدیک به زاویه‌ی شکل‌گیری میدان کشش قطری نمونه‌ی بدون بازشو است؛ در صورتی که در مدل‌های میانی نظیر مدل‌های ۵، ۹، ۱۱، زاویه‌ی α مطابق شکل ۱۲، که توزیع تنش اصلی اول را نشان می‌دهد، دچار شکست شده است. قطعاً وجود بازشو، صفحه‌ی کلی ورق را به زیرصفحاتی تقسیم می‌کند، که شکل‌گیری میدان کشش قطری در هر زیرصفحه با توجه به سختی اعضاء محیطی متعلق به همان چشمه مطابق رابطه ۴ صورت خواهد گرفت.

۲.۵. تعیین رابطه‌ی نیمه‌تجربی برآورد مقاومت مدل‌ها

با توجه به نتایج جدول ۲، می‌توان رابطه‌ی نیمه‌تجربی بین درصد کاهش مقاومت مدل‌ها با بازشو نسبت به مدل بدون بازشو تعیین کرد. بر این اساس ابتدا مقادیر جدول ۲ را روی نمودار برده و سپس با سعی و خطا و به کمک نرم‌افزار MATLAB به بازش بهترین رویه‌ی سه بعدی گذرنده از مقاومت‌های مورد نظر مطابق شکل ۱۳ پرداخته شده است.

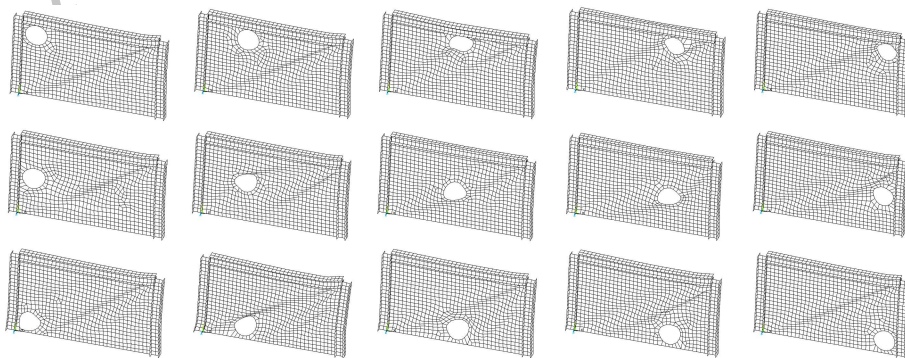
معادله‌ی رویه‌ی ذکر شده، مقدار مطلق مقاومت‌های برشی یکایک نمونه‌ها را براساس مختصات بازشو در صفحه‌ی ورق دیوار ارائه می‌کند. لیکن ارائه‌ی رابطه‌ی که مبین درصد کاهش مقاومت مدل‌های با بازشو نسبت به مدل بدون بازشو باشد و از طرفی نسبت به مختصات محل بازشو بی‌بعد باشد، که مشخصاً هدف مطلوب این پژوهش است، به راحتی از معکوس رویه‌ی حاصل و با استفاده از مفهوم دستگاه

جدول ۲. مقاومت حد کشسان مدل‌های مورد بررسی.

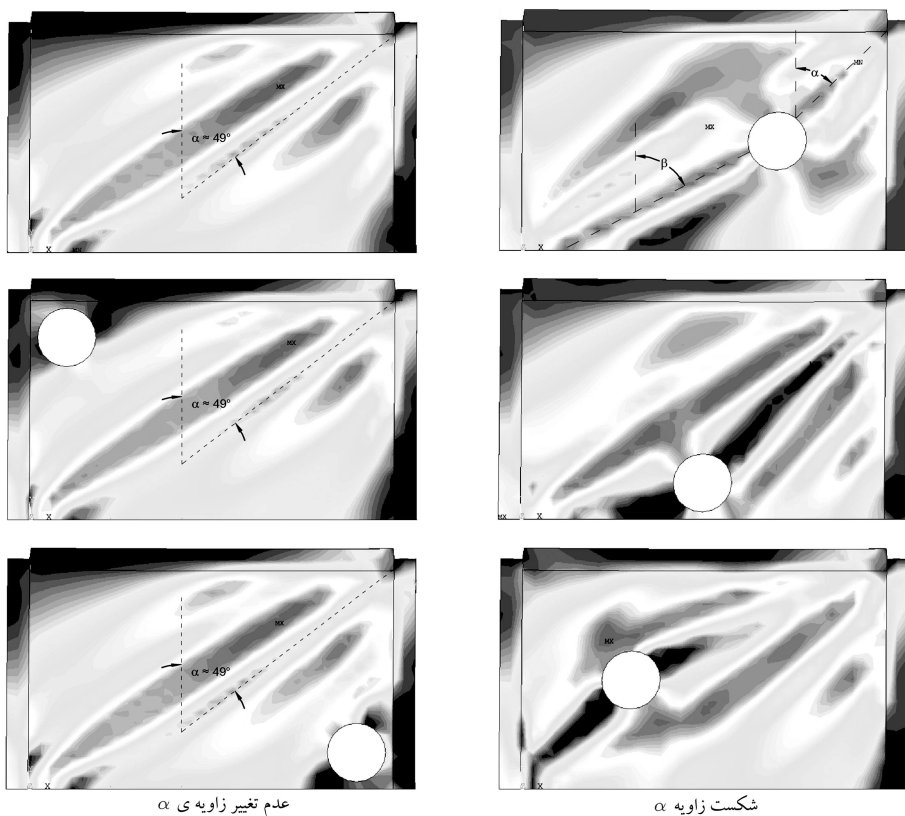
	۵	۴	۳	۲	۱	V_y (ton)
۱	۱۴۳٫۹	۱۳۸٫۹	۱۳۶٫۶	۱۳۷٫۱	۱۴۵٫۱	۱
۲	۱۴۱٫۲	۱۲۸٫۷	۱۲۵٫۱	۱۲۷٫۱	۱۴۲٫۱	۲
۳	۱۴۳٫۷	۱۳۳٫۴	۱۳۵٫۵	۱۳۷٫۹	۱۴۴٫۸	۳

جدول ۳. درصد افت مقاومت مدل‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو.

	۵	۴	۳	۲	۱	ΔV_y (%)
۱	۱٫۱۷	۴٫۶۰	۶٫۱۸	۵٫۸۴	۰٫۳۴	۱
۲	۳٫۰۲	۱۱٫۶۱	۱۴٫۰۸	۱۲٫۷۱	۲٫۴	۲
۳	۱٫۳۱	۸٫۳۸	۶٫۹۴	۵٫۲۹	۰٫۵۴	۳



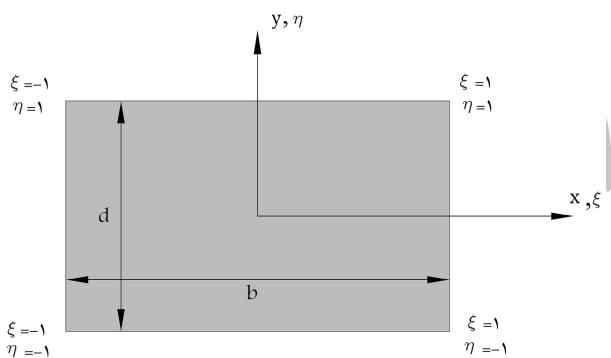
شکل ۱۱. کمانش خارج از صفحه و نحوه‌ی دخالت محل بازشو در تغییرشکل نمونه‌ها.



عدم تغییر زاویه ی α

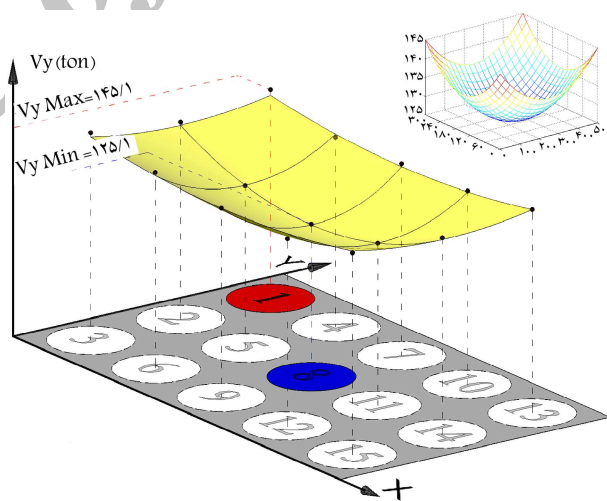
شکست زاویه α

شکل ۱۲. توزیع تنش اصلی اول.



شکل ۱۴. دستگاه مختصات طبیعی جهت استخراج ξ و η .

آمده است، که حاکی از دقت مناسب رابطه ی ۸ در تخمین درصد کاهش مقاومت است.



شکل ۱۳. برازش بهترین رویه ی گذرا از مقارنت های برشی نمونه ها.

۷. اعتبارسنجی رابطه ی پیشنهادی ۸

۷.۱. پانل های برشی با نسبت دهانه به ارتفاع برابر ۱

برای کنترل صحت رابطه ی پیشنهادی ۸ در خصوص پانل های برشی مربعی با نسبت دهانه به ارتفاع برابر ۱، روند طی شده در این پژوهش برای پانل به عرض $b = 300$ سانتی متر و $d = 300$ سانتی متر مطابق شکل ۱۷ تکرار شده است. ضخامت ورق مدلهای مورد استفاده در این خصوص به جهت بررسی اثر ضخامت ورق در رابطه ی پیشنهادی ۸، برابر ۳/۵ میلی متر انتخاب و قطر بازوها 90° سانتی متر اختیار شده است.

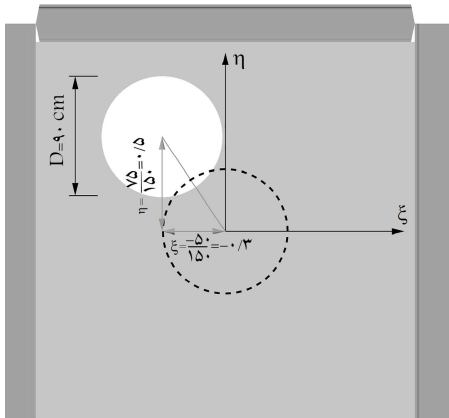
نهایی رابطه ی ۸، مدل جدیدی با شماره ی ۱۶ با موقعیت بازشو در مختصات جدید $x = -150$ سانتی متر، $y = 45$ سانتی متر و قطر مشابه 80° سانتی متر مطابق شکل ۱۵، انتخاب و تحت بارگذاری قرار گرفته است. مقاومت حد کشسان مدل مورد بررسی حاصل از آنالیز پوس مدل مطابق شکل ۱۶ برابر $132,94$ تن محاسبه شده است، که این مقدار $8,7\%$ کمتر از نمونه ی بدون بازشو است. درصد افت مقاومت مدل ۱۶ با $(-150, 250) = -0,6$ و $\xi =$ و $\eta =$ $(45, 150) = 0,3$ و جایگذاری در رابطه ی پیشنهادی ۸ برابر با $6,1\%$ به دست

جدول ۴. درصد افت مقاومت مدل ها نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو (آنالیز مدل‌ها).

۳	۲	۱	ΔV_y (%)
۹٫۲	۱۷٫۴۳	۷٫۲	۱
۱۳٫۶	۲۸٫۶	۱۴٫۷	۲
۹٫۹	۱۴٫۶۰	۸٫۴	۳

جدول ۵. درصد افت مقاومت مدل‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو (رابطه‌ی ۸).

۳	۲	۱	ΔV_y (%)
۲٫۸۱	۱۶٫۶۷	۲٫۸۱	۱
۵٫۰۵	۳۰	۵٫۰۵	۲
۲٫۸۱	۱۶٫۶۷	۲٫۸۱	۳



شکل ۱۸. مدل جدید جهت کنترل صحت رابطه‌ی ۱۲ برای پانل مربعی.

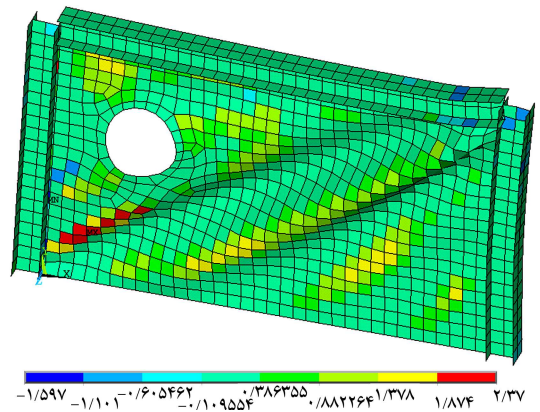
مقاومت ۲۸٫۶٪، به‌طور مناسبی با مقدار مورد انتظار از رابطه‌ی اصلی ۱ هم‌خوانی دارد. با تخمین درصد افت مقاومت مدل‌ها با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی ۸، مطابق جدول ۵ و مقایسه‌ی آن با مقادیر متناظر جدول ۴ مشاهده می‌شود که رابطه‌ی پیشنهادی ۸، افت مقاومت پانل‌های مربعی را نسبتاً با دقتی کمتر از پانل‌های مستطیلی (با نسبت عرض به ارتفاع بیش از ۱) تخمین می‌زند. بیشترین مقدار خطای رابطه‌ی ۸ در تخمین افت مقاومت برای پانل مستطیلی و مربعی مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب ۳٫۶۳٪ و ۹٫۶۵٪ به‌دست آمده است.

جهت کنترل نهایی رابطه‌ی ۸ برای بازشو با محلی متفاوت از موقعیت‌های مندرج در شکل ۱۷، مدل جدیدی با موقعیت بازشو در مختصات جدید $x = -5^\circ$ سانتی‌متر، $y = 75$ سانتی‌متر و قطر 90° سانتی‌متر مطابق شکل ۱۸، انتخاب و تحت بارگذاری قرار گرفته است. مقاومت حد کشسان مدل مورد بررسی حاصل از آنالیز پوش مدل، مطابق شکل ۱۹ برابر ۹۶٫۴۳ تن محاسبه شده است، که این مقدار ۲۱٫۰۸٪ کمتر از نمونه‌ی بدون بازشو است. تغییرمکان خارج از صفحه‌ی ورق و توزیع تنش اصلی در لحظه‌ی باربری نهایی در شکل ۲۰ ارائه شده است.

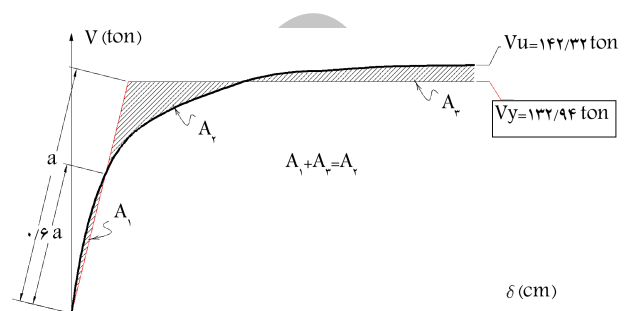
درصد افت مقاومت مدل مذکور با $-0.33 = (-5.0/15.0) = \xi$ و $0.5 = (75/15.0) = \eta$ و جایگذاری در رابطه‌ی پیشنهادی ۸ برابر با ۲۱٫۱۲ به‌دست آمده است، که حاکی از دقت بسیار مناسب رابطه‌ی ۸ در تخمین درصد کاهش مقاومت پانل‌های مربعی است.

۲.۷. پانل‌های با نسبت دهانه به ارتفاع برابر ۲

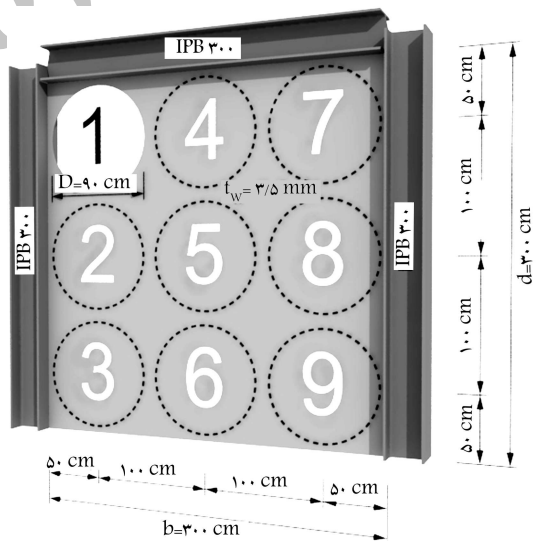
مدل شماره ۱۷، با هدف بررسی رفتار پانل برشی با عرض ۶ متر و ارتفاع ۳ متر



شکل ۱۵. مدل شماره ۱۶ جهت کنترل مجدد صحت رابطه‌ی ۸، توزیع دومین تنش اصلی.



شکل ۱۶. مقاومت حد کشسان مدل ۱۶ با منحنی دوخطی معادل.



شکل ۱۷. مدل‌های جدید جهت کنترل صحت رابطه‌ی ۱۲ برای پانل مربعی.

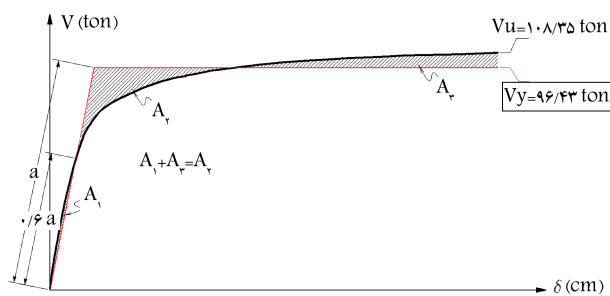
نتایج حاصل از آنالیز پانل مربعی بدون بازشو با مشخصات موجود در شکل ۱۷، برابر ۱۲۲٫۲ تن محاسبه شده است، که با مقدار مورد انتظار ۱۲۴ تن از روابط تئوری موجود (رابطه‌ی ۵)، کمتر از ۱٫۵٪ اختلاف داشته است، که به‌عنوان خطای قابل قبول مدل‌سازی پذیرفتنی است. نتایج حاصل از آنالیز مدل‌ها با بازشو در قالب درصد کاهش مقاومت مدل‌ها نسبت به مدل بدون بازشو در جدول ۴ قابل مشاهده است.

در اینجا نیز بیشترین درصد افت مربوط به بازشو در مرکز ورق است، که با افت

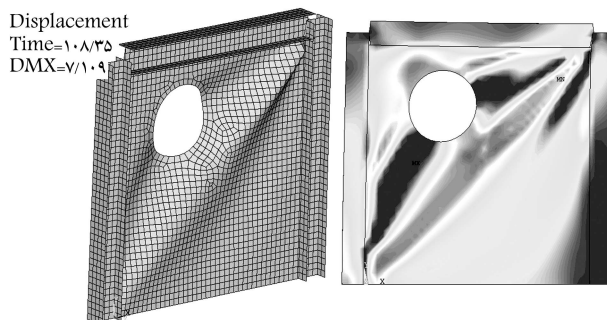
۳.۷. بازشوها با شکل‌های مربع مستطیل

همان‌طور که در مقدمه‌ی نوشتار حاضر عنوان شده است، پارامتر D در رابطه‌ی اصلی ۱ برای بازشوی ۲ ضلعی برابر با قطر دایره‌ی محیطی بازشو موردنظر تعریف شده است. جهت بررسی صحت رابطه‌ی ۸ در خصوص موضوع ذکرشده، مدل شماره‌ی ۱۸ با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، عرض ۶ متر، ارتفاع ۳ متر، و ضخامت ورق ۳ میلی‌متر با بازشوی مربعی‌شکل با طول ضلع ۱٫۲ متر مطابق شکل ۲۲ انتخاب شده است. موقعیت بازشوی مربعی در مدل شماره‌ی ۱۸، قرینه‌ی مدل شماره‌ی ۱۷ با بازشوی دایره‌ی انتخاب شده است.

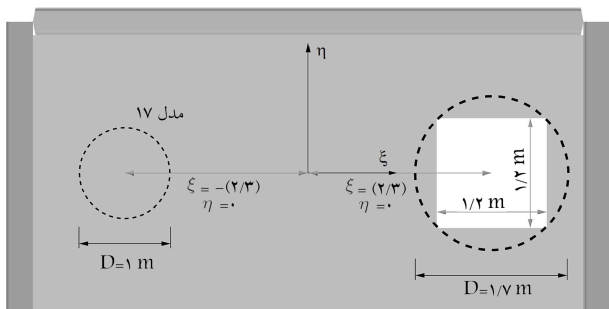
از آنجا که کلیه‌ی مشخصات مدل ۱۸ مشابه مدل ۱۷ است و فقط تفاوت موجود بین دو مدل در شکل بازشو است و با توجه به اینکه بازشو مربعی با طول ضلع ۱٫۲ متر معادل بازشو دایره‌ی با قطر تقریبی ۱٫۷ متر است، که نسبت به مدل ۱۷ اضافه قطر ۱٫۷ برابری دارد، لذا با استفاده از رابطه‌ی ۸ پیش‌بینی شده است که افت مقاومت ۴٫۸٪ در مدل ۱۸ نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو مشاهده شود. مقاومت حد کشسان مدل ۱۸ حاصل از نتایج آنالیز برابر ۸۵٫۲ تن محاسبه شده است (شکل ۲۳)، که افت مقاومت ۱۴٫۱٪ نسبت به نمونه‌ی بدون بازشو را نشان می‌دهد. اختلاف ۹٫۳٪ بین نتایج آنالیز اجزاء محدود و



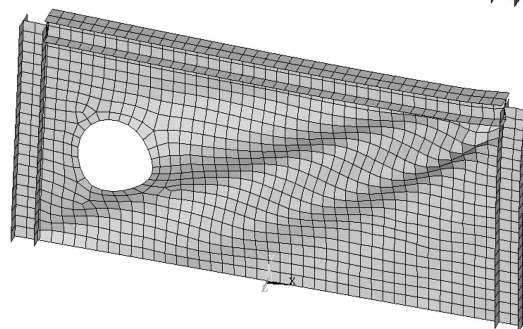
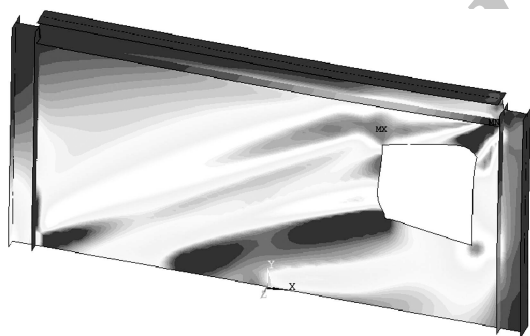
شکل ۱۹. مقاومت حد کشسان مدل جدید با منحنی دوطرفی معادل.



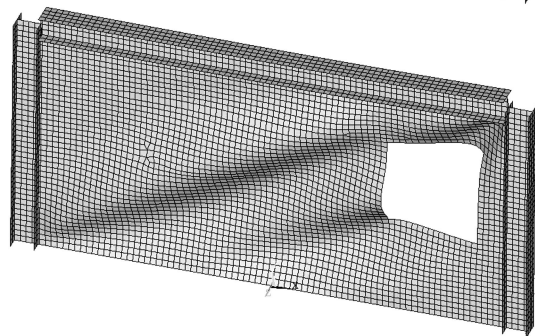
شکل ۲۰. توزیع تنش اصلی و تغییر شکل مدل در لحظه‌ی باربری نهایی



شکل ۲۲. هندسه‌ی مدل شماره‌ی ۱۸.



شکل ۲۱. توزیع تنش و تغییر شکل مدل شماره‌ی ۱۷.



شکل ۲۳. توزیع تنش اصلی اول و تغییر شکل مدل شماره‌ی ۱۸.

مطابق شکل ۲۱ و کنترل رابطه‌ی پیشنهادی ۸ برای نسبت دهانه به ارتفاع برابر ۲ علاوه بر نسبت‌های ۱ و ۱٫۶۷ مورد بررسی در این پژوهش مد نظر قرار گرفته است. با در نظر گرفتن ضخامت ورق ۳ میلی‌متر و قطر بازشو ۱ متر و موقعیت $x = -200$ سانتی‌متر و $y = 0$ نسبت به مرکز ورق، مقاومت حد کشسان مدل از آنالیز اجزاء محدود برابر ۱۹۵٫۲ تن به دست آمده است، که نسبت به مدل بدون بازشو نظیر، افت مقاومت ۹٫۴۶٪ دارد. این مقدار افت با استفاده از رابطه‌ی ۸، برابر ۲٫۸۱٪ محاسبه شده است. اختلاف ۶٫۶۵٪ بین نتایج حاصله، نشانگر صحت رابطه پیشنهادی برای پانل‌های برشی مورد بررسی است.

براساس روابط ۶ و ۷ به دست آورد و در رابطه ۸ جایگزین کرد و با تقریب بسیار مناسب میزان افت مقاومت واقعی مدل را به دست آورد. نتایج نشان داده است که استفاده از رابطه ۱ برای کاهش مقاومت پانل فقط برای بازشو در مرکز ورق معتبر است و برای سایر بازشوها محافظه کارانه بوده و افت مقاومت را بسیار بیشتر از مقدار حقیقی نشان داده است.

در پژوهش حاضر، در اثر به کارگیری رابطه ۱ برای افت مقاومت مدل ۱، منجر به بروز خطای حدود ۱۵٪ شده است. رابطه پیشنهادی ۸، که از مدل سازی تعداد محدودی از نمونه های پژوهش حاضر حاصل شده است، رابطه ی مفید در تخمین درصد افت مقاومت پانل های برشی با بازشوی متمرکز در هر مکان دلخواه از ورق است. براساس نتایج مدل سازی، استفاده از رابطه ۸ برای کلیه ی پانل های مستطیلی با نسبت دهانه به ارتفاع بیش از ۱ و پانل های مربعی معتبر است و میزان افت مقاومت مدل ها با بازشو در هر مکان از ورق، به نحو مطلوبی با رابطه ی پیشنهادی ۸ برآورد خواهد شد.

رابطه ۸، نشانگر صحت عملکرد رابطه ۸ برای بازشو با شکل های مختلف است.

۸. نتیجه گیری

در این نوشتار، درصد کاهش ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی در اثر وجود بازشو در نقاط مختلف، به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داده است که دست یابی به روابط ساده برای محاسبه ی دقیق میزان افت مقاومت یک پانل با بازشو در هر نقطه ی دلخواه، نسبت به پانل بدون بازشو امکان پذیر است. در نهایت، رابطه ی نیمه تجربی و بی بعد شده ی ۸ در این خصوص ارائه شده است. جهت استفاده از رابطه ۸ فقط کافی است مرکز سطح ورق را به عنوان مبدأ مختصات قرار داد و موقعیت هر بازشو را براساس پارامترهای بی بعد ξ و η معرفی شده

پانویس ها

1. reduced beam section
2. drift

منابع (References)

1. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear walls", *Thin Walled Structures*, **14**(2), pp. 139-151 (1992).
2. Sabouri Ghomi, S., *Lateral Load Resisting Systems An Introduction to Steel Shear Walls*, **1**, Angizeh, Tehran (2001).
3. 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", *Journal of Constructional Steel Research*, **79**, pp. 91-100 (2012).
4. Sabouri-Ghomi, S. and Mamazizi, S. "Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings", *Journal of Constructional Steel Research*, **86**, pp. 56-66 (Jan. 2014).
5. Purba, R. and Bruneau, M. "Finite element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **135**(11), pp. 1367-1376 (2009).
6. Vian, D., Bruneau, M. and Purba, R. "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams II: Analysis and design recommendations", *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **135**(3), pp. 221-228 (2009).
7. Alinia, M.M. and Dastfan, M. "Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members", *Int. J. Const. Steel Research*, **62**(7), pp. 730-738 (2006).
8. Alinia, M.M. and Dastfan, M. "Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels", *Int. J. Const Steel Research*, **63**(4), pp.63-554 (2007).
9. Alinia, M.M. and Dastfan, M. "The effects of surrounding members on postbuckling behaviour of thin steel plate shear walls", In: Shen ZY et al., Editors, *Advances in Steel Structures*, **2**, pp. 1427-1432 (2005).
10. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
11. 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 (2012).
12. Astaneh-Asl, A. " seismic behavior and design of steel shear walls", Steel Tips Report, Structural Steel Educational Council, Moraga (CA, USA) (2001).
13. American Institute of Steel Construction (AISC), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago (IL, USA): AISC (2010).
14. Azhari, M. and Mirghaderi R., *Design of Steel Structures*, **IV**, 3ed edition, Arkan e Danesh, Tehran (2011).