

# سیستم دیوار برشی فولادی، سیستمی نوین برای طراحی لرزه‌ای

مجتبی جعفررفائی، کارشناس ارشد مهندسی سازه

Jafar\_refaei@yahoo.com

## چکیده

سیستم دیوارهای برشی فولادی سیستم بسیار نوینی است که در سه دهه اخیر به سرعت در دنیا مورد توجه قرار گرفته و از این سیستم برای ساخت و مقاوم سازی ساختمان های بسیار مهمی در کشورهای پیشرفته و زلزله خیزی مانند آمریکا و ژاپن استفاده شده است. اساس ایده دیوار برشی فولادی، بهره‌گیری از میدان کشش قطری است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می‌گردد. در این مقاله ضمن معرفی این سیستم و روابط مهم در طراحی، چند نمونه از دتایل های این گونه سیستم ها بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: دیوار برشی فولادی، ورق فولادی، طرح لرزه ای، دتایل های اجرایی.

## Abstract

In the past three decades, steel plate shear wall system has been extensively used as a modern system for building and retrofitting important structures and is used in modern countries such as USA and Japan. The main idea of steel plate shear wall system is using an in-plane diagonal tension field forms after buckling. In this paper, beside introducing this system and key relationships in the design, some details of steel plate shear wall systems has been investigated.

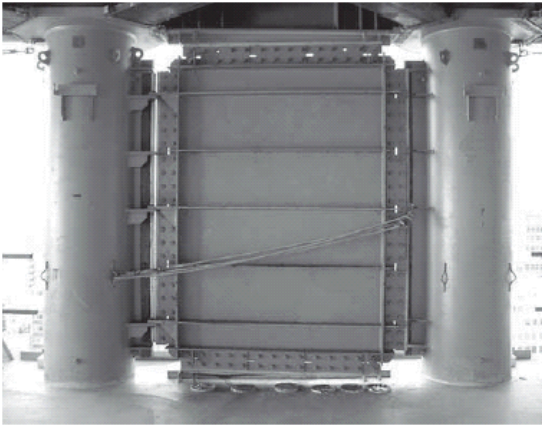
Key words: Steel Plate Shear Wall System, Steel Plate, seismic design, steel executive details.

دیوار برشی فولادی به دو شکل تقویت شده و تقویت نشده اجرا می‌گردد. در حالت تقویت شده هدف جلوگیری از کمانش قبل از تسلیم برشی است و در حالت تقویت نشده اجازه داده می‌شود که ورق کمانه کند و هدف اینست که از ناحیه کشش قطری جهت حمل برش طبقه استفاده شود [۱]. در دیوارهای برشی فولادی با استفاده از ورق‌های فولادی می‌توان از پدیده پس کمانش، مشابه تیر ورفها بدون هیچ‌گونه خلی در پایداری استفاده نمود. منحنی‌های هیستریزیس، دیوارهای برشی فولادی، تحت اثر بارهای رفت و برگشتی، با ورق نازک یا تقویت شده کاملاً پایدار با جذب انرژی بالاست. مطالعات عددی و تجربی نشان می‌دهند که این سیستم علاوه بر سختی زیاد، دارای جذب انرژی زیاد و شاخص‌های هیستریزیس پایداری هستند. در مورد زمان تناوب دو دسته رابطه دقیق و تجربی توسط آیین‌نامه‌ها ارائه شده است. روابط دقیق با توجه به نتایج روش رایلی هستند که تابع شکل آنها، تغییرشکل جانبی سازه به علت یک دسته نیروی جانبی است. روابط تجربی نیز از مقادیر اندازه‌گیری شده در ساختمانهای واقعی در حین زلزله و یا تحت ارتعاشات القایی حاصل شده است. بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای ساختمانها از زمان تناوب طبیعی سازه جهت تعیین شتاب پایه طراحی استفاده می‌کنند. هدف اصلی در طراحی لرزه‌ای این گونه سازه‌ها بر این مبناست که رفتار سازه، در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های کوچک بدون خسارت و در محدوده خطی باقی مانده و در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های شدید، ضمن حفظ پایداری کلی خود، خسارت‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای را تحمل کند. به همین دلیل مقاومت لرزه‌ای که مورد نظر آیین‌نامه‌ها است، عموماً کمتر و در برخی موارد، خیلی کمتر از مقاومت جانبی مورد نیاز برای حفظ پایداری سازه در محدوده الاستیک، در یک زلزله شدید است.

سازه‌ها به هنگام رخداد زلزله‌های متوسط و بزرگ، وارد محدوده غیرالاستیک شده و برای طراحی آن‌ها نیاز به یک تحلیل غیرالاستیک است. اما به دلیل وقت گیر بودن این گونه تحلیل‌ها و عدم گستردگی برنامه‌های تحلیل غیرالاستیک و همچنین سهولت روش الاستیک، روش‌های تحلیل و طراحی متداول، براساس تحلیل الاستیک سازه و با نیروی کاهش یافته زلزله صورت می‌گیرد. کاهش مقاومت سازه از مقاومت الاستیک مورد نیاز، عموماً با استفاده از ضریب کاهش مقاومت انجام می‌شود. بدین منظور آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، نیروهای لرزه‌ای مورد نیاز در طراحی الاستیک یک سازه را از یک طیف خطی که وابسته به زمان تناوب طبیعی ساختمان و شرایط خاک محل احداث آن است، به دست می‌آورند و برای ملحوظ نمودن اثر رفتار غیرالاستیک، جذب انرژی بر اثر رفتار هیستریزیس، میرایی و اثر مقاومت افزون سازه، این نیروی الاستیک را به وسیله ضریب کاهش مقاومت (ضریب رفتار) به نیروی طراحی تبدیل می‌کنند. سازه‌های ساختمانی باید به گونه‌ای طراحی شوند که توانایی جذب و تحمل نیروهای جانبی از قبیل باد و زلزله را داشته باشند. در انتخاب سیستم مناسب مهاربندی عوامل مختلف از ملاحظات سازه‌ای گرفته تا ملاحظات اقتصادی و معماری دخیل می‌باشند.



شکل ۱- دیوار برشی فولادی تقویت نشده در مکزیک



شکل ۲- دیوار برشی فولادی با سخت کننده افقی و قائم (سمت راست)، دیوار برشی فولادی با سخت کننده افقی (سمت چپ) در ژاپن

## ۲. مزایای دیوار برشی فولادی

مشخص است که هر سیستم ساختمانی برای خود مزایا و معایبی دارد و مسلماً دیوار برشی فولادی هم از این قاعده مستثنی نیست، لذا از مزایای این نوع سیستمها به طور خلاصه می توان به این موارد اشاره کرد: اجرای آسان و سریع، رفتار سیستم در محیط پلاستیک و نیز میزان جذب انرژی آن نسبت به سیستمهای مهاربندی دیگر بهتر است، شکل پذیری بسیار بالای سیستم، بیشتر بودن ظرفیت دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با خطراتی مانند زلزله، طوفان، انفجار در مقایسه با دیگر سیستمها، کاهش وزن سازه، کاهش هزینهی ایجاد فونداسیون بعلت کمتر شدن وزن سازه، افزایش فضای مفید طبقات، سهولت اتصال دیوار برشی فولادی به قاب فولادی بعلت همگن بودن، صرفه جویی در مصرف فولاد، اما با وجود مزایای بسیار زیاد این نوع سیستم می توان به سه عامل زیر که مانع از گسترش استفاده از این نوع سیستم می گردند اشاره نمود:

- نبود یک توافق کلی در تحلیل و طراحی این نوع سیستمها مخصوصاً در آیین نامه های معتبر
- کمبود منابع و اطلاعات و نسبتاً جدید بودن موضوع
- نقص اطلاعات مربوط به رفتار لرزه ای این نوع سیستمها

همانطور که اشاره گردید هر ورق فولادی می تواند تقویت شده یا تقویت نشده باشد، هر چند در ابتدا علت اصلی استفاده از سخت کننده ها جلوگیری از کمانش خارج از صفحه پانلها بود اما با استفاده از این نوع سخت کننده ها مشاهده گردید که میزان جذب انرژی در بارهای سیکلی افزایش چشمگیری پیدا می کند. اما هزینه بالای ساخت این نوع سیستم مانع مهمی در برابر اجرای آن بود. توصیه شده است که [۴] از سخت کننده ها با ضخامت بالا استفاده نشود زیرا مقاومت بالای این گونه سازه ها باعث کمانش ستون ها و در نتیجه انهدام کل سازه در اثر خرابی ستونها می گردد.

آزمایشات انجام گرفته [۵] نشان داده است که کمانش صفحه به معنای انهدام و خرابی سازه نیست و اگر صفحه به اندازه کافی تکیه گاه داشته باشد نیروهای پس-کمانشی آن از نیروهای کمانشی تئوریک بسیار بیشتر خواهد بود. در نقطه ی کمانش دیوار، مکانیسم مقاومت از حالت برش داخل صفحه به حالت میدان کششی مورب یا قطری تبدیل می شود و در صورتی که ضخامت دیوار کم باشد کمانش در بارهای خیلی پایین صورت گرفته و لذا پانل با عمل میدان کششی کنترل می شود. عملکرد

صحيح لرزه ای یک سازه مستلزم آن است که مقاومت قابل دسترسی و ظرفیت های تغییر شکل اعضا بیش از نیازهای تحمیل شده به سازه بر اثر زمین لرزه باشد . باتوجه به رفتار سازه در زمان وقوع زمین لرزه، ارزیابی عملکرد دقیق آن باید توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و با استفاده از زمین لرزه های منتخب صورت گیرد. با ورود سازه به حیطه رفتار غیر خطی تحت اثر زلزله، جابجایی ها نسبت به نیروها توصیف بهتری از پاسخ سازه ارائه داده و با محدود کردن تغییر مکانها به جای نیروها، سطح تخریب سازه به طرز موثرتری کنترل می شود. تغییر نگرش از طراحی بر اساس نیرو به سمت طراحی بر مبنای رفتار و عملکرد سازه، روش جدیدی را در زمینه طراحی به وجود آورده است که اصطلاحاً طراحی بر اساس عملکرد ۱ نامیده می شود. طراحی بر اساس عملکرد بر مبنای طراحی در حالات حدی می باشد. برای دستیابی به ظرفیت سازه در آن سوی محدوده الاستیک احتیاج به استفاده از تحلیل های غیر خطی می باشد. تخمین نیازهای لرزه ای در سطوح عملکردی پایین مانند ایمنی جانی و جلوگیری از خرابی کلی سازه، نیازمند ملاحظات گسترده رفتار غیر الاستیک سازه است.

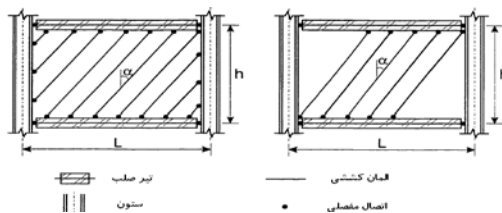
توربرن و همکارانش یک روش تحلیلی برای محاسبه مقاومت دیوار برشی فولادی سخت نشده ارائه کردند. آنها روش خودشان را بر مبنای نظریه کششی قطری خالص واگنر (۱۹۳۱) ارائه کردند و این روش را روش مدل نواری نامیدند. در این روش ورق فولادی با یک سری اعضای نواری هم جهت با تنش های کششی اصلی جایگزین می گردد که این نوارها فقط توانایی انتقال کشش را دارا می باشند و در این روش هر نواری یک ناحیه از ورق را که برابر حاصلضرب پهنای نوار در ضخامت ورق بود، شامل می گردید.

زاویه نوارهای کششی با استفاده از روش کار مجازی بدست آمد. آنها یک نمونه دیوار برشی فولادی یک طبقه ی یک دهانه را که با تیر و ستون احاطه شده بود را برای این کار تحت برش خالص قرار دادند. همچنین ستون ها را بصورت پیوسته در طبقات ادامه داده و اتصال تیر به ستون ها را هم مفصلی در نظر گرفتند. با توجه به اینکه نیروهای کششی در دو طبقه ی مجاور همدیگر اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند لذا اثر آنها بر تیر طبقه بعلاوه متفاوت بودن جهت نیرو در این دو طبقه خنثی شده و می توان تیر مذکور را نیز صلب در نظر گرفت.

برای ستون ها هم دو حالت را در نظر گرفتند:

- ۱ - ستون با سختی خمشی نامحدود که این فرض باعث ایجاد یک ناحیه کششی یکنواخت در سرتاسر ورق فولادی می شود.
- ۲ - ستون های کاملاً انعطاف پذیر که در این حالت هیچکدام از نوارهای مورب جایگزین ورق، به ستون ها متصل نمی شود.

(۱) بخشی از یک میدان کششی (۲) میدان کششی کامل



شکل ۳ - مدل نواری در یک دیوار برشی فولادی

این محققین مطالعات تحلیلی زیادی برای تعیین تعداد مناسب نوارهای جایگزین به منظور تخمین مناسب مقاومت ورق انجام دادند که در نهایت به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۱۰ نوار برای مدل سازی کافی می باشد. همچنین توربرن و همکارانش به بررسی اثر ضخامت ورق فولادی، ارتفاع طبقه، طول دهانه، سختی ستون بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی پرداختند که در اینجا بطور خلاصه به نتایج آنان اشاره می گردد:

- ۱ - سختی ورق فولادی به طور خطی با افزایش ضخامت ورق اضافه می یابد که شیب این خط تابعی از هندسه ورق می باشد.
  - ۲ - رابطه میان سختی ورق و ارتفاع طبقه خطی در مقیاس نیمه لگاریتمی می باشد و با افزایش ارتفاع طبقه سختی جانبی ورق کاهش می یابد.
  - ۳ - برای یک ستون با مشخصات ثابت در یک مقیاس لگاریتمی از سختی پانل و طول دهانه پانل، برای نسبت های  $L/h$  کمتر از یک با افزایش طول دهانه سختی ستون کاهش می یابد [۲].
- زاویه ی شیب نوارهای کششی طبق دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود براساس اصل حداقل انرژی از رابطه ی زیر به دست می آید [۳]:

$$\tan^4 \alpha = \frac{\frac{2}{t_w L} + \frac{1}{A_c}}{\frac{2}{t_w L} + \frac{2}{A_b L} + \frac{h^4}{180 I_c L^2}} \quad (1)$$

که در آن:  $t_w$  و  $h$  و  $L$ : طول و ارتفاع و ضخامت پانل دیوار برشی؛  $A_b$ : سطح مقطع تیر؛  $A_c$  و  $I_c$ : لنگر اینرسی ستون و سطح مقطع.

رابطه ارائه شده در آیین نامه AISC 341 برای محاسبه زاویه ی شیب نوارهای کششی به صورت زیر است [۴]:

$$\tan^4 \alpha = \frac{\frac{t_w L}{2 A_c} + 1}{1 + t_w h \left( \frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360 I_c L} \right)} \quad (2)$$

### ۳. تحلیل و طراحی

با توجه به آیین نامه مراحل زیر جهت طراحی سیستم دیوار برشی فولادی توصیه می گردد.

#### گام اول: تعیین ضخامت اولیه ورق

در این گام ابتدا تمام برش طبقه به ورق داده می شود و ضخامت ورق با فرض زاویه میدان کششی تعیین می گردد.

#### گام دوم: تعیین مقاطع اولیه تیرها

#### گام سوم: تعیین مقاطع اولیه ستون ها

#### گام چهارم: تعیین زاویه میدان های کششی

با توجه به المان های بدست آمده می توان زاویه میدان های کششی را که در ابتدا فرض کرده بودیم، بدست آوریم و با استفاده از آن ضخامت ورق را تصحیح می کنیم.

### گام پنجم: اصلاح مقاطع اولیه تیر و ستون

پس از اصلاح ضخامت ورق های فولادی، مقاطع تیر و ستون را اصلاح می کنیم. این کار سبب می شود که در مرحله تحلیل و طراحی نهایی زودتر به پاسخ برسیم.

### گام ششم: تحلیل سیستم دیوار برشی فولادی

در گام اول تمام برش طبقه را به ورق فولادی دادیم. در این مرحله هدف اینست که سهم قاب را از برش طبقه تعیین کرده و در نهایت طراحی تیر و ستون را کامل کنیم. در نظر گرفتن سهم قاب از بار جانبی موجب کاهش سهم ورق فولادی و در نتیجه کاهش ضخامت ورق می گردد. برای تحلیل از مدل ارتوتروپیک استفاده می کنیم. هر گام تحلیل شامل مراحل زیر است:

۱. کنترل مقاومت ورق برای سهم ورق از بار جانبی
۲. کنترل مقاومت تیر برای نیروهای خمشی ناشی از بار ثقلی، تسلیم ورق و نیروی محوری ستون
۳. کنترل مقاومت ستون برای نیروهای ناشی از بار ثقلی، تسلیم ورق و نیروهای ناشی از تیر
۴. محاسبه مجدد زاویه میدان کششی در نتیجه تغییر مشخصات تیر، ستون و ورق

ممان اینرسی ستونها در سیستم دیوار برشی فولادی می بایست از مقدار زیر بیشتر باشد [۵]:

$$I_c \geq 0.0031 \frac{t_w h^4}{L} \quad (۳)$$

که در آن  $t_w$ : ضخامت ورق،  $h$ : فاصله بین تیرها،  $L$ : فاصله بین ستونها است.

ممان اینرسی تیرها در سیستم دیوار برشی فولادی می بایست از مقدار زیر بیشتر باشد [۵]:

$$I_b \geq 0.0031 \frac{\Delta t_w l^4}{h} \quad (۴)$$

که در آن  $\Delta t_w$  اختلاف میان ضخامت ورق بالایی و پایینی تیر است. با توجه به اینکه از یک ضخامت ثابت برای ورقها استفاده شد پس ممان اینرسی تیرها مناسب است.

همچنین طبق آیین نامه AISC 341 حداقل ضخامت ورق برای طراحی به روش ASD از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$t_w \geq \frac{\Omega V_a}{0.42 F_y L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (۵)$$

$V_u$ : مقاومت برشی مورد نیاز (ASD)،  $\Omega$ : ضریب اطمینان (۱/۶۷)،  $L_{cf}$ : فاصله خالص پانل جان میان بالهای ستونها.

و برای طراحی به روش LRFD از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$t_w \geq \frac{V_u}{\phi 0.42 F_y L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (۶)$$

$V_u$ : مقاومت برشی مورد نیاز (LRFD)،  $\phi$ : ضریب مقاومت ارائه شده در AISC 341 (۰/۹).

طبق آیین نامه FEMA 450 لاغری جان به مقدار زیر باید محدود گردد:

$$\frac{\min(L, h)}{t_w} \leq 25 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (۷)$$

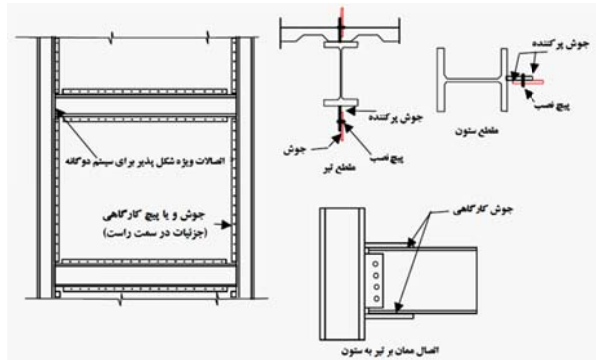
در رابطه فوق E مدول یانگ است. مساحت نوارهای معادل، در مدلسازی دیوارهای برشی فولادی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$A_s = \frac{[L \cos(\alpha) + h \sin(\alpha)] t_w}{n} \quad (۸)$$

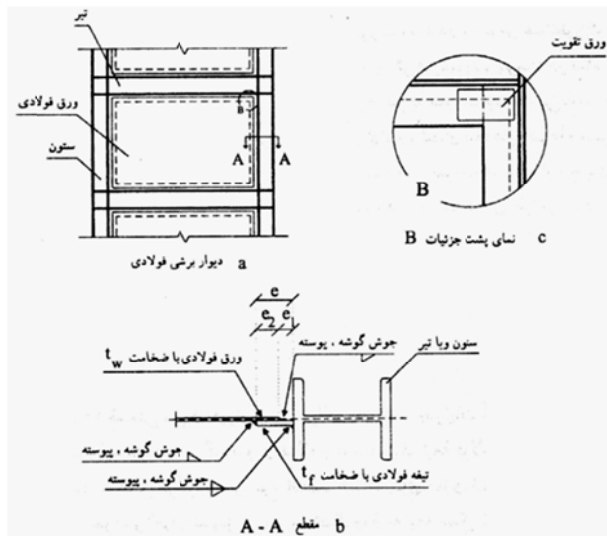
L طول پانل، h ارتفاع پانل و n تعداد نوارها ست.

#### ۴. چند نمونه از جزئیات اجرایی سیستم دیوار برشی فولادی سخت نشده

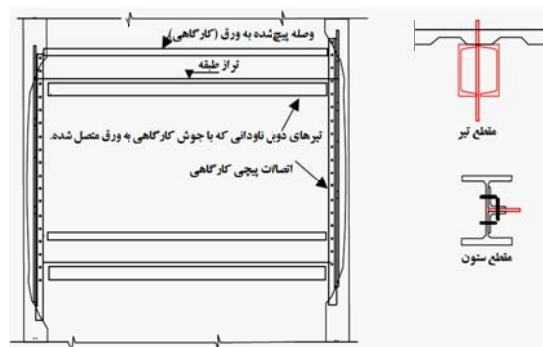
سیستم دیوارهای برشی فولادی از نظر اجرایی، سیستمی ساده بوده و هیچگونه پیچیدگی خاصی در آن وجود ندارد. از لحاظ اجرایی بدون نیاز به کسب مهارتهای جدید، قابل اجرا است، با توجه به سادگی و امکان ساخت در کارخانه و نصب در محل سرعت اجرای سیستم بالا است.



شکل ۴- جزئیات اجرایی دیوار برشی فولادی (آستانه اصل)

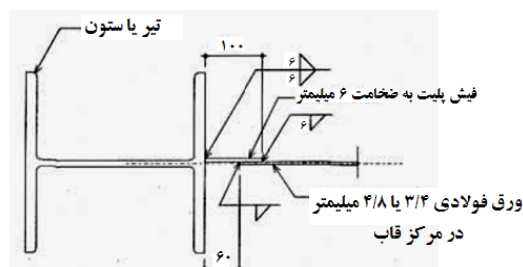


شکل ۵ - جزئیات اجرایی دیوار برشی فولادی (صبوری قمی)



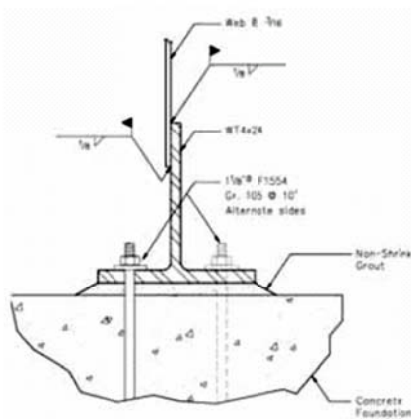
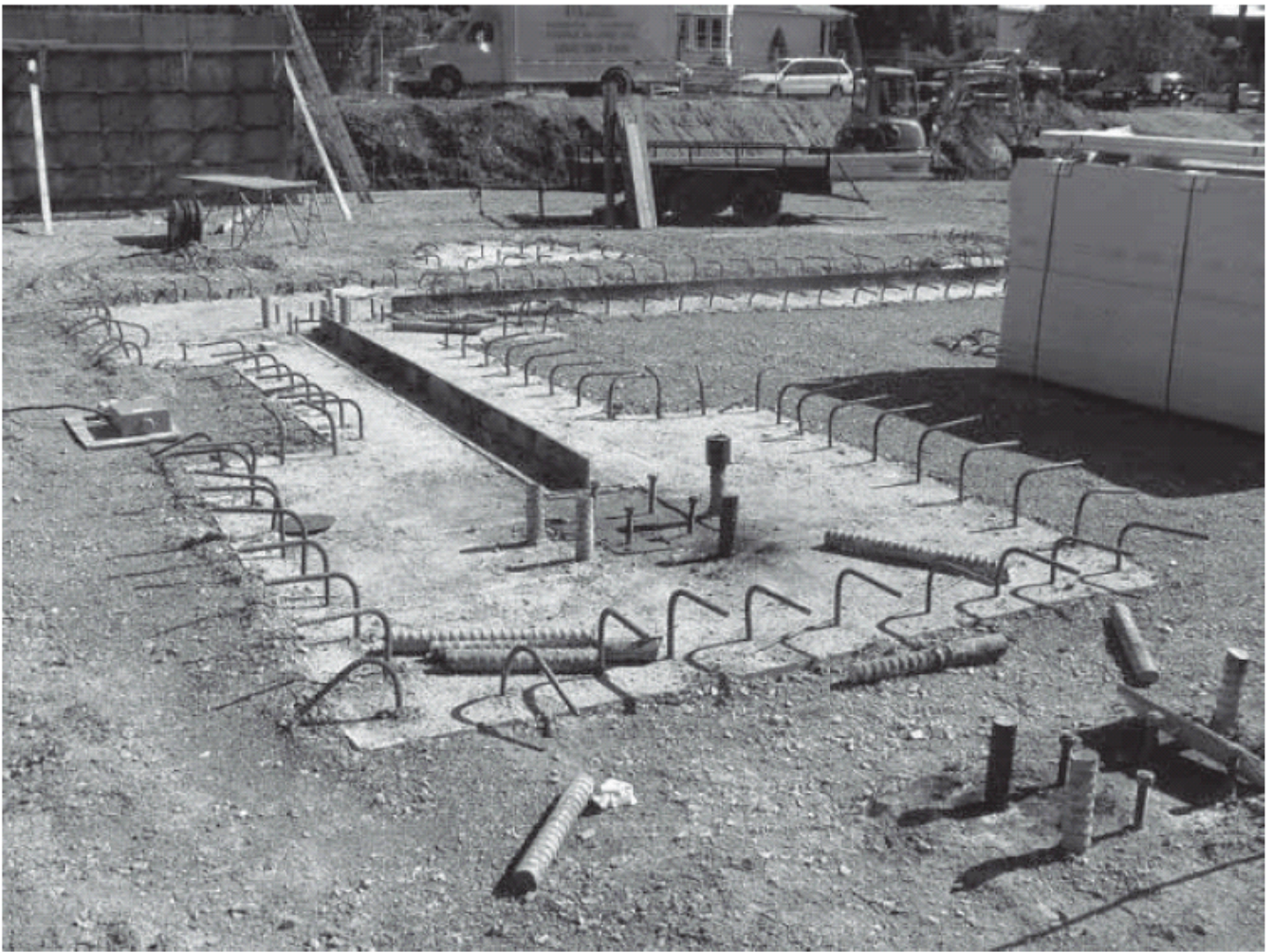
شکل ۶ - جزئیات دیوار برشی فولادی (تروی و ریچارد ۱۹۸۸)

جزئیات ارائه شده توسط تروی و ریچارد از آنجا که سیستم دیوار برشی نیاز به سختی بالای درون صفحه‌ای دارد، مطلوب به نظر نمی‌رسد.



شکل ۷ - جزئیات برای اتصال فیش پلیت به تیر و ستون (دایور و همکاران)

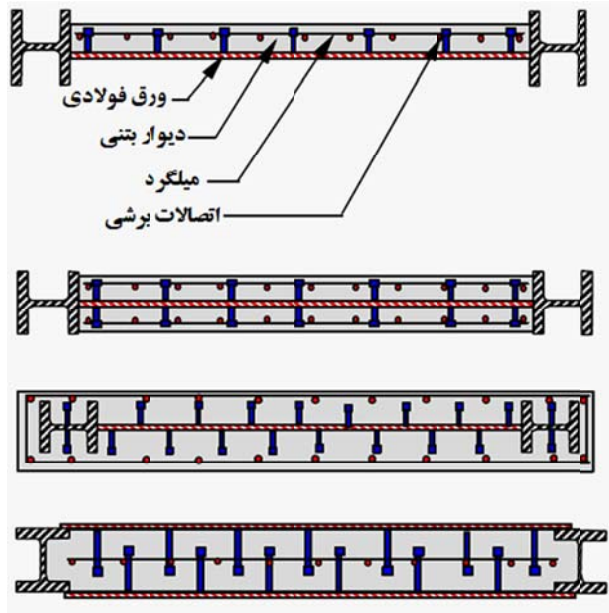




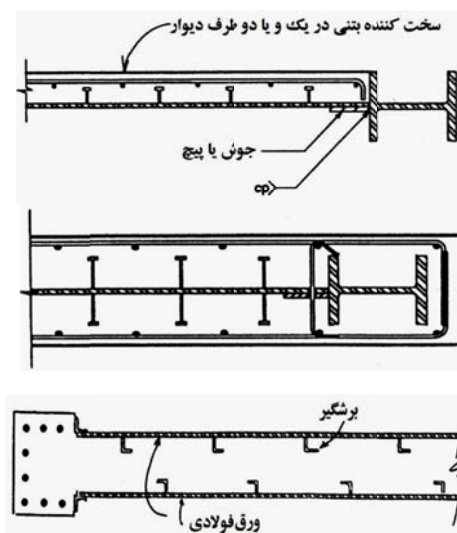
شکل ۸ - جزئیات برای اتصال تیر و ستون

۵. جزئیات اجرایی سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیت

در سیستم دیوارهای برشی کامپوزیت برای جلوگیری از کمانش ورق و رسیدن ورق به تسلیم از دیوار بتنی در یک طرف و یا دو طرف ورق استفاده می‌شود. در این نوع سیستم دیوار بتنی توسط برشگیر به ورق متصل می‌شود.



شکل ۹- جزئیات ارائه شده توسط آستانه اصل برای دیوار برشی کامپوزیت



شکل ۱۰- جزئیات ارائه شده برای دیوار برشی کامپوزیت در آیین نامه

## ۶. نتایج

در این مقاله ضمن بررسی مدل‌سازی سیستم دیوار برشی فولادی به روش مدل نواری، روابط مهم در طراحی و چند نمونه دتایل این سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی به روش نواری پاسخ‌های دقیقی از رفتار واقعی این سیستم بدست نمی‌دهد ولی پاسخ‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد. برای بهبود مدل‌سازی این سیستم با توجه به کماتش نوارهای بلندتر توصیه می‌گردد با تعریف جداگانه‌ای نسبت به سایر نوارها مدل گردند.

## ۷. مراجع

- [1] Astaneh-Asl, A., *Seismic behavior and design of steel shear walls*, Structural Steel Educational Council Technical Information and Product Service, 2001.
- [2] Thurburn, L. J., Kulak, G.L., Montgomery, C.J., *Analysis of Steel Plate Shear Walls*, Struct., Eng., Report 107, Dep. of Civil Eng., University of Alberta, 1983.
- [۳] دستور العمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵.
- [4] AISC, ANSI/AISC 341-10, *Seismic Provision for Structural Building*, American Institute of steel Construction Inc., Chicago, IL, 2010.
- [5] ASTM, A 336/A 336M-97, *Standard Specification for Commercial Steel Sheet, Carbon, Cold-Rolled*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1997.