

اثر آرایش‌های مختلف سخت‌کننده در سختی و ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی

مجید قلهکی* (دانشیار)

محمد جلیل‌زاده افشاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شهریه (زمستان ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳، شماره ۴، ص. ۱۲-۳

امروزه استفاده از دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی لرزه‌ی کارآمد، در افزایش مقاومت جانبی و سختی ساختمان‌ها در برابر زلزله، در نوسازی و بهسازی لرزه‌ی سازه‌های بتنی و فولادی مورد توجه قرار گرفته است. در نوشتار حاضر، ظرفیت و سختی برشی دیوار برشی فولادی تحت آرایش‌های مختلف سخت‌کننده، اعم از: افقی، قائم و افقی - قائم، به کمک روش اجزاء محدود بررسی و در نهایت، روابط نیمه‌تجربی مرتبط ارائه شده است. نتایج حاکی از پیش‌بینی مناسب سختی و مقاومت برشی دیوار برشی با سخت‌کننده بوده است، لیکن افزایش تعداد سخت‌کننده از حدی خاص، تأثیر محسوسی در افزایش سختی و مقاومت نخواهد داشت.

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

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی تقویت شده، سختی، ظرفیت برشی.

۱. تاریخچه‌ی پژوهش

است که کاربرد مناسب سخت‌کننده، سختی و جذب انرژی سیستم را افزایش می‌دهد و در ادامه، روشی جهت تعیین کمیته‌ی ممان اینرسی لازم برای سخت‌کننده‌ها جهت جلوگیری از کماتش کلی ورق ارائه شده است که مقادیر حاصل از روش مذکور با برخی آزمایش‌ها،^[۵] مقایسه و توافق خوبی حاصل شده است.^[۷،۶] همچنین در قالب مطالعاتی به روش اجزاء محدود (۲۰۱۳) به بررسی عملکرد پانل میانی نازک بین دو بازشو در دیوارهای فولادی سخت شده پرداخته شده و نتایج آن نشان داده است که برای اطمینان از وقوع جاری شدن برشی ورق فولادی پانل میانی پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی طرفین، محدودیت‌هایی به لحاظ ابعاد سطح مقطع سخت‌کننده و نیز نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی وجود خواهد داشت.^[۸]

در مطالعات دیگری (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی مقاومت‌سازی قاب‌های فولادی مهاربندی شده به کمک دیوارهای برشی فولادی از دیدگاه لرزه‌ی پرداخته و عنوان شده است که با رعایت پاره‌ی نکات علمی، فنی و اجرایی، تعویض سیستم باربر جانبی از مهاربندی فولادی همگرا به دیوار برشی فولادی، روشی مناسب جهت مقاومت‌سازی و بهسازی قاب‌های فولادی موجود است.^[۹]

با روش اجزاء محدود در بررسی اثر مقاومت‌سازی دیوار برشی فولادی بازشودار با الیاف FRP (۲۰۱۴) عنوان شده است که در اثر وجود سخت‌کننده در موقعیت‌های مناسب اطراف بازشو، توزیع تنش در ورق دیوار و اعضاء مرزی، یکنواخت‌تر است و سختی و جذب انرژی سیستم بیشتر خواهد شد.^[۱۰] با وجود پژوهش‌های فراوانی که بر روی دیوارهای برشی فولادی سخت شده توسط پژوهشگران داخلی و خارجی

در سال‌های اخیر، جهت اطمینان از نحوه‌ی عملکرد لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی، پژوهش‌های آزمایشگاهی وسیعی تحت بارهای چرخه‌ی و یک جهته بر روی دیوارهای برشی صورت گرفته است که نتایج آن نشانگر سختی زیاد، مقاومت کافی، شکل‌پذیری فوق‌العاده و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای سیستم لرزه‌بر مذكور 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 سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷، مقایسه‌ی رفتار پانل‌های سخت نشده (نازک) و سخت شده و اثر سخت‌شدگی در مقاومت نهایی و رفتار چرخه‌ی پانل‌های سخت شده و نازک بررسی شده و نتایج نشان داده است که میزان بهینه‌ی از سخت‌کننده‌ها باید استفاده شود، تا صلبیت و شکل‌پذیری کافی حاصل شود. همچنین با یک مطالعه‌ی اجزاء محدود، تأثیر صلبیت اعضاء مرزی در رفتار کماتش برشی و فراکمانشی پانل بررسی شده است که حاصل آن تأثیر مستقیم سختی پیچشی اعضاء مرزی در افزایش بار کماتشی و عدم تأثیر آن در مقاومت فراکمانشی بوده است.^[۱-۴]

مطالعاتی (۲۰۰۷) نیز جهت بهبود پایداری و جلوگیری از کماتش ارتجاعی زود هنگام دیوار با استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم انجام و نشان داده شده

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۹، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۹.

انجام شده است، تحلیل دیوارهای مذکور به جهت دستیابی به مقاومت و سختی سیستم، همچنان نیازمند انجام آنالیزهای زمان‌بر و پرهزینه غیرخطی استاتیکی و دینامیکی است. از طرفی تقریباً تمامی روابط کلاسیک و تئوریک موجود در ارتباط با دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده است و رابطه‌ی مشخصی که مقاومت و سختی پائل تقویت شده را نسبت به پائل تقویت نشده متناظر برآورد کند، وجود ندارد. از این رو هدف نوشتار حاضر، دستیابی به روابط ساده‌ی است که مقاومت و سختی پائل تقویت شده را فقط براساس تعداد سخت‌کننده‌های قائم و افقی که مود کماتش کلی ورق را به مود کماتش موضعی در زیرصفحات تبدیل می‌کنند، محاسبه کنند.

بر این اساس پس از اعتبارسنجی، روند سخت کردن دیوار برشی نازک تا ۴ سخت‌کننده‌ی افقی و قائم انجام شده است. براساس نتایج به دست آمده از آنالیز مدل‌ها، روابطی برای تخمین مقاومت و سختی مدل‌ها استخراج و براساس آن‌ها، مقاومت و سختی پائل‌های تقویت شده با تعداد سخت‌کننده‌ی بیشتر پیش‌بینی شده است. با انجام مدل‌سازی‌های مجدد با تعداد سخت‌کننده‌ی بیشتر، صحت مقادیر پیش‌بینی بررسی و در صورت تطابق مناسب، روابط پیشنهادی تأیید و ارائه شده است. در انتها، بازه‌ی از تعداد سخت‌کننده که روابط پیشنهادی در آن محدوده‌ی معتبر است، معرفی و روند ذکر شده در قالب فلوجارتی مطابق شکل ۱ نشان داده شده است.

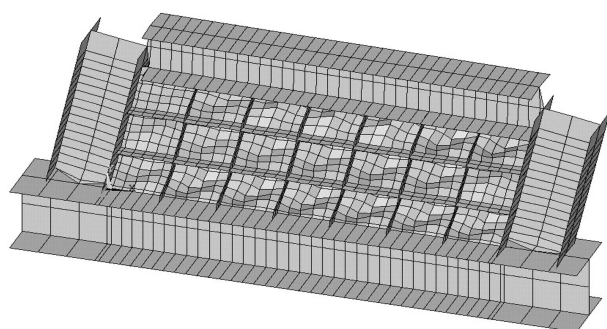
۲. حساسیت شبکه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌سازی

مدل آزمایشگاهی با سخت‌کننده‌ی تاکاهاشی^[۱۵] که یک دیوار برشی فولادی با عرض دهانه‌ی ۲٫۱ متر، ارتفاع ۰٫۹ متر و ضخامت ورق ۳٫۲ میلی‌متر با تنش تسلیم $f_y = 232$ مگاپاسکال و تنش حد نهایی $f_u = 380$ مگاپاسکال است، جهت مدل‌سازی و اعتبارسنجی انتخاب شده است. مدل آزمایشگاهی مذکور با قاب پیرامونی مفصلی، ۶ سخت‌کننده‌ی عمودی و ۲ سخت‌کننده‌ی افقی با فواصل یکسان از یکدیگر و در دو طرف ورق و سطح مقطعی برابر با ۶۰ در ۴٫۵ میلی‌متر داشتند. بر این اساس در روش اجزاء محدود، اتصال تیر به ستون به صورت

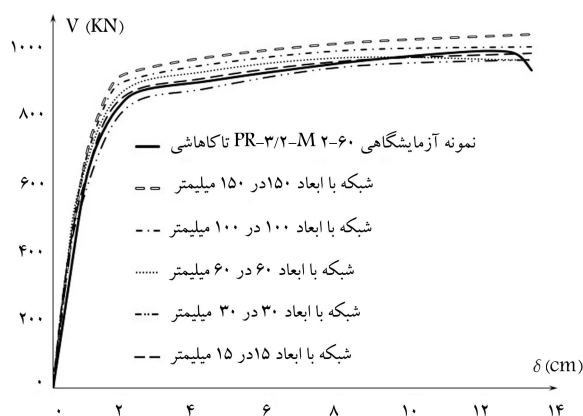
مفصلی و با مثلثی کردن جان تیر و اتصال آن به بال ستون مدل‌سازی انجام و نیز از روش مذکور برای مدل‌سازی اتصال مفصلی پای ستون به تیر عمیق کف استفاده شد (شکل ۲). همچنین از المان Shell ۴ گره‌ی (۱۸۱ Node ۴) در نرم‌افزار ANSYS برای مدل‌سازی ورق و قاب پیرامونی و نیز برای تیر و ستون‌های محیطی از پروفیل IPB۳۰۰ و برای تیر عمیق تحتانی از پروفیل IPB۴۰۰ استفاده شد.

به منظور انجام آنالیز حساسیت مش‌بندی (شبکه‌بندی)، ابعاد مش مختلف مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد و مدل تحت بار جانبی یک جهته قرار گرفت. شکل ۳، مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که حاکی از تطابق مناسب نحوه‌ی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان می‌دهد چنانچه ابعاد مش‌بندی از حدی ریزتر شود، دقت محاسبات افزایش زیادی ندارد 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 و برای حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی در روند اعتبارسنجی، نمونه‌ی دوم آزمایشگاهی مدل‌سازی شد.

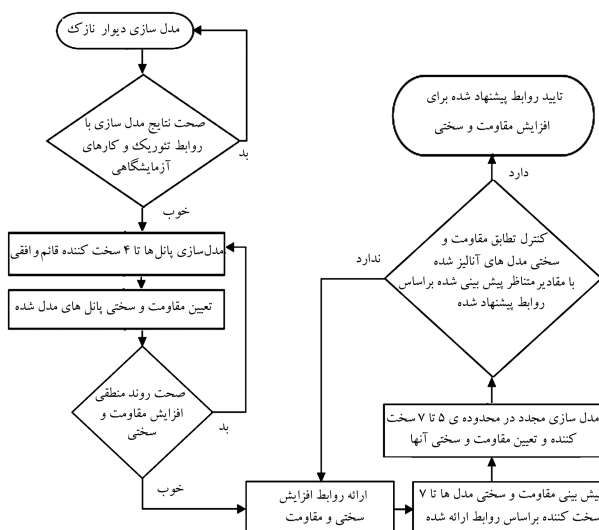
مدل آزمایشگاهی صبور و سجادی^[۱۱] که مشخصات آن در شکل ۴ ارائه شده است، به عنوان دومین نمونه‌ی آزمایشگاهی به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انتخاب و بررسی شد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی مذکور (شکل ۵)، صحت مدل‌سازی با ابعاد مش 15×15 سانتی‌متر را تأیید کرد و بر این اساس در ادامه‌ی روند مدل‌سازی‌ها، از ابعاد شبکه‌بندی مذکور استفاده شده است.



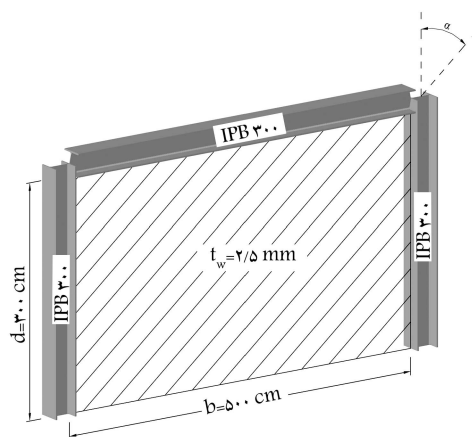
شکل ۲. مدل اجزاء محدود نمونه‌ی تاکاهاشی تحت بار جانبی.



شکل ۳. منحنی نیرو-تغییر مکان مدل اجزاء محدود با ابعاد مختلف مش و نمونه‌ی آزمایشگاهی.



شکل ۱. فلوجارت مدل‌سازی.



شکل ۶. ابعاد و مشخصات پانل برشی فولادی.

اولیهی تیر و ستون مطابق رابطه‌های ۱ الی ۳ استفاده شد.

$$I_C \geq 0.00307 \frac{t_w \cdot d^3}{b} \quad (1)$$

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

$$\alpha = \arctan \sqrt{\frac{1 + \frac{t_w \cdot b}{A_c}}{1 + t_w \cdot d \left(\frac{1}{A_b} + \frac{d^2}{I_C \cdot b} \right)}} \quad (3)$$

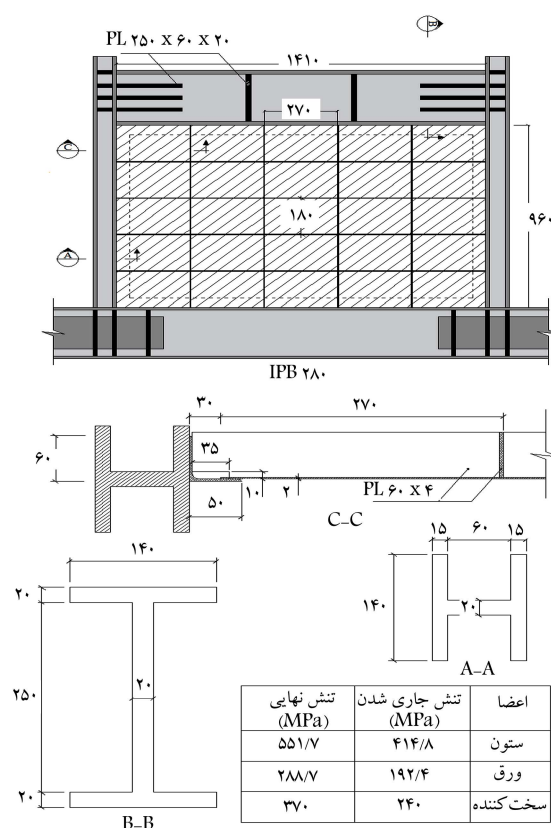
که در آنها، I_C ممان اینرسی ستون، t_w ضخامت ورق، d ارتفاع ورق، b عرض ورق، M_{pb} لنگر خمیری تیر، σ_{ty} تنش تسلیم کششی، α زاویه‌ی میدان کشش قطری با خط قائم، A_c سطح مقطع ستون و A_b سطح مقطع تیر است. بر این اساس مطابق شکل ۶، برای دیوار با ابعاد مذکور، تیرها و ستون‌ها از نوع IPB 300 طراحی و مدل‌سازی شد.

فولاد مورد استفاده در تمامی اعضا از نوع ST 37 با مدول کشسانی ۲۱۰ گیگاپاسکال و تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال با منحنی تنش - کرنش دو خطی ایده‌آل بدون سخت‌شوندگی (کشسان - کاملاً خمیری) است. از آنجا که حذف تیر تحتانی موجب کاهش محسوس زمان تحلیل‌ها می‌شود، لذا در مدل‌سازی‌ها، تیر تحتانی حذف و شرایط مرزی مفصلی مستقیم در پای ستون و دیوار اعمال شد. جهت دستیابی به روابط ساده که بیانگر درصد افزایش مقاومت و سختی پانل تقویت شده با سخت‌کننده نسبت به مدل مشابه بدون سخت‌کننده است، ابتدا باید پانل بدون سخت‌کننده مدل‌سازی شود.

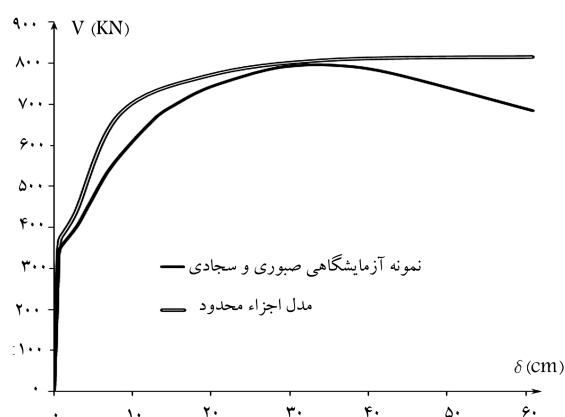
مطابق روابط تئوری موجود،^[۱۳] ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$V_y = \frac{1}{3} f_y \cdot b \cdot t_w \cdot \sin(2\alpha) \quad (4)$$

با توجه به مقدار زاویه‌ی α محاسبه شده از رابطه‌ی ۳ که حدود ۴۷٫۲° است، ظرفیت برشی تئوری دیوار برابر ۱۴۸٫۷ تن محاسبه شد. براساس آنالیز مدل اجزاء محدود پانل بدون سخت‌کننده، ظرفیت برشی ورق برابر ۱۴۵٫۴ تن به دست آمد که در مقایسه با مقدار تحلیلی ۱۴۸٫۷ تن، خطای حدود ۲٪ را نشان داد که حاکی از دقت مناسب ابعاد شبکه‌بندی و روند مدل‌سازی است.



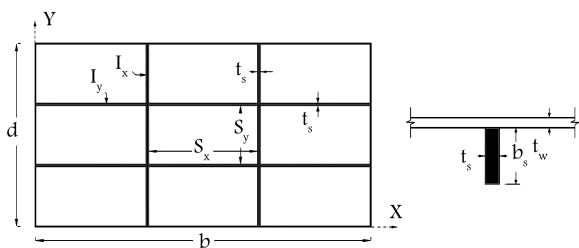
شکل ۴. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی صبوری و سجادی.^[۱۱]



شکل ۵. منحنی نیرو - تغییر مکان مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی صبوری و سجادی.

۳. مدل‌سازی نمونه‌های مورد بررسی

با توجه به دهانه‌های معمول ساختمان‌ها، یک دیوار برشی فولادی به عرض ۵۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۰۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. قاب پیرامونی ورق، یک قاب با اتصال ساده بود و سختی تیرها و ستون‌ها به گونه‌ی بود که ورق کاملاً تحت برش خالص باشد. جهت انتخاب مقاطع مناسب برای ستون‌ها و تیر محیطی از روابط موجود در آیین‌نامه‌ی ۱۰- AISI 334^[۱۲] درخصوص طرح



شکل ۹. مشخصات هندسی یانل و سخت کننده‌ها.

$$\left(\frac{I_x}{S_x} + \frac{t_w^r}{\mathfrak{V}(\mathfrak{V} - \nu^r)}\right)^{\circ, \gamma \Delta} \left(\frac{I_y}{S_y} + \frac{t_w^r}{\mathfrak{V}(\mathfrak{V} - \nu^r)}\right)^{\circ, \gamma \Delta} \geq \frac{t_w^r}{\mathfrak{V}(\mathfrak{V} - \nu^r)} \cdot \left(\frac{d}{S_x}\right)^r \cdot \left(\frac{k_L}{k_G}\right) \quad (\Delta)$$

که در آن، K_g ضریب کمانش کلی ورق است که با توجه به اتصال ساده‌ی ورق به اعضاء محیطی برابر با $3/64$ محاسبه شده است و K_L ضریب کمانش موضعی ورق است که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} k_L = \frac{\phi}{\phi + 1} + \frac{\tau}{(S_y/S_x)^{\tau}} & \frac{S_y}{S_x} \geq 1 \\ k_L = \frac{\phi}{\phi + 1} + \frac{\phi\tau}{(S_y/S_x)^{\tau}} & \frac{S_y}{S_x} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

سایر پارامترهای رابطه‌ی ۵ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، در صورت استفاده از ضخامت و ابعاد یکسان برای سخت‌کننده‌های افقی و قائم ($I_x = I_y$) و نیز با جایگزین کردن I_s به جای I_x و I_y در رابطه‌ی ۵ و نیز با توجه به مقادیر S_x و S_y حاصل از هر یک از آرایش‌های سخت‌کننده‌ها مطابق شکل ۷، مقدار ممان اینرسی مورد نیاز (I_s) برای سخت‌کننده‌های افقی و قائم مدل‌های مورد بررسی، محاسبه شده و بیشترین آن مربوط به مدل (۰۷۴h) و برابر $51,08 \text{ cm}^4$ به دست آمده است. لذا با انتخاب سخت‌کننده‌ها با عرض 10 cm سانتی‌متر ($b_s = 10 \text{ cm}$) و ضخامت 1 cm سانتی‌متر ($t_s = 1 \text{ cm}$)، ممان اینرسی حاصل شده متناظر با ابعاد انتخابی ذکر شده، مطابق رابطه‌ی ۷ برابر $83,33 \text{ cm}^4$ است که از بیشترین مقدار مورد نیاز مدل‌های مورد بررسی مربوط به مدل (۰۷۴h) نیز بیشتر است و به این ترتیب ممان اینرسی مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های کلیه‌ی مدل‌ها، جهت وقوع کماتش موضعی زیر صفحات تأمین می‌شود:

$$I_s = \frac{1}{\gamma} t_s \cdot (b_s)^\gamma \quad (\gamma)$$

همچنین نسبت عرض به ضخامت سخت‌کننده‌های انتخابی جهت کنترل معیار لاغری سخت‌کننده برابر با ۱۰ است که از بیشینه‌ی مقدار مجاز آن (۱۶/۲۳) مطابق رابطه‌ی ۸، کمتر بوده و لذا ابعاد انتخابی سخت‌کننده مناسب است.^[۱۴]

$$\frac{b_s}{t_s} < \frac{V_{90}}{\sqrt{f_y}} \quad (\lambda)$$

که در آن، f_y تنش تسلیم مصالح سخت کننده است.

۵. بررسی و تحلیل نتایج

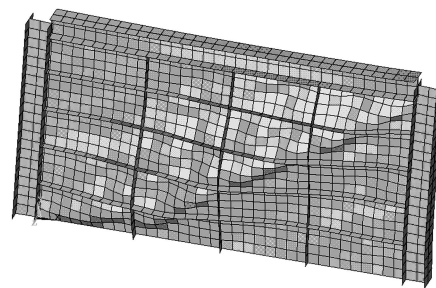
۱.۵. تحلیل منحنی‌های نیرو - تغییر مکان حاصل از آنالیز مدل‌ها در اثر فرایند افزودن سخت کننده به دیوار برشی انتظار می‌رود که مقاومت نهایی (Vu)، مقاومت حد کشسان (Vy) و نیز سختی پائل (Ke) افزایش و تغییر مکان

۴. معرفی آرایش و ابعاد سخت کننده‌ها

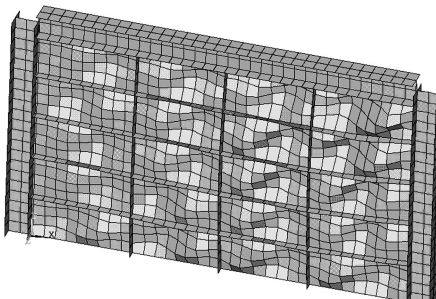
به منظور بررسی رفتار پانل‌های سخت شده تحت آرایش‌های مختلف سخت‌کننده، تعداد ۲۵ مدل با فواصل سخت‌کننده‌ی افقی و قائم مختلف مطابق شکل ۷ تهیه و تحت بار جانبی قرار گرفت. ابعاد و ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها باید به گونه‌ای باشد که از کمناش کلی ورق جلوگیری و مطابق شکل ۸، مود کمناش کلی به مود کمناش موضعی در زیرصفحه‌ها تبدیل شود. به عبارت دیگر، در صورت انتخاب ضخامت و ابعاد نامناسب برای سخت‌کننده، وقوع کمناش کلی ورق به همراه سخت‌کننده‌ها امری قطعی است و از ظرفیت ورق فولادی به‌صورت کامل استفاده نخواهد شد. برای تحقق تبدیل کمناش کلی ورق به مود کمناش موضعی در هر زیرصفحه، باید رابطه‌ی ارائه شده توسط تیموشنکو برای ورق ارتوروپیک مطابق رابطه‌ی ۵ ارضا شود:

$b = \Delta \dots \text{cm}$	$b/r \dots b/r$	$b/r \dots b/r \dots b/r$	$b/r \dots b/r \dots b/r \dots b/r$	$bababababab$
$\cdot v \cdot h$	$\vee v \cdot h$	$\vee v \cdot h$	$\vee v \cdot h$	$\vee v \cdot h$
$\cdot v \vee h$	$\vee v \vee h$	$\vee v \vee h$	$\vee v \vee h$	$\vee v \vee h$
$\cdot v \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee h$
$\cdot v \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee h$
$\cdot v \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee h$
$\cdot v \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee h$
$\cdot v \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$
$\cdot v \vee \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$	$\vee v \vee \vee \vee \vee \vee \vee \vee h$

شکل ۷. آرایش‌های انتخابی سخت‌کننده جهت بررسی ظرفیت پانل برشی فولادی.

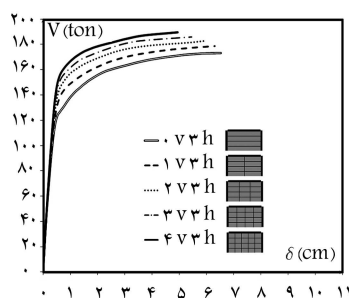


الف) مود کمانشی نامطلوب کلی ورق با جرای سخت کننده نامناسب؛

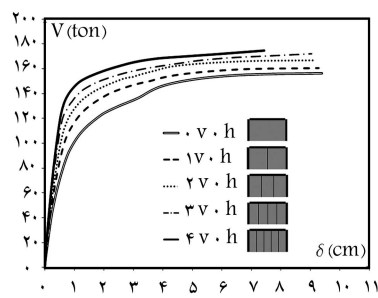


(ب) مود کمانشی مطلوب موضعی زیر صفحات با جرای سخت کننده مناسب.

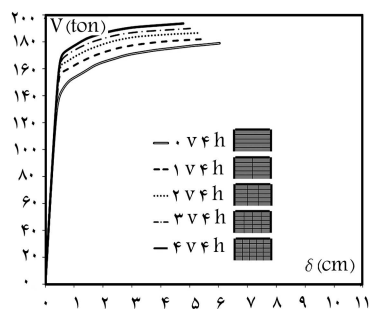
شکل ۸. تأثیر ابعاد و مشخصات هندسی سخت‌کننده در مود کمانش پانل پرشی.



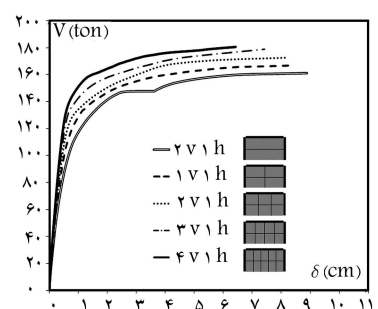
ت) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۳h؛



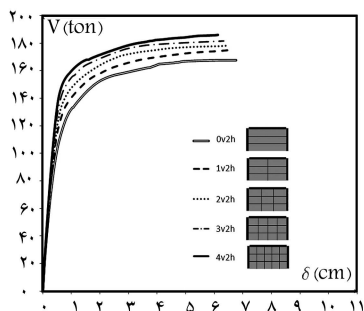
الف) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۰h؛



ث) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۴h؛



ب) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۱h؛



پ) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۲h؛

شکل ۱۰. روند تغییر رفتار پانل در اثر افزودن سخت کننده‌ی قائم.

مقاومت و سختی مؤثر حد کشسان کلیه‌ی مدل‌ها، با استفاده از مدل رفتار دو خطی ایده‌آل محاسبه و نتایج به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲.۵. تعیین رابطه‌ی نیمه تجربی برآورد مقاومت مدل‌ها

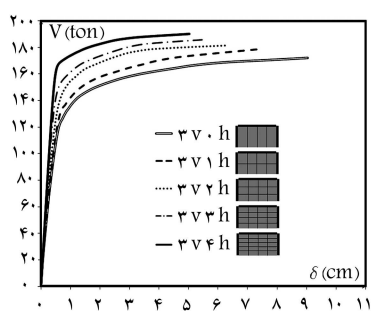
با توجه به نتایج جدول ۱، می‌توان رابطه‌ی نیمه تجربی بین درصد افزایش مقاومت مدل‌های با سخت کننده نسبت به مدل بدون سخت کننده و تعداد سخت کننده‌های افقی (n_h) و قائم (n_v) اضافه شده به پانل برشی تعیین کرد. بر این اساس، میانگین

جدول ۱. مقاومت حد کشسان مدل‌های مورد بررسی.

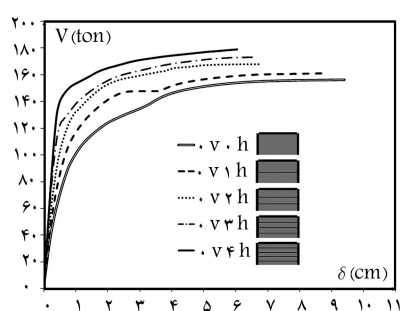
V_y (ton)	۰v	۱v	۲v	۳v	۴v
۰h	۱۴۵/۴	۱۵۱/۶	۱۵۸/۲	۱۶۱/۵	۱۶۵/۰
۱h	۱۵۰/۹	۱۵۷/۰	۱۶۲/۴	۱۶۶/۴	۱۷۰/۰
۲h	۱۵۸/۳	۱۶۴/۱	۱۶۹/۴	۱۷۳/۲	۱۷۶/۴
۳h	۱۶۱/۳	۱۶۷/۵	۱۷۲/۹	۱۷۶/۴	۱۷۹/۸
۴h	۱۶۸/۶	۱۷۴/۶	۱۷۹/۹	۱۸۳/۵	۱۸۶/۹

برشی حد نهایی سازه (δ_t) کاهش یابد. در شکل ۱۰، تأثیر افزایش مقاومت و سختی و کاهش تغییر مکان نهایی سازه در اثر افزودن سخت کننده‌ها در دو حالت فقط قائم و فقط افقی بررسی شده است که مطابق آن روند تغییر منحنی نیرو - تغییر مکان پانل برشی بدون سخت کننده‌ی افقی، در اثر افزودن فقط سخت کننده‌ی قائم از صفر تا ۴ سخت کننده (شکل ۱۰الف) مشاهده می‌شود. روند افزودن سخت کننده‌ی قائم از صفر تا ۴ عدد، برای پانل با ۱ سخت کننده‌ی افقی تا ۴ سخت کننده‌ی افقی در شکل‌های (۱۰ب تا ۱۰ث) نشان داده شده است.

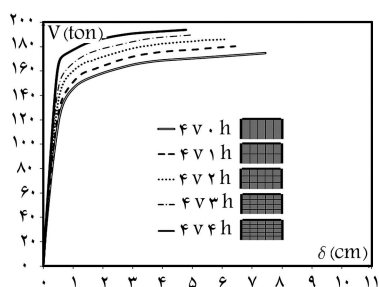
مجدداً با افزایش تعداد سخت کننده‌ی افقی از صفر تا ۴ عدد، برای تعداد سخت کننده‌ی قائم ثابت و مشخص از صفر تا ۴ عدد، نمودار نیرو - تغییر مکان نمونه‌ها مطابق شکل‌های (۱۱الف) الی (۱۱ث) به دست آمده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سخت کننده‌ها، سختی و مقاومت نمونه‌ها افزایش و تغییر مکان برشی حد نهایی سازه کاهش یافته است. شکل ۱۲، نحوه‌ی تشکیل میدان کشش قطری در هر یک از مدل‌ها را نشان می‌دهد که مطابق آن با انتخاب میزان سخت کننده‌ی مناسب، از مود کمانش کلی جلوگیری و کمانش در هر یک از زیرصفحه‌ها تشکیل شده است.



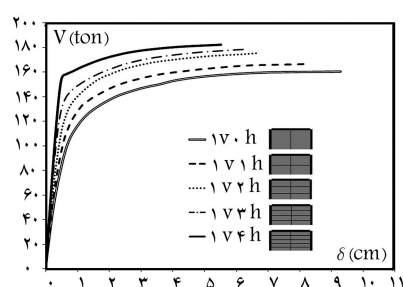
ت) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۳۷؛



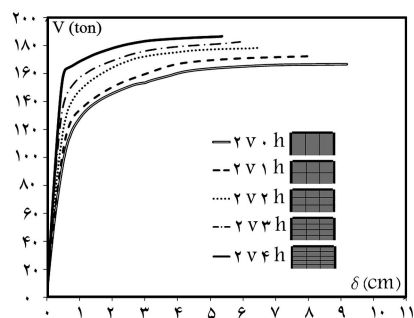
الف) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۱۰؛



ث) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۴۷؛



ب) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۱۹؛



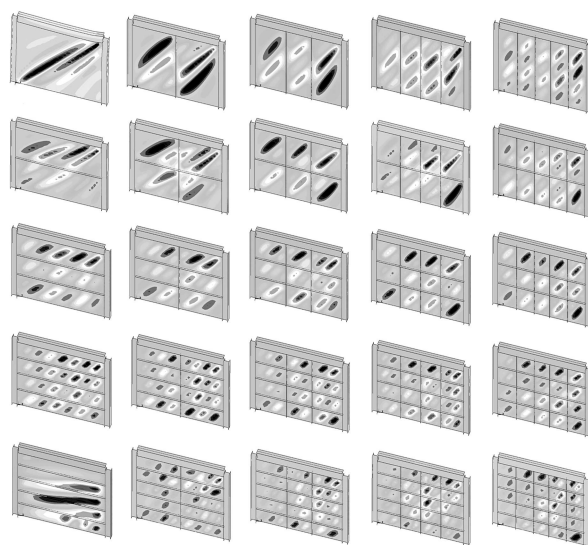
پ) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۲۷؛

شکل ۱۱. روند تغییر رفتار پانل در اثر افزودن سخت‌کننده‌ی افقی.

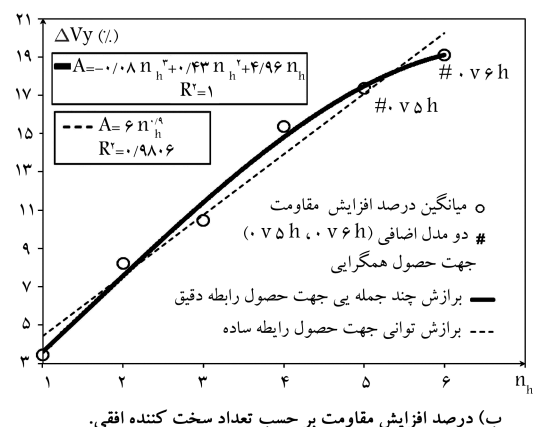
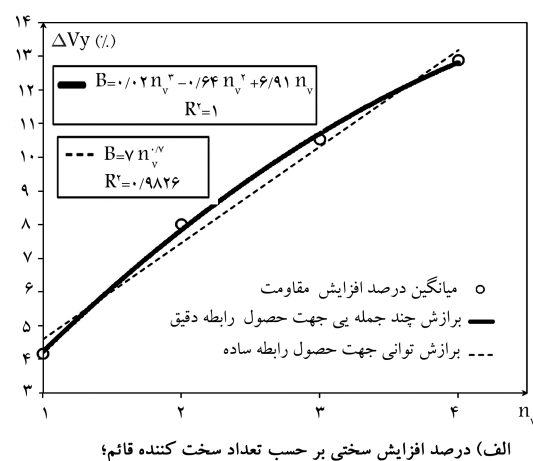
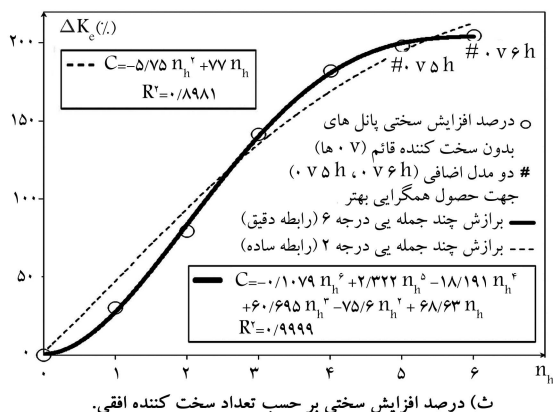
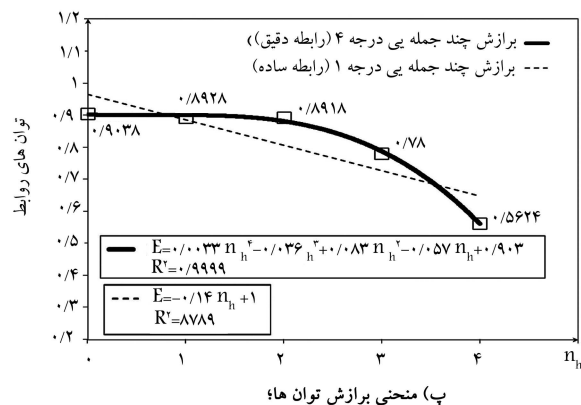
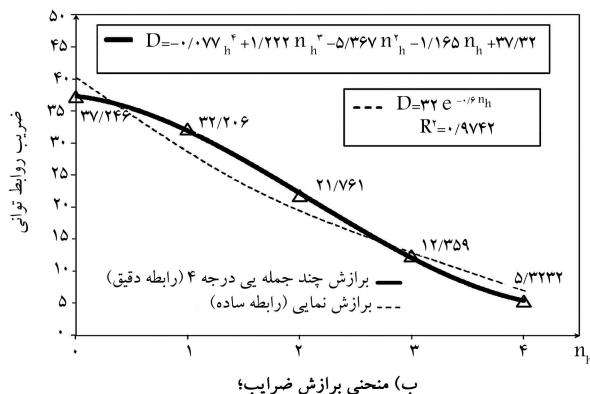
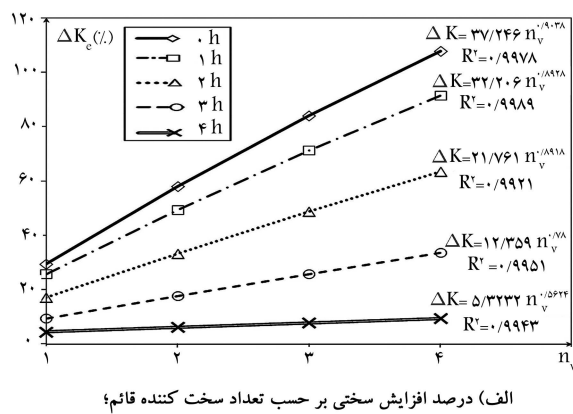
جدول ۲. سختی موثر حد کشسان مدل‌های مورد بررسی.

K_e (ton/cm)	0_v	1_v	2_v	3_v	4_v
0_h	۱۲۳/۱	۱۵۹/۳	۱۹۴/۶	۲۲۶/۵	۲۵۵/۷
1_h	۱۶۰/۴	۱۹۲/۰	۲۲۱/۰	۲۴۸/۱	۲۷۲/۹
2_h	۲۲۱/۰	۲۴۲/۰	۲۶۲/۰	۲۸۱/۰	۲۹۹/۰
3_h	۲۹۷/۵	۳۰۹/۰	۳۱۹/۱	۳۲۹/۱	۳۳۸/۸
4_h	۳۵۳/۴	۳۵۸/۹	۳۶۱/۰	۳۶۳/۰	۳۶۴/۹

درصد تغییرات مقاومت مدل‌ها نسبت به تغییرات تعداد سخت‌کننده‌ها برای دو حالت افزایش سخت‌کننده‌ی قائم (n_v)، صرف‌نظر از تعداد سخت‌کننده‌ی افقی و همچنین افزایش سخت‌کننده‌ی افقی (n_h) صرف‌نظر از تعداد سخت‌کننده‌ی قائم، در شکل ۱۳ ترسیم و بر هر یک از دسته داده‌ها، خطوطی با معادلات مختلف برازش داده شده و نهایتاً رابطه‌ی ۹ که تغییرات درصد مقاومت نسبت به تعداد سخت‌کننده‌های افقی و قائم را نشان می‌دهد، ارائه شده است.



شکل ۱۲. نحوه‌ی تشکیل میدان کششی قطری در هر یک از نمونه‌ها.



شکل ۱۳. روند افزایش مقاومت دیوار برشی فولادی برای دو حالت سخت کننده‌ی قائم و افقی.

$$\Delta V_y = ((A + B) / 145/4) \times 100, \{n_h, n_v\} \in N$$

$$\begin{cases} A = -0.08 n_h^2 + 0.43 n_h^3 + 4/96 n_h \\ B = 0.02 n_v^2 - 0.64 n_v^3 + 6/91 n_v \end{cases} \quad (9)$$

که در آن، ΔV_y درصد افزایش مقاومت برشی پانل سخت شده نسبت به پانل سخت نشده است. چنانچه جهت ساده‌سازی رابطه‌ی ۹ از برازش‌های توانی مطابق شکل ۱۳ استفاده شود، رابطه‌ی ساده‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$\Delta V_y = ((6 n_h^{0.9} + 7 n_v^{0.9}) / 145/4) \times 100 \quad (10)$$

۳.۵. تعیین رابطه‌ی نیمه‌تجربی برآورد سختی مدل‌ها

با استفاده از نتایج جدول ۲ و منحنی‌های ترسیمی شکل ۱۴، رابطه‌ی نیمه‌تجربی به منظور محاسبه‌ی درصد افزایش سختی پانل‌های سخت شده نسبت به نمونه‌ی بدون سخت کننده بر حسب تعداد سخت کننده‌ی افقی و قائم قابل دست‌یابی است. مطابق شکل مذکور، افزایش سختی برخلاف مقاومت مدل‌ها، در تمامی حالات ذکر شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ (الف الی ث) روند یکسانی ندارد. مثلاً، روند افزایش سختی در اثر افزودن سخت کننده‌های قائم در پانل‌های بدون سخت کننده‌ی افقی (۰h)، از این روند در پانل‌های با ۱ سخت کننده‌ی افقی (۱h) بیشتر و در ۱hها نیز از ۲hها بیشتر است و به همین ترتیب این روند با افزایش تعداد سخت کننده‌ی

افقی کاهش می‌یابد. لذا استفاده از میانگین تغییرات مطابق آنچه برای مقاومت نمونه‌ها براساس حالات (۱۰الف) تا (۱۰ث) ذکر شد، با خطای قابل ملاحظه‌یی همراه خواهد بود.

لذا به منظور ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی برای درصد افزایش سختی نمونه‌ها لازم است تا با استفاده از توابع چندجمله‌یی جهت ضرایب و توان رابطه‌ی توانی و عدم استفاده از میانگین ضرایب، خطای محاسبات به کمترین میزان رسانده شود و رابطه‌ی دقیق مبین درصد افزایش سختی در اثر سخت‌کننده‌های قائم برای هر تعداد خاصی از سخت‌کننده‌ی افقی جداگانه حاصل شود (شکل‌های ۱۴ب و پ). پروسه‌ی مذکور به تعبیری روند افزایش سختی سطری مقادیر جدول ۲ را در رابطه‌ی موردنظر لحاظ می‌کند. جهت اعمال روند ستونی افزایش سختی مقادیر جدول ۲، فقط کافی است ستون (۰v) را مطابق شکل (۱۴ت) بررسی شود تا رابطه‌ی موردنظر حاصل شود.

رابطه‌ی ذکر شده به دلیل آنکه اثر هم‌زمان افزایش سخت‌کننده‌های افقی و قائم را لحاظ می‌کند، با خطای کمی همراه است و به‌عنوان رابطه‌ی بیان‌کننده‌ی درصد افزایش سختی مدل‌ها بر حسب تعداد سخت‌کننده‌ها، به صورت رابطه‌ی ۱۱ قابل ارائه است:

$$\Delta K_e = ((C + D \cdot n_v^E) / 1231) \times 100, \{n_h, n_v\} \in N$$

$$\begin{cases} C = -0.1079n_h^6 + 2.322n_h^5 - 18.191n_h^4 + 60.695n_h^3 \\ \quad - 75.6n_h^2 + 68.63n_h \\ D = -0.077n_h^5 + 1.222n_h^4 - 5.367n_h^3 - 1.165n_h^2 \\ \quad + 37.32 \\ E = 0.0033n_h^4 - 0.036n_h^3 + 0.082n_h^2 - 0.057n_h \\ \quad + 0.903 \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، ΔK_e درصد افزایش سختی برشی پانل سخت شده نسبت به پانل سخت نشده است. چنانچه جهت ساده‌سازی رابطه‌ی ۱۱ از برازش‌های خطی، نمایی و

چندجمله‌یی ساده مطابق شکل ۱۴ استفاده شود، رابطه‌ی ساده مبین درصد افزایش سختی برشی پانل بر حسب تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\Delta K_e = ((-5.75 n_h^2 + 77n_h + 32e^{-0.6n_h} \times n_v^{1-0.14n_h}) / 1231) \times 100 \quad (12)$$

از دیگر نکات قابل توجه در بخش کنونی، تأثیر بیشتر سخت‌کننده‌ی افقی نسبت به سخت‌کننده‌ی قائم در افزایش سختی پانل‌های با سخت‌کننده است. به گونه‌یی که با مقایسه‌ی هر دو مدل دلخواه از پانل‌های مورد بررسی که مجموع کل سخت‌کننده‌های آن دو برابر بوده است، اما تعداد سخت‌کننده‌های افقی و قائم آنها عکس یکدیگر است، مدلی که تعداد سخت‌کننده‌ی افقی بیشتری دارد، سختی بیشتری خواهد داشت. دلیل این امر را می‌توان در نسبت s_y/s_x دانست که نهایتاً باعث شکل‌گیری یکنواخت‌تر میدان کششی بین تیرها می‌شود. موضوع ذکر شده در مورد افزایش مقاومت پانل‌ها صادق نیست و تأثیر سخت‌کننده‌های افقی و قائم در افزایش مقاومت پانل مطابق جدول ۳ تقریباً یکسان است. به عبارتی، چنانچه هدف فقط افزایش سختی پانل با فقط یک سخت‌کننده باشد، باید سخت‌کننده‌ی مذکور به صورت افقی تعبیه شود.

۶. کنترل صحت روابط ارائه شده برای افزایش مقاومت و سختی پانل‌های مورد بررسی

به منظور صحت‌سنجی روابط ارائه شده، مدل‌های دیگری با تعداد سخت‌کننده‌های افقی و قائم بیشتر در نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌سازی و سختی و مقاومت آنها با مقادیر متناظر پیش‌بینی شده براساس روابط ارائه شده مقایسه شده است. نتایج پیش‌بینی مقاومت و سختی این پانل‌ها به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه و نتایج مذکور با نتایج اجزاء محدود در شکل ۱۵ مقایسه شده است که حاکی از تطابق مناسب نتایج است. نتایج نشان می‌دهد که تعداد بیشینه‌ی ۷ سخت‌کننده به صورت افقی و قائم، بیشینه‌ی مقاومت و سختی پانل را تأمین می‌کند. این کران خاص

جدول ۳. پیش‌بینی مقاومت مدل‌ها با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی.

۷v	۶v	۵v	۴v	۳v	۲v	۱v	۰v	$V_y (ton)$
۱۶۹٫۲۷	۱۶۸٫۴۵	۱۶۶٫۴۵	۱۶۴٫۰۸	۱۶۰٫۹۱	۱۵۶٫۸۲	۱۵۱٫۶۹	۱۴۵٫۴	۰h
۱۷۴٫۵۸	۱۷۳٫۴۵	۱۷۱٫۷۶	۱۶۹٫۳۹	۱۶۶٫۲۲	۱۶۲٫۱۳	۱۵۷٫۰	۱۵۰٫۷۱	۱h
۱۸۰٫۲۷	۱۷۹٫۱۴	۱۷۷٫۴۵	۱۷۵٫۰۸	۱۷۱٫۹۱	۱۶۷٫۸۲	۱۶۲٫۶۹	۱۵۶٫۴	۲h
۱۸۵٫۸۶	۱۸۴٫۰۴	۱۸۳٫۰۴	۱۸۰٫۶۷	۱۷۷٫۵	۱۷۳٫۴۱	۱۶۸٫۲۸	۱۶۱٫۹۹	۳h
۱۹۰٫۸۷	۱۸۹٫۷۴	۱۸۸٫۰۵	۱۸۵٫۶۸	۱۸۲٫۵۱	۱۷۸٫۴۲	۱۷۳٫۲۹	۱۶۷٫۰	۴h
۱۹۴٫۸۲	۱۹۳٫۶۹	۱۹۲٫۰	۱۸۹٫۶۳	۱۸۶٫۴۶	۱۸۲٫۳۷	۱۷۷٫۲۴	۱۷۰٫۹۵	۵h
۱۹۷٫۲۳	۱۹۶٫۱	۱۹۴٫۴۱	۱۹۲٫۰۴	۱۸۸٫۸۷	۱۸۴٫۷۸	۱۷۹٫۶۵	۱۷۳٫۳۶	۶h
۱۹۷٫۶۲	۱۹۶٫۴۹	۱۹۴٫۸	۱۹۲٫۴۳	۱۸۹٫۲۶	۱۸۵٫۱۷	۱۸۰٫۰۴	۱۷۳٫۷۵	۷h

کنترل مقادیر حاصل از رابطه‌ی ۹ با مقادیر موجود از نتایج مدل‌سازی،

محدوده‌ی پیش‌بینی براساس رابطه‌ی ۹،

مدل‌سازی مجدد در محدوده‌ی پیش‌بینی جهت کنترل صحت رابطه‌ی ۹.

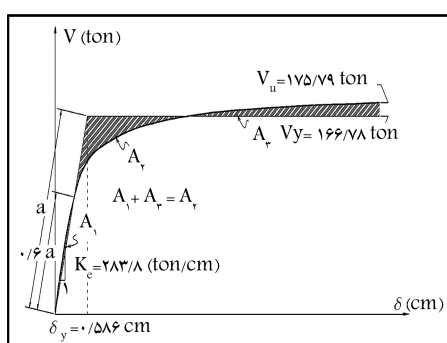
جدول ۴. پیش بینی سختی مدل‌ها با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی.

V_v	V_v	V_v	V_v	V_v	V_v	V_v	V_v	$K(ton/cm)$
۳۳۹/۴۰	۳۱۱/۳۰	۲۸۲/۷۳	۲۵۳/۶۰	۲۲۳/۷۴	۱۹۲/۸۹	۱۶۰/۴۲	۱۲۳/۱	$0^{\circ}h$
۳۴۳/۵۳	۳۱۹/۹۶	۲۹۵/۹۷	۲۷۱/۴۸	۲۴۶/۳۳	۲۲۰/۲۸	۱۹۲/۷۸	۱۶۰/۸۵	$1^{\circ}h$
۳۴۳/۵۵	۳۲۷/۷۶	۳۱۱/۶۷	۲۹۵/۲۰	۲۷۸/۲۵	۲۶۰/۶۴	۲۴۱/۹۳	۲۱۹/۸۶	$2^{\circ}h$
۳۵۴/۸۷	۳۴۸/۳۶	۳۴۲/۱۷	۳۳۵/۳۹	۳۲۸/۲۲	۳۲۰/۴۷	۳۱۱/۷۵	۲۹۹/۴۷	$3^{\circ}h$
۳۶۶/۶۰	۳۶۵/۳۷	۳۶۴/۰۵	۳۶۲/۶۰	۳۶۰/۹۸	۳۵۹/۰۸	۳۵۶/۶۶	۳۵۱/۳۷	$4^{\circ}h$
۳۶۷/۲۶	۳۶۷/۱۴	۳۶۷/۰۰	۳۶۶/۸۳	۳۶۶/۶۴	۳۶۶/۳۸	۳۶۶/۰۱	۳۶۴/۰۶	$5^{\circ}h$
۳۷۰/۹۶	۳۷۰/۹۵	۳۷۰/۹۴	۳۷۰/۹۲	۳۷۰/۹۰	۳۷۰/۸۸	۳۷۰/۸۳	۳۶۹/۵۵	$6^{\circ}h$
۳۷۳/۰۳	۳۷۳/۰۲	۳۷۳/۰۰	۳۷۲/۹۸	۳۷۲/۹۶	۳۷۲/۹۳	۳۷۲/۸۸	۳۷۲/۴۳	$7^{\circ}h$

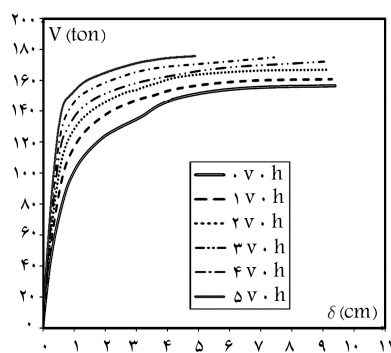
کنترل مقادیر حاصل از رابطه‌ی ۱۱ با مقادیر موجود از نتایج مدل سازی،

محدوده‌ی پیش‌بینی براساس رابطه‌ی ۱۱،

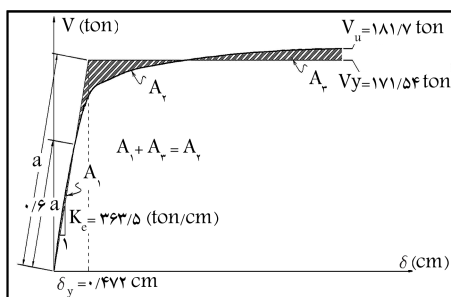
مدل سازی مجدد در محدوده‌ی پیش‌بینی جهت کنترل صحت رابطه‌ی ۱۱.



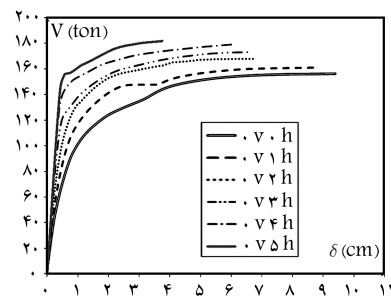
ب) مقاومت و سختی مدل ۰ V H



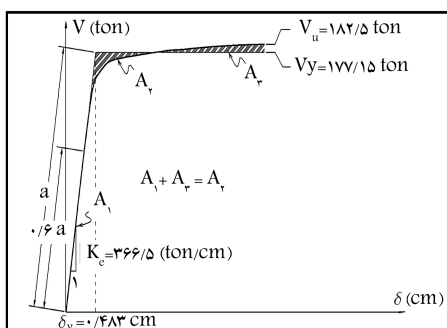
الف) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل ۰ V H



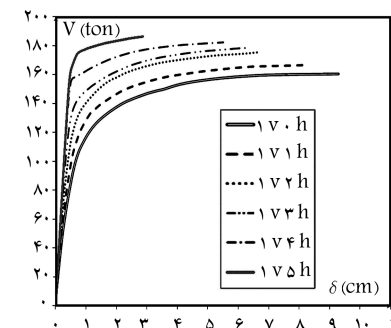
ت) مقاومت و سختی مدل ۱ V H



ب) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل ۱ V H



ج) مقاومت و سختی مدل ۱ V 5 H



ث) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل ۱ V 5 H

شکل ۱۵. نتایج آنالیز مدل‌های جدید ($0^{\circ}h$)، ($1^{\circ}h$) و ($5^{\circ}h$) جهت کنترل صحت روابط ۹ و ۱۱.

دقیقاً مرزی است که پس از آن میدان کشش قطری به نحوی مطلوب در تمامی زیرصفحات تشکیل نخواهد شد.

۷. نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که دیوار برشی فولادی بدون تقویت، شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد و در اثر پروسه‌ی افزودن سخت‌کننده‌ها با محدود کردن تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌های مختلف و افزایش سختی سازه، ظرفیت دیوار در تحمل بار جانبی افزایش می‌یابد. کران فوقانی خاصی به لحاظ تعداد سخت‌کننده‌های افقی و قائم با توجه به روند افزایش مقاومت و سختی پانل در اثر افزودن سخت‌کننده وجود خواهد داشت که اضافه کردن سخت‌کننده بیش از این مقدار، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در افزایش سختی و مقاومت پانل ندارد و فقط سبب سنگین‌تر شدن وزن پانل و افزایش مشکلات اجرایی خواهد شد. بررسی‌ها، عدد ۷ را برای سخت‌کننده‌های افقی و عمودی به عنوان محدوده‌ی معتبر برای استفاده از روابط پیشنهادی درصد افزایش مقاومت و سختی معرفی می‌کند.

نتایج نشان داده است که سخت‌کننده‌ی افقی نسبت به سخت‌کننده‌ی قائم تأثیر بیشتری در افزایش سختی پانل دارد. لیکن تأثیر افزودن هر کدام از دو سخت‌کننده‌ی افقی و قائم در افزایش مقاومت تقریباً یکسان است. به عبارت دیگر، چنانچه هدف، افزایش سختی پانل با یک سخت‌کننده باشد، باید سخت‌کننده‌ی مذکور به صورت افقی تعبیه شود.

نتایج همچنین نشان داده است که دست‌یابی به روابط ساده برای محاسبه‌ی سختی و مقاومت یک پانل تقویت شده از روی پانل تقویت نشده‌ی مشابه امکان‌پذیر است. مقایسه‌ی میزان خطای موجود در اثر استفاده از روابط ساده شده‌ی درصد افزایش مقاومت و سختی پانل (روابط ۱۰ و ۱۲) به جای روابط دقیق مرتبط (روابط ۹ و ۱۱) نشان داده است که استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی درصد افزایش مقاومت (رابطه‌ی ۱۰) بسیار مفید است و در تمامی مدل‌ها، خطای ثبت شده ناچیز و قابل اغماض است، اما استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی درصد افزایش سختی (رابطه‌ی ۱۲)، به دلیل حساسیت رفتار پانل در مورد سختی با خطای بیشتری علی‌الخصوص در مدل‌های (۰ v ۱h) و (۰ v ۲h) که به ترتیب ۱۷ و ۱۳ درصد خطا دارد، همراه است؛ لیکن سایر مدل‌ها خطایی کمتر از ۳٪ دارند و لذا استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی درصد افزایش سختی نیز توصیه می‌شود.

منابع (References)

- 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).
- Alinia, M.M. and Dastfan, M. "Cyclic behavior, deformability and rigidity of stiffened steel panels", *J. Constr. Steel Res.*, **63**(4), pp. 554-563 (2007).
- Alinia, M.M. and Dastfan, M. "Effect of surrounding members on shear buckling of panels", *Int. J. Thin Walled Structures, Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, **43**(3), pp. 461-475 (2005).
- Alinia, M.M. and Dastfan, M. "The effects of surrounding members on post-buckling behaviour of thin steel plate shear walls", In: Shen, Z.Y. et al., editors, *Advances in Steel Structures*, **2**, pp. 1427-1432 (2005).
- Takahashi, Y., Takemoto, T. and Tagaki, M. "Experimental study on thin steel shear walls and particular bracings under alternative horizontal load", *IABSE Symposium: Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, Lisbon, Portugal, pp. 185-191 (1973).
- Sabouri-Ghomi, S., Kharrazi, M.H.K., Mam-Azizi, S. and Asad Sajadi, R. "Buckling behavior improvement of steel plate shear wall systems", *Journal of the Structural Design of Tall and Special Buildings*, **17**(4), pp. 823-837 (2008).
- Sabouri-Ghomi, S. and Sajadi, R. "Numerical method for determining the size of stiffeners in stiffened steel plate shear walls for preventing global buckling", 6th National Congress of Civil Engineering, University of semnan, Iran (May 2011).
- Sabouri, S. Ahouri, E. and Mamazizi, S. "Study of unstiffened central panel between two openings in steel plate shear walls with stiffeners", *Journal of Civil Engineering (School of Engineering)*, **24**(1), pp. 15-34 (2013).
- Massumi A., Shekari M. and Ahmadi M. "Evaluation of seismic strengthening of steel braced frames using steel shear walls", *The Modares Journal of Civil Engineering*, **13**(5), pp. 65-78 (In Persian) (2014).
- Nikkhoo, A. and Chaman Ara, M.M. "Effect of FRP reinforcement in the steel shear wall with opening via numerical methods", *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, **62**, pp. 45-59 (In Persian) (2014).
- Sabouri, S. and Sajadi, R.A. "Experimental investigation of force modification factor and energy absorption of ductile steel plate shear walls with stiffeners and without stiffener", *Journal of Structures and Steel*, **4**(3), pp. 13-25 (2008).
- American Institute of Steel Construction (AISC), "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago (IL, USA): AISC (2010).
- Azhari, M. and Mirghaderi, R., *Design of Steel Structures*, Volume IV, 3ed Edition, Tehran, Arkan e Danesh (2011).
- Iranian National Building Code, Part 10th, *Design and Construction of Steel Buildings* (2009).