

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

مجید فلهکی* (دانشیار)

محمد جلیل‌زاده افشاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳-۲)
دوره ۲-۳۳، شماره ۴/۲، 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.

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

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

۱. تاریخچه‌ی پژوهش

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 مذکور 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 کمانش برشی و فراکمانشی پانل بررسی شده است که حاصل آن تأثیر مستقیم سختی پیچشی اعضاء مرزی در افزایش بار کمانشی و عدم تأثیر آن در مقاومت فراکمانشی بوده است.^[۱-۴]

مطالعاتی (۲۰۰۷) نیز جهت بهبود پایداری و جلوگیری از کمانش ارتجاعی زود هنگام دیوار با استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم انجام و نشان داده شده است.^[۱-۴]

مطالعات دیگری (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی مقاوم‌سازی 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 مقاوم‌سازی و بهسازی قاب‌های فولادی موجود است.^[۵]

با روش اجزاء محدود در بررسی اثر مقاوم‌سازی 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 مذکور 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 کمانش برشی و فراکمانشی پانل بررسی شده است که حاصل آن تأثیر مستقیم سختی پیچشی اعضاء مرزی در افزایش بار کمانشی و عدم تأثیر آن در مقاومت فراکمانشی بوده است.^[۱-۴]

مطالعاتی (۲۰۰۷) نیز جهت بهبود پایداری و جلوگیری از کمانش ارتجاعی زود هنگام دیوار با استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم انجام و نشان داده شده است.^[۱-۴]

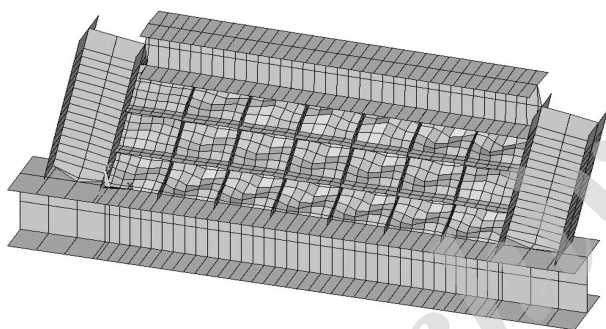
* نویسنده مسئول

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

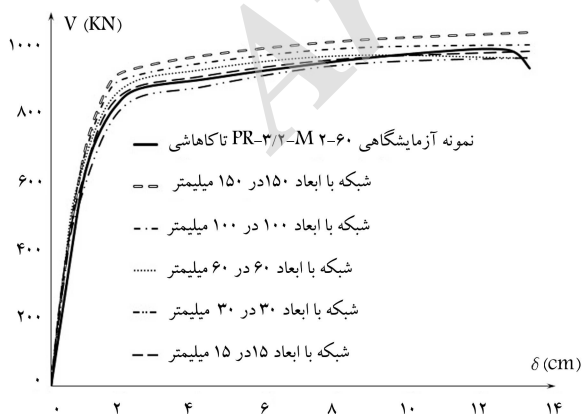
مفصلی و با مثلثی کردن جان تیر و اتصال آن به بال ستون مدل سازی انجام و نیز از روش مذکور برای مدل سازی اتصال مفصلی پای ستون به تیر عمیق کف استفاده شد (شکل ۲). همچنین از المان Shell ۴ گره‌بندی (۱۸۱ Node ۴) در نرم افزار ANSYS برای مدل سازی ورق و قاب پیرامونی و نیز برای تیر و ستون های محیطی از پروفیل IPB۳۰۰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

به منظور انجام آنالیز حساسیت مش بندی (شبکه بندی)، ابعاد مش مختلف مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد و مدل تحت بار جانبی یک جهته قرار گرفت. شکل ۳، مقایسه‌ی نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که حاکی از تطابق مناسب نحوه‌ی مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان می‌دهد چنانچه ابعاد مش بندی 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 ۱۵ × ۱۵ سانتی متر که تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، انتخاب و برای حصول اطمینان از صحت مدل سازی در روند اعتبارسنجی، نمونه‌ی دوم آزمایشگاهی مدل سازی شد.

مدل آزمایشگاهی صبوری و سجادی^[۱۱] که مشخصات آن در شکل ۴ ارائه شده است، به عنوان دومین نمونه‌ی آزمایشگاهی به منظور اعتبارسنجی مدل سازی انتخاب و بررسی شد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی مذکور (شکل ۵)، صحت مدل سازی با ابعاد مش ۱۵ × ۱۵ سانتی متر را تأیید کرد و بر این اساس در ادامه‌ی روند مدل سازی‌ها، از ابعاد شبکه بندی مذکور استفاده شده است.



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



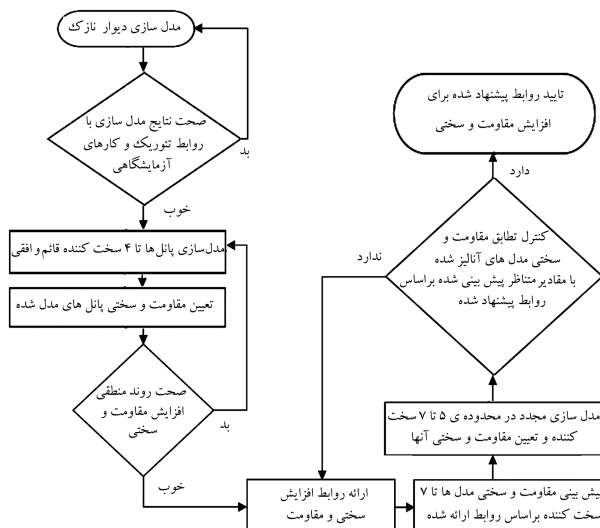
شکل ۳. منحنی نیرو-تغییر مکان مدل اجزاء محدود با ابعاد مختلف مش و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

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

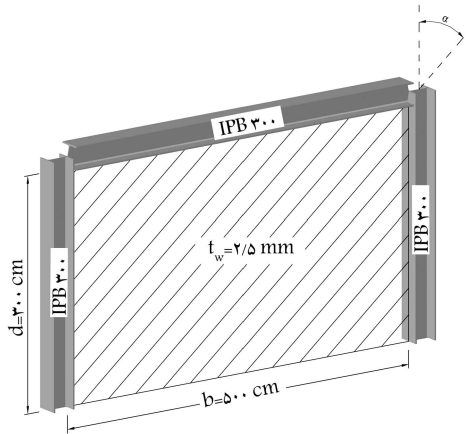
بر این اساس پس از اعتبارسنجی، روند سخت کردن دیوار برشی نازک تا ۴ سخت کننده‌ی افقی و قائم انجام شده است. براساس نتایج به دست آمده از آنالیز مدل‌ها، روابطی برای تخمین مقاومت و سختی مدل‌ها استخراج و براساس آن‌ها، مقاومت و سختی پانل‌های تقویت شده با تعداد سخت کننده‌ی بیشتر پیش‌بینی شده است. با انجام مدل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

۲. حساسیت شبکه بندی و اعتبارسنجی مدل سازی

مدل آزمایشگاهی با سخت کننده‌ی 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 مدل سازی و اعتبارسنجی انتخاب شده است. مدل آزمایشگاهی مذکور با قاب پیرامونی مفصلی، ۶ سخت کننده‌ی عمودی و ۲ سخت کننده‌ی 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



شکل ۱. فلوجارتی مدل سازی.



شکل ۶. ابعاد و مشخصات پانل برشی فولادی.

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

$$I_C \geq 0.100 \cdot 300 \cdot \frac{t_w \cdot d^3}{b} \quad (1)$$

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

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

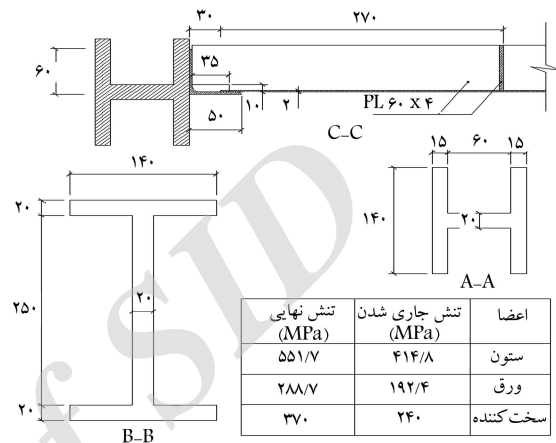
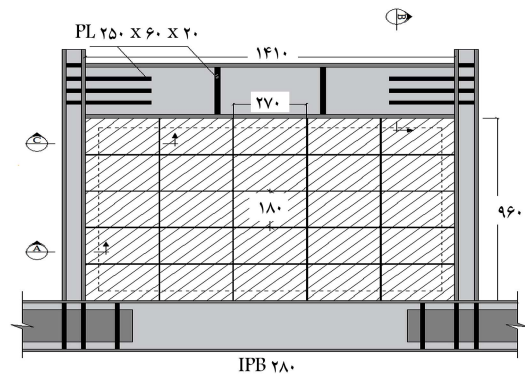
که در آن‌ها، I_C ممان اینرسی ستون، t_w ضخامت ورق، d ارتفاع ورق، b عرض ورق، M_{pb} لنگر خمیری تیر، σ_{ty} تنش تسلیم کششی، α زاویه‌ی میدان کشش قطری با خط قائم، A_c سطح مقطع ستون و A_b سطح مقطع تیر است. بر این اساس مطابق شکل ۶، برای دیوار با ابعاد مذکور، تیرها و ستون‌ها از نوع IPB300 طراحی و مدل‌سازی شد.

فولاد مورد استفاده در تمامی اعضا از نوع ST37 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.

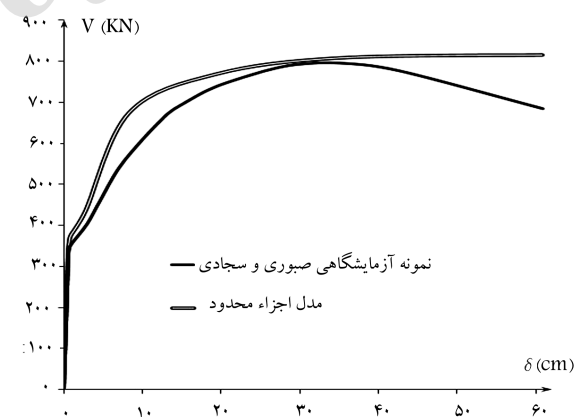
مطابق روابط تئوری موجود^[۱۳] ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

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

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 سجدی.^[۱۱]



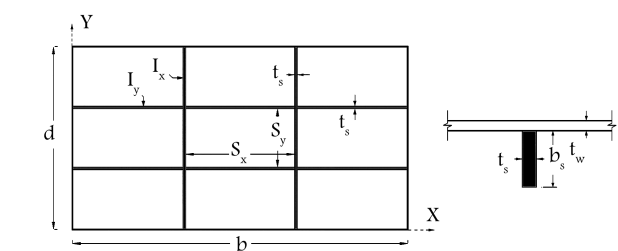
شکل ۵. منحنی نیرو- تغییرمکان مدل اجزاء محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی صبوری و سجدی.

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-AISC340^[۱۲] درخصوص طرح

۴. معرفی آرایش و ابعاد سخت‌کننده‌ها

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 گونه‌ی باشد که از کماتش کلی ورق جلوگیری و مطابق شکل ۸، مود کماتش کلی به مود کماتش موضعی در زیرصفحه‌ها تبدیل شود. به عبارت دیگر، در صورت انتخاب ضخامت و ابعاد نامناسب برای سخت‌کننده، وقوع کماتش کلی ورق به همراه سخت‌کننده‌ها امری قطعی است و از ظرفیت ورق فولادی به صورت کامل استفاده نخواهد شد. برای تحقق تبدیل کماتش کلی ورق به مود کماتش موضعی در هر زیرصفحه، باید رابطه‌ی ارائه شده توسط تیموشنکو برای ورق ارتوتروپیک مطابق رابطه‌ی ۵ ارضا شود:



شکل ۹. مشخصات هندسی پانل و سخت‌کننده‌ها.

$$\left(\frac{I_x}{S_x} + \frac{t_w^2}{12(1-\nu^2)}\right)^{0.75} \left(\frac{I_y}{S_y} + \frac{t_w^2}{12(1-\nu^2)}\right)^{0.25} \geq \frac{t_w^2}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{d}{S_x}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_L}{k_G}\right) \quad (5)$$

که در آن، k_G ضریب کماتش کلی ورق است که با توجه به اتصال ساده‌ی ورق به اعضاء محیطی برابر با ۳٫۶۴ محاسبه شده است و k_L ضریب کماتش موضعی ورق است که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} k_L = 5.35 + \frac{t_w^2}{(S_y/S_x)^2} \cdot \frac{S_y}{S_x} \geq 1 \\ k_L = 4 + \frac{5.35}{(S_y/S_x)^2} \cdot \frac{S_y}{S_x} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

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 موردنیاز (I_s) برای سخت‌کننده‌های افقی و قائم مدل‌های مورد بررسی، محاسبه شده و بیشترین آن مربوط به مدل (۰۷۴h) و برابر 517.8 cm^4 به دست آمده است. لذا با انتخاب سخت‌کننده‌ها با عرض 10° سانتی‌متر ($b_s = 10 \text{ cm}$) و ضخامت 1 سانتی‌متر ($t_s = 1 \text{ cm}$)، ممان اینرسی حاصل شده متناظر با ابعاد انتخابی ذکر شده، مطابق رابطه‌ی ۷ برابر 837.33 cm^4 است که از بیشترین مقدار موردنیاز مدل‌های مورد بررسی مربوط به مدل (۰۷۴h) نیز بیشتر است و به این ترتیب ممان اینرسی موردنیاز برای سخت‌کننده‌های کلیه‌ی مدل‌ها، جهت وقوع کماتش موضعی زیرصفحات تأمین می‌شود:

$$I_s = \frac{1}{12} t_s \cdot (b_s)^3 \quad (7)$$

همچنین نسبت عرض به ضخامت سخت‌کننده‌های انتخابی جهت کنترل معیار لاغری سخت‌کننده برابر با 10° است که از بیشینه‌ی مقدار مجاز آن (۱۶٫۲۳) مطابق رابطه‌ی ۸، کمتر بوده و لذا ابعاد انتخابی سخت‌کننده مناسب است.^[۱۴]

$$\frac{b_s}{t_s} < \frac{795}{\sqrt{f_y}} \quad (8)$$

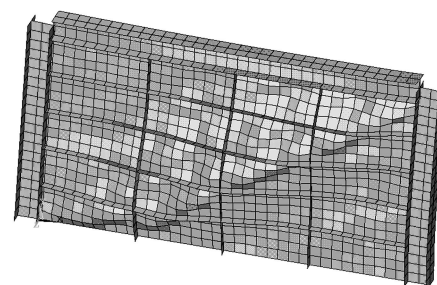
که در آن، f_y تنش تسلیم مصالح سخت‌کننده است.

۵. بررسی و تحلیل نتایج

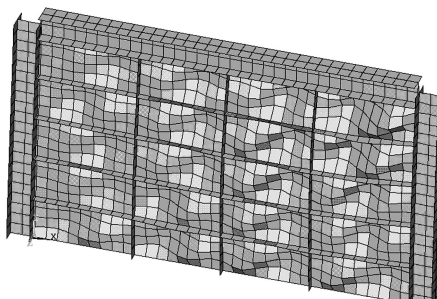
۱.۵. تحلیل منحنی‌های نیرو - تغییر مکان حاصل از آنالیز مدل‌ها در اثر فرایند افزودن سخت‌کننده به دیوار برشی انتظار می‌رود که مقاومت نهایی (V_u)، مقاومت حد کشسان (V_y) و نیز سختی پانل (K_e) افزایش و تغییر مکان

	b=50.0 cm	b _r	b _r	b _r b _r b _r	b _r b _r b _r b _r	b _r b _r b _r b _r b _r
d=30.0 cm	0. v. h	1 v. h	2 v. h	3 v. h	4 v. h	bababababa
d _r	0. v ₁ h	1 v ₁ h	2 v ₁ h	3 v ₁ h	4 v ₁ h	
d _r d _r	0. v ₂ h	1 v ₂ h	2 v ₂ h	3 v ₂ h	4 v ₂ h	
d _r d _r d _r	0. v ₃ h	1 v ₃ h	2 v ₃ h	3 v ₃ h	4 v ₃ h	
d _r d _r d _r d _r	0. v ₄ h	1 v ₄ h	2 v ₄ h	3 v ₄ h	4 v ₄ h	

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

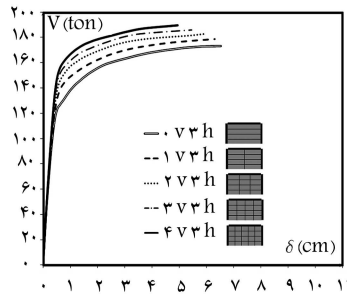


(الف) مود کماتشی نامطلوب کلی ورق با جرای سخت‌کننده نامناسب؛

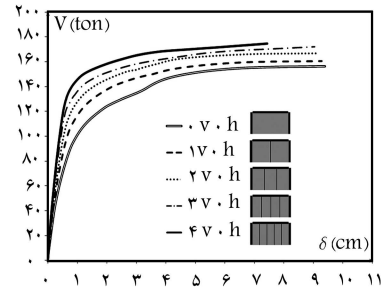


(ب) مود کماتشی مطلوب موضعی زیرصفحات با جرای سخت‌کننده مناسب.

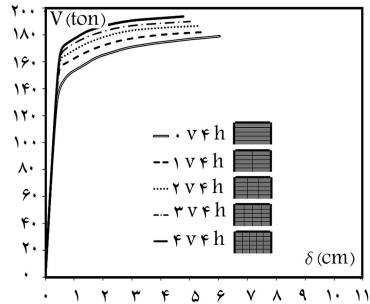
شکل ۸. تأثیر ابعاد و مشخصات هندسی سخت‌کننده در مود کماتش پانل برشی.



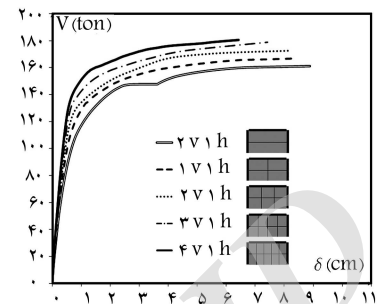
ت) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۳ h



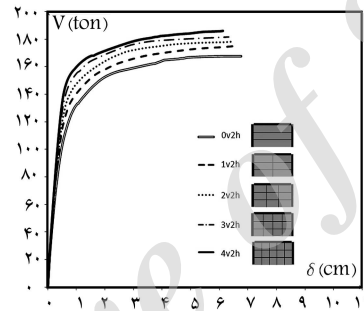
الف) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۰ h



ث) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۴ h



ب) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۱ h



پ) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۲ h

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

مقاومت و سختی مؤثر حد کشسان کلیه ی مدل ها، با استفاده از مدل رفتار دو خطی ایده آل محاسبه و نتایج به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲.۵. تعیین رابطه ی نیمه تجربی برآورد مقاومت مدل ها

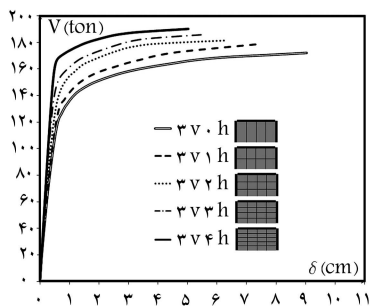
با توجه به نتایج جدول ۱، می توان رابطه ی نیمه تجربی بین درصد افزایش مقاومت مدل های با سخت کننده نسبت به مدل بدون سخت کننده و تعداد سخت کننده های افقی (n_h) و قائم (n_v) اضافه شده به پانل برشی تعیین کرد. بر این اساس، میانگین

جدول ۱. مقاومت حد کشسان مدل های مورد بررسی.

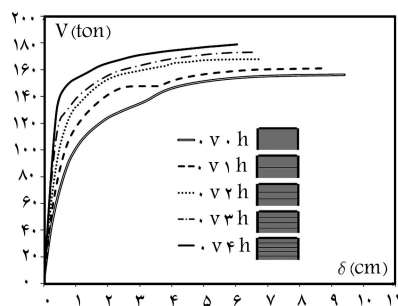
	۴v	۳v	۲v	۱v	۰v	V_y (ton)
۰h	۱۶۵٫۰	۱۶۱٫۵	۱۵۸٫۲	۱۵۱٫۶	۱۴۵٫۴	۰h
۱h	۱۷۰٫۰	۱۶۶٫۴	۱۶۲٫۴	۱۵۷٫۰	۱۵۰٫۹	۱h
۲h	۱۷۶٫۴	۱۷۳٫۲	۱۶۹٫۴	۱۶۴٫۱	۱۵۸٫۳	۲h
۳h	۱۷۹٫۸	۱۷۶٫۴	۱۷۲٫۹	۱۶۷٫۵	۱۶۱٫۳	۳h
۴h	۱۸۶٫۹	۱۸۳٫۵	۱۷۹٫۹	۱۷۴٫۶	۱۶۸٫۶	۴h

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

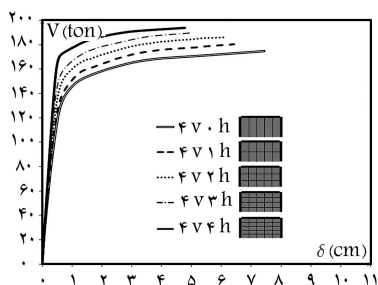
مجدداً با افزایش تعداد سخت کننده ی افقی از صفر تا ۴ عدد، برای تعداد سخت کننده ی قائم ثابت و مشخص از صفر تا ۴ عدد، نمودار نیرو - تغییر مکان نمونه ها مطابق شکل های (۱۱ الف) الی (۱۱ ث) به دست آمده است. همان طور که در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود، با افزایش تعداد سخت کننده ها، سختی و مقاومت نمونه ها افزایش و تغییر مکان برشی حد نهایی سازه کاهش یافته است. شکل ۱۲، نحوه ی تشکیل میدان کشش قطری در هر یک از مدل ها را نشان می دهد که مطابق آن با انتخاب میزان سخت کننده ی مناسب، از مود کمانش کلی جلوگیری و کمانش در هر یک از زیرصفحه ها تشکیل شده است.



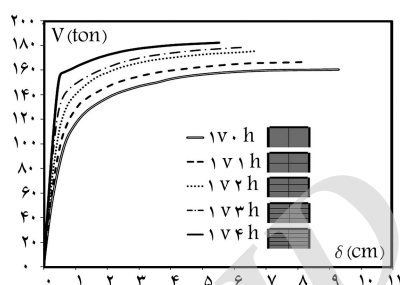
ت) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۳۷؛



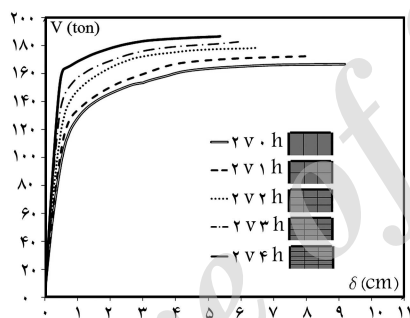
الف) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۷؛



ث) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۴۷؛



ب) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۱۷؛



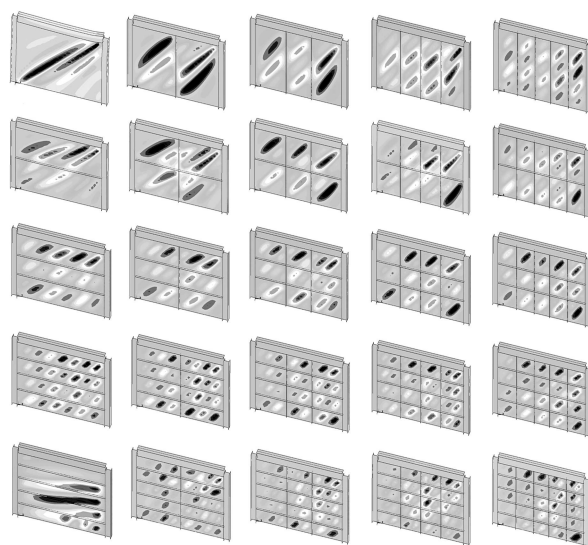
پ) منحنی نیرو تغییر مکان مدل های ۲۷؛

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

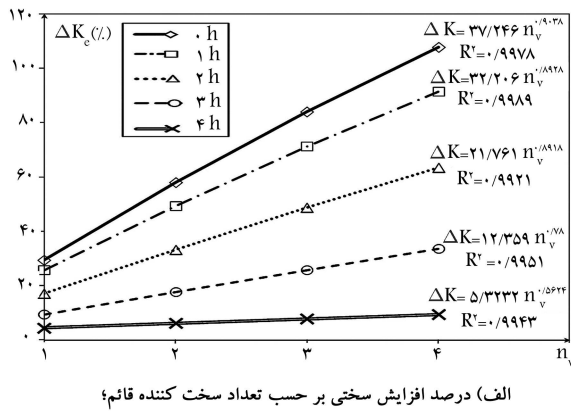
جدول ۲. سختی موثر حد کشسان مدل‌های مورد بررسی.

$4v$	$3v$	$2v$	$1v$	$0v$	K_e (ton/cm)
۲۵۵٫۷	۲۲۶٫۵	۱۹۴٫۶	۱۵۹٫۳	۱۲۳٫۱	۰h
۲۷۲٫۹	۲۴۸٫۱	۲۲۱٫۰	۱۹۲٫۰	۱۶۰٫۴	۱h
۲۹۹٫۰	۲۸۱٫۰	۲۶۲٫۰	۲۴۲٫۰	۲۲۱٫۰	۲h
۳۳۸٫۸	۳۲۹٫۱	۳۱۹٫۱	۳۰۹٫۰	۲۹۷٫۵	۳h
۳۶۴٫۹	۳۶۳٫۰	۳۶۱٫۰	۳۵۸٫۹	۳۵۳٫۴	۴h

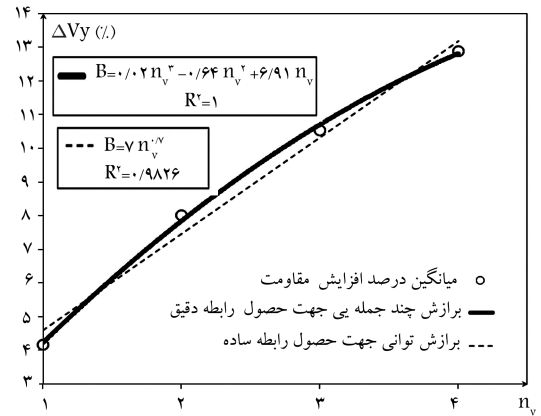
درصد تغییرات مقاومت مدل‌ها نسبت به تغییرات تعداد سخت‌کننده‌ها برای دو حالت افزایش سخت‌کننده‌ی قائم (n_v)، صرف‌نظر از تعداد سخت‌کننده‌ی افقی و همچنین افزایش سخت‌کننده‌ی افقی (n_h) صرف‌نظر از تعداد سخت‌کننده‌ی قائم، در شکل ۱۳ ترسیم و بر هر یک از دسته داده‌ها، خطوطی با معادلات مختلف برازش داده شده و نهایتاً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



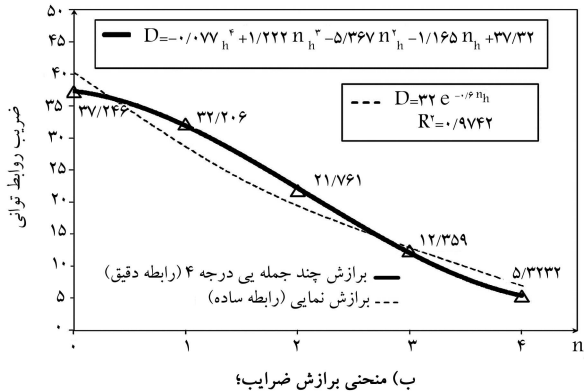
شکل ۱۲. نحوه‌ی تشکیل میدان کششی قطری در هر یک از نمونه‌ها.



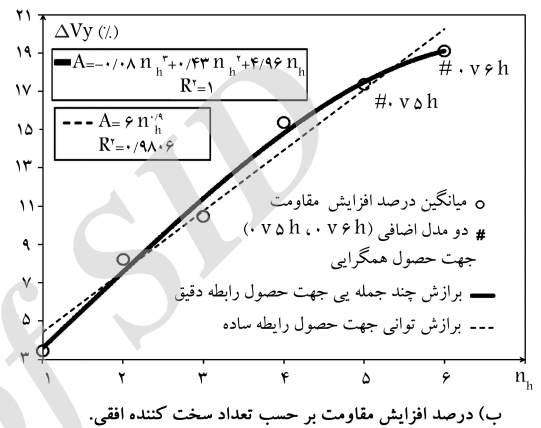
الف) درصد افزایش سختی بر حسب تعداد سخت کننده قائم؛



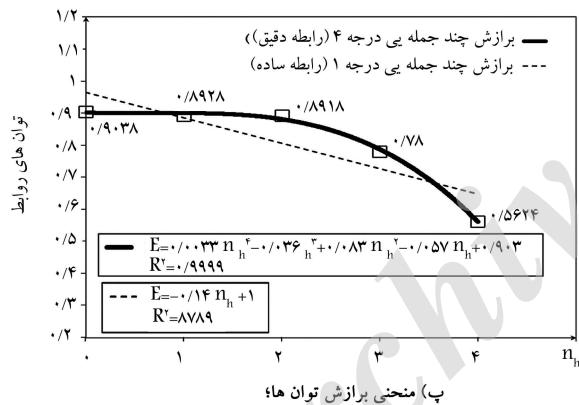
الف) درصد افزایش سختی بر حسب تعداد سخت کننده قائم؛



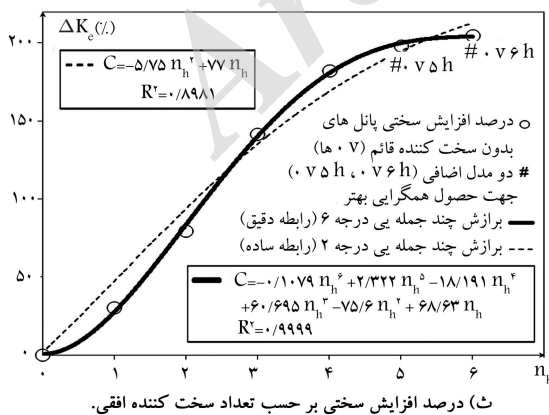
ب) منحنی برازش ضرایب؛



ب) درصد افزایش مقاومت بر حسب تعداد سخت کننده افقی.



پ) منحنی برازش توان ها؛



ث) درصد افزایش سختی بر حسب تعداد سخت کننده افقی.

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

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

$$\begin{cases} A = -0.08n_h^2 + 0.43n_h + 4.96n_h \\ B = 0.02n_v^2 - 0.64n_v + 6.91n_v \end{cases} \quad (9)$$

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:

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

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 برحسب 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 (h°h)، 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

شکل ۱۴. روند افزایش سختی برای حالت‌های مختلف افزایش تعداد سخت کننده‌ی دیوار برشی فولادی.

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

$$\Delta K_e = ((-0.75 n_h^2 + 77 n_h + 32 e^{-0.6 n_h} \times n_v^{1-0.14 n_h}) / 123.1) \times 100 \quad (12)$$

از دیگر نکات قابل توجه در بخش کنونی، تأثیر بیشتر سخت‌کننده‌ی افقی نسبت به سخت‌کننده‌ی قائم در افزایش سختی پانل‌های با سخت‌کننده است. به گونه‌ی 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

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

لذا به منظور ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی برای درصد افزایش سختی نمونه‌ها لازم است تا با استفاده از توابع چندجمله‌بی 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 ۱۴ ب 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 (۷) را مطابق شکل (۱۴ ت) 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 به عنوان رابطه‌ی بیان‌کننده‌ی درصد افزایش سختی مدل‌ها بر حسب تعداد سخت‌کننده‌ها، به صورت رابطه‌ی ۱۱ قابل ارائه است:

$$\Delta K_e = ((C + D.n_v^E) / 123.1) \times 100, \{n_h, n_v\} \in N \quad (11)$$

$$\begin{cases} C = -0.1079 n_h^6 + 2.322 n_h^5 - 18.191 n_h^4 + 60.695 n_h^3 \\ \quad - 75.6 n_h^2 + 68.63 n_h \\ D = -0.77 n_h^2 + 1.222 n_h - 0.367 n_h - 1.165 n_h \\ \quad + 37.32 \\ E = 0.0033 n_h^2 - 0.36 n_h + 0.82 n_h - 0.57 n_h \\ \quad + 0.903 \end{cases}$$

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

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.

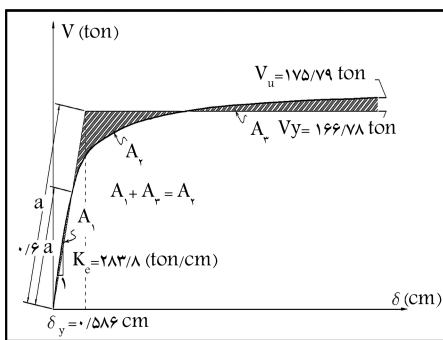
جدول ۴. پیش بینی سختی مدل‌ها با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی.

γ_v	ϵ_v	δ_v	ζ_v	η_v	θ_v	ι_v	κ_v	$K(\text{ton/cm})$
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	$7^{\circ}h$

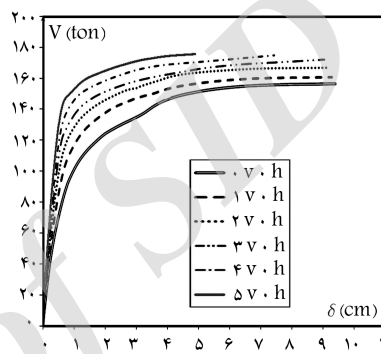
کنترل مقادیر حاصل از رابطه‌ی ۱۱ با مقادیر موجود از نتایج مدل‌سازی،

محدوده‌ی پیش‌بینی براساس رابطه‌ی ۱۱،

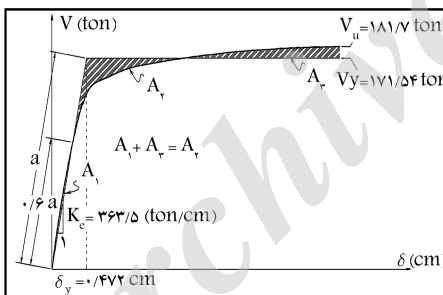
مدل‌سازی مجدد در محدوده‌ی پیش‌بینی جهت کنترل صحت رابطه‌ی ۱۱.



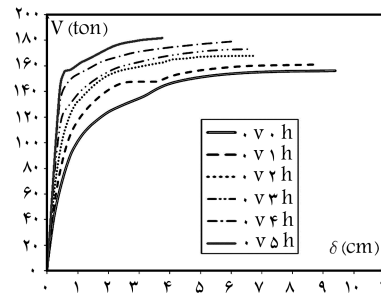
ب) مقاومت و سختی مدل $5^{\circ}V \cdot H$



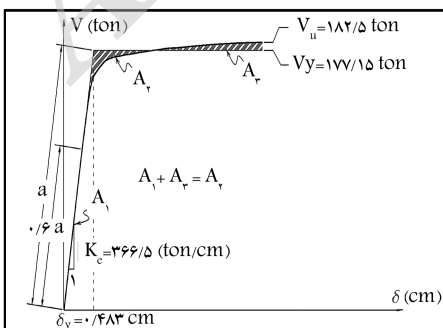
الف) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل $5^{\circ}V \cdot H$



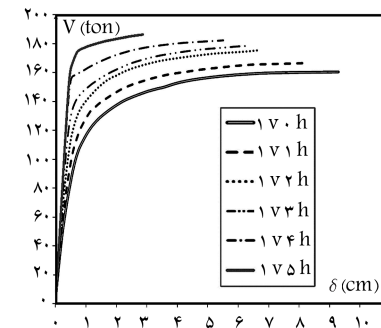
ت) مقاومت و سختی مدل $4^{\circ}V \cdot H$



ب) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل $4^{\circ}V \cdot H$



ج) مقاومت و سختی مدل $1^{\circ}V \cdot H$



ث) قرارگیری مناسب منحنی نیرو تغییر مکان مدل $1^{\circ}V \cdot H$

شکل ۱۵. نتایج آنالیز مدل‌های جدید ($5^{\circ}v \cdot h$), ($1^{\circ}v \cdot h$) و 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.

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 1° و 12°) به جای روابط دقیق مرتبط (روابط 9° و 11°) نشان داده است که استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی درصد افزایش مقاومت (رابطه‌ی 1°) 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 12°)، به دلیل حساسیت رفتار پانل در مورد سختی با خطای بیشتری علی‌الخصوص در مدل‌های ($0.71h$) و ($0.72h$) که به ترتیب 17 و 13 درصد خطا دارد، همراه است؛ لیکن سایر مدل‌ها خطایی کمتر از 3% دارند و لذا استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی درصد افزایش سختی نیز توصیه می‌شود.

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 7 را برای سخت‌کننده‌های افقی و عمودی به عنوان محدوده‌ی معتبر برای استفاده از روابط پیشنهادی درصد افزایش مقاومت و سختی معرفی می‌کند.

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 shear 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 Eivil 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).