

اثر محل بازشوی متمرکز در کاهش ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی

مجید قلهکی* (دانشیار)

محمد جلیلزاده افشاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (پیاپی ۱۳۹۶)
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۲، ص. ۲۵-۳۳

پتانسیل بالای دیوارهای برشی فولادی در جذب انرژی و شکل پذیری زیاد آنها باعث شده است که جهت تحمل بارهای جانبی، به ضخامت های بسیار کم به خصوص در طبقات فوقانی سازه نیاز داشته باشند، که در محاسبات گاهی به کسری از میلی متر می رسد. از آنجا که ممکن است ورق های فولادی با چنین ضخامت هایی در بازار موجود نباشد، استفاده از ورق با ضخامت بالاتر از نیاز طراحی، ولی با ایجاد بازشو برای کاهش سختی، یکی از راه حل های منطقی است. از سوی دیگر، وجود بازشو به لحاظ ملاحظات معماری نظیر تعبیه پنجره و نورگیری امری بدیهی و اجتناب ناپذیر 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، رابطه نیمه تجربی و بی بعد شده جهت تخمین دقیق میزان کاهش مقاومت دیوار با بازشو در هر نقطه ای دلخواهی از ورق ارائه شده است.

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

۱. مقدمه

در سال های اخیر، جهت اطمینان از نحوه عملکرد لرزه یی دیوارهای برشی فولادی، پژوهش های آزمایشگاهی وسیعی تحت بارهای چرخه یی و یک جهت بر روی دیوارهای برشی فولادی صورت گرفته است، که نتایج آن نشانگر سختی زیاد، مقاومت کافی، شکل پذیری فوق العاده و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای این سیستم لرزه بر بوده است. با توجه به اینکه از دیوارهای برشی فولادی علاوه بر سازه های نو احداث، در بهسازی لرزه یی سازه های موجود نیز استفاده می شود، لذا مطالعه دیوارهای برشی فولادی از منظر تحلیلی همواره مورد علاقه پژوهشگران بوده است. در یک سری مطالعات آزمایشگاهی (۱۹۹۲)^[۱] که جهت بررسی اثر بازشو در رفتار پانل های برشی فولادی با تعبیه روزنه های دایره یی شکل در مرکز ورق تحت بارهای چرخه یی 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 شده اند. بار چرخه یی از طریق گوشه های قطری توسط ماشین هیدرولیکی به ظرفیت ۲۵ تن اعمال شده است. عمق پانل ها ۳۰۰ میلی متر، عرض آنها ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی متر، و ضخامت ورق ها نیز ۸۳/۰ تا ۲۳/۱ میلی متر انتخاب شده اند. برای تنش تسلیم ورق ها مقدار ۲۱۹ و ۱۵۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بازشوهای دایره یی به قطرهای ۱۰۵، ۱۵۰ و ۱۵۰ میلی متر در مرکز ورق مورد آزمایش قرار گرفته اند. بر پایه نتایج آزمایش، مقاومت و سختی پانل در اثر بازشو مطابق رابطه ی ۱ کاهش

* نویسنده مسئول

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

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

می یابد:

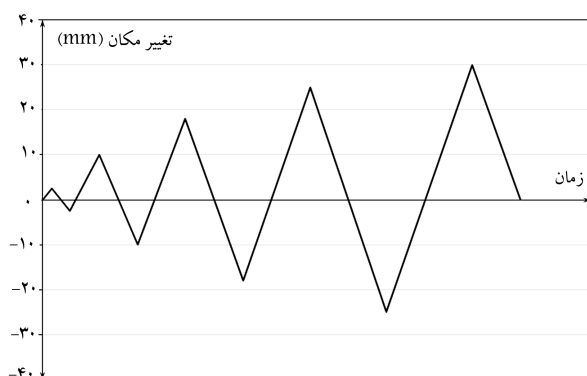
$$\frac{V_{yr}}{V_y} = \frac{K_{wr}}{K_w} = \left(1 - \frac{D}{b}\right) \quad (1)$$

که در آن، D قطر بازشو، b عرض پانل، V_{yr}/V_y و K_{wr}/K_w به ترتیب نسبت های مقاومت و سختی پانل با بازشو به نمونه متناظر بدون بازشو است. همچنین در مطالعه ی ذکر شده اشاره شده است که رابطه ی ۱ برای بازشو در مرکز ورق، بیشترین اثرکاهندگی را دارد. لذا در صورت قرارگیری بازشو در سایر قسمت های ورق، استفاده از رابطه ی مذکور بسیار محافظه کارانه است و پارامتر D در رابطه ی ۱ برای بازشوهایی با شکل های مربع و یا مستطیل برابر قطر دایره ی 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 تک بازشوی مستطیلی در پانل های سخت شده و نازک مورد بررسی قرار گرفته و عنوان شده است که افت مقاومت و سختی در اثر ایجاد بازشو در پانل های بدون سخت کننده و با سخت کننده، روندی متفاوت از یکدیگر خواهند داشت.^[۴] در بررسی های آزمایشگاهی مشابه، با ایجاد دو بازشوی مستطیلی متقارن نسبت به مرکز ورق، سختی و ظرفیت برشی دیوارهای برشی سوراخ دار سخت شده مطالعه شده است.^[۵] همچنین در پژوهش های دیگری (۲۰۰۹)^[۶]، با انجام مطالعات عددی به روش اجزاء محدود به اصلاح رابطه ی ۱ در پانل های

جدول ۱. مشخصات هندسی و مقاومتی ورق‌های پرکننده.

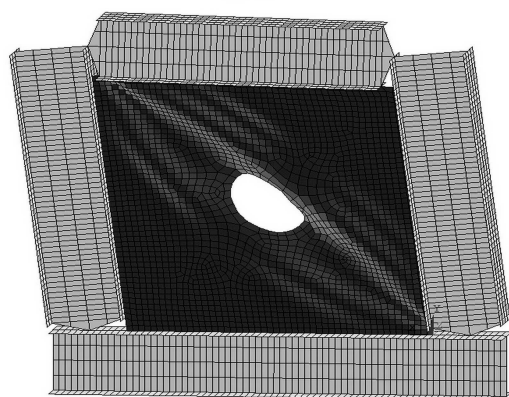
نمونه‌ی آزمایشگاهی	ضخامت ورق (mm)	قطر بازشو (mm)	تنش تسلیم (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)
SPW۲	۰٫۷	۱۰۰	۱۸۰	۳۰۰
SPW۸	۰٫۳۷	۲۵۰	۲۹۹	۳۷۵



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



الف) نمونه آزمایشگاهی SPW۲



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 گرهی (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.

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

در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ نیز با یک مطالعه‌ی اجزاء محدود، تأثیر صلیب اعضا مرزی در رفتار کماتش برشی و فراکمانشی پانل مورد بررسی قرار گرفته است، که حاصل آن تأثیر مستقیم سختی پیچشی اعضا مرزی در افزایش بارکمانشی و عدم تأثیر آن در مقاومت فراکمانشی بوده است.^[۹-۷] همچنین در سال ۲۰۱۲، تأثیر ایجاد بازشوها بزرگ مستطیلی سخت‌شده با سخت‌کننده‌های مرزی و محلی در شکل‌پذیری، سختی، و ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی به وسیله‌ی مطالعات اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۰] در پژوهش دیگری در همان سال، اثر ابعاد بازشو 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 منحنی‌های هیستریزس حاصل از نمونه‌های مورد بررسی، میزان جذب انرژی پانل‌های بازشودار بررسی شده است.^[۱۱]

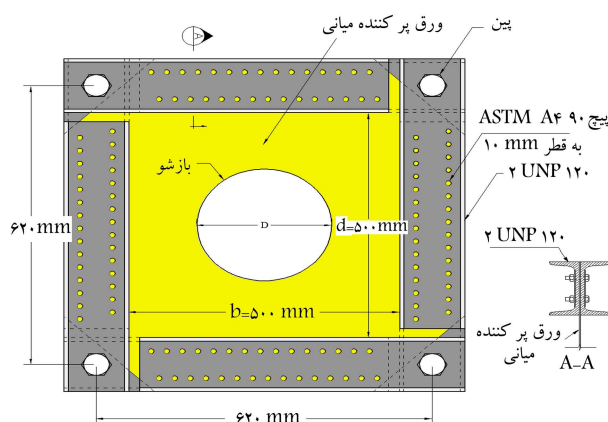
مطالعات آزمایشگاهی مشابه و جامعی در همین خصوص نیز برای بررسی رفتار لرزه‌یی دیوارهای برشی نازک و سخت‌شده بدون بازشو و با وجود بازشو در سال ۲۰۰۱ انجام و نتایج در قالب ارائه‌ی ضوابط طراحی براساس عملکرد لرزه‌یی دیوارهای برشی فولادی بیان شده است.^[۱۲]

۲. حساسیت شبکه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌سازی

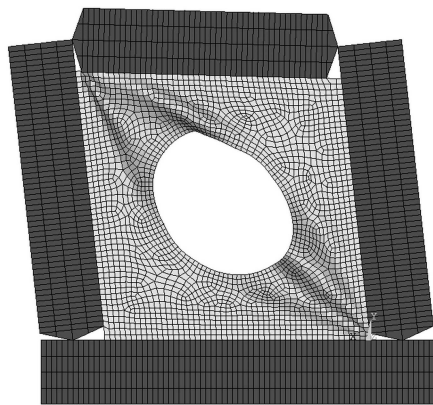
دو نمونه‌ی آزمایشگاهی SPW۲ و SPW۸ در پژوهشی در سال ۲۰۱۲،^[۱۱] با توجه به اینکه اعضا مرزی به دلیل اتصال مفصلی، سهمی در تحمل بار جانبی نداشته و کلیه‌ی بار اعمالی به ورق دیوار اعمال شده است (که هدف خاص پژوهش حاضر است) و نیز با توجه به شباهت زیاد با مدل‌های موردنظر این نوشتار، برای انجام آنالیز حساسیت شبکه‌بندی 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 ۵/۰٪ 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 ذکرشده، 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] درخصوص طرح اولیه‌ی تیر و ستون مطابق روابط ۲ الی ۴ استفاده شده است:

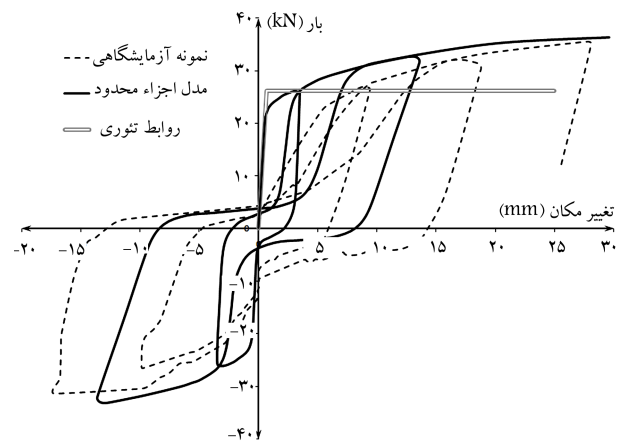
$$I_C \geq 0.700307 \frac{t_w \cdot d^3}{b} \quad (2)$$

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

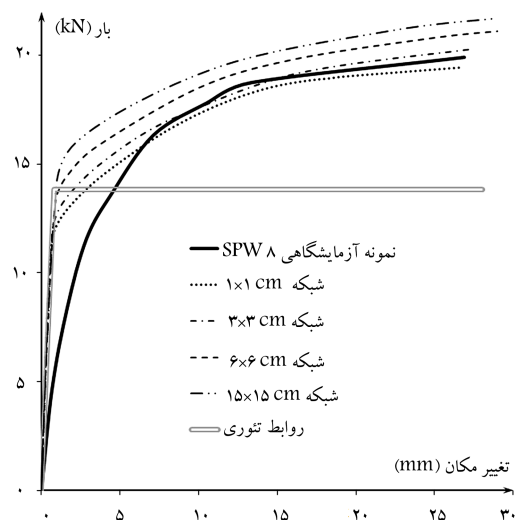
$$\tan^2 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w \cdot b}{12 A_c}}{1 + t_w \cdot d \left(\frac{1}{A_b} + \frac{d^2}{12 I_C \cdot b} \right)} \quad (4)$$

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 اعضا 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 SPW۲ (شکل ۳الف) انجام شده و مدل تحت بار چرخه‌ی قرار گرفته است.

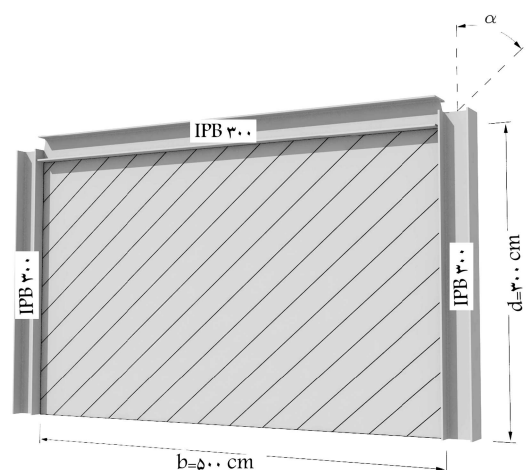
مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنالیز مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است، که حاکی از تطابق مناسب نحوه‌ی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است. نکته‌ی قابل ذکر درخصوص اختلاف ملموس سختی کشسان مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی، عدم مدل‌سازی اتصالات ورق پُرکننده‌ی میانی به اعضا مرزی است، که باعث می‌شود سختی مدل از مقدار متناظر نمونه‌ی آزمایشگاهی بیشتر باشد. در برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی (۲۰، ۲۱)^[۱۱] گسیختگی مدل در اثر بارگی 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 (SPW۸) 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.



شکل ۷. ابعاد و مشخصات پانل برشی.

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

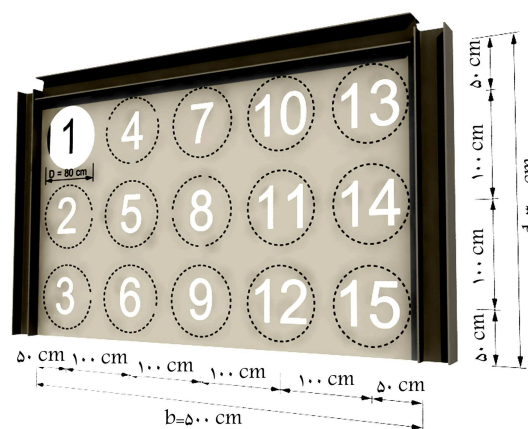
مطابق روابط تئوری موجود،^[۱۴] ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$V_y = \frac{1}{4} f_y \cdot b \cdot t_w \cdot \sin(2\alpha) \quad (5)$$

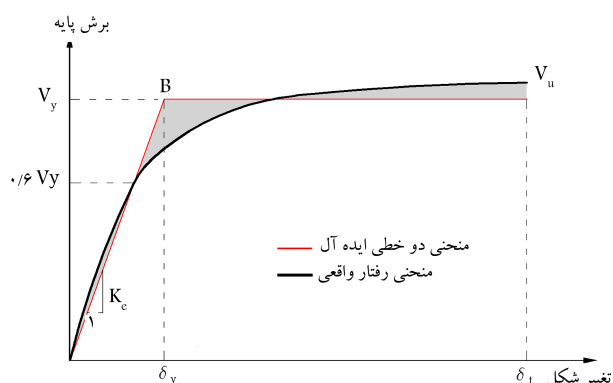
با توجه به مقدار زاویه‌ی α محاسبه شده از رابطه‌ی ۴، که حدود ۴۷٫۲ درجه است، ظرفیت برشی تئوری دیوار برابر ۱۴۹٫۶ تن محاسبه شده است. براساس آنالیز مدل اجزاء محدود پانل بدون سخت‌کننده، ظرفیت برشی ورق برابر ۱۴۵٫۶ تن به دست آمده است، که در مقایسه با مقدار تحلیلی ۱۴۹٫۶ تن، خطای حدود ۲٫۷٪ را نشان داده است، که حاکی از دقت مناسب ابعاد شبکه‌بندی و روند مدل‌سازی است.

۴. معرفی مدل‌ها براساس چیدمان بارش

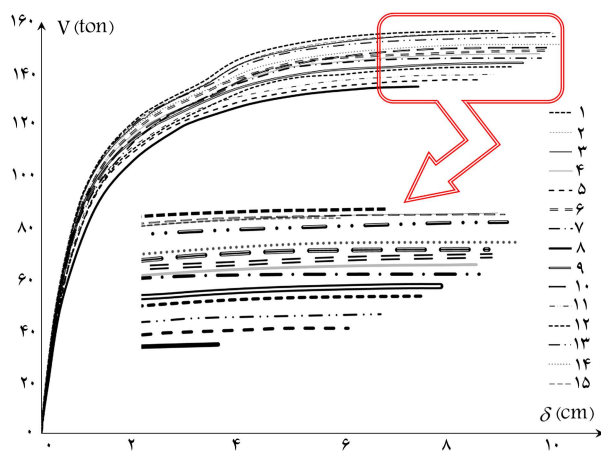
به منظور بررسی رفتار پانل‌های بارش‌دار، تعداد ۱۵ مدل با بارش‌هایی به قطر ۸۰ سانتی‌متر در محل‌هایی مطابق شکل ۸ تهیه و تحت بار جانبی قرار گرفته است.



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



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



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

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 $-0.4 = (-100/250) = \xi$ و $\eta = 0$ و جایگذاری در رابطه‌ی پیشنهادی ۸ برابر با 13.99% به‌دست 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 دورشدن 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. تغییر شکل 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 و 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 رابطه‌ی 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. براین اساس ابتدا مقادیر جدول ۲ را روی نمودار برده و سپس با سعی و خطا و به کمک نرم‌افزار MATLAB به برازش بهترین رویه‌ی سه بعدی گذرنده از مقاومت‌های موردنظر مطابق شکل ۱۳ پرداخته شده است.

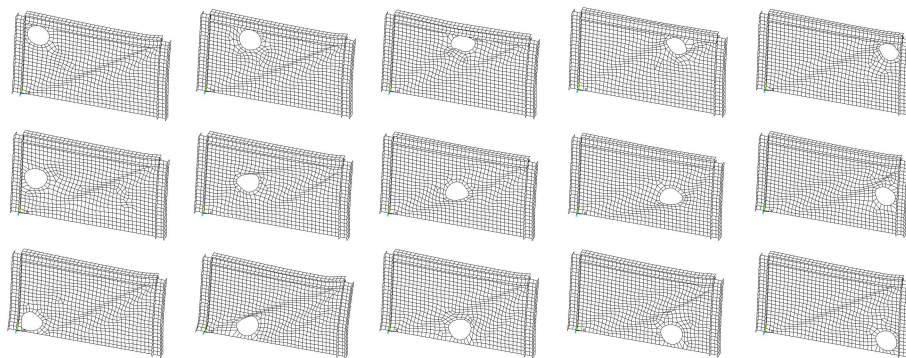
معادله‌ی رویه‌ی ذکرشده، مقدار مطلق مقاومت‌های برشی یکایک نمونه‌ها را براساس مختصات بازشو در صفحه‌ی ورق دیوار ارائه می‌کند. لیکن ارائه‌ی رابطه‌ی که مبین درصد کاهش مقاومت مدل‌های با بازشو نسبت به مدل بدون بازشو باشد و از طرفی نسبت به مختصات محل بازشو بی‌بعد باشد، که مشخصاً هدف مطلوب این پژوهش است، به راحتی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

جدول ۲. مقاومت حد کشسان مدل‌های مورد بررسی.

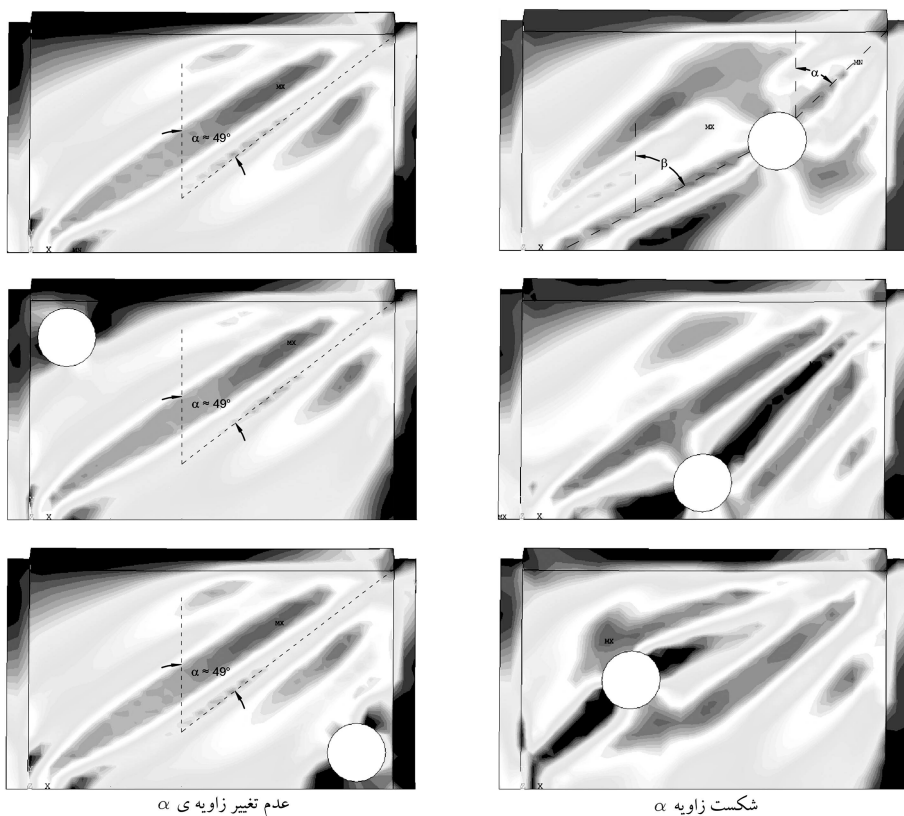
V_y (ton)	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱۴۵٫۱	۱۳۷٫۱	۱۳۶٫۶	۱۳۸٫۹	۱۴۳٫۹
۲	۱۴۲٫۱	۱۲۷٫۱	۱۲۵٫۱	۱۲۸٫۷	۱۴۱٫۲
۳	۱۴۴٫۸	۱۳۷٫۹	۱۳۵٫۵	۱۳۳٫۴	۱۴۳٫۷

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

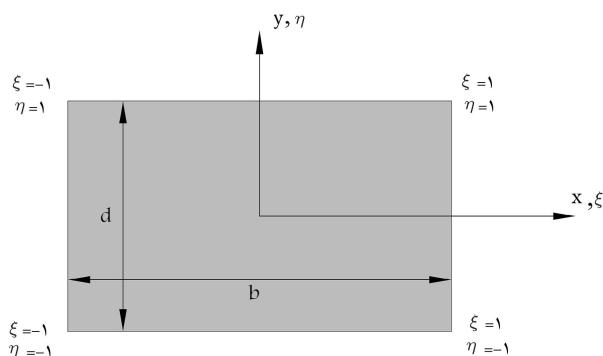
ΔV_y (%)	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰٫۳۴	۵٫۸۴	۶٫۱۸	۴٫۶۰	۱٫۱۷
۲	۲٫۴	۱۲٫۷۱	۱۴٫۰۸	۱۱٫۶۱	۳٫۰۲
۳	۰٫۵۴	۵٫۲۹	۶٫۹۴	۸٫۳۸	۱٫۳۱



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

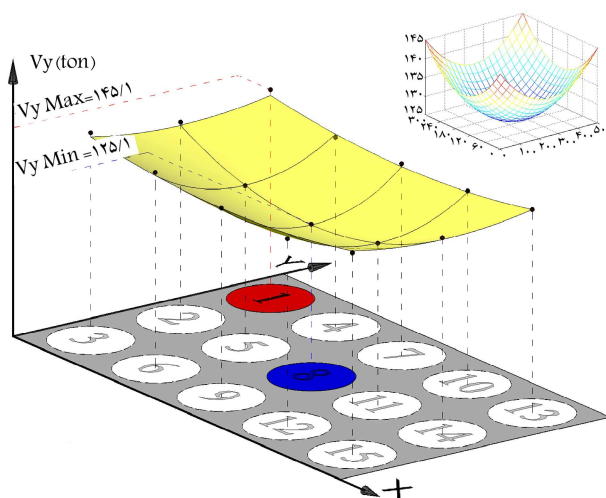


شکل ۱۲. توزیع تنش اصلی اول.



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 مقاومت 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 درخصوص 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 در رابطه ی پیشنهادی ۸، برابر ۳/۵ میلی متر انتخاب و قطر بازوها 90° سانتی متر اختیار شده است.

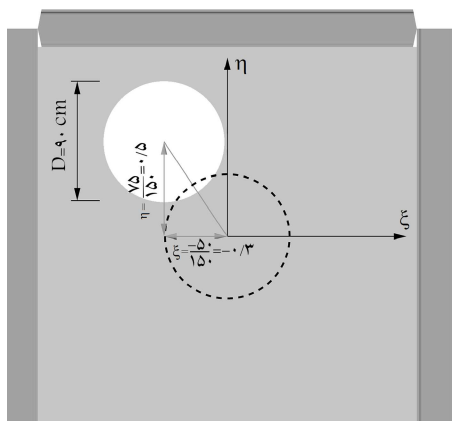
نهایی رابطه ی ۸، مدل جدیدی با شماره ی ۱۶ با موقعیت بارشو در مختصات جدید $x = -150$ سانتی متر، $y = 45$ سانتی متر و قطر مشابه 80° سانتی متر مطابق شکل ۱۵، انتخاب و تحت بارگذاری قرار گرفته است. مقاومت حد کشسان مدل مورد بررسی حاصل از آنالیز پوش مدل مطابق شکل ۱۶ برابر $132/94$ تن محاسبه شده است، که این مقدار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

جدول ۴. درصد افت مقاومت مدل ها نسبت به نمونه ی بدون بازشو (آنالیز مدل ها).

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 مدل ها نسبت به نمونه ی بدون بازشو (رابطه ی 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 رابطه ی ۱۲ برای پانل مربعی.

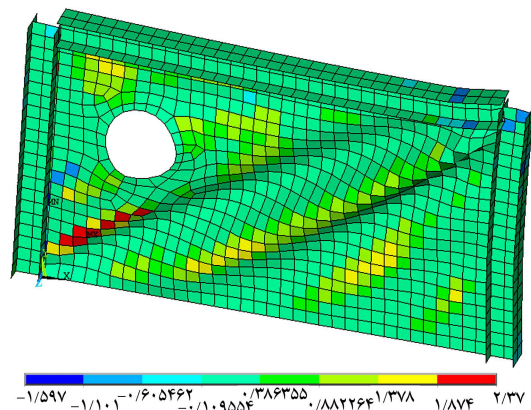
مقاومت ۲۸/۶٪، به طور مناسبی با مقدار مورد انتظار از رابطه ی اصلی ۱ هم خوانی دارد. با تخمین درصد افت مقاومت مدل ها با استفاده از رابطه ی پیشنهادی ۸، مطابق جدول ۵ و مقایسه ی آن با مقادیر متناظر جدول ۴ مشاهده می شود که رابطه ی پیشنهادی ۸، افت مقاومت پانل های مربعی را نسبتاً با دقتی کمتر از پانل های مستطیلی (با نسبت عرض به ارتفاع بیش از ۱) تخمین می زند. بیشترین مقدار خطای رابطه ی ۸ در تخمین افت مقاومت برای پانل مستطیلی و مربعی مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب ۳/۶۳٪ و ۹/۶۵٪ به دست آمده است.

جهت کنترل نهایی رابطه ی ۸ برای بازشو با محلی متفاوت از موقعیت های مندرج در شکل ۱۷، مدل جدیدی با موقعیت بازشو در مختصات جدید $x = -50^\circ$ سانتی متر، $y = 75$ سانتی متر و قطر 90° سانتی متر 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 ۸/۲۱٪ کمتر از نمونه ی بدون بازشو است. تغییر مکان خارج از صفحه ی ورق و توزیع تنش اصلی در لحظه ی باربری نهایی در شکل ۲۰ ارائه شده است.

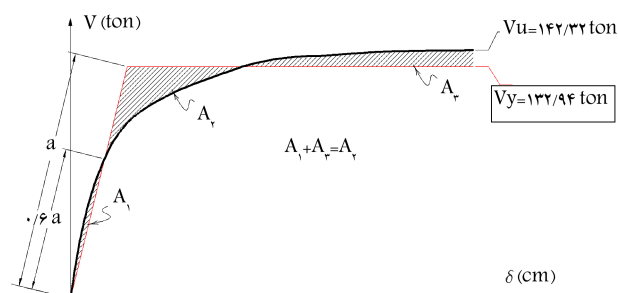
درصد افت مقاومت مدل مذکور با $\xi = (-50/150) = -0/33$ و $\eta = (75/150) = 0/5$ و جایگذاری در رابطه ی پیشنهادی ۸ برابر با ۲۱/۱۲ به دست آمده است، که حاکی از دقت بسیار مناسب رابطه ی ۸ در تخمین درصد کاهش مقاومت پانل های مربعی است.

۲.۷. پانل های با نسبت دهانه به ارتفاع برابر ۲

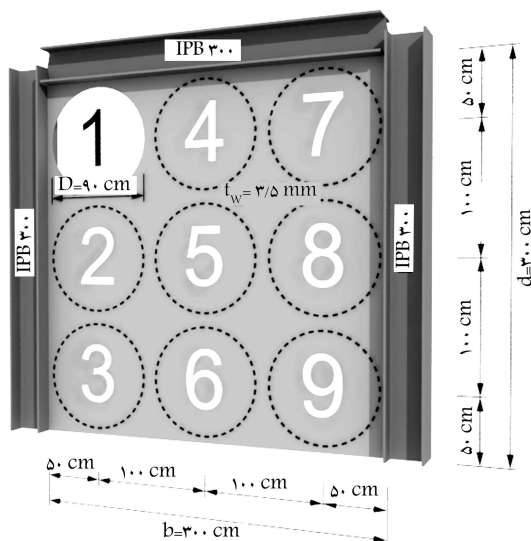
مدل شماره ی ۱۷، با هدف بررسی رفتار پانل برشی با عرض ۶ متر و ارتفاع ۳ متر



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



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



شکل ۱۷. مدل های جدید جهت کنترل صحت رابطه ی ۱۲ برای پانل مربعی.

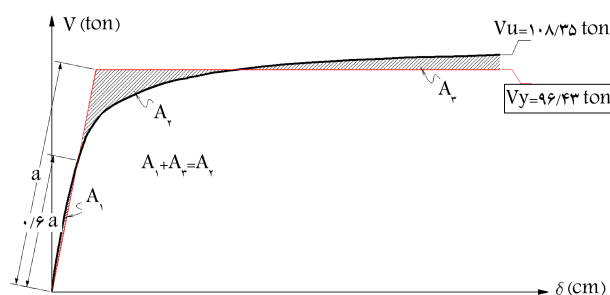
نتایج حاصل از آنالیز پانل مربعی بدون بازشو با مشخصات موجود در شکل ۱۷، برابر ۱۲۲/۲ تن محاسبه شده است، که با مقدار مورد انتظار ۱۲۴ تن از روابط تئوری موجود (رابطه ی ۵)، کمتر از ۱/۵٪ اختلاف داشته است، که به عنوان خطای قابل قبول مدل سازی پذیرفتنی است. نتایج حاصل از آنالیز مدل ها با بازشو در قالب درصد کاهش مقاومت مدل ها 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

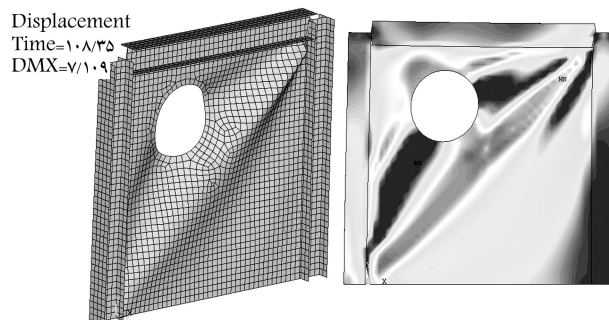
۳.۷. بازشوها با شکل‌های مربع مستطیل

همان‌طور که در مقدمه‌ی نوشتار حاضر عنوان شده است، پارامتر D در رابطه‌ی اصلی ۱ برای بازشوی ۴ ضلعی برابر با قطر دایره‌ی محیطی بازشو موردنظر تعریف شده است. جهت بررسی صحت رابطه‌ی ۸ درخصوص 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 دایره‌یی انتخاب شده است.

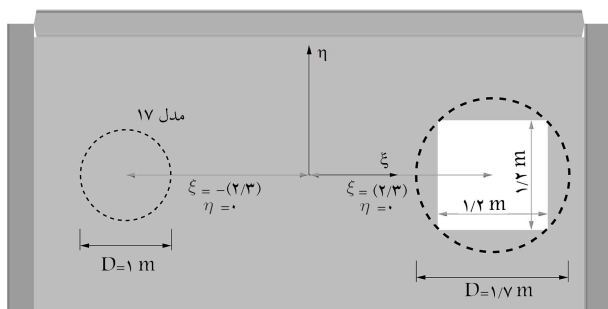
از آنجا که کلیه‌ی مشخصات مدل ۱۸ مشابه مدل ۱۷ است و فقط تفاوت موجود بین دو مدل در شکل بازشو است و با توجه به اینکه بازشو مربعی با طول ضلع ۱/۲ متر معادل بازشو دایره‌یی با قطر تقریبی ۱/۷ متر است، که نسبت به مدل ۱۷ اضافه قطر ۱/۷ برابری دارد، لذا با استفاده از رابطه‌ی ۸ پیش‌بینی شده است که افت مقاومت ۴/۸٪ 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



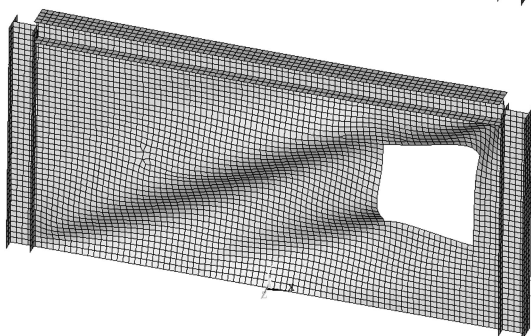
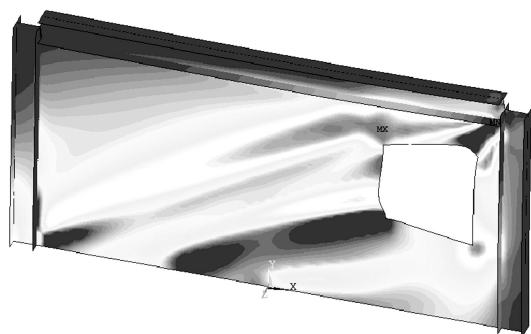
شکل ۱۹. مقاومت حد کشسان مدل جدید با منحنی دوطبقی معادل.



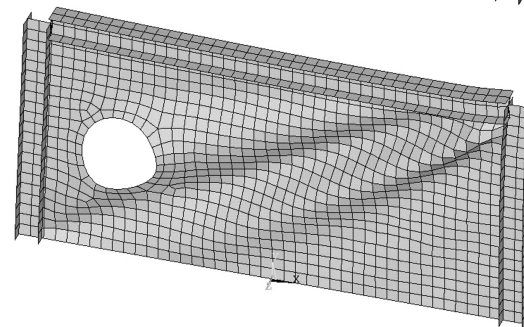
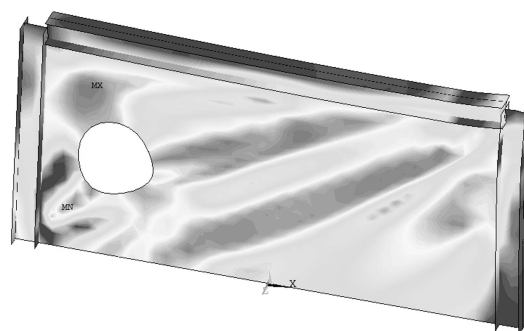
شکل ۲۰. توزیع تنش اصلی و تغییرشکل مدل در لحظه‌ی باربری نهایی.



شکل ۲۲. هندسه‌ی مدل شماره‌ی ۱۸.



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



شکل ۲۱. توزیع تنش و تغییرشکل مدل شماره‌ی ۱۷.

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 یی 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

پانوشتها

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*, **I**, 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. Astanek-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).