



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۹ تا ۲۸  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 19- 28



نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)

Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## بررسی عملکرد پانل میانی تقویت شده بین دو بازشو در دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده سعید صبوری<sup>۱\*</sup>، الناز آهوری<sup>۲</sup>

۱- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت ۱۳۹۰/۳/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۸)

### چکیده

در دیوارهای برشی فولادی دارای دو بازشو، پانل بین بازشوها از نظر عملکرد با یک تیر شبیه سازی می شود که بسته به نسبت ابعاد، رفتاری به صورت برشی یا خمشی صرف و یا به صورت برشی و خمشی توأم خواهد داشت. با فرض در نظر گرفتن سخت کننده های دوگانه در طرفین پانل میانی؛ سخت کننده های مذکور مانند ستون های پانل بین بازشوها که خود قابل مقایسه با یک سیستم دیوار برشی فولادی است رفتار نموده و لازم است برای اطمینان از جاری شدن برشی ورق فولادی پانل میانی قبل از جاری شدن سخت کننده های طرفین آن در اثر خمش، سطح مقطع سخت کننده های مذکور از حد معینی کمتر نباشد. از طرفی در تعیین رفتار پانل میانی به لحاظ رفتار خمشی یا برشی، نسبت ابعاد آن اثرگذار خواهد بود. در این مقاله، پانل میانی با شبیه سازی آن به شکل یک تیر، مورد مطالعه قرار گرفته و روابطی برای تعیین حدود ابعاد پانل میانی برای تعیین نوع عملکرد آن و محاسبه حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای سخت کننده های طرفین آن در حالت بررسی پانل مذکور به صورت تقویت شده، ارائه شده و مقایسه ای بین نتایج حاصل از روابط بدست آمده با نتایج مدل سازی عددی با نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. بر این اساس مشخص شده که در مورد دیوارهای برشی فولادی تقویت شده با دو بازشو، می توان با انتخاب مناسب نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی، از عملکرد برشی در پانل بین بازشوها اطمینان یافت.

### کلمات کلیدی

دیوارهای برشی فولادی، سخت کننده، بازشوهای مستطیلی، پانل میانی تقویت شده.

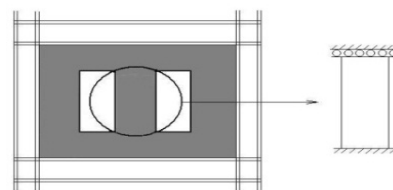
\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات  
Email: sabouri@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی که به صورت تقویت شده و بدون تقویت و نیز با فرض وجود بازشو و یا نبود آن، طراحی و ساخته می‌شوند، در سال‌های اخیر، به عنوان یکی از سامانه‌های باربر جانبی دارای مزایای متعدد نسبت به سایرین، توسط محققین کشورهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برخی از مزایای استفاده از دیوارهای برشی ساخته شده از ورق‌های فولادی به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی عبارتند از: شکل‌پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی زیاد، آسانی در اجرا، دارا بودن سختی برشی اولیه بالا که در محدود ساختن میزان تغییرمکان جانبی بخصوص در سازه‌های بلند، بسیار اثرگذار خواهد بود، داشتن وزن کمتر در مقایسه با نمونه‌های بتنی مشابه و در نتیجه آن کاهش وزن سازه که در میزان کاهش برش پایه مؤثر است.

از نخستین مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو، تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه سازه دانشگاه کاردیف انگلستان است [۱-۶]. در این مطالعات که مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با اعمال بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی بدون تقویت و دارای یک بازشوی دایروی موجود در مرکز ورق انجام شد، دیده شد که نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری کافی و حلقه‌های هیستریزیس پایدار S شکل بوده و قابلیت جذب انرژی آنها که در هر چرخه بارگذاری، با بیشینه دامنه تغییرشکل برشی افزایش داشته، نیز قابل ملاحظه بوده است. همچنین مشخص شد که مقاومت و سختی پانل‌ها با افزایش قطر بازشو کاهش یافته است.

هدف از این مقاله، مطالعه تئوریک پانل میانی با شبیه‌سازی آن به یک تیر و ارائه روابطی برای تعیین حدود ابعاد پانل میانی برای تعیین نوع عملکرد آن و نیز بدست آوردن روابطی برای محاسبه حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی در حالت بررسی پانل مذکور به صورت تقویت شده و مقایسه نتایج حاصل از مطالعه تئوریک و روابط بدست آمده با نتایج مدل‌سازی عددی برای نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی است. در شکل (۱) وضعیت پانل میانی در دیوارهای برشی فولادی با دو بازشو نشان داده شده است.



شکل (۱): وضعیت کلی پانل میانی بین دو بازشو در پانل‌های برشی فولادی

## ۲- بررسی و مطالعه رفتار پانل میانی در نمونه‌های دارای

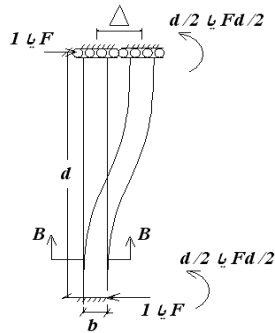
## دو بازشو و عوامل مؤثر بر عملکرد آن

در سامانه دیوار برشی فولادی دارای دو بازشو که در این تحقیق در بیشتر موارد مدل‌سازی عددی، حالت وجود دو بازشوی مستطیلی ایستاده، مورد بررسی قرار گرفته است، پانل میانی (پانل بین دو بازشو) خود مشابه یک دیوار برشی با ابعاد کمتر از ابعاد پانل اصلی است که رفتار آن بر حسب نسبت ابعاد پانل میانی تعیین شده و بر این اساس می‌تواند رفتاری بصورت غالباً برشی، غالباً خمشی و یا ترکیبی از رفتارهای برشی و خمشی را داشته باشد. در پانل میانی سامانه‌های دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی، عملکرد برشی بر رفتار خمشی ترجیح داده شده و این اصل مبنای محاسبه رابطه تعیین حدود مربوط به نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی برای مشخص شدن نوع رفتار آن قرار گرفته است. بر این اساس لازم است برای حصول اطمینان از عملکرد برشی در پانل میانی، از فرضیه وقوع جاری شدن برشی ورق جان پانل مذکور پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های دوگانه طرفین آن در اثر خمش حاصل از عملکرد نیروهای کششی در سخت‌کننده‌های یک سمت پانل میانی و نیروهای فشاری در سخت‌کننده‌های سمت دیگر آن استفاده شود.

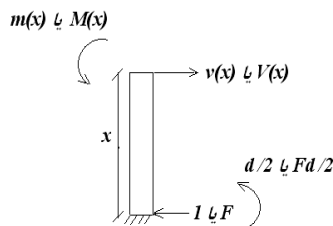
## ۳- بررسی عملکرد کماتش پانل میانی و ارائه روابط

## تئوری حاکم

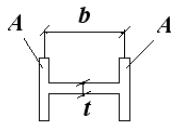
در این تحقیق، شرط رعایت حداقل سطح مقطع لازم برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی و نیز انتخاب نسبت مناسب ارتفاع به عرض آن، با فرض آنکه پانل مذکور کماتش نکند، بررسی شده و به این منظور در مدل‌های موردنظر، کل سطح پانل میانی در حالت مقید بودن تغییرمکان خارج از صفحه آن مورد مطالعه قرار گرفته است. سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی به صورت دوگانه (دو ورق مستطیلی) در هر طرف پانل در نظر گرفته شده که در بخش مدل‌سازی به مشخصات آنها اشاره شده است. پانل بین دو بازشو در دیوارهای برشی فولادی در حالت شبیه‌سازی آن به تیر، در شکل (۲) نشان داده شده است. در شکل (۲-الف) پانل تغییرشکل یافته تحت اثر اعمال بار جانبی موجود  $F$  و نیز در حالت اعمال بار جانبی واحد، طبق اصل کار مجازی نشان داده شده و شکل (۲-ب)، دیاگرام آزاد پانل را در مقطعی به فاصله  $x$  از تراز پایین آن در هر دو حالت بارگذاری مذکور و شکل (۲-ج) مقطع پانل را نشان می‌دهند. در شکل (۲-ب) نیروی برشی در مقطع مورد بررسی از انتهای المان تحت اثر اعمال بار جانبی  $F$  و بار واحد به ترتیب  $V(x)$  و  $v(x)$  و ممان‌های خمشی در اثر اعمال بار جانبی  $F$  و بار واحد



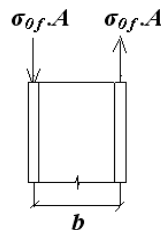
(الف) شبیه سازی پانل میانی به یک تیر تحت اثر اعمال بار بر اساس اصل کار مجازی



(ب) دیاگرام آزاد پانل میانی در مقطعی به فاصله x از تراز پایین آن در روش کار مجازی و بر اساس اعمال بار



(ج) مقطع تیر ارائه شده در قسمت (الف) (SEC B-B)



(د) فرض نیروی محوری در بال ها

شکل (۲): پانل میانی بین بازوها در حالت شبیه سازی شده به یک تیر با مقطع I شکل

$d$  به عنوان ارتفاع تیر در نظر گرفته شده و  $I_f$  ممان اینرسی بال های مقطع تیر بوده که بر اساس رابطه (۴) بدست می آید. معرف فاصله مرکز تا مرکز بال های مقطع تعریف می شود:

$$I_f = 2A \left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{Ab^2}{2} \quad (4)$$

بر اساس دو معادله فوق،  $\Delta_b$  از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$\Delta_b = \frac{Fd^3}{6EAb^2} \quad (5)$$

به ترتیب  $M(x)$  و  $m(x)$  معرفی شده اند.

جان تیر در شکل (۲-ج)، ورق جان پانل بین بازوها در نمونه دیوار برشی فولادی بوده و بال های تیر نیز، سخت کننده های طرفین پانل میانی هستند. در شکل (۲-د) نیز نیروهای محوری به وجود آمده در سخت کننده های دو طرف پانل مشخص شده است. در شکل (۲)، فاصله مرکز تا مرکز سخت کننده های طرفین پانل برابر با  $b$ ، ارتفاع آن برابر با  $d$  و ضخامت ورق جان مساوی با  $t$  در نظر گرفته شده و سطح مقطع سخت کننده های طرفین پانل میانی نیز  $A$  است.

با فرض نبود امکان کمانش در ورق پانل بین بازوها، رابطه  $\tau_{cr} \geq \tau_{yw}$  برقرار خواهد بود.

برای محاسبه تغییرمکان های برشی و خمشی؛ از اصل کار مجازی استفاده می شود که طبق آن، تغییرمکان های برشی از رابطه (۱) و تغییرمکان های خمشی از رابطه (۲) محاسبه می شوند: [۷]

$$\Delta_s = k \int_0^d \frac{V(x) \cdot v(x)}{GA} dx \quad (1)$$

$$\Delta_b = \int_0^d \frac{M(x) \cdot m(x)}{EI} dx \quad (2)$$

که در روابط کلی فوق  $\Delta_b$  و  $\Delta_s$  به ترتیب برابر با تغییرمکان های برشی و خمشی،  $M(x)$  و  $V(x)$  نیروی برشی و لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی  $F$ ،  $v(x)$  و  $m(x)$  نیروی برشی و لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی واحد،  $k$  ثابت برش در مقطع،  $E$  و  $G$  مدول ارتجاعی برشی و خمشی،  $I$  و  $A$  ممان اینرسی و مساحت مقطع تعریف می شوند. در این قسمت لازم است تا با شبیه سازی پانل میانی دیوار برشی فولادی، به یک تیر با مقطع  $I$  شکل، نیروها و تغییرمکان های برشی و خمشی در آن، بر اساس اصل فوق تعیین شوند. پس از محاسبه نیروی برشی و لنگر خمشی، در صورت اعمال بار واحد و بار جانبی برابر با  $F$  و با فرض محاسبه ممان های  $M(x)$  و  $m(x)$  به صورت  $M(x) = F \times (x - 0.5d)$  و  $m(x) = 1 \times (x - 0.5d)$  می توان رابطه (۲) را که مربوط به محاسبه تغییرمکان های خمشی است، به صورت رابطه (۳) بازنویسی نمود:

$$\Delta_b = \int_0^d \frac{F(x - \frac{d}{2})^2}{EI} dx = \frac{Fd^3}{12EI_f} \quad (3)$$

حال در صورت بررسی پانل در حالت تقویت شده (بدون کمانش)، فرض می‌شود ابعاد پانل میانی باید به گونه‌ای انتخاب شود که با توجه به ضخامت ورق، کمانش بعد از جاری شدن ورق رخ دهد یا به عبارت دیگر ورق تا رسیدن به حد جاری شدن، کمانش نکنند که در این صورت لازم است:

$$\tau_{cr} \geq \tau_{yw} \quad (14)$$

$$F_{su} = \tau_{yw}bt = \frac{\sigma_{ow}}{\sqrt{3}}bt \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)،  $\tau_{yw}$  تنش برشی حد جاری شدن ورق فولادی بوده که برابر با  $(\sigma_{ow}/\sqrt{3})$  است،  $\sigma_{ow}$  تنش جاری شدن ورق و  $\tau_{cr}$  تنش برشی بحرانی متناظر با کمانش ورق تعریف می‌شود. اکنون بر اساس نامسای‌های (۹) و (۱۰) و رابطه (۱۳) می‌توان نوشت:

$$F_{su} \leq F_{bu} \rightarrow \frac{\sigma_{ow}}{\sqrt{3}}bt \leq \frac{2\sigma_{of}}{d}Ab \quad (16)$$

$$\rightarrow A \geq \frac{\sigma_{ow}td}{2\sqrt{3}\sigma_{of}} \quad (16)$$

با جایگزینی  $F_{su}$  و  $F_{bu}$  به ترتیب در روابط (۵) و (۸) می‌توان کمیت‌های  $\Delta_{su}$  و  $\Delta_{bu}$  را به ترتیب بر اساس معادلات (۱۷) و (۱۸) محاسبه نمود:

$$\Delta_{su} = \frac{2(1+\mu)F_{su}d}{Ebt} \quad (17)$$

$$\Delta_{bu} = \frac{F_{bu}d^3}{6EAb^2} \quad (18)$$

با جایگزینی  $F_{su}$  از رابطه (۱۵) و  $F_{bu}$  از معادله (۱۳) می‌توان نوشت:

$$\frac{2(1+\mu)d}{Ebt} \cdot \frac{\sigma_{ow}}{\sqrt{3}}bt \geq \frac{2\sigma_{of}}{d}Ab \frac{d^3}{6EAb^2} \quad (19)$$

$$\rightarrow \frac{d}{b} \leq 2\sqrt{3}(1+\mu) \frac{\sigma_{ow}}{\sigma_{of}} \quad (19)$$

با قرار دادن مقدار  $F_{bu}$  از رابطه (۱۳) در معادله (۱۸) خواهیم داشت:

$$\Delta_{bu} = \frac{F_{bu}d^3}{6EAb^2} = \frac{2\sigma_{of}d^2}{6Eb} \quad (20)$$

بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با فرض ثابت بودن  $d$ ،  $E$ ،  $\mu$ ،  $A$ ،  $t$ ،  $\sigma_{ow}$  و  $\sigma_{of}$  فقط عامل  $b$  متغیر است که تغییر در میزان نسبت  $d/b$  در پانل میانی، با تغییر  $b$  انجام می‌شود:

$$\begin{cases} F_{bu} \propto b \\ \Delta_{bu} \propto \frac{1}{b} \end{cases} \rightarrow k_b = \frac{F_{bu}}{\Delta_{bu}} \rightarrow k_b \propto b^2 \quad (21)$$

بنابراین در چنین شرایطی سختی خمشی پانل میانی ( $k_b$ ) با توان دوم عرض پانل مذکور تغییر می‌نماید. در شرایط وجود پانل میانی تقویت شده، با در نظر گرفتن رابطه (۱۴) در مورد تنش‌ها، رابطه (۱۵) برای محاسبه نیروی برشی نهایی المان بدست می‌آید و با جایگذاری معادله (۱۵) در معادله (۱۷) می‌توان نوشت:

$$\Delta_{su} = \frac{2(1+\mu)d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_{ow}}{E} \quad (22)$$

بنابراین در صورت بررسی پانل میانی در حالت بدون کمانش:

$$\begin{cases} F_{su} \propto b \\ \Delta_{su} \propto 1 \end{cases} \rightarrow k_s = \frac{F_{su}}{\Delta_{su}} \rightarrow k_s \propto b \quad (23)$$

در رابطه (۱) و با فرض  $k = 1$  می‌توان نوشت:

$$\Delta_s = \int_0^d \frac{F dx}{\left(\frac{E}{2(1+\mu)}\right) \cdot A_w} = \frac{2Fd(1+\mu)}{EA_w} \quad (6)$$

که در آن،  $A_w$  مساحت وجه تحت اثر برش ورق در پانل میانی تعریف می‌شود و برابر است با:

$$A_w = bt \quad (7)$$

و  $\mu$  ضریب پواسون است. در این صورت با توجه به معادلات (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$\Delta_s = \frac{2Fd(1+\mu)}{Ebt} \quad (8)$$

به عنوان اولین شرط، لازم است تا وقوع جاری شدن برشی ورق جان پانل میانی، پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های دوگانه طرفین این پانل (بالهای مقطع  $I$  شکل) در اثر خمش حاصل از عملکرد نیروهای کششی در سخت‌کننده‌های یک سمت پانل و نیروهای فشاری در سخت‌کننده‌های سمت دیگر آن رخ دهد که لازمه آن برقراری رابطه (۹) است:

$$F_{su} \leq F_{bu} \quad (9)$$

که در آن،  $F_{su}$  نیروی برشی نهایی (با فرض الاستیک - کاملاً پلاستیک بودن دیاگرام تنش - کرنش فولاد) در ورق جان پانل بین دو بازشو و  $F_{bu}$  نیروی جانبی ناشی از لنگر خمشی نهایی (با فرض الاستیک - کاملاً پلاستیک بودن دیاگرام تنش - کرنش فولاد) در تراز بالایی پانل میانی است. نیروی  $F_{bu}$  طبق شکل (۲-د) منجر به ایجاد نیروی محوری برابر با  $\sigma_{of}A$  در سخت‌کننده‌های مذکور می‌شود.

شرط دوم؛ مستلزم بیشتر بودن تغییرمکان برشی حد الاستیک ورق ( $\Delta_{su}$ ) از تغییرمکان خمشی حد الاستیک ( $\Delta_{bu}$ ) در تراز بالایی پانل میانی است:

$$\Delta_{su} \geq \Delta_{bu} \quad (10)$$

در المان مورد بررسی، بر اساس شکل‌های (۲-ج) و (۲-د)، در صورتی که لنگر خمشی در ترازهای بالا و پایین تیر ارائه شده را به ترتیب با نمادهای  $M_T$  و  $M_B$  تعریف نماییم و  $\sigma_{of}$  تنش جاری شدن فولاد سخت‌کننده‌های دوگانه طرفین پانل میانی (بال‌های مقطع تیر در شکل (۲-د)) در نظر گرفته شود، می‌توان مقادیر ممان‌های مذکور را بر اساس رابطه (۱۱) محاسبه نمود:

$$M_B = M_T = \frac{F_{bu}d}{2} \quad (11)$$

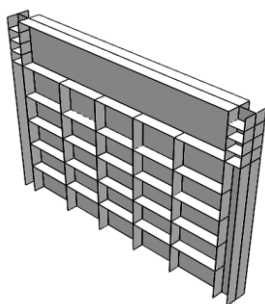
از طرف دیگر بر اساس شکل (۲-د) می‌توان ممان‌های  $M_T$  و  $M_B$  را از رابطه (۱۲) محاسبه نمود:

$$M_B = M_T = \sigma_{of}Ab \quad (12)$$

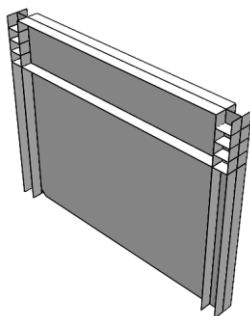
با مساوی قرار دادن طرف راست معادلات (۱۱) و (۱۲)، مقدار  $F_{bu}$  بر اساس معادله (۱۳) قابل تعیین است:

$$F_{bu} = \frac{2\sigma_{of}}{d}Ab \quad (13)$$

شده است که بر اساس معیار طراحی موجود [۱۰]، کمانش ورق به جای کمانش کلی، بصورت کمانش موضعی در زیرصفحات باشد. سخت کننده‌ها به شکل ورق‌های مستطیلی در نظر گرفته شده‌اند. اتصال سخت کننده‌ها به ورق، اتصال تیر به ستون‌ها و اتصال ورق و سخت کننده‌ها به المان‌های قاب، همه از نوع اتصالات ممان گیر هستند. در محل اتصال ورق و سخت کننده‌های قائم به تراز پایه، همه درجات آزادی مقید شده‌اند. بارگذاری مدل‌ها از نوع مونوتونیک با اعمال تغییرمکان به مقطع ستون‌ها بوده و برای جلوگیری از ناپایداری عمود بر صفحه پانل، دو نقطه در تراز بالای مدل بصورت متقارن نسبت به خط عمودی گذرنده از مرکز سطح آن در برابر تغییرمکان خارج از صفحه بسته شده‌اند. مش بندی اعضا با المان S4R که از دسته المان‌های پوسته استاندارد است انجام شده که نوعی المان صفحه‌ای چهار گرهی با قابلیت انحنای دو طرفه بوده و بصورت نازک یا ضخیم می‌تواند بکار رود.



شکل (۳): مدل نمونه پانل تقویت شده مورد آزمایش



شکل (۴): مدل نمونه پانل بدون تقویت مورد آزمایش

جدول (۱): ابعاد مقطع تیرها و ستون‌های نمونه‌های مورد آزمایش

ضخامت جان (mm)	ارتفاع جان (mm)	ضخامت بال (mm)	عرض بال (mm)	المان
۲۰	۶۰	۱۵	۱۴۰	ستون
۲۰	۲۵۰	۲۰	۱۴۰	تیر

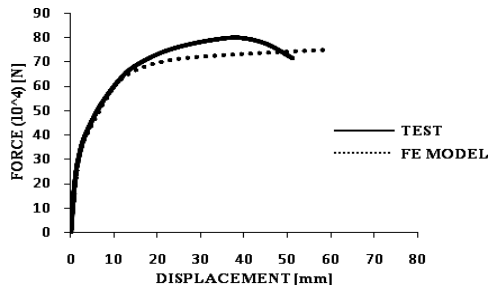
بر اساس رابطه (۲۳)، سختی برشی پانل میانی ( $k_s$ ) با عرض پانل مذکور متناسب است. از این رو در صورت مطالعه پانل میانی، با فرض ثابت بودن  $t, A, \mu, E, d, \sigma_{0f}$  و  $\sigma_{0w}$  و متغیر بودن  $b$  می‌توان بیان نمود که همواره سختی خمشی المان متناسب با  $b^2$  و سختی برشی آن متناسب با  $b$  است و در چنین شرایطی، در صورت افزایش  $b$  و در نتیجه کاهش نسبت  $d/b$ ، افزایش سختی خمشی المان به مراتب بالاتر از افزایش سختی برشی آن بوده و به دلیل ایجاد سختی برشی کمتر نسبت به سختی خمشی در المان، تغییرمکان‌های برشی بر تغییرمکان‌های خمشی غالب شده و رفتار برشی المان بر عملکرد خمشی، حاکم می‌شود. از طرفی با کاهش  $b$  و در نتیجه افزایش نسبت  $d/b$ ، کاهش سختی خمشی المان به مراتب بیشتر از کاهش سختی برشی آن بوده و به دلیل دارا بودن سختی برشی بیشتر نسبت به سختی خمشی، تغییرمکان‌های خمشی بر تغییرمکان‌های برشی غالب شده و رفتار خمشی المان بر عملکرد برشی، حاکم می‌شود.

#### ۴- مدل سازی و بررسی درستی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های قبل

از دو نمونه دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه بدون بازشو که یکی از آنان در حالت تقویت شده و دیگری بدون استفاده از سخت کننده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۹و۸] استفاده شده و منحنی‌های بار - تغییرمکان جانبی آزمایشگاهی دو نمونه مذکور تحت اثر بارگذاری مونوتونیک، به عنوان ملاک تعیین درستی نتایج مدل‌سازی عددی، در نظر گرفته شده و در قیاس با منحنی‌های متناظر آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۱- فرضیات کلی مدل‌سازی عددی

برای مطالعه عددی عملکرد پانل میانی در پانل‌های برشی فولادی، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در مدل‌سازی نمونه‌های تقویت شده و بدون تقویت انتخاب شده برای بررسی درستی نتایج که به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند، المان‌های ورق فولادی، تیر بالایی و ستون‌های احاطه کننده ورق با المان پوسته مدل شده‌اند. در جدول (۱) ابعاد مقاطع المان‌های قاب، در جدول (۲) ابعاد ورق و سخت کننده‌ها و در جدول (۳) مشخصات مکانیکی انواع فولاد بکار رفته در نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌ها ارائه شده است. سخت کننده‌ها در مدل تقویت شده مانند نمونه آزمایشگاهی به صورت یک طرفه به عرض ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. انتخاب ابعاد سخت کننده‌ها به گونه‌ای انجام



شکل (۶): مقایسه منحنی‌های مربوط به بررسی درستی نتایج در مورد مدل پانل بدون بازشو و بدون سخت‌کننده

با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) دیده می‌شود که منحنی‌های بدست آمده از نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی، انطباق قابل قبولی دارند.

#### ۲-۴- مدل‌سازی و معرفی مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

در این مجموعه از مدل‌ها که با هدف بررسی درستی روابط کلاسیک حاصله با نتایج مدل‌سازی عددی ساخته شده‌اند؛ بازشوهایی با ارتفاع ۴۵۰ میلی‌متر و عرض ۲۵۰ میلی‌متر در ورق فولادی ایجاد شده و وضعیت استقرار سخت‌کننده‌ها در همه مدل‌ها و در همه حالت‌های مورد بررسی، یکسان و طبق شکل (۷) در نظر گرفته شده است. به دلیل ثابت بودن ارتفاع بازشوها که برابر با ارتفاع پانل میانی است، تغییر نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی، با تغییر فاصله بین بازشوها تأمین شده است. در همه مدل‌های این سری، سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی به صورت دو طرفه؛ با ارتفاع برابر با ارتفاع بازشوها و با عرض ۲۶/۴ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر بوده که کمی بیش از مقدار بدست آمده بر اساس روابط کلاسیک است (شرط حداقل سطح مقطع لازم برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی بر اساس شرط وقوع پدیده جاری شدن ورق جان پانل مذکور در برش، پیش از جاری شدن خمشی سخت‌کننده‌های طرفین آن، استوار است). در حالی که سخت‌کننده‌های روی ورق اصلی، بصورت دوطرفه با عرض ۱۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند که علت انتخاب مقطعی با سطح مقطع و ممان اینرسی بالا، جلوگیری از کمانش کلی و تبدیل وضعیت کمانشی به کمانش موضعی در زیرصفحات بوده است [۱۰]. علاوه بر آن، در همه مدل‌های این مجموعه، امکان تغییر شکل کمانشی تمام پانل‌ها آزاد بوده و فقط پانل میانی از این لحاظ در حالت تقویت شده بررسی شده است. بر اساس توضیح ارائه شده در بخش ۳، در همه پانل‌های مدل شده در حالت مقید بودن امکان کمانش پانل بین دو بازشو، تقویت پانل مذکور با

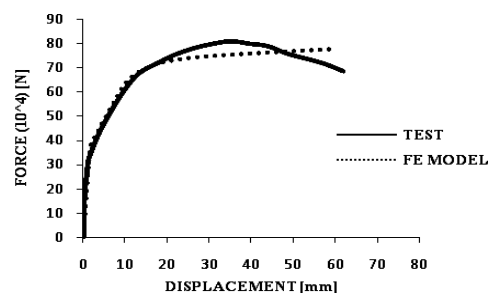
جدول (۲): ابعاد ورق و سخت‌کننده‌ها در نمونه‌های مورد آزمایش

ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	عرض (mm)	المان
۲	۹۶۰	۱۴۱۰	ورق فولادی
۳	۱۴۰	۹۰	سخت‌کننده های جان ستون
۴	۹۶۰	۶۰	سخت‌کننده های عمودی
۴	۱۴۱۰	۶۰	سخت‌کننده های افقی

جدول (۳): مشخصات مکانیکی قطعات نمونه‌های مورد آزمایش

تنش نهایی (MPa)	تنش جاری شدن (Mpa)	نوع فولاد	المان
۵۴۴	۴۱۴/۹	ST-52	ستون
۵۴۴	۴۱۴/۹	ST-52	تیر
۲۸۸/۷	۱۹۲/۴	ST-14	ورق
۳۷۰	۲۴۰	ST-37	سخت‌کننده های روی ورق

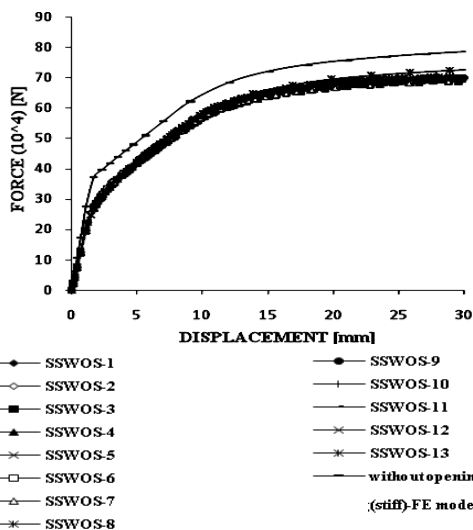
مقایسه نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی برشی در برابر تغییرمکان جانبی حاصل از آزمایش با منحنی‌های متناظر بدست آمده از مطالعه عددی، ملاک تعیین درستی نتایج مدل‌سازی در نظر گرفته شده و در مورد مدل‌های تقویت شده و بدون تقویت و بدون بازشوی بررسی شده برای مطالعه درستی نتایج که به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند، منحنی‌های بار - تغییرمکان حاصل از مدل‌سازی عددی با منحنی‌های متناظر آزمایشگاهی به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه شده‌اند.



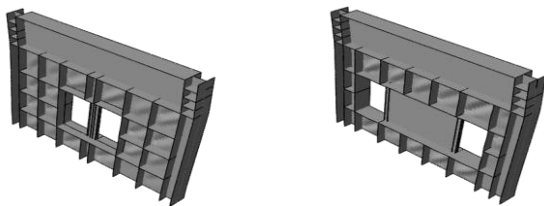
شکل (۵): مقایسه منحنی‌های مربوط به بررسی درستی نتایج در مورد مدل پانل بدون بازشو و با سخت‌کننده

#### ۴-۴- مقایسه نتایج مربوط به جاری شدن المان های پانل میانی

در مدل های مورد مطالعه، مقدار  $\sigma_{0w}$  برای فولاد ورق برابر با ۱۹۲/۴ مگاپاسکال انتخاب شده است. معیار جاری شدن ورق فولادی تقویت شده پانل بین بازشوها، رسیدن بیش از نصف سطح ورق به تنش جاری شدن (برابر با ۱۹۲/۴ مگاپاسکال)؛ در نظر گرفته شده و معیار جاری شدن سخت کننده های طرفین پانل میانی رسیدن المان های سخت کننده های مزبور (بال های مقطع تیر) به تنش جاری شدن ۴۱۴/۹ مگاپاسکال تعریف می شود. در شکل های (۱۲) تا (۲۴) وضعیت تنش ها در ورق پانل میانی و سخت کننده های اطراف آن در تغییر مکان های مختلف برای تعیین آغاز جاری شدگی در هر کدام از آنها آورده شده است.



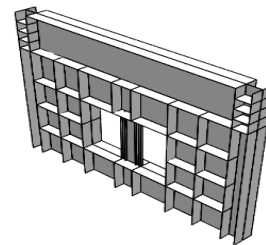
شکل (۹): منحنی های بار - تغییر مکان مدل های مورد بررسی



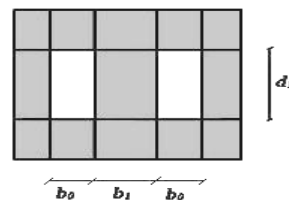
شکل (۱۰): مدل SSWOS-1 در حالت تغییر شکل یافته  
شکل (۱۱): مدل SSWOS-13 در حالت تغییر شکل یافته

همان طور که مشاهده می شود با افزایش  $d_1/b_1$ ، به تدریج شروع جاری شدگی از ورق به سخت کننده های اطراف پانل میانی منتقل می شود. این موضوع در شکل (۲۵) مشخص است. با توجه به شکل (۲۵)، تا حدود  $d_1/b_1 \leq 2/8$ ، ابتدا ورق پانل میانی جاری می شود، یا به عبارت دیگر می توان گفت که در این محدوده پانل میانی در برش عمل نموده و فراتر از این حد، به تدریج عملکرد آن به سمت رفتار خمشی میل نموده است.

مقید نمودن تغییر مکان خارج از صفحه کل سطح پانل انجام شده است. تعریف پارامتری ابعاد مدل ها در شکل (۸) ارائه شده است. در نامگذاری مدل های مورد بررسی بصورت SSWOS-1، SSWOS-2 تا SSWOS-13 مقادیر انتخاب شده برای نسبت  $d_1/b_1$  به ترتیب برابر با ۰/۷، ۱، ۱/۵، ۲/۰۸، ۲/۲، ۲/۵، ۲/۷۸، ۳/۵، ۴/۲، ۵/۳، ۶، ۷ و ۹ هستند. شرط حداقل نسبت ابعاد پانل میانی که با نسبت  $d_1/b_1$  معرفی شده است، بر اساس شرط بیشتر بودن تغییر مکان برشی نسبت به تغییر مکان خمشی در تراز بالایی بازشوها در پانل بین دو بازشو بدست آمده است. پس از اتمام مراحل مدل سازی؛ نمودار تغییرات نیروی برشی در برابر تغییر مکان جانبی در تراز بالای پانل اصلی برای تمام مدل ها در شکل (۹) رسم و مقایسه شده است. در شکل های (۱۰) و (۱۱)، دو مورد از پانل های مورد بررسی به ترتیب با نسبت  $d_1/b_1$  برابر با ۰/۷ و ۹ پس از بارگذاری نشان داده شده اند.



شکل (۷): شکل کلی مربوط به وضعیت استقرار سخت کننده ها روی ورق

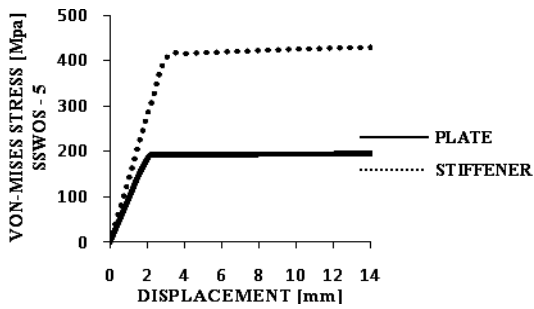


شکل (۸): ابعاد بازشوها در نمونه های مورد مطالعه

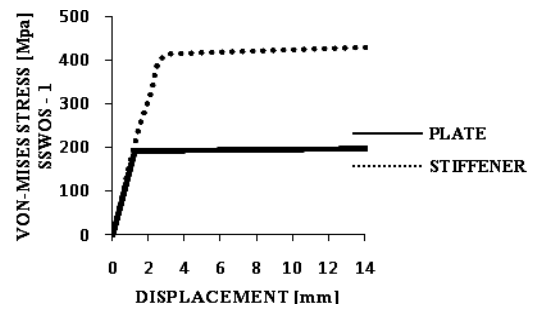
با مشاهده شکل های (۱۰) و (۱۱) مشخص می شود که به دلیل مقید بودن تغییر شکل خارج از صفحه در پانل میانی، هیچ گونه تغییر شکل کمانشی در آن ایجاد نشده، در حالی که در سایر زیرصفحات وقوع کمانش در ورق کاملاً مشهود است.

#### ۴-۳- مقایسه نتایج مربوط به سختی و مقاومت نمونه ها

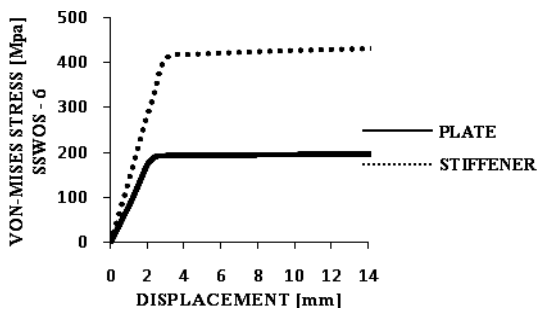
همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، سختی برشی و مقاومت برشی نهایی کلیه پانل های بازشودار تا حد زیادی یکسان هستند. علت این امر را می توان به دلیل وابستگی سختی و مقاومت مدل های تقویت شده بازشودار، به عرض بازشوها و ضخامت ورق دانست که در این نمونه ها هر دو عامل فوق ثابت در نظر گرفته شده اند.



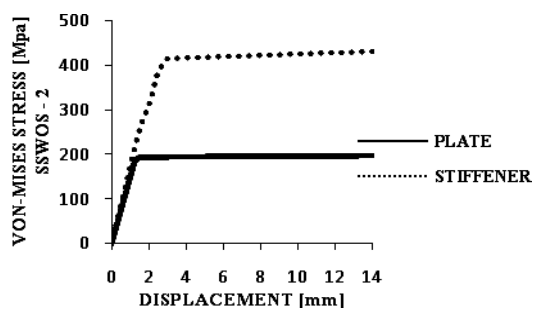
شکل (۱۶): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-5 با  $d_1/b_1=2/2$



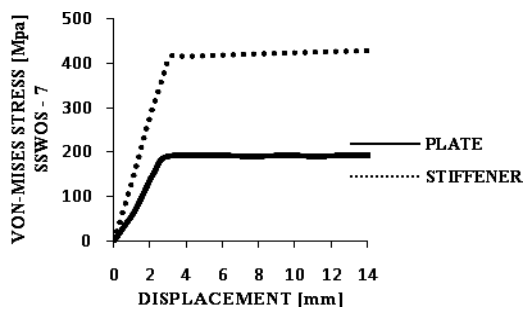
شکل (۱۲): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-1 با  $d_1/b_1=0/7$



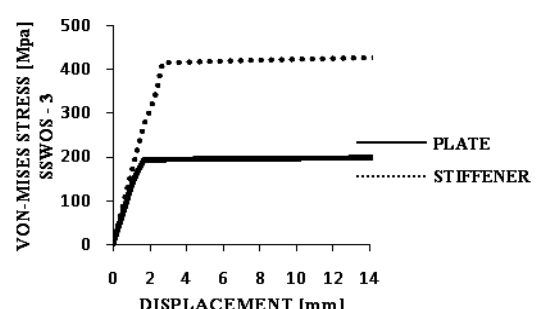
شکل (۱۷): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-6 با  $d_1/b_1=2/5$



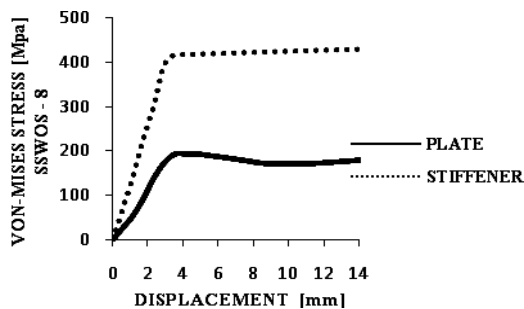
شکل (۱۳): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-2 با  $d_1/b_1=1$



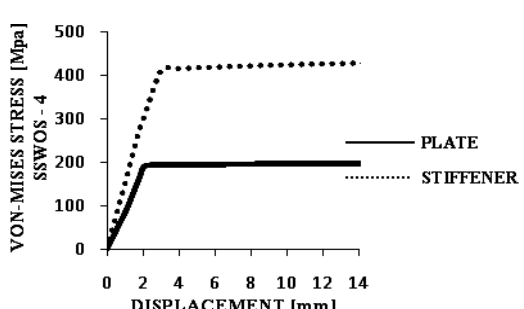
شکل (۱۸): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-7 با  $d_1/b_1=2/78$



شکل (۱۴): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-3 با  $d_1/b_1=1/5$

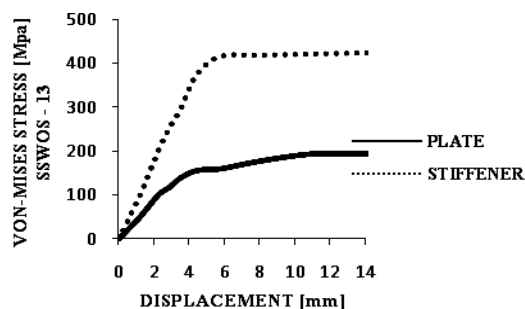


شکل (۱۹): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-8 با  $d_1/b_1=3/5$

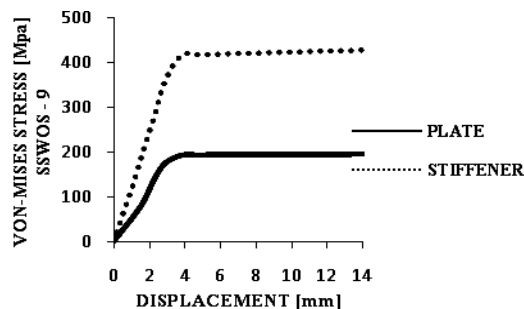


شکل (۱۵): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-4 با  $d_1/b_1=2/08$

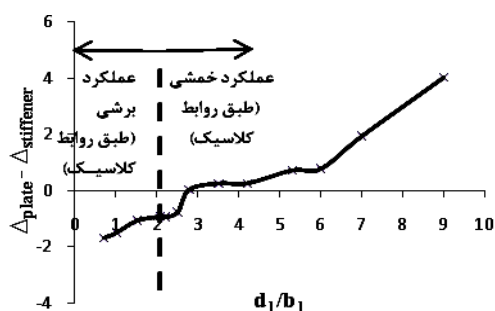




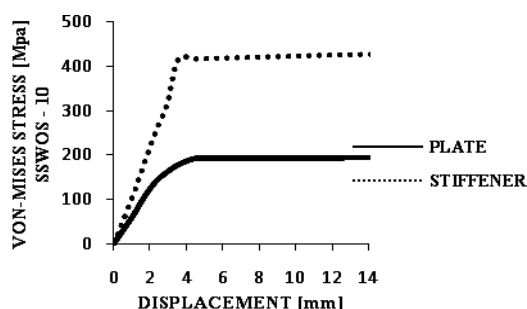
شکل (۲۴): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-13 با  $d_1/b_1=9$



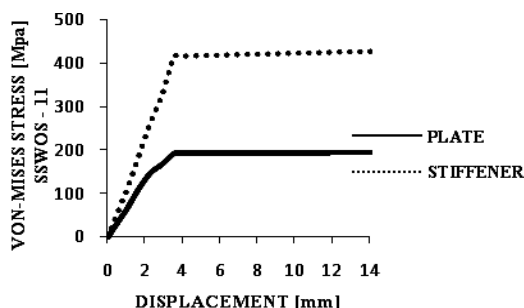
شکل (۲۰): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-9 با  $d_1/b_1=4/2$



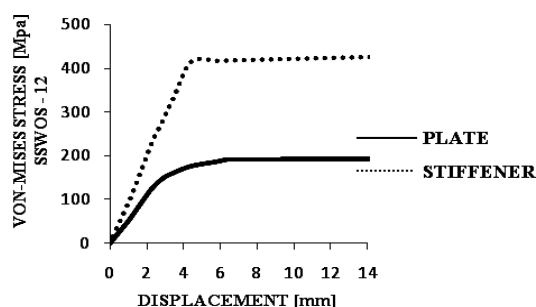
شکل (۲۵): مقایسه مقدار اختلاف تغییر مکان آغاز جاری شدن ورق پانل میانی و سخت کننده های طرفین آن بر حسب نسبت  $d_1/b_1$



شکل (۲۱): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-10 با  $d_1/b_1=5/3$



شکل (۲۲): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-11 با  $d_1/b_1=6$



شکل (۲۳): مقایسه تغییرات تنش جاری شدن فون میسز مدل SSWOS-12 با  $d_1/b_1=7$

#### ۵- مقایسه نتایج روش عددی با روش تئوری کلاسیک

همان طور که در شکل (۲۵) نشان داده شده است در صورت انتخاب فولاد به ترتیب با تنش جاری شدن  $192/4$  و  $414/9$  مگاپاسکال برای ورق پانل میانی و سخت کننده های اطراف آن، بر اساس روش تئوری کلاسیک با انتخاب نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی کمتر از  $2/1$  (یعنی  $d_1/b_1 \leq 2/1$ )، پانل مذکور بصورت برشی عمل می نماید. این در حالیست که نتایج روش عددی حد مذکور را حدوداً برابر با  $2/8$  بدست می دهد. از آنجا که برای تعیین دقیق تر حد مذکور نیاز به انجام آزمایش های متعدد است، بنابراین می توان تا زمان انجام آنها، از حد بدست آمده در روش تئوری کلاسیک که در جهت اطمینان بیشتری است، استفاده نمود.

#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، پانل تقویت شده بین دو بازو در دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده از نظر عملکرد برشی یا خمشی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه به کمک روش کلاسیک، روابط حاکم بر نوع عملکرد پانل مذکور تعیین شد. سپس به کمک روش عددی که با دو آزمایش انجام شده کالیبره شد،

Structures, 12: pp. 145- 162, 1991.

Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T.M., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Plate Shear Panels", Journal of Thin-Walled Structures, 14: pp. 139- 151, 1992.

اخوان لیل آبادی، محمدرضا؛ طاحونی، شاپور؛ "تحلیل سازه‌ها (روش کلاسیک و ماتریس)"، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۸۱.

صبوری، قمی، سعید؛ یحیایی، محمود؛ اسعد سجادی، رامین؛ "بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با بازشو"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۸۸.

صبوری، قمی، سعید؛ اسعد سجادی، رامین؛ "بررسی آزمایشگاهی ضریب رفتار و جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده"، مجله علمی - پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، شماره ۳، تابستان ۱۳۸۷.

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, Vol. 17: pp. 823- 837, 2008.

درستی روابط بدست آمده بررسی شده و نتایج زیر حاصل گردید: الف) در صورت کمتر بودن نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی از حدود  $2/8$  ( $d_1/b_1 \leq 2/8$ )، آغاز جاری‌شدگی ابتدا در ورق اتفاق می‌افتد، بنابراین در این حالت رفتار پانل میانی به صورت برشی ارزیابی می‌شود.

ب) در صورت بیشتر بودن نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی از حدود  $2/8$  ( $d_1/b_1 \geq 2/8$ )، نتایج نشان می‌دهند که آغاز جاری‌شدگی به جای ورق ابتدا در سخت‌کننده‌ها واقع می‌شود که در این حالت رفتار پانل میانی به صورت خمشی ارزیابی می‌شود.

ج) مشاهده می‌شود که در صورت انتخاب فولاد با تنش جاری شدن  $192/4$  مگاپاسکال برای ورق تقویت شده پانل میانی و نیز فولاد با تنش جاری شدن برابر  $414/9$  مگاپاسکال برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل مذکور، روش عددی، حد  $2/8$  را به‌عنوان مرز تفکیک‌کننده رفتار برشی و خمشی بدست می‌دهد. طبق روش تئوری، با انتخاب نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی برابر با مقداری کمتر از  $2/1$ ، پانل به صورت برشی عمل می‌نماید. اگر چه نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی، همراه با صحت‌سنجی اولیه با دو آزمایش انجام شده است، با این حال برای اطمینان و استناد به آنها لازم است در این زمینه مطالعات آزمایشگاهی بیشتری همراه با بررسی نقش قاب دربرگیرنده ورق، انجام پذیرد و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی به دقت مورد مطالعه و تطبیق قرار داده شوند.

## ۷- مراجع

[۱] صبوری قمی، سعید؛ "سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی: مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی"، انتشارات انگیزه، تهران، ۱۳۸۰.

[۲] صبوری قمی، سعید؛ "سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی: طرح اندیشه استفاده از فولاد نرم"، انتشارات انگیزه، تهران، ۱۳۸۳.

[۳] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E. and Kharrazi, M.H.K., "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(6): pp. 878- 889, 2005.

[۴] Sabouri-Ghomi, S., "Discussion of Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131 (4): pp. 695- 697, 2005.

[۵] Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T.M., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", Journal of Thin-Walled