



# بررسی تجربی رفتار کمانشی ورقهای فولادی سخت شده

## با لوله های مورب به عنوان پانل برشی مطلوب

\*مرتضی نقی پور<sup>۱</sup>، سید حسین پیران ولید<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۹/۱۱/۴، پذیرش ۹۱/۶/۵)

### چکیده

پانل های برشی فولادی در سه دهه اخیر به دلیل سختی مناسب، شکل پذیری و اتلاف انرژی بالا در ساختمان های جدید و همچنین در مقاوم سازی ساختمانهای موجود در دو نوع سخت شده و بدون سخت کننده مورد استفاده قرار گرفته اند. استفاده از سخت کننده های تسمه ای به صورت افقی و قائم برای جلوگیری از کمانش ورق پرکننده با معایبی همراه است که می توان به پائین بودن مقاومت کمانشی این تسمه ها اشاره کرد. از آنجا که کمانش ورق پرکننده در پانل های برشی در راستا و یا موازی با قطر پانل برشی می باشد، لذا بمنظور بهبود رفتار پانل های برشی، استفاده از سخت کننده لوله ای بصورت مورب پیشنهاد گردید و برای بررسی رفتار ورق فولادی تحت این سخت کننده، تعداد ۸ عدد نمونه به ابعاد داخلی  $60 \times 60 (cm)$  ساخته شد و نتایج آزمایش با بار گذاری استاتیکی فزاینده حاکی از آنست که نمونه با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  دارای مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی بیشتری می باشد و تعداد نیم موج های ناشی از کمانش برون صفحه ای ورق پرکننده در فاصله بین سخت کننده ها با افزایش نسبت فوق کاهش می یابد.

### کلمات کلیدی

پانل برشی، ورق پرکننده، سخت کننده تسمه ای، سخت کننده لوله ای

## Experimental Study of Steel Plates' Buckling Behavior Stiffened with Oblique Tubes as Suitable Shear Panels

Mortaza Naghipour, Seyed Hossein Piran Valid

### ABSTRACT

Steel shear panels have been used in new buildings and also retrofitting of existing structures in two kind, stiffened and unstiffened, in recently three decades because of their proper stiffness, ductility and high energy dissipation. Using strap stiffeners in vertical and horizontal for preventing the buckling of filling sheet has also some defects such as low buckling strength in straps. Since the buckling of the filling sheet in shear panels is in direction or parallel of diameter of panels, then for improving the shear panel's behavior, using tube stiffeners in oblique suggested and for the study of the behavior of steel plates with these stiffeners, 8 samples with inner dimensions  $60 \times 60 (cm)$  have been made and the results of tests with increasing static loading show that the sample with ratio  $h/b = 1/4$  has maximum yield and ultimate strength and the number of half-waves in distance of stiffeners that comes from out plane buckling of the filling sheet, decreases with increasing the above ratio.

### Key Words

Shear Panel, Filling Sheet, Strap Stiffener, Tube Stiffener

\*۱. دانشیار دانشکده عمران، عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، [m\\_naghi@nit.ac.ir](mailto:m_naghi@nit.ac.ir) (نویسنده مسئول)

۲. کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، [hosseinpiranvalid@yahoo.com](mailto:hosseinpiranvalid@yahoo.com)



در دهه های اخیر دیوارهای برشی فولادی (SSW) به عنوان یک نوع سیستم ابتکاری مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله و باد در ساختمانهای مختلف مطرح بوده اند و در مقایسه با دیگر سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی از قبیل قاب خمشی و قاب مهاربندی شده، عملکرد بهتری دارند. این سیستم شامل پانلهای مجزا می باشد که هر پانل از بالا و پایین به تیرها و از طرفین به ستون ها متصل می شود. اساس استفاده از دیوارهای برشی با ورق سخت نشده بر پایه عمل میدان های کششی ورق می باشد و طبق آزمایشات انجام شده ورق ها پس از کمانش، ناپایدار نشده بلکه دارای مقاومتی هستند (مقاومت پس کمانشی) که سبب می شود ورق ها پس از کمانش قابلیت باربری خود را حفظ نمایند [۱].

از اوایل دهه ۷۰ انواع گوناگون دیوارهای برشی فولادی برای به کارگیری در سیستم مقاوم جانبی سازه ها پیشنهاد گردید. اولین برنامه تحقیقاتی وسیع روی رفتار پانل های برشی فولادی توسط تاکاهاشی و همکاران (۱۹۷۳) اجرا شد [۲]. با توجه به آزمایشی که توسط کولاک و تیملر (۱۹۸۳) بر روی یک نمونه دیوار برشی دو طبقه سخت نشده تحت بارگذاری استاتیکی صورت گرفت، منحنی بار- تغییر مکان برای نمونه رفتاری شکل پذیر و پر مقاومت را نشان داد که در انتهای آزمایش شکل پذیری بسیار زیاد ۴ برای این نمونه بدست آمد [۳]. اولین روش برای آنالیز و طراحی دیوارهای برشی فولادی با جایگزینی ورق فولادی با تعدادی اعضای خرپایی مورب توسط توربورن و کولاک (۱۹۸۳) آغاز شد [۴].

در انگلستان صبوری و رابرت (۱۹۹۲) آزمایشاتی را بر روی ۱۶ نمونه که این نمونه ها شامل ورقهای فولادی با بازشو و بدون بازشو درون یک قاب با چهار مفصل که به صورت قطری بارگذاری شده بودند انجام دادند و نتایج آزمایشات منجر به ابداع روشی برای آنالیز و طراحی دیوارهای برشی و ارائه یک مدل تحلیلی از رفتار

هیستریزس پانل های برشی فولادی گردید [۵، ۶]. همچنین آزمایشاتی که توسط الگالی و کاسز (۱۹۹۳) بر روی ۶ نمونه صورت گرفت بیانگر این مطلب است که وقتی از یک ورق نازک سخت نشده بعنوان دیوار برشی استفاده شود، رفتار غیر الاستیک با تسلیم شدن ورق (دیوار) آغاز می شود و مقاومت سیستم با شکل گیری مفصل پلاستیک در ستون ها معین می گردد [۷]. از جمله کارهای آزمایشگاهی دیگر می توان به آزمایش دینامیکی انجام شده توسط رضایی (۱۹۹۷) اشاره نمود [۸]. آزمایش دیگری نیز توسط درایور و همکارانش (۱۹۹۷) بر روی نمونه ای چهار طبقه صورت گرفت که نمونه شکل پذیری بیشتر از ۶ را نشان داد [۹]. مطالعات و آزمایشاتی که توسط آستانه اصل و ژائو (۲۰۰۲) بر روی دو نمونه سه طبقه با بارگذاری رفت و برگشتی صورت گرفت، و تحقیقی که توسط صبوری، ونتورا و خرازی (۲۰۰۵) برای طراحی دیوارهای برشی شکل پذیر انجام پذیرفت و همچنین آزمایشی که توسط صبوری و قلهکی (۲۰۰۸) بر روی دو نمونه دیوار برشی سه طبقه با ورق نازک با دو نوع اتصال صلب و مفصلی صورت گرفت، نشان می دهد که ورق های فولادی نازک و بدون سخت کننده در دیوارهای برشی بسیار شکل پذیر، مطلوب و مؤثر عمل می کنند [۱۰، ۱۱، ۱۲]. علی رغم شکل پذیری بالا و جذب انرژی مطلوب پانل های برشی با ورق نازک سخت نشده، بمنظور جلوگیری از کمانش ورق پرکننده در محدوده الاستیک و جلوگیری از تغییر شکل مفرط برون صفحه ای ورق پرکننده که مشکلات بهره برداری را بهمراه خواهد داشت استفاده از سخت کننده ضرورت می نماید. استفاده از لوله بعنوان سخت کننده با مزایایی از قبیل بالا بودن مقاومت کمانشی لوله ها، نصب سریع و آسان لوله ها به دیوار برشی با استفاده از پیچ که می توان با انجام عملیات سوراخکاری در کارگاه به فرآیند نصب سرعت بخشید و عدم نیاز به بکارگیری نیروی متخصص جهت نصب لوله ها اشاره کرد. همچنین نصب لوله ها به صورت مورب و عمود بر طول کمانش برون صفحه ای ورق فولادی سبب



$E$  بترتیب تنش حد جاری شدن ورق فولادی و مدول الاستیسیته ورق فولادی می باشند.

$$\theta = 45^\circ \quad (1)$$

$$F_{Wu} = \frac{bt}{2} \sigma_0, U_{We} = \frac{2\sigma_0}{E} d$$

$$K_W = \frac{bt}{4d} E$$

$$\theta = 35^\circ \text{ و یا } \theta = 55^\circ \quad (2)$$

$$F_{Wu} = 0.94 \left( \frac{bt}{2} \sigma_0 \right), U_{We} = 1.064 \left( \frac{2\sigma_0}{E} d \right)$$

$$K_W = 0.883 \left( \frac{bt}{4d} E \right)$$

همانطور که مشاهده می گردد با فرض  $\theta = 55^\circ$  و یا  $\theta = 35^\circ$  بجای  $\theta = 45^\circ$ ، مقاومت برشی نهائی ورق فولادی،  $F_{Wu}$ ، حدوداً ۶٪ کاهش یافته و تغییر مکان برشی حد الاستیک آن ۶٪ افزایش می یابد. همچنین سختی برشی ورق فولادی،  $K_W$ ، حدود ۱۲٪ کاهش نشان می دهد. بدین ترتیب همانطور که دیده می شود، در بدترین شرایط اثر  $\theta$  بر روی مقاومت نهایی و تغییر مکان برشی الاستیک ورق فولادی ناچیز و اثر آن بر روی سختی برشی ورق قابل توجه نمی باشد، لذا فرض  $\theta = 45^\circ$  در دیوارهای برشی فولادی متعارف در ساختمانها، معقول بنظر می رسد.

با توجه به بحث فوق در رابطه با نیروی برشی نهائی، تغییر مکان برشی حد الاستیک و سختی برشی ورق فولادی و ابعاد ورق فولادی  $(t, d, b)$  و زاویه میدان کشش قطری،  $\theta$ ، روی عوامل مذکور، بنظر می رسد در صورتیکه در دیوار برشی فولادی یک طبقه سعی شود عرض آنها،  $b$ ، بیشتر از ارتفاع طبقه،  $d$ ، در طراحی انتخاب گردد، دیوار بجای میل به عملکرد خمشی به سمت عملکرد برشی خواهد رفت، وضعیت دیوار برشی نیز بلحاظ عوامل ذکر شده بهبود می یابد. با توجه به روابط فوق تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی تابع  $d$  بوده و مستقل از  $b$  و  $t$  می باشد، لذا با افزایش عرض دیوار،  $b$ ، مقدار آن ثابت باقیمانده ولی مقاومت برشی نهائی آن که مستقل از  $d$  بوده و رابطه مستقیم با  $b$  و  $t$

تقسیم شدن طول کمانش ورق فولادی و در نتیجه کاهش میزان حداکثر تغییر مکان برون صفحه ای می شود. همچنین باید توجه داشت که هدف از سخت کردن ورق پرکننده، جلوگیری کامل از کمانش ورق نمی باشد زیرا وقوع کمانش در ورق سبب افزایش میزان شکل پذیری شده و به تبع آن قابلیت جذب انرژی افزایش می یابد. پس می توان اظهار داشت با قرار دادن سخت کننده های لوله ای در فواصل مناسب می توان با افزایش شکل پذیری، رفتار سیستم در برابر بارهای جانبی را بهبود بخشید. لذا با توجه به موارد ذکر شده، بدست آوردن یک فاصله مناسب بین سخت کننده ها بسیار ضروری می باشد.

## ۲- نحوه کمانش ورق پرکننده تحت برش خاص

به منظور بررسی رفتار ورق و چگونگی کمانش آن سعی گردید نمونه ها طوری ساخته شوند تا در دسته پانل های برشی با ورق نازک یا لاغر قرار گیرند یعنی ورق پرکننده در محدوده الاستیک کمانش نماید. در تحقیقات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، زاویه میدان های کشش و فشار،  $\theta$ ، حدوداً بین  $35^\circ$  تا  $55^\circ$  گزارش شده است. در دیوارهای برشی متعارف عموماً عرض پانل،  $b$ ، بزرگتر از ارتفاع آن،  $d$ ، می باشد ( $b > d$ )،  $\theta < 45^\circ$  است و در پانل هایی که عرض پانل،  $b$ ، کوچکتر از ارتفاع آن،  $d$ ، باشد ( $b < d$ )،  $\theta > 45^\circ$  است. البته صلبیت ستون ها و تا اندازه ای صلبیت تیرها و ضخامت ورق نیز در مقدار  $\theta$  نقش دارد. با توجه به روابط موجود می توان اثر  $\theta$  را برای دو حد ذکر شده بر روی نیروی برشی نهایی،  $F_{Wu}$ ، تغییر مکان برشی حد الاستیک،  $U_{We}$ ، و سختی برشی ورق فولادی،  $K_W$ ، محاسبه نمود. برای این منظور در صورتی که فرض کنیم ورق فولادی نازک باشد بطوری که بتوان  $\tau_{cr} = 0$  فرض کرد برای  $\theta = 45^\circ$ ،  $\theta = 35^\circ$  و  $\theta = 55^\circ$  مقادیر  $F_{Wu}$ ،  $U_{We}$  و  $K_W$  با استفاده از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه می باشند [۱۳]. در روابط (۱) و (۲)،  $\sigma_0$

دارد افزایش می یابد که طبیعتاً افزایش سختی برشی دیوار را نیز که متناسب با آن است به همراه خواهد داشت ( $K = \frac{F}{U}$ ). با توجه به موارد ذکر شده فوق آنچه که بر رفتار برشی دیوارهای برشی تأثیرگذار است عرض دیوار برشی می باشد لذا برای تعیین یک فاصله مناسب بین سخت کننده ها باید از نسبت  $\frac{h}{b}$  استفاده نمود لذا در آزمایشات با ثابت فرض کردن عرض دیوار برشی می توان به یک فاصله مطلوب بین سخت کننده ها و یا به یک نسبت مناسب  $\frac{h}{b}$  دست یافت.

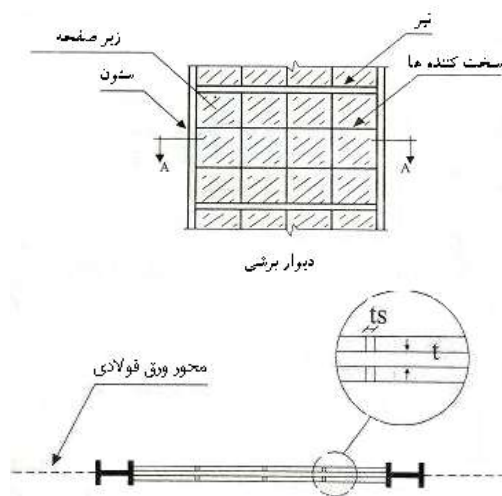
### ۳- تعیین ابعاد سخت کننده

در رابطه با سخت کننده ها برای جلوگیری از تغییر شکل آنها و در نتیجه برای جلوگیری از کماتش کلی ورق فولادی و وادار نمودن آن به کماتش موضعی در زیر صفحه ها روابط (۳) و (۴) پیشنهاد می گردد [۱۳]:

$$t_s \geq t \quad (3)$$

$$I_s \geq 500t^4 \quad (4)$$

در روابط فوق  $t$  ضخامت ورق فولادی،  $t_s$  ضخامت تیغه سخت کننده ها و  $I_s$  ممان اینرسی سخت کننده ها نسبت به محور ورق فولادی می باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): دیوار برشی تقویت شده به صورت افقی و قائم [۱۳]

روابط (۳) و (۴) با توجه به نتایج آزمایشهای انجام شده توسط تاکاهاشی و همکاران بر روی نمونه هایی که به صورت افقی و قائم سخت شده اند بدست آمد که جنبه پیشنهادی دارد. در این تحقیق نیز برای بدست آوردن یک ابعاد اولیه از این روابط استفاده گردید. همچنین پس از تعیین ابعاد سخت کننده ها رابطه (۵) نیز باید برای سخت کننده لوله ای ارضاء گردد [۱۴].

$$\frac{3300}{F_y} = \frac{D}{t_s} \quad (5)$$

در رابطه (۳)،  $F_y$  تنش تسلیم سخت کننده لوله ای،  $D$  قطر لوله و  $t_s$  ضخامت لوله می باشد.

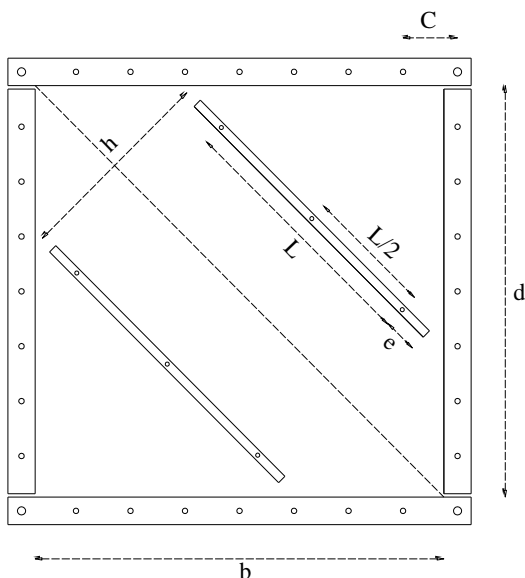
با توجه به روابط فوق، در این تحقیق از لوله با قطر خارجی  $D$ ،  $13(mm)$  و ضخامت  $t_s$ ،  $1(mm)$  استفاده شده است.

### ۴- جزئیات مربوط به نمونه ها

از آنجا که فاصله بین سخت کننده ها تأثیر زیادی بر روی رفتار نمونه ها خواهد داشت لذا برای بررسی این مورد و بدست آوردن یک نسبت مطلوب برای فاصله بین سخت کننده ها،  $h$  و عرض پانل،  $b$ ، تعدادی نمونه در ابعاد داخلی  $60 \times 60(cm)$ ، به صورتی که در شکل (۲) نشان داده شده است، ساخته شد. فاصله بین سخت کننده ها (فاصله مرکز تا مرکز لوله ها)،  $h$ ، از  $30(cm)$  تا  $15(cm)$  متغیر می باشد. در واقع می توان گفت برای بررسی این موضوع دو نمونه با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{2}$ ، دو نمونه با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  ساخته شد. همچنین برای مقایسه رفتار این نمونه های سخت شده با حالت بدون سخت کننده دو نمونه نیز بدون سخت کننده با ورق پرکننده به ضخامت  $0.6(mm)$  ساخته شد. باید خاطر نشان کرد که دو نمونه نیز با ورق پرکننده به ضخامت  $2(mm)$  و بدون سخت کننده بمنظور بررسی رفتار پانل های برشی با ورق ضخیم ساخته شد.

همه این نمونه ها در دو سری ساخته شدند. در سری اول از قاب با پروفیل قوطی به ابعاد  $2.5 \times 1(cm)$  و





شکل (۲): جزئیات نمونه های ساخته شده

ضخامت  $1.5(mm)$  و در سری دوم از قاب با پروفیل قوطی به ابعاد  $2 \times 4(cm)$  و ضخامت  $2.5(mm)$  استفاده گردید. در همه نمونه ها برای اتصال ورق به قاب از پیچ با قطر  $8(mm)$  و برای اتصال سخت کننده به ورق پرکننده از پیچ با قطر  $5(mm)$  استفاده شد. همچنین قطر پیچهای گوشه  $12(mm)$  در نظر گرفته شد. مشخصات همه نمونه ها در جدول (۱) بیان گردیده است.

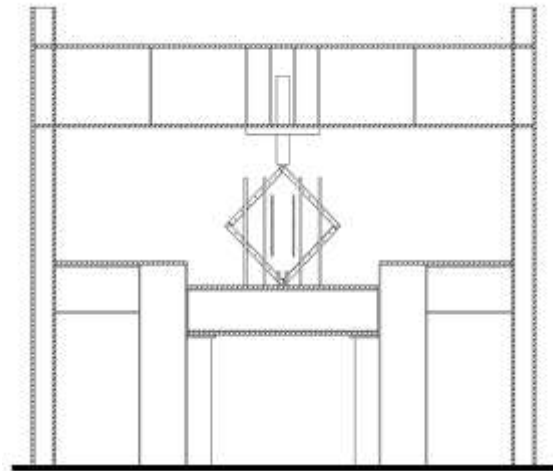
باید خاطر نشان کرد که سخت کننده ها در دو طرف ورق پرکننده، به صورتی که در شکل (۲) نشان داده شده است، به ورق اتصال می یابند که در هر طرف سخت کننده ها از هم به اندازه  $h$  و از محور قطر به اندازه  $\frac{h}{2}$  فاصله دارند. بمنظور اجتناب از اثر قاب روی سخت کننده ها، سخت کننده ها از قاب پیرامون به اندازه  $3(cm)$  در هر انتهای خود فاصله دارند. همچنین مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه ها و سخت کننده های موجود از نوع فولاد نرمه ST-37 می باشد.

جدول (۱): مشخصات هندسی نمونه ها

| وزن (kg) | (c) (cm) | (e) (cm) | (L) (cm) | (h) (cm)       | (t) (mm) | (d) (cm) | (b) (cm) | نمونه    |
|----------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| ۸/۰۵     | ۷/۲۵     | ۵        | ۰        | بدون سخت کننده | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{11}$ |
| ۹/۰۶     | ۷/۲۵     | ۵        | ۳۸/۸     | ۳۰             | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{12}$ |
| ۹/۲      | ۷/۲۵     | ۵        | ۵۳/۸     | ۱۵             | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{13}$ |
| ۱۳/۲۴    | ۷/۲۵     | ۵        |          | بدون سخت کننده | ۲        | ۶۰       | ۶۰       | $S_{14}$ |
| ۱۲/۸۷    | ۸        | ۵        | ۰        | بدون سخت کننده | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{21}$ |
| ۱۳/۴۳    | ۸        | ۵        | ۳۸/۸     | ۳۰             | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{22}$ |
| ۱۳/۵۷    | ۸        | ۵        | ۵۳/۸     | ۱۵             | ۰/۶      | ۶۰       | ۶۰       | $S_{23}$ |
| ۱۸/۰۶    | ۸        | ۵        | ۰        | بدون سخت کننده | ۲        | ۶۰       | ۶۰       | $S_{24}$ |

## ۵- فرآیند بارگذاری

برای اینکه ورق تحت برش خالص قرار گیرد، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، بارگذاری استاتیکی به صورت قطری توسط سیلندر هیدرولیکی به نمونه اعمال گردید. مقدار این نیرو توسط نیروسنج و تغییر مکان قائم نیز توسط جابجایی سنج بصورتی که در شکل (۳) نشان داده شده است اندازه گیری شد.



شکل (۳): نحوه بارگذاری و اندازه گیری تغییر مکان قائم

## ۶- انجام آزمایش و نتایج آن

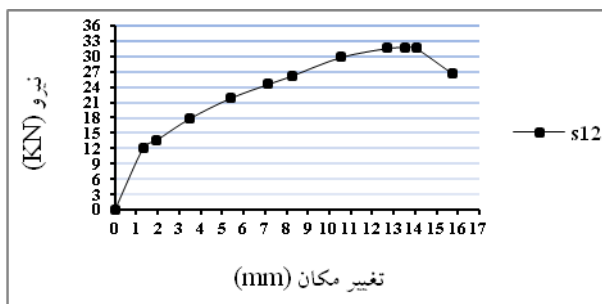
در همه نمونه های سری اول ( $S_1$ ) با مشاهده اولین نشانه های کماتش برون صفحه ای ورق پرکننده نمودار بار-تغییر مکان از مرحله خطی وارد مرحله غیر خطی گردید و بارگذاری تا زمان وقوع کماتش کلی در قاب ادامه یافت.

توجه به شکل (۴) [نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د)] نمونه های  $S_{11}$ ،  $S_{12}$ ،  $S_{13}$  و  $S_{14}$  بترتیب در نیروهای  $11.4(KN)$ ،  $12.2(KN)$ ،  $20.4(KN)$  و  $45.9(KN)$  از مرحله خطی وارد مرحله غیر خطی شده و نیروی نهایی برای نمونه ها نیز بترتیب  $24.4(KN)$ ،  $31.8(KN)$ ،  $34.4(KN)$  و  $45.9(KN)$  بدست آمد. با توجه به شکل های (۵)، (۶)، (۷) و (۸) مشاهده می شود ورق پرکننده در نمونه  $S_{11}$  با یک نیم موج مشخص، نمونه  $S_{12}$  با سه نیم موج مشخص و نمونه  $S_{13}$  با شش نیم موج مشخص کماتش نمود.

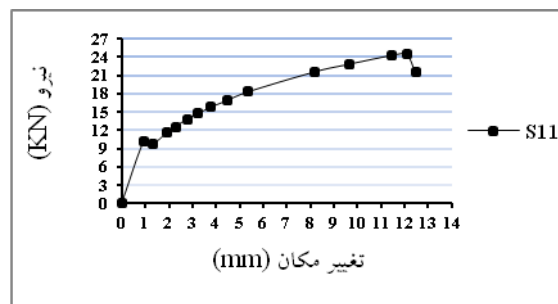
در نمونه  $S_{14}$  بدلیل استفاده از ورق ضخیم ( $2mm$ ) نمونه رفتاری الاستیک از خود نشان نداد. با توجه به شکل (۱۱)، قبل از اینکه ورق به مقاومت نهایی خود برسد قاب پیرامون تمایل به کماتش از خود نشان داد؛ که این موضوع نشان می دهد مد گسیختگی تابعی از ناپایداری قاب می شود و فقط یک افزایش ناچیزی در مقاومت سیستم، بواسطه افزایش ضخامت ورق پرکننده، ایجاد می شود.

همانطور که در نمونه های سری اول مشاهده گردید بدلیل وقوع کماتش زود هنگام در قاب پیرامونی از تمام ظرفیت ورق پرکننده استفاده نشد، بدلیل وجود مقاومت پس کماتشی در ورق ها و بمنظور بررسی بهتر این پدیده و انتقال مد گسیختگی از قاب پیرامونی به ورق پرکننده نمونه های سری دوم ( $S_2$ ) ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

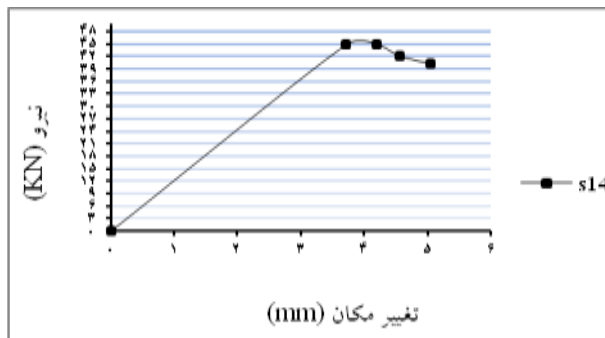
در همه نمونه های سری دوم ( $S_2$ ) با مشاهده اولین نشانه های کماتش برون صفحه ای در ورق پرکننده نمودار بار-تغییر مکان از مرحله خطی وارد مرحله غیر خطی گردید و بارگذاری تا زمان گسیختگی ورق پرکننده در محل اتصال با قاب پیرامون ادامه یافت.



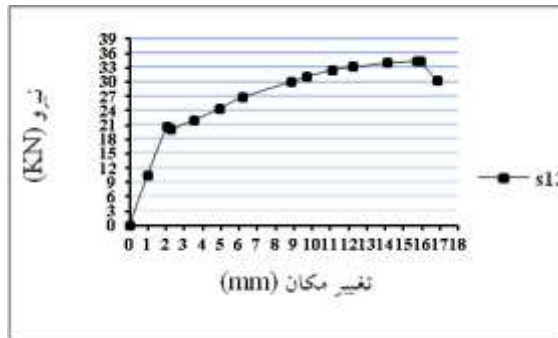
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۴): نمودار بار- تغییر مکان نمونه ها - (الف)  $S_{11}$  - (ب)  $S_{12}$  - (ج)  $S_{13}$  - (د)  $S_{14}$



شکل (۵): نحوه کماتش ورق پرکننده در نمونه  $S_{11}$



شکل (۶): نحوه کماتش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{12}$



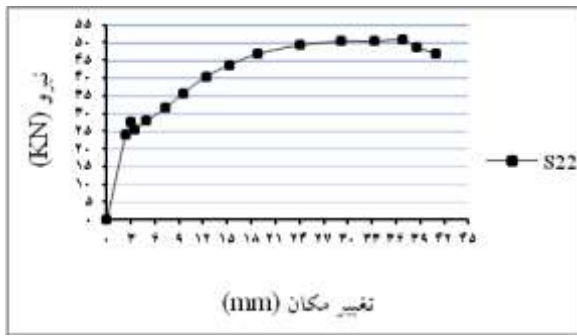
شکل (۷): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{13}$



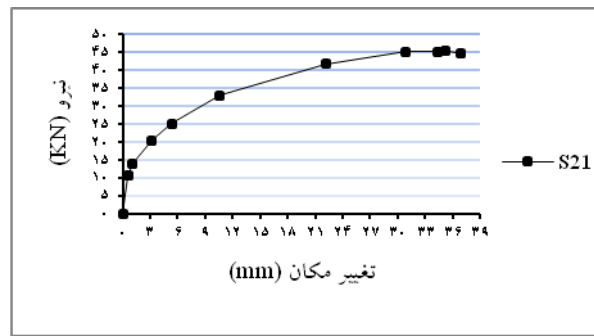
شکل (۸): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{14}$

از اینکه ورق به مقاومت نهایی خود برسد قاب پیرامون تمایل به کمانش از خود نشان داد؛ که این موضوع نشان می دهد مد گسیختگی تابعی از ناپایداری قاب می شود و فقط یک افزایش ناچیزی در مقاومت سیستم، بواسطه افزایش ضخامت ورق پرکننده، ایجاد می شود. در اینجا به عنوان یک نتیجه می توان اظهار داشت که استفاده از ورق های ضخیم به منظور بالا بردن مقاومت نهایی و مقاومت تسلیم، کاری بسیار ناکارآمد و غیر اقتصادی است چرا که این افزایش ضخامت در ورق مستلزم استفاده از ستون هایی با ضریب لاغری کم و مقاومت بالا است که این موضوع سیستم را کاملاً غیر اقتصادی و ناکارآمد می نماید.

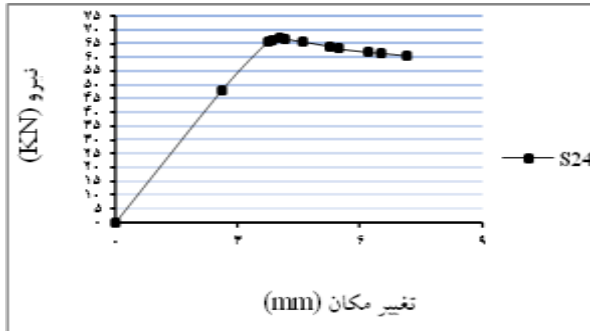
با توجه به شکل (۹) [نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د)] نمونه های  $S_{21}$ ،  $S_{22}$ ،  $S_{23}$  و  $S_{24}$  بترتیب در نیروهای  $11.3(KN)$ ،  $26.8(KN)$ ،  $24.08(KN)$  و  $66.9(KN)$  از مرحله خطی وارد مرحله غیر خطی شده و نیروی نهایی برای نمونه ها نیز بترتیب  $45.4(KN)$ ،  $51.4(KN)$ ،  $52.08(KN)$  و  $66.9(KN)$  بدست آمد. با توجه به شکل های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) مشاهده می شود کمانش ورق پرکننده در نمونه های سری دوم تقریباً همانند نمونه های سری اول می باشد و اختلاف موجود بدلیل ادامه بارگذاری تا گسیختگی ورق می باشد که خود منجر به ظهور نیم موج های دیگر گردید. در نمونه  $S_{24}$  بدلیل استفاده از ورق ضخیم  $2(mm)$ ، با توجه به شکل (۹)، قبل



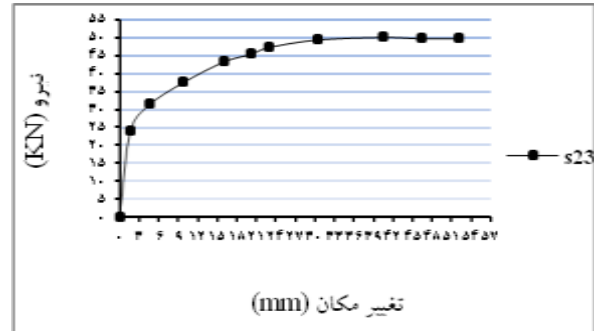
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۹): نمودار بار- تغییر مکان نمونه ها - (الف)  $S_{21}$  - (ب)  $S_{22}$  - (ج)  $S_{23}$  - (د)  $S_{24}$



شکل (۱۰): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{21}$



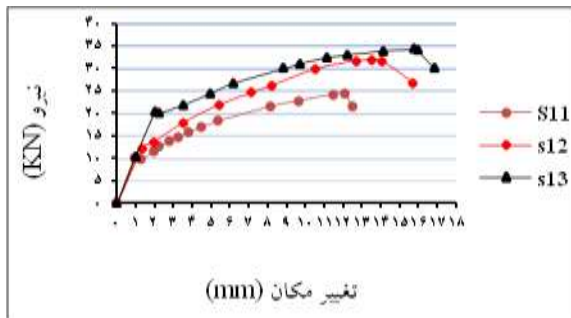
شکل (۱۱): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{22}$



شکل (۱۲): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{23}$

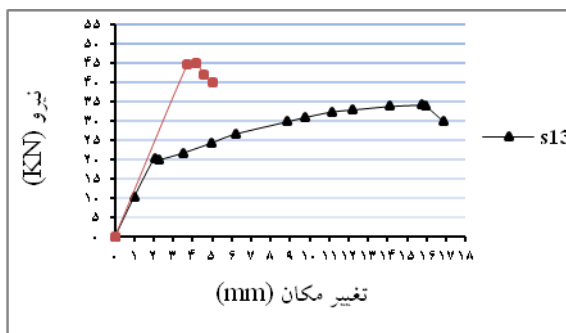


شکل (۱۳): نحوه کمانش ورق پرکننده و قاب در نمونه  $S_{24}$



شکل (۱۴): نمودار مقایسه ای بار- تغییر مکان نمونه های

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}$$



شکل (۱۵): نمودار مقایسه ای بار- تغییر مکان نمونه های

$$S_{13}, S_{14}$$

#### ۷- بررسی مقایسه ای نمونه های سری اول و دوم

با توجه به نمودار شکل (۱۴) که مربوط به نمونه های سری اول می باشد کاملاً مشخص است که نمونه با سخت کننده به فاصله 15(cm) (نمونه  $S_{13}$ ) عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه های سری اول از خود نشان می دهد. علی رغم ثابت بودن سختی اولیه در همه نمونه ها، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی در نمونه با سخت کننده به فاصله 15(cm) افزایش قابل توجهی داشته است. از نمودار شکل (۱۵) می توان دریافت که نمونه  $S_{13}$  شکل پذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه های سری اول از خود نشان داده است.

با توجه به نمودار های شکل (۱۸) می توان اظهار داشت افزایش ابعاد قاب تأثیر قابل توجهی بر روی شکل پذیری و مقاومت نهایی نمونه های سری دوم نسبت به نمونه های سری اول داشته است. علت اصلی آن رخ ندادن کماتش کلی قاب قبل از گسیختگی ورق پرکننده و استفاده از ظرفیت نهایی ورق پرکننده و همچنین افزایش سطح گیرداری ورق می باشد (افزایش سطح تماس ورق با قاب با توجه به استفاده از پروفیل با مقطع بزرگتر).

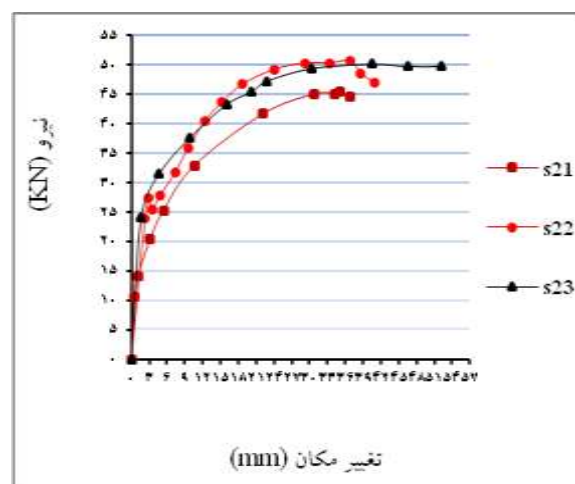
## ۸- نتایج

۱- با توجه به نتایج آزمایش و تحلیل های انجام شده بر روی نمونه ها، نمونه با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  ( $S_{23}$  و  $S_{13}$ ) عملکرد بهتری از خود در مقایسه با سایر نمونه ها نشان داد. می توان اظهار داشت بهترین فاصله بین سخت کننده ها در پانلهای برشی مربعی زمانی است که نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  برقرار باشد.

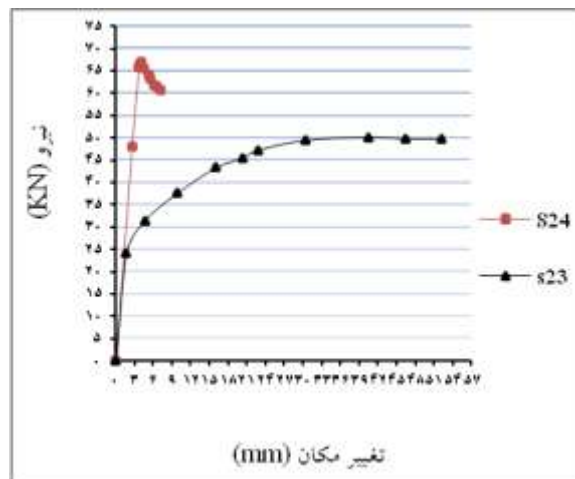
۲- همانطور که از نمودارهای مقایسه ای نمونه های سری اول به خوبی مشهود است سختی اولیه همه نمونه ها ( تا قبل از وقوع کماتش برون صفحه ای ورق پرکننده) با هم برابر بوده ولی سختی ثانویه در نمونه  $S_{13}$  با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  از سایر نمونه ها بیشتر می باشد.

۳- با توجه به نحوه کماتش ورق پرکننده در نمونه های سری اول ملاحظه گردید تعداد نیم موجهای کماتشی ورق پرکننده با کاهش فاصله بین سخت کننده ها افزایش می یابد که این موضوع بیانگر کاهش حداکثر کماتش برون صفحه ای ورق پرکننده در بین سخت کننده ها علی رغم افزایش نیروی نهایی، می باشد. همچنین می توان افزایش تعداد نیم موج ها را یکی از عوامل عمده افزایش میزان شکل پذیری دانست.

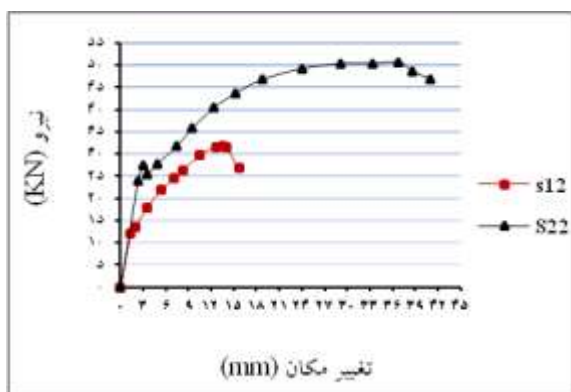
با توجه به شکل (۱۶) که مربوط به نمونه های سری دوم می باشد مشاهده می شود با تغییر فاصله بین سخت کننده ها تغییر قابل توجهی در رفتار سیستم ایجاد می شود و می توان گفت در نمونه با سخت کننده به فاصله 15(cm) (نمونه  $S_{23}$ ) رفتاری یکنواخت تر و مطلوب تر نسبت به سایر نمونه های سری دوم مشاهده می شود. همانطور که مشاهده می شود، سختی اولیه در همه نمونه های سری دوم تقریباً با هم برابر می باشد. از نمودار شکل (۱۷) می توان دریافت که نمونه  $S_{23}$  شکل پذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه های سری دوم از خود نشان داده است.



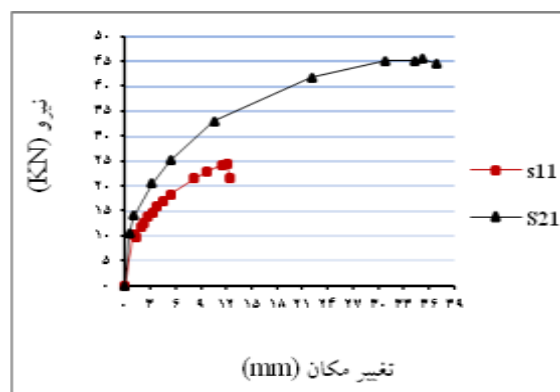
شکل (۱۶): نمودار مقایسه ای بار- تغییر مکان نمونه های  $S_{21}$ ،  $S_{22}$  و  $S_{23}$



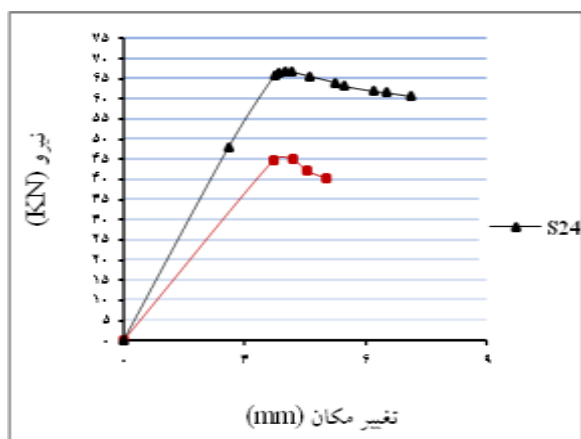
شکل (۱۷): نمودار مقایسه ای بار- تغییر مکان نمونه های  $S_{23}$  و  $S_{24}$



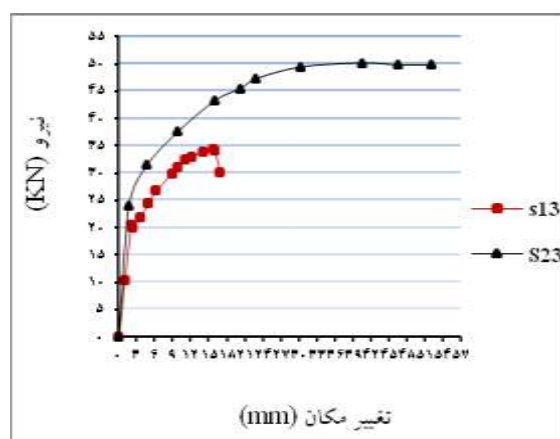
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۱۸): نمودارهای مقایسه ای بار-تغییر مکان نمونه های سری اول و سری دوم - (الف)  $S_{11}$  و  $S_{21}$  - (ب)  $S_{12}$  و

$S_{22}$  - (ج)  $S_{13}$  و  $S_{23}$  - (د)  $S_{14}$  و  $S_{24}$

یکی دیگر از عوامل مهم افزایش مقاومت نهائی و شکل پذیری نمونه های سری دوم را می توان به افزایش میزان گیرداری ورق پرکننده نسبت داد.

۶- با توجه به تحلیل آزمایش مربوط به نمونه های  $S_{14}$  و  $S_{24}$  مشاهده گردید استفاده از ورق ضخیم بمنظور افزایش مقاومت تسلیم و افزایش جذب انرژی عملی کاملاً غیر اقتصادی و ناکارآمد می باشد. چرا که علی رغم افزایش مقاومت تسلیم و نهائی سیستم، سیستم کاملاً رفتاری غیرالاستیک از خود نشان می دهد و قبل از اینکه ورق پرکننده به مقاومت نهائی خود برسد قاب (در دیوارهای برشی، ستون کناری) دچار کمانش کلی می شود که این

۴- همانطور که از نمودارهای مقایسه ای سری دوم مشهود است همه نمونه ها دارای سختی اولیه برابر بوده ولی سختی ثانویه و شکل پذیری نمونه  $S_{23}$  با نسبت  $\frac{h}{b} = \frac{1}{4}$  تا حدودی بیشتر از سایر نمونه ها است.

۵- از نمودارهای مقایسه ای سری اول و دوم می توان دریافت که با جلوگیری از کمانش کلی قاب می توان به یک شکل پذیری بسیار مطلوبی دست یافت. همانطور که بیان گردید در نمونه های سری دوم بمنظور جلوگیری از کمانش کلی قاب، از قاب با پروفیل قوطی بزرگتر استفاده شد که این موضوع سبب افزایش قابل توجه مقاومت نهائی سیستم و شکل پذیری آن گردید. باید خاطر نشان کرد که

9- Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.L. and Elwi, A.E. (1997), "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls", Struct. Eng. Rept. 215, University of Alberta, Canada.

10- Astaneh-Asl, A. and Zhao, Q. (2002), "Cyclic Behavior of Steel Plate Shear Wall Systems", Proceeding of Annual stability Conference, Structural Stability Research Council, Seattle.

11- Sabouri-Ghomi S, Ventura CE, Kharrazi MHK. (2005), "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Shear Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 878-89.

۱۲- صبوری، سعید. قلعهکی، مجید " آنالیز و طراحی دیوارهای برشی فولادی شکل پذیر با استفاده از مدل اندرکنش ورق با قاب"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۶.

۱۳- صبوری، سعید، "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی"، انتشارات انگیزه، ۱۳۸۰.

۱۴- آیین نامه ملی ساختمان ایران، مبحث ۱۰: طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، تهران، معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۷۷.

موضوع برای سیستم های جانبی که باید در مقابل بارهای جانبی رفتاری الاستیک مطلوب از خود نشان دهند مناسب نمی باشد

۷- با توجه به نمودار مقایسه ای بین نمونه های  $S_{13}$  و  $S_{14}$  و همچنین نمودار مقایسه ای بین نمونه های  $S_{23}$  و  $S_{24}$  مشاهده گردید با افزایش ضخامت ورق بطور قابل توجهی از شکل پذیری سیستم کاسته می شود.

## ۹- منابع

1-Astaneh-asl, A. (2001). "Seismic behavior and design of steel shear walls", Rep. prepared for Structural Steel Education Council, Univ of California at Berkely, Calif.

2- Takahashi, Y., Takeda, T., Takemoto, Y. and Takagi, M. (1973). "Experimental Study on Thin Steel Shear Walls and Particular steel Bracings under Alternative Horizontal Load", In Preliminary Report of the IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structure Acted on by Well Defined Repeated Loads, Lisbon, 185-191.

3- Timler, P.A. and Kulak, G.L. (1983), "Experimental Study of Steel Plate Shear Walls", Struct. Eng. Rept. 114, Dept. Civil Eng, Univ. Alberta.

4- Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. (1983), "Analysis and Design of Steel Shear Wall Systems", Struct. Eng. Rept. 107, Dept. Civil Eng, Univ. Alberta.

5- Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1991), "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Steel Plate Shear Panels", Thin-Walled Struct, 14, 145-162.

6- Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992), "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plate Shear Panels", Thin-Walled Struct, 14, 139-151.

7- Elgaaly, M. Caccese, V. (1993), "Postbuckling behavior of steel plate shear walls under cyclic loads", ASCE Journal of Structural Engineering, 119(2), PP. 588-605.

8- Rezaee, M.K., Ventura, C.E., Prion, H.G.L. and Lubell, A.S. (1997), "Vibration Testing of an Unstiffened Steel Plate Shear Wall Frame", Second Symposium on Applied Mechanics Structures: Seismic Eng, 4.