



اثر توزیع تنش ورق در میدان پس کمانش بر نیروهای برشی و اندرکنشی ورق در دیوارهای برشی فولادی

سعید صبوری^۱، سید رامین اسعد سجادی^۲
(دریافت: ۸۹/۹/۱۱، پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۵)

چکیده

دیوارهای برشی فولادی سیستمهای مقاوم در برابر بارهای جانبی می باشند. این دیوارها به دو صورت بدون سخت کننده و با سخت کننده بکار می روند. جهت تعیین نیرو و تغییر مکان برشی تسلیم شدن ورق و همچنین تنشهای اندرکنشی ایجاد شده از ورق بر روی قاب لازم است تا توزیع تنش ورق در میدان پس کمانش بررسی شود. در این تحقیق با استفاده از دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده و با سخت کننده توزیع تنش در ورق بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که برای تعیین نیروی برشی و تغییر مکان تسلیم شدن ورق، تنش اصلی سوم ورق در میدان پس کمانش باید برابر تنش برشی کمانشی ورق و برای تعیین تنشهای اندرکنشی ورق بر روی قاب، تنش اصلی سوم ورق در میدان پس کمانش برابر نصف تنش برشی کمانشی ورق در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی، تئوری اندرکنش ورق و قاب، تنش، پس کمانش

The Effect of Plate Stress Distribution in Post Buckling Field on Shear Force and Plate Interaction Force in Steel Plate Shear Walls

Saied Sabouri, Seyed Ramin Asad Sajadi

ABSTRACT

Steel plate Shear walls are resistible systems against horizontal loading. They are used without stiffeners and with stiffeners types. It is necessary that the plate stress distribution is studied for determining the shear force and yield displacement of plate and the plate stress interaction effects on frame. In this paper, the plate stress distribution is studied by using two experimental steel plate shear walls without stiffeners and with stiffeners. The results show that, the plate third principal stress in post buckling field should be equal the plate shear stress buckling for determining the shear and yield displacement of plate and should be equal the half of plate shear stress buckling for determining the plate stress interaction effects on frame.

Keyword

Steel Plate Shear Wall, Plate-Frame Interaction Theory, Stress, Post Buckling

۱. دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sabouri@kntu.ac.ir (نویسنده مسئول)
۲. پژوهشگر فوق دکترای عمران سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، rasajadi@yahoo.com



برای محاسبه اثر اندرکنش ورق باید از آنالیز غیر خطی در نرم افزار استفاده گردد تا اثر تسلیم شدن ورق بر روی قاب پیرامون در نظر گرفته شود.

تئوری اندرکنش ورق و قاب توسط صبوری ایجاد شد [۱۶-۱۰]. این تئوری، توانایی محاسبه رفتار نیروی برشی- تغییر مکان دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده، با سخت کننده، بدون بازشو و با بازشو را دارد همچنین اثر اندرکنش ورق بر روی قاب پیرامون را با استفاده از رابطه‌های تئوری کلاسیک، محاسبه می نماید.

هدف از این تحقیق بررسی توزیع تنش ورق برای محاسبه نیروی برشی، تغییر مکان تسلیم ورق و تنشهای اندرکنشی ورق بر روی قاب پیرامون درمیدان پس کمانش در دیوارهای برشی فولادی با و بدون سخت کننده بر پایه تئوری اندرکنش ورق و قاب است. برای این منظور از دو نمونه آزمایشگاهی و المان محدودی استفاده شده است. مدل‌های المان محدودی مشابه نمونه‌های مدل‌های آزمایشگاهی هستند که تحلیل المان محدودی آنها با نتایج آزمایشگاهی کالبره شده و برای بررسی توزیع تنش ورق از آنها استفاده شده اند.

۲- مشخصات هندسی نمونه های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی [۱۶] مورد استفاده در این تحقیق شامل دو نمونه دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده به نام DS-SPSW-0% و بدون سخت کننده به نام DS-PSW می باشد که در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده اند. نمونه ها در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران توسط مولفین تحت آزمایش قرار گرفته اند [۱۶].

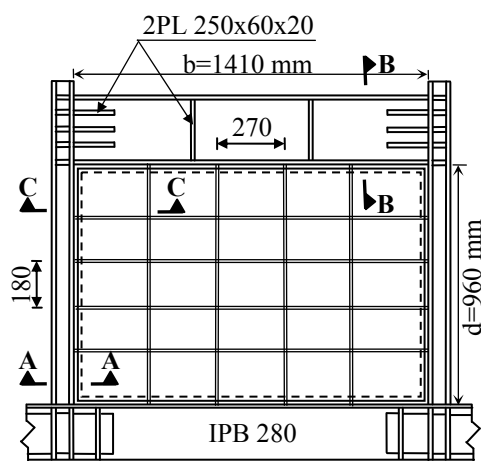
عرض و ارتفاع نمونه ها به ترتیب ۱۵۹۰ و ۱۲۵۰ میلیمتر بوده و در مقیاس یک سوم ساخته شده بودند. در دیوارهای برشی فولادی، ورق فولادی معمولاً به کمک ورق واسط به قاب پیرامون متصل می شود که در این نمونه ها برای اتصال ورق و سخت کننده ها به قاب پیرامون از یک قاب نبشی 60x60x6 میلیمتر استفاده شد. عرض و ارتفاع قاب

امروزه استفاده از دیوارهای برشی فولادی به علت توانایی زیاد آنها در مقابل بارهای جانبی و جذب انرژی زلزله در کشورهای مختلف گسترش یافته است [۱]. دیوارهای برشی فولادی به دو صورت با و بدون سخت کننده به کار می روند. یکی از عوامل کاهش دهنده جذب انرژی در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده، کمانش ورق در بارهای کم است. استفاده از سخت کننده باعث بهبود رفتار کمانشی ورق خواهد شد.

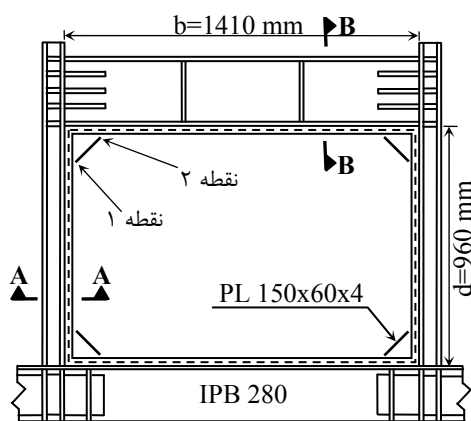
یکی از مهمترین عوامل موثر بر رفتار دیوارهای برشی فولادی، اثر اندرکنش نیروی ورق بر تیر و ستون پیرامون خود می باشد. در صورتی که تیر و ستونها در برابر تنش ناشی از کمانش ورق ضعیف باشند به طرف ورق کشیده می شوند و دیوار برشی فولادی کارایی خود را از دست می دهد که نتایج آزمایشها نیز آن را تایید می نماید [۲].

تاکنون تئوریهای مختلفی برای تعیین رفتار دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده ارائه شده است که برای حالت با سخت کننده گسترش داده نشده است. تروپورن، کولاک و همکاران [۳] و تیملر و کولاک [۴] روش مدل میله‌ای را برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بدون سخت کننده گسترش دادند. در این روش ورق به یک سری نوارهای مورب موازی تقسیم می شود، سپس ورق نوارها با یک سری میله های خربایی موازی که فقط تحمل نیروی کششی را دارند، جایگزین می شوند. محققین مختلفی نتایج تحلیلی این روش را با استفاده از آزمایشهای مختلف مقایسه کرده اند [۵-۸] و برای اصلاح آن روشهایی نظیر اصلاح منحنی تنش - کرنش میله های خربایی [۶] و اصلاح زاویه قرارگیری میله ها [۸]، پیشنهاد شده است. برمن و برونو [۹] با استفاده از تشکیل مکانیسم در مدل‌های میله ای و قاب رابطه ای را برای تعیین نیروی برشی دیوار برشی فولادی ارائه نموده اند. در این مدل محاسبه اثر اندرکنشی ورق بر روی قاب پیرامون دارای دو محدودیت است. اول این که ورق مورد استفاده در این مدل باید نازک و بدون سخت کننده باشد. دوم این که

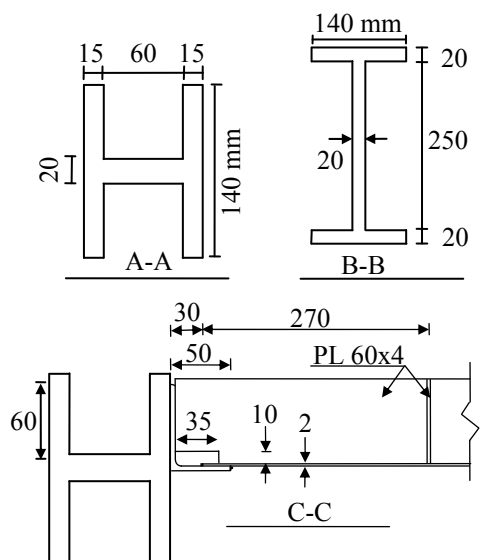




(الف)



(ب)



شکل (۱): مشخصات نمونه های آزمایشگاهی [۱۶]

الف- DS-SPSW-0% - ب- DS-PSW

نشی به ترتیب ۱۴۱۰ و ۹۶۰ میلیمتر بودند. برای انجام دقیق جوشکاری اتصال ورق به لبه نشی یکی از اضلاع نشی تراشکاری شد تا لبه آن کاملاً صاف گردد که بدین وسیله یک ضلع نشی به طول ۵۰ میلیمتر کاهش داده شد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

سخت کننده ها دارای عرض و ضخامت به ترتیب ۶۰ و ۴ میلیمتر بودند و بر روی ورق نصب شده و دوسر آنها به قاب نشی جوش شده بودند. سخت کننده ها صرفاً در یک طرف بر روی ورق نصب شده بودند که در شکل (۱) نشان داده شده اند. ورق محصور بین سخت کننده ها در نمونه DS-SPSW-0% زیر صفحه نامیده می شود.

عرض و ضخامت بالهای ستون به ترتیب ۱۴۰ و ۱۵ میلیمتر بودند و جان ستونها دارای عرض ۶۰ میلیمتر و ضخامت ۲۰ میلیمتر بودند. عرض بالهای تیر بالای نمونه ۱۴۰ میلیمتر و ضخامت آن ۲۰ میلیمتر بودند. عرض و ضخامت جان ستونها به ترتیب ۲۵۰ و ۲۰ میلیمتر بودند که در شکل (۱) نشان داده شده اند.

در نمونه DS-PSW چهار سخت کننده کوچک در گوشه های ورق جهت جلوگیری از زپ شدگی در یک طرف ورق نصب شده بودند و دو سر سخت کننده ها به نام نقطه های شماره های (۱) و (۲) شماره گذاری شده اند. که مشخصات آن در شکل (۱) نشان داده شده اند.

جنس ورق مورد استفاده از نوع فولاد با مقاومت پایین با تنش تسلیم شدن ۱۹۲/۴ مگاپاسکال و جنس تیر و ستون از نوع فولاد با مقاومت بالا با تنش تسلیم شدن ۴۱۴/۸ مگاپاسکال انتخاب شد.

نمونه ها بوسیله یک تیر IPB280 تقویت شده به کف صلب آزمایشگاه متصل شده بودند و در داخل یک قاب نگهدارنده قرار گرفته بودند. نیروهای رفت و برگشتی بوسیله دو جک در در طرفین تیر بالایی وارد می شدند.

۳- نمونه های المان محدودی

برای مدلسازی نمونه های آزمایشگاهی با استفاده از المان محدود از نرم افزار المان محدودی ANSYS استفاده شد. ورق، نبشی، سخت کننده ها با استفاده از المان Shell 181، المانهای ستون و تیر بالا با استفاده از المان Solid 45 مدل شدند. همچنین از منحنی تنش- کرنش واقعی مصالح استفاده شد. شرایط گیرداری نمونه دقیقاً مانند حالت آزمایشگاهی آن در نظر گرفته شد. برای اتصال ورق به قاب پیرامون مطابق نمونه آزمایشگاهی از نبشی استفاده شد. دو ضلع نبشی با استفاده از المان Shell 181 مدل شدند. یکی از اضلاع نبشی بر روی المانهای Solid 45 ستونها با استفاده از المان Shell 181 مدل شد (مانند نمونه آزمایشگاهی) و یکی از اضلاع نبشی به صورت عمود بر المانهای Solid 45 مدل شد و المانهای ورق به آن متصل شدند که در نتیجه گره های مشترک بین المانهای Solid 45 و Shell 181 دارای سختی خمشی نیز شدند و شرایط مدلهای آزمایشگاهی محقق شد.

برای ایجاد کمانش در ورق، اعوجاج کوچکی مطابق با شکل مد اول کمانش به ورق اعمال شد. مکان وارد شدن بار جانبی دقیقاً مانند حالت آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. در تحلیل المان محدودی از روش غیر خطی هندسی و مصالح از نوع کینماتیک چند خطی استفاده شد. همچنین اثر نیروی محوری بر سختی المان و تغییر شکل های بزرگ نیز در نظر گرفته شد.

۴- تئوری اندر کنش ورق و قاب

در این تئوری دیوار برشی فولادی به صورت یک طبقه مجزا فرض می شود [۱۴-۱۰] که در شکل (۲) نشان داده شده است. تئوری، با فرض شرایط زیر بدست آمده است:

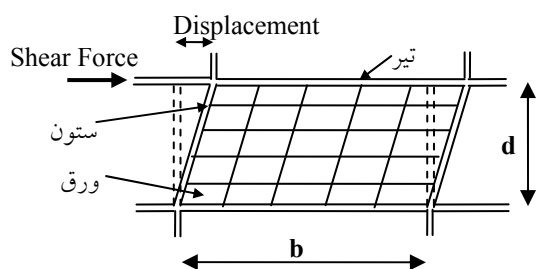
- ۱- رفتار فولاد بصورت الاستیک - پلاستیک کامل است.
- ۲- ستونها به اندازه کافی صلب هستند بطوریکه تحت میدان کششی ورق دچار جمع شدگی نشده و میدان پس کمانش بصورت یکنواخت تمام سطح ورق را فرا بگیرد.

۳- اتصال ورق فولادی با قاب پیرامون خود بصورت ساده فرض می شود.

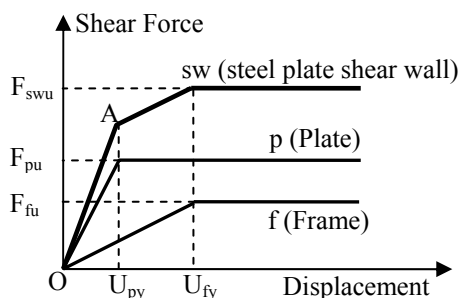
۴- اثر تنش های ناشی از خمش بر روی تنش های کمانشی ورق قابل صرف نظر است.

منحنی رفتاری نیروی برشی - تغییر مکان برای ورق و قاب پیرامون به طور جداگانه محاسبه شده سپس با جمع آنها منحنی نیروی برشی - تغییر مکان دیوار برشی فولادی بدست می آید که در شکل (۳) نشان داده شده است. در شکل (۳)، U_{py} تغییر مکان برشی تسلیم شدن ورق، U_{fy} تغییر مکان برشی تشکیل مفصلهای پلاستیک در قاب، F_{pu} نیروی برشی تسلیم شدن ورق، F_{fu} نیروی برشی تسلیم شدن ورق، F_{swu} نیروی پلاستیک در قاب و F_{swu} نیروی برشی فولادی است و از رابطه (۱) بدست می آید:

$$F_{swu} = F_{pu} + F_{fu} \quad (1)$$



شکل (۲): دیوار برشی فولادی به صورت یک طبقه [۱۳]



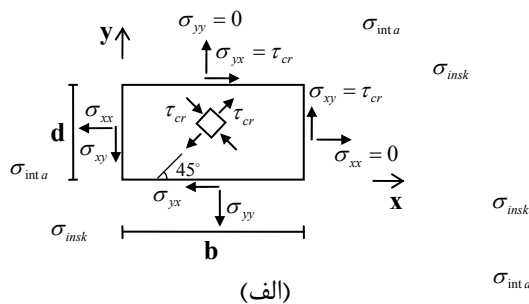
شکل (۳): مولفه های تئوری اندرکنش ورق و قاب در

دیوار برشی فولادی [۱۳]

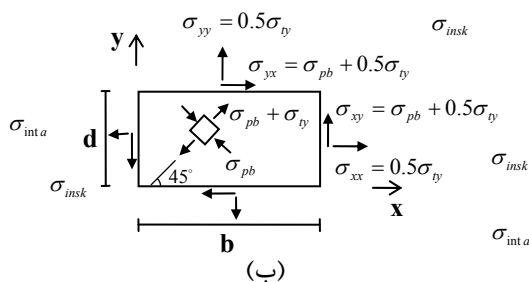
نیروی برشی ورق فولادی هنگام کماتش از رابطه (۵) بدست می آید [۱۴-۱۰]:

$$F_{per} = \tau_{cr} \cdot b \cdot t \quad (5)$$

پس از کماتش، موجهایی در ورق ایجاد می شود که به آن میدان پس کماتش گفته می شود. توزیع میدان تنش در میدان پس کماتش، مطابق شکل (۵-ب) فرض می شود. مطابق شکل (۵-ب)، موجهای میدان پس کماتش با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در تمام سطح ورق ایجاد می شود [۱۳]. تنش های ورق پس از تشکیل میدان پس کماتش مطابق شکل (۵-ب) از رابطه های (۶) تا (۸) بدست می آیند:



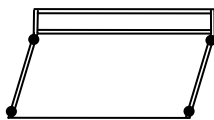
(الف)



(ب)

شکل (۵): وضعیت تنشها در ورق فولادی

الف- قبل از کماتش ورق ب- در میدان پس کماتش



● مفصل پلاستیک

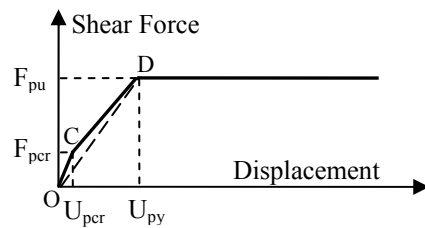
شکل (۶): تشکیل مفصلهای پلاستیک

در نمونه های آزمایشگاهی

$$\sigma_{xx} = 0.5\sigma_{ty} \quad (6)$$

$$\sigma_{yy} = 0.5\sigma_{ty} \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_{pb} + 0.5\sigma_{ty} \quad (8)$$



شکل (۴): منحنی بار - تغییر مکان ورق [۱۳]

سختی دیوار برشی فولادی با استفاده از شکل (۳) از رابطه (۲) بدست می آید:

$$K_{sw} = K_p + K_f \quad (2)$$

در رابطه (۲)، K_{sw} سختی برشی دیوار برشی فولادی، K_p سختی برشی ورق و K_f سختی برشی قاب هستند.

۴-۱- تعیین رفتار نیروی برشی - تغییر مکان ورق

منحنی بار - تغییر مکان ورق در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۴)، نقطه C نشاندهنده نقطه ای است که در آن ورق کماتش می کند و نقطه D حد تسلیم ورق فولادی را نشان می دهد. در شکل (۴)، F_{per} و U_{per} تغییر مکان و نیروی برشی متناظر کماتش ورق است. تا قبل از کماتش ورق وضعیت تنشهای ورق در شکل (۵-الف) نشان داده شده اند. تنش برشی کماتشی ورق فولادی در ناحیه الاستیک با فرض اتصال مفصلی ورق به قاب پیرامون از تنش کماتش اوایلر مطابق رابطه (۳) بدست می آید [۱۷]:

$$\tau_{cr} = \frac{K_t \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، τ_{cr} تنش بحرانی کماتش برشی ورق در ناحیه الاستیک، σ_y تنش تسلیم شدن، t ضخامت، E ضریب ارتجاعی، ν ضریب پواسون، b دهانه ورق مطابق شکل (۱) و K_t ضریب کماتش برشی ورق است که از رابطه (۴) بدست می آیند [۱۷]:

$$d/b \geq 1 \Rightarrow K_t = 5.35 + 4(b/d)^2 \quad (4)$$

$$d/b \leq 1 \Rightarrow K_t = 5.35(b/d)^2 + 4$$

که در رابطه (۴)، d ارتفاع ورق می باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است. در این حالت مطابق شکل (۵-الف)

مفصلهای پلاستیک، تغییر مکان و سختی متناظر آن از رابطه‌های (۱۷) تا (۱۹) بدست می‌آیند [۱۰-۱۴]:

$$F_{fu} = 4M_{fp} / d \quad (17)$$

$$U_{fu} = (M_{fp} d^2) / (6EI_f) \quad (18)$$

$$K_f = 24EI_f / d^3 \quad (19)$$

در این رابطه‌ها M_{fp} لنگر پلاستیک مقطع ستونها، I_f ممان اینرسی مقطع ستونها است.

۵- کالیبراسیون نمونه های المان محدودی با آزمایشگاهی

در تئوری اندرکنش ورق و قاب تعیین رابطه‌های (۱۱) تا (۱۶) وابسته به تعیین σ_{pb} (تنش اصلی سوم ورق) است. در ناحیه الاستیک، قانون هوک برقرار بوده و تنشهای ایجاد شده در ورق با استفاده از نتایج کرنش سنجهای نصب شده بر روی ورق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی قابل تعیین است لیکن در ناحیه پلاستیک، قانون هوک برقرار نبوده بنابراین از نتایج کرنش سنجهای نصب شده بر روی ورق نمی‌توان توزیع تنش را در ورق تسلیم شده محاسبه نمود. بنابراین برای تعیین توزیع تنش در ورق به خصوص در زمان تسلیم شدن آن از روش المان محدود استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از المان محدود مدل شده و مدل‌های المان محدودی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده اند. در این تحقیق برای کالیبراسیون نمونه‌های المان محدودی با نتایج آزمایشگاهی رفتار کلی نمونه‌های آزمایشگاهی با المان محدودی و همچنین سختی و مقاومت برشی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. رفتار آزمایشگاهی نمونه‌ها در مرجع ۱۶ توسط مولفین آورده شده است.

در شکل‌های (۷) و (۸) منحنیهای چرخه ای نمونه های آزمایشگاهی و پوش المان محدودی آنها نشان داده شده اند. در شکل‌های (۷) و (۸)، F_{max} حداکثر نیروی برشی قابل تحمل در نمونه های آزمایشگاهی است.

نمونه های آزمایشگاهی مطابق استاندارد ATC-24 [۱۹] زیر بار چرخه ای قرار گرفتند.

در رابطه های (۶) تا (۸)، σ_{xx} ، σ_{yy} ، σ_{xy} ، σ_{yx} تنشهای لبه های ورق هستند. همچنین σ_{pb} تنش اصلی سوم ورق و σ_{ty} تنش حد تسلیم ورق در میدان پس کماتش هستند. مطابق معیار تسلیم شدن فون میسز، تسلیم شدن ورق زمانی اتفاق می افتد که رابطه (۹) برقرار باشد [۱۰-۱۴]:

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 6\sigma_{xy}^2 - 2\sigma_y^2 = 0 \quad (9)$$

با قرار دادن رابطه‌های (۶) تا (۸) در رابطه (۹)، رابطه (۱۰) برای محاسبه تنش σ_{ty} حاصل می‌شود:

$$\sigma_{ty}^2 + 3\sigma_{pb}\sigma_{ty} + 3\sigma_{pb}^2 - \sigma_y^2 = 0 \quad (10)$$

مقاومت نیروی برشی ورق در نقطه D در شکل (۴) در حالت وضعیت تنش شکل (۵-ب) از رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

$$F_{pu} = \sigma_{xy}bt = (\sigma_{pb} + 0.5\sigma_{ty})bt \quad (11)$$

تغییرمکانهای U_{py} و U_{pcr} با مساوی قرار دادن انرژی داخلی ورق [۱۸] و کار خارجی بدست آمده از منحنی شکل ۴ در نقاط C و D مطابق رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) بدست می‌آیند:

$$U_{pcr} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{cr} d \quad (12)$$

$$U_{py} = \frac{\bar{w}d + (\sigma_{pb} + 0.5\sigma_{ty})(1+\nu)\tau_{cr}d/E}{0.5(\tau_{cr} + \sigma_{pb} + 0.5\sigma_{ty})} \quad (13)$$

که در رابطه ۱۳، \bar{w} از رابطه ۱۴ بدست می‌آید:

$$\bar{w} = \frac{1}{2E} (\sigma_{ty}^2 + 2(1+\nu)(\sigma_{pb}^2 + \sigma_{pb}\sigma_{ty})) \quad (14)$$

تنش مکشی (σ_{insk}) و برشی (σ_{inta}) اندرکنش ورق بر روی قاب در نقطه D (شکل ۴) در حالت وضعیت تنش شکل (۵-ب) برابر هستند با:

$$\sigma_{insk} = 0.5\sigma_{ty} \quad (15)$$

$$\sigma_{inta} = \sigma_{pb} + 0.5\sigma_{ty} \quad (16)$$

۴-۲- تعیین رفتار نیروی برشی-تغییر مکان قاب

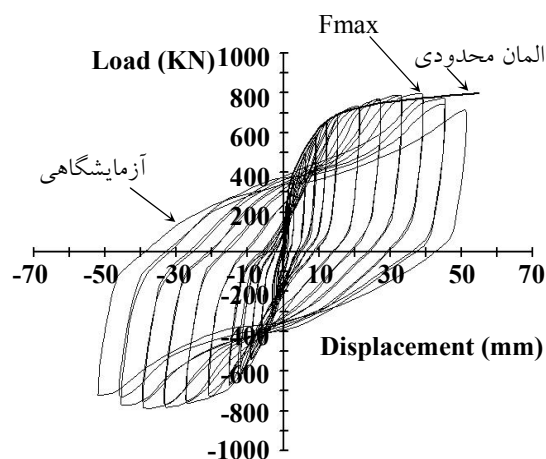
در نمونه های DS-SPSW-0% ، DS-PSW مفصلهای پلاستیک در بالا و پایین ستونها تشکیل می‌شوند که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند بنابراین نیروی برشی تشکیل



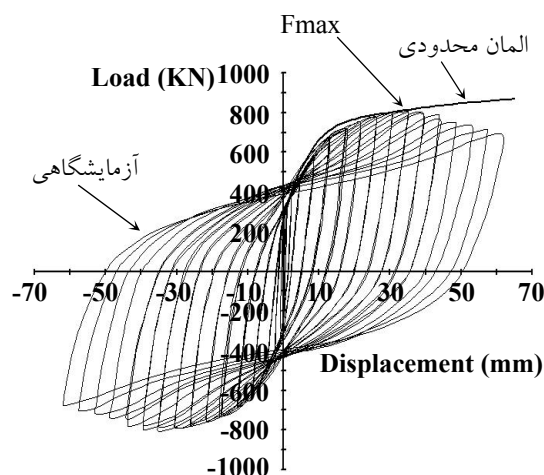
آزمایشگاهی و المان محدودی در نقطه متناظر F_{max} (شکل ۷) در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود تشابه مناسبی در نحوه تشکیل میدان پس کماتش در نمونه المان محدودی نسبت به نمونه آزمایشگاهی وجود دارد. نتایج المان محدودی نشان داد که در میدان پس کماتش هر دو تنش اندرکنشی مکشی (σ_{insk}) و برشی (σ_{inta}) از طرف ورق بر روی تیر و ستون وارد می‌شدند.

سختی اولیه بدست آمده از روش المان محدود ۲/۴ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد همچنین در نمونه های یاد شده مقدار بار حاصل از نتایج المان محدود در نقطه F_{max} (شکل ۷) به مقدار ۳/۴- درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی تفاوت دارد که قابل صرف نظر کردن است.

در نمونه آزمایشگاهی، در تغییر مکان ۹ میلیمتر پارگی کوچکی در ورق از گوشه نقطه ۱ سخت کننده های نصب شده در گوشه های ورق (شکل ۱) شروع شد و ابتدا با افزایش بار پارگی از یک گوشه نبشی به داخل ورق مثلثی محصور به سخت کننده و نبشی ها گسترش یافته سپس به طرف قسمت بیرون ورق مثلثی در لبه ورق و نبشی گسترش یافت. پارگی ورق به آرامی صورت می گرفت. ورق از لبه نبشی فقط از نقطه ۱ سخت کننده (شکل ۱) جدا می شد و از نقطه ۲ سخت کننده پارگی دیده نمی شد. نتایج آزمایش نشان داد که تا لحظه بار F_{max} ، پارگی یاد شده تاثیر زیادی بر روی مقاومت ورق نمی گذاشت و از بار F_{max} به بعد پارگی یاد شده باعث ایجاد نرم شدگی در منحنی چرخه ای شد. در نمونه المان محدودی، از آن جایی که تئوری مکانیک شکست در نظر گرفته نشده است، از بار F_{max} به بعد نرم شدگی در منحنی پوش دیده نشود که در شکل (۷) نشان داده شده است. کرنش سنجهای نصب شده بر روی بالهای ستونها در نمونه آزمایشگاهی و نتایج آنالیز در نمونه المان محدودی نشان دادند که مفصلهای پلاستیک در بالا و پایین ستونها تشکیل شدند که در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۷): منحنی چرخه ای و المان محدودی نمونه آزمایشگاهی DS-PSW



شکل (۸): منحنی چرخه ای و المان محدودی نمونه آزمایشگاهی DS-SPSW-0%

۱-۵- مقایسه رفتار آزمایشگاهی و المان محدودی در

نمونه DS-PSW

نتایج آزمایشگاهی و المان محدودی نشان دادند که ورق این نمونه در بارگذاری بسیار پایین کماتش کرد. نتایج المان محدودی نشان داد که تنش برشی ورق در زمان کماتش در حدود ۰/۰۳۲ تنش تسلیم شدن ورق (۶/۲ مگا پاسکال) بود. در هر دو نمونه آزمایشگاهی و المان محدودی پس از ایجاد کماتش در ورق، موجهای پس کماتش در ورق ایجاد شد که میدان پس کماتش در حالت

۵-۲- مقایسه رفتار آزمایشگاهی و المان محدودی در

نمونه DS-SPSW-0%

نتایج آزمایشگاهی و المان محدودی نشان دادند ورق زیر صفحه ها ابتدا تسلیم شده و سپس موجهای پس کمانش در آنها ایجاد می شوند.

میدان پس کمانش در حالت آزمایشگاهی و المان محدودی در نقطه متناظر F_{max} (شکل ۸) در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می شود تشابه مناسبی در نحوه تشکیل میدان پس کمانش در نمونه المان محدودی نسبت به نمونه آزمایشگاهی وجود دارد.

نتایج المان محدودی نشان دادند که در نقطه تسلیم شدن ورق زیر صفحه ها (میدان پس کمانش ایجاد نشده است) تنش اندرکنشی مکشی (σ_{insk}) برابر صفر و صرفاً تنش برشی (σ_{inta}) از طرف ورق بر روی تیر و ستون وارد می شدند. پس از تسلیم شدن ورق، میدان پس کمانش در زیر صفحه ها ایجاد شد و نتایج المان محدودی نشان دادند که هر دو تنش اندرکنشی مکشی (σ_{insk}) و برشی (σ_{inta}) از طرف ورق بر روی تیر و ستون وارد می شدند.

سختی اولیه بدست آمده از روش المان محدود ۵/۳- درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد همچنین در نمونه های یاد شده مقدار بار حاصل از نتایج المان محدود در نقطه F_{max} (شکل ۷) به مقدار ۲ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی تفاوت دارد که قابل صرف نظر کردن است.

اولین پارگی ورق در نمونه آزمایشگاهی در تغییر مکان ۲۱/۶ میلیمتر بصورت سوراخ کوچکی در میانه یکی از زیر صفحه ها ایجاد شد و با افزایش تغییر مکان زیر صفحه های دیگر نیز شروع به پاره شدن نمودند. پارگی ایجاد شده به علت انحنای شدید موجهای پس کمانش بود. انحنای زیاد موج باعث می شد تا ضخامت ورق در بالاترین انحنای موج کاهش می یافت سپس بعد از چند حلقه بارگذاری دچار پارگی می شد.

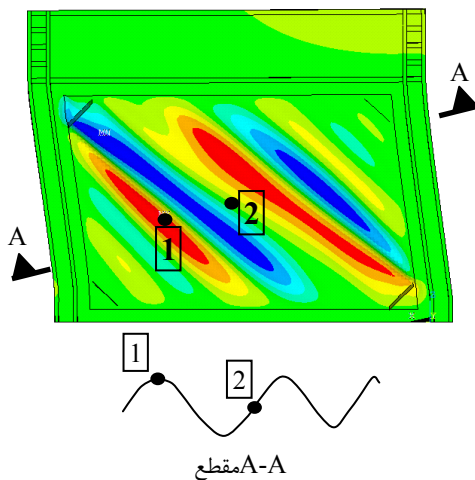
با افزایش بار، پارگیهای کوچک ایجاد شده در وسط زیر صفحه ها رشد نمودند. در نمونه هیچگونه پارگی به صورت زیپ شدگی بین ورق و لبه نبشی دور تا دور قاب بوجود نیامد. پارگیهای کوچک موضعی ایجاد شده در وسط زیر صفحه ها تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه نگذاشت. در نمونه پارگی وسط ورق به تدریج و آرامی صورت می گرفت.

در بار F_{max} زیر صفحه ها دارای پارگی در وسط زیر صفحه بودند ولی این پارگی به اندازه ای بود که ورق در وسط زیر صفحه پیوستگی خود را حفظ کرده بود که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۹): تغییر شکل نمونه آزمایشگاهی

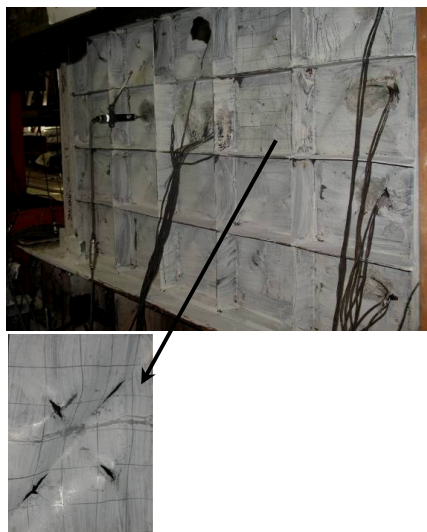
DS-SPSW در بار F_{max}



شکل (۱۰): مکان نقاط بررسی تنش در نمونه

المان محدودی DS-SPSW

مطابق موارد یاد شده در نمونه‌های DS-PSW و DS-0% SPSW نتایج المان محدودی تا نقطه متناظر بار F_{max} دارای انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی هستند. محدوده مورد مطالعه در این تحقیق بررسی وضعیت توزیع تنش σ_{pb} (تنش اصلی سوم ورق) تا نقطه متناظر بار F_{max} (شکل‌های ۷ و ۸) می‌باشد که با توجه به انطباق مناسب نتایج المان محدودی با نتایج آزمایشگاهی دارای قابلیت اطمینان مناسبی می‌باشند.



شکل (۱۱): تغییر شکل و پارگی ورق در نمونه

DS-SPSW-0% در بار F_{max}

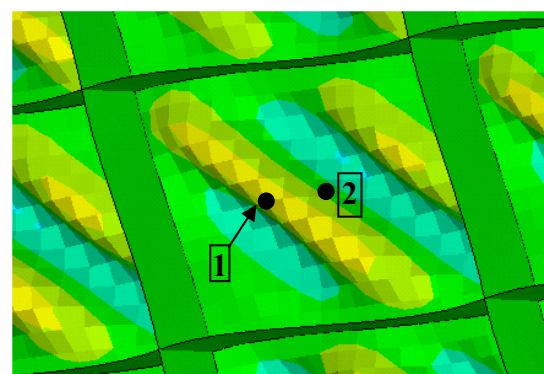
۶- تعیین تنش اصلی سوم ورق (σ_{pb}) در تئوری اندرکنش ورق و قاب

وضعیت تنش‌های اصلی با استفاده از نمونه‌های المان محدودی DS-PSW و DS-SPSW-0% بررسی شده است. توزیع تنش در دو نقطه قله و عطف موج پس کمانش مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل‌های (۱۰) و (۱۲) نشان داده شده‌اند. در این حالات تنش اصلی سوم ورق که منفی نیز است مطابق شکل ۵ تا قبل از کمانش ورق τ_{cr} و بعد از کمانش ورق σ_{pb} است و برای دو نمونه در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده‌اند. در تئوری اندرکنش ورق و قاب مقدار σ_{pb} به صورت ضریب (α) از τ_{cr} مطابق رابطه ۲۰ تعیین می‌شود:

$$\alpha = \sigma_{pb} / \tau_{cr} \quad (20)$$

مطابق شکل (۱۳) در نمونه DS-PSW، در تغییر مکان تسلیم شدن ورق (U_{py}) مقدار تنش σ_{pb} برای متوسط تنش نقطه‌های ۱ و ۲ برابر ۲/۸ تنش τ_{cr} است ($\alpha = 2.8$). بعد از تسلیم شدن ورق مقدار تنش σ_{pb} ابتدا به شدت کاهش یافته سپس تقریباً ثابت شده است در این حالت $\alpha = 0.54$ است.

مطابق شکل (۱۴) در نمونه DS-SPSW، در تغییر مکان تسلیم شدن ورق (U_{py}) تنش σ_{pb} تقریباً برابر تنش τ_{cr} و تنش برشی تسلیم شدن ورق است بنابراین در این تغییر مکان، $\alpha = 1$ است. به عبارتی در این نمونه کمانش و تسلیم شدن ورق تقریباً در یک تغییر مکان اتفاق افتاده است. بعد از تسلیم شدن ورق مقدار تنش σ_{pb} ابتدا به



شکل (۱۲): مکان نقاط بررسی تنش در

نمونه المان محدودی DS-SPSW-0%

با افزایش تغییر مکان، پارگی ایجاد شده در وسط زیر صفحه‌ها گسترش می‌یافت. از بار F_{max} به بعد مقاومت ورق به علت گسترش پارگی کاهش یافت و باعث ایجاد نرم شدگی در منحنی چرخه ای شد که در شکل (۸) نشان داده شده است. در نمونه المان محدودی از آن جایی که تئوری مکانیک شکست در نظر گرفته نشده است، از بار F_{max} به بعد نرم شدگی در منحنی پوش دیده نمی‌شود که در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. کرنش سنجهای نصب شده بر روی بالهای ستونها در نمونه آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی در نمونه المان محدودی نشان دادند که مفصلهای پلاستیک در بالا و پایین ستونها تشکیل شدند که در شکل (۶) نشان داده شده است.

α	F_{pu}	U_{py}	σ_{inta}
0.40	-5.15%	6.87%	-5.15%
0.50	-3.65%	4.26%	-3.65%

همانطور که در این دو جدول دیده می‌شود تاثیر α بر پارامترهای یاد شده قابل صرف نظر کردن است. در جدول (۱) اختلاف σ_{insk} برای α های مختلف نسبت به $\alpha = 1$ برای نمونه DS-PSW آورده شده است همانطور که در این جدول دیده می‌شود تاثیر α بر σ_{inta} قابل صرف نظر کردن است.

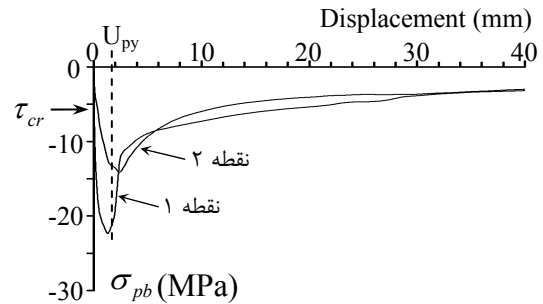
در نمونه DS-SPSW در تغییر مکان تسلیم شدن ورق (U_{py}) مقدار $\alpha = 1$ بوده (قبل از کمانش ورق) و مطابق رابطه های (۱۰) و (۱۵) مقدار $\sigma_{insk} = 0$ می‌باشد و پس از ایجاد کمانش ورق مقدار $\alpha = 0.4$ بوده و مطابق رابطه های (۱۰) و (۱۵) مقدار $\sigma_{insk} = 0.32\sigma_y$ خواهد شد به عبارت دیگر در نمونه DS-SPSW مقدار تنش اندرکنشی σ_{insk} نسبت به مقدار α حساسیت قابل توجهی دارد.

در تئوری اندرکنش ورق و قاب برای تعیین F_{pu} ، U_{py} مقدار $\alpha = 1$ در نظر گرفته می‌شود [۱۳] در نتیجه مطابق رابطه (۱۰)، در نمونه DS-SPSW-0% در تغییر مکان U_{py} مقدار $\sigma_{ty} = 0$ حاصل می‌شود به عبارت دیگر مطابق شکل (۴) نقطه C بر روی D منطبق می‌شود که مطابق نتایج آزمایشگاهی بوده و ورق تا قبل از تسلیم شدن تحت تنش برشی وارد ناحیه پس کمانش نشده است همچنین در نمونه DS-PSW تنش برشی کمانشی (τ_{cr}) تقریباً صفر بوده و مطابق شکل ۴ نقطه C بر نقطه O منطبق می‌شود. در این نمونه در تغییر مکان U_{py} مقدار $\sigma_{ty} = \sigma_y$ حاصل می‌شود.

مقایسه سختی برشی بدست آمده از رابطه (۲) با فرض $\alpha = 1$ و سختی بدست آمده از منحنی‌های آزمایشگاهی چرخه‌ای نشان می‌دهند که اختلاف سختی برشی تئوری نسبت به آزمایشگاهی برای نمونه های DS- و DS-PSW-0% کمتر از ۷ درصد است که قابل صرف نظر کردن بوده و نشان‌دهنده درستی فرض یاد شده ($\alpha = 1$) برای

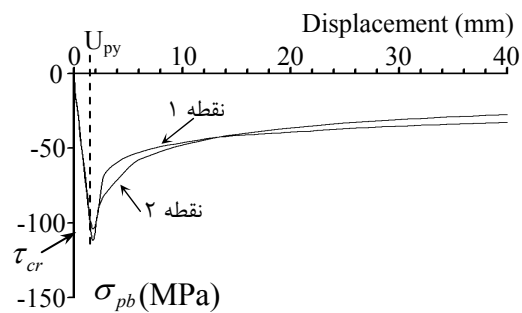
شدت کاهش یافته سپس تقریباً ثابت شده است که در این حالت $\alpha = 0.4$ است.

در جدول‌های (۱) و (۲) اختلاف F_{pu} ، U_{py} و σ_{inta} برای α های مختلف نسبت به $\alpha = 1$ در هر دو نمونه آورده شده است.



شکل (۱۳): وضعیت تنش اصلی سوم در نمونه

المان محدودی DS-PSW



شکل (۱۴): وضعیت تنش اصلی سوم در نمونه

المان محدودی DS-SPSW-0%

جدول (۱): اختلاف پارامترهای تئوری اندرکنش ورق و قاب

با α های مختلف نسبت به $\alpha = 1$ در نمونه DS-PSW

α	F_{pu}	U_{py}	σ_{inta}	σ_{insk}
0.50	-0.73%	2.23%	-0.73%	2.45%
0.54	-0.67%	2.04%	-0.67%	2.26%
2.80	2.49%	-6.47%	2.49%	-8.99%

جدول (۲): اختلاف پارامترهای تئوری اندرکنش ورق و قاب

با α های مختلف نسبت به $\alpha = 1$ در نمونه DS-SPSW



۸- مراجع

1. Sabelli, R., Bruneau, M., "Steel Design Guide of Steel Plate Shear Walls", American Institute of Steel Construction, (AISC), No.20, May 2007.
2. Choi, I.N., Park, H.G., "Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear -Dominated Steel Plate Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 134, No. 9, Sep. 2008.
3. Thorburn, L. J., Kulak, G. L., and Montgomery, C. J. "Analysis and design of steel shear wall system." Structural Engineering Rep.No. 107, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Alberta, Canada, 1983.
4. Timler, P.A., Kulak, G.L., " Experimental Study of Steel Plate Shear Wall", Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, Structural Engineering Report No.114 1983.
5. Tromposch, E.W., Kulak, G.L., "Cyclic and Static Behavior of Thin Panel Steel Plate Shear Walls", Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, Structural Engineering Report No.145, 1987.
6. Elgaaly, M., Caccese, V., Du, C., "Postbuckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Loads", Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.2, Feb.1993.
7. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L., Elwi, A.E., "Seismic Behaviour of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report 215, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, Feb. 1997.
8. Rezai, M., Ventura, C.E., Prion, H.G.L., "Numerical Investigation of Thin Unstiffened Steel Plate Shear Walls", 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.
9. Berman, J., and Bruneau, M., "Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls" Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol.129, No.11, Nov.1, 2003.
10. Roberts, T.M., and Sabouri Ghomi, S., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", Thin Walled Structure 12(1991) 145-162.
11. Roberts, T.M., and Sabouri Ghomi, S., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plates Shear Panels", Thin-walled Structures 14(1992) 139-151.
12. Sabouri-Ghomi, S., " Discussion of Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls By Jeffrey Berman and Michel Bruneau, ASCE, Non.2003, Vol.129, No.11", Journal of Structural Engineering, ASCE, April 2005, P695.

۱۳. صبوری، سعید، " سیستمهای مقاوم در برابر بارهای

جانبی - مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی "، نشر

انگیزه، ۱۳۸۳.

تعیین U_{py} ، F_{pu} در تئوری اندرکنش ورق و قاب می‌باشد. در تئوری اندرکنش ورق و قاب برای تعیین تنش‌های اندرکنشی ورق بر روی قاب (σ_{insk} و σ_{inta}) مقدار α با استفاده از مقادیر بدست آمده برای دو نمونه آزمایشگاهی مقدار $\alpha = 0.5$ پیشنهاد می‌شود. در نمونه DS-PSW مقدار τ_{cr} ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است بنابراین مطابق رابطه (۱۰) مقدار $\sigma_{fy} = \sigma_y$ حاصل می‌شود. در نمونه DS-SPSW با فرض $\alpha = 0.5$ مقدار $\sigma_{fy} = 0.54\sigma_y$ بدست می‌آید.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق برای تعیین توزیع تنش در ورق دیوار برشی فولادی در حوزه میدان پس کمانش از دو نمونه آزمایشگاهی استفاده شده است همچنین این دو نمونه با استفاده از المان محدود مدل شده و با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده اند.

نتایج نشان می‌دهند که بحرانی ترین تنشهای اندرکنشی ورق بر روی قاب (σ_{insk} و σ_{inta}) در حالتی بدست می‌آیند که تنش اصلی سوم ورق در میدان پس کمانش برابر نصف تنش برشی کمانشی ورق ($\sigma_{pb} = 0.5\tau_{cr}$) باشد که لازم است تیر و ستون قاب پیرامون در برابر اثر این تنشها مقاومت لازم را داشته باشند. در تئوری اندرکنش ورق و قاب برای تعیین نیروی برشی و تغییر مکان تسلیم شدن ورق تنش اصلی سوم ورق در میدان پس کمانش برابر تنش برشی کمانشی ورق ($\sigma_{pb} = \tau_{cr}$) در نظر گرفته می‌شود. در این حالت رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) برای نمونه DS-SPSW-0% نشان می‌دهند که رفتار ورق مانند یک صفحه برشی بوده و تا قبل از تسلیم شدن تحت تنش برشی وارد ناحیه پس کمانش نشده است که منطبق بر رفتار آزمایشگاهی نمونه می‌باشد همچنین سختی برشی بدست آمده با فرض یاد شده در نمونه‌های دیوار برشی فولادی از رابطه‌های تئوریک انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



14. Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E., Kharrazi, M.H.K., "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.131, No.6, June 2005.

۱۵. قلهکی، مجید، " اثر اتصال تیر به ستون بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۶.

۱۶. صبوری، سعید، اسعد سجادی، سید رامین، " بررسی آزمایشگاهی ضریب رفتار و جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی شکل پذیر با سخت کننده و بدون سخت کننده"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۷، صفحه های ۱۳-۲۵.

۱۷. تیموشنکو، گیر، ترجمه تقی زاده منظری، مجید، " تئوری پایداری ارتجاعی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۹.

18. Timoshenko, S. P., Krieger, S. W., "Theory of Plates and Shears", Second Edition, McGRAW-HILL Book Co.

19. ATC-24, "Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures", by Applied Technology Council, 1992.

