

بسمه تعالی

هل يستوی الذین یعلمون والذین لا یعلمون؟  
آیا کسانی که می دانند با کسانی که نمی دانند برابرند؟  
قرآن کریم، سوره زمر، آیه ۹



اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران  
مرکز همایش های هتل المپیک تهران  
۲۱ و ۲۲ دی ماه ۱۳۹۳

## گواهی پذیرش و چاپ مقاله (شفاهی)

کد مقاله: ۱-۱۳۳

نویسنده و پژوهشگر گرامی؛ آقای/خانم منصور قلعه نوی - ایمان طاهریان  
کمیته علمی اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران مفتخر است اعلام نماید، مقاله شما با عنوان:  
بررسی رفتار سیستم نوین دیوارهای برشی فولادی مرکب

توسط این کمیته تایید و در کتاب و لوح فشرده مجموعه مقالات این همایش که در روزهای ۲۱ و ۲۲ دی ماه ۱۳۹۳ در مرکز همایش های هتل المپیک تهران برگزار گردید، چاپ شده است. کمیته علمی اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران ضمن قدردانی از شما برای همکاری باین همایش، از خداوند متعال برای شما نویسنده محترم آرزوی توفیق روز افزون دارد.

دکتر غلامرضا هوانی  
دبیر علمی همایش

عالمی



مجلس سالان بین المللی ایران تا به هم راه می آید



کد مقاله: ۱۳۳-۱

## بررسی رفتار سیستم نوین دیوارهای برشی فولادی مرکب

منصور قلعه‌نوی<sup>۱</sup>، ایمان طاهریان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، ghalehnovi@um.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد (واحد بین‌المللی)

### چکیده

بارهای جانبی وارد بر سازه‌ها همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. سیستم‌های سازه‌ای بسیاری برای تحمل این بارها پیشنهاد و ارائه شده‌اند. در سال‌های اخیر از دیوارهای برشی فولادی مرکب به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های مهار جانبی استفاده شده‌است. در این دیوارها به کمک پانل‌های بتنی از کمانش ورق‌های فولادی جلوگیری می‌شود. از این رو، از همه‌ی ظرفیت ورق استفاده شده و امکان جاری شدن ورق پیش از کمانش نیز فراهم می‌شود. این امر، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد و به بهبود رفتار سازه کمک می‌کند. در این پژوهش به بررسی رفتار سیستم نوینی از دیوارهای برشی فولادی مرکب پرداخته شده و رفتار آن‌ها با دیوارهای برشی فولادی مقایسه می‌شوند. برای این منظور از الگوهای عددی صحت‌سنجی شده با نتیجه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان دهنده‌ی رفتار مناسب‌تر دیوارهای مرکب در برابر بارهای جانبی هستند.

**کلمات کلیدی:** پانل بتنی، ورق فولادی، کمانش، دیوار برشی فولادی مرکب



اوبس همایش ملی مهندسی سازه ایران  
تیرماه ۱۳۹۳، تهران، مرکز همایش‌های برج میلاد  
۴ و ۵ دیماه ۱۳۹۳

## بررسی رفتار سیستم نوین دیوارهای برشی فولادی مرکب

منصور قلعه‌نوی<sup>۱</sup>، ایمان طاهریان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد (واحد بین الملل)

ghalehnovi@um.ac.ir  
imantaherian@yahoo.com

### چکیده

بارهای جانبی وارد بر سازه‌ها همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. سیستم‌های سازه‌ای بسیاری برای تحمل این بارها پیشنهاد و ارائه شده‌اند. در سال‌های اخیر از دیوارهای برشی فولادی مرکب به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های مهار جانبی استفاده شده‌است. در این دیوارها به کمک پانل‌های بتنی از کمانش ورق‌های فولادی جلوگیری می‌شود. از این رو، از همه‌ی ظرفیت ورق استفاده شده و امکان جاری شدن ورق پیش از کمانش نیز فراهم می‌شود. این امر، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد و به بهبود رفتار سازه کمک می‌کند. در این پژوهش به بررسی رفتار سیستم نوینی از دیوارهای برشی فولادی مرکب پرداخته شده و رفتار آن‌ها با دیوارهای برشی فولادی مقایسه می‌شوند. برای این منظور از الگوهای عددی صحت‌سنجی شده با نتیجه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان دهنده‌ی رفتار مناسب‌تر دیوارهای مرکب در برابر بارهای جانبی هستند.

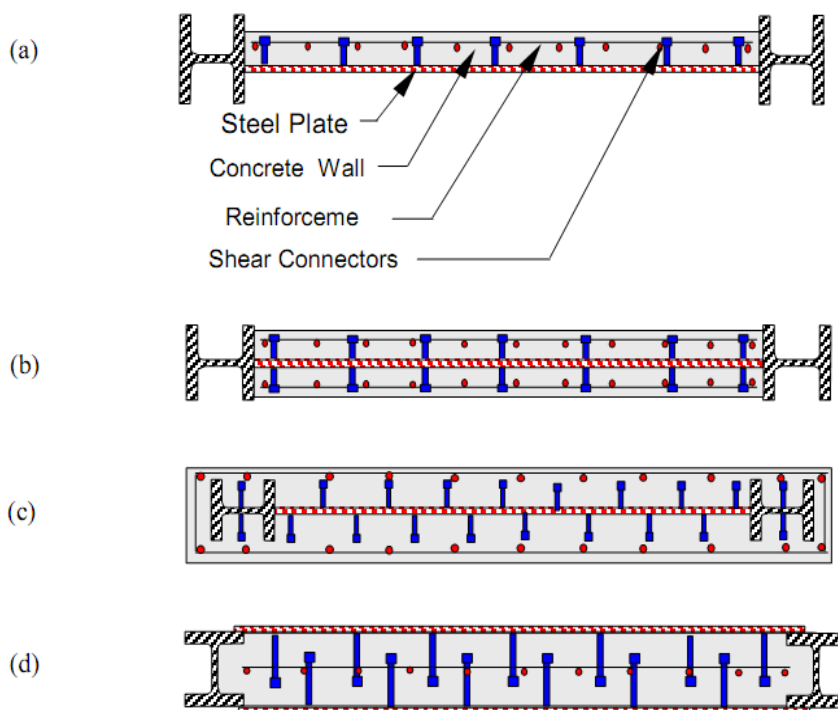
**کلمات کلیدی:** پانل بتنی، ورق فولادی، کمانش، دیوار برشی فولادی مرکب

### ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های فراوانی در مورد سیستم‌های ترکیبی انجام شده‌اند [۱ و ۲]. این پژوهش‌ها با توجه به نیازهای سازه‌ها شامل سختی مناسب برای کاهش دررفت طبقه‌ها، ویژگی جذب انرژی بالا، جلوگیری از خسارت‌های ناگهانی و رفتار مناسب در برابر بارهای جانبی که مهم‌ترین بارهای وارد بر سازه را تشکیل می‌دهند، صورت گرفته‌اند. دیوارهای برشی یکی از سیستم‌های مناسب هستند که به رفتار مناسب‌تر سازه در مقابله با بارهای جانبی کمک شایانی می‌کنند. از بین دیوارهای برشی مختلفی که پیشنهاد شدند، دیوارهای برشی فولادی به علت وزن پایین، مسائل اجرایی و رفتار مناسب‌تر مورد توجه قرار گرفتند. این دیوارها کاستی‌هایی نیز دارند. مهم‌ترین کاستی آن‌ها را می‌توان کمانش ورق فولادی استفاده شده در دیوارهای برشی فولادی دانست. به منظور رفع این مشکل، دیوارهای نوینی به نام دیوارهای برشی

فولادی مرکب پیشنهاد شدند. در این دیوارها به کمک پانل‌های بتنی از کمانش ورق‌های فولادی جلوگیری می‌شود. از این رو، شناخت ویژگی‌ها و رفتار این دیوارها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

دیوارهای برشی فولادی مرکب (composite steel shear walls) سیستم‌های مهار جانبی نوینی هستند که به دلیل برخورداری از برتری‌ها و خصوصیات رفتاری منحصر به فرد خود، بسیاری از نیازمندی‌ها در زمینه سازه‌ها را برآورده می‌سازند. دیوارهای برشی مورد بررسی در این پژوهش شامل دیوار برشی فولادی است که با دیوار برشی بتنی از یک یا دو طرف تقویت شده است. اتصال این دو دیوار فولادی و بتنی به کمک برش‌گیرها یا پیچ‌ها انجام می‌شود. نمونه‌هایی از دیوارهای برشی مرکب در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۳].



شکل ۱ - نمونه‌ای از دیوارهای برشی مرکب [۳]

در مقایسه با دیگر سیستم‌های مهار جانبی سازه‌ها، دیوارهای برشی فولادی مرکب دارای برتری‌هایی هستند. در ادامه به برخی از این برتری‌ها اشاره می‌شود [۴ و ۵]:

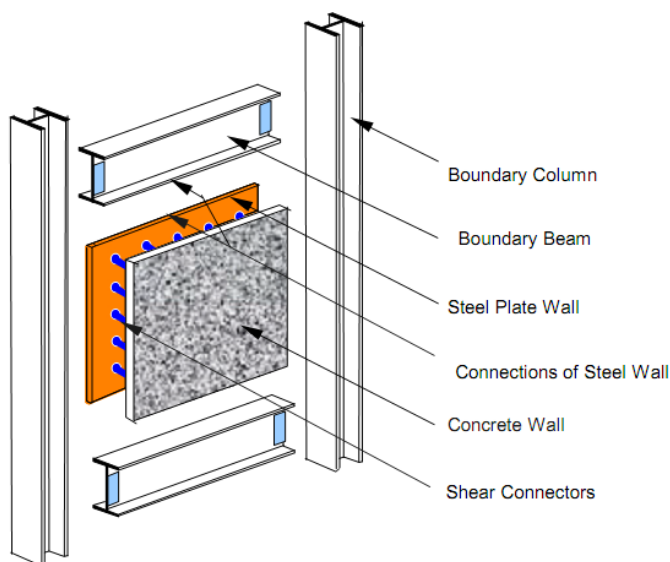
۱. در مقایسه با دیوارهای برشی بتنی، دیوار برشی مرکب با ظرفیت برشی مشابه، دارای ضخامت و وزن کم‌تری خواهد بود. کم‌تر بودن مقطع این دیوار از نقطه نظر معماری مناسب است و فضای بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد. وزن کم‌تر این دیوارها، امکان استفاده از این گونه دیوارها برای سازه‌های بلند را نیز فراهم می‌کند. همچنین، کاهش در نیروهای زلزله‌ای وارد شده با سازه و پی‌هایی با ابعاد کوچک‌تر را نتیجه می‌دهد.

۲. دیوارهای برشی مرکب می‌تواند بصورت پیش‌ساخته یا بصورت درجا در محل ساخته شود. از آنجا که دیوار برشی فولادی می‌تواند سختی و پایداری دیوار را در زمان اجرا فراهم کند، ساخت دیوارهای برشی بتنی می‌تواند به‌طور مجزا و مستقل از دیوار برشی فولادی انجام پذیرد. در حالت پیش‌ساخته، دیوارهای بتنی می‌تواند در هر زمان دلخواه به ورق فولادی پیچ شود.

۳. در یک دیوار برشی فولادی، برش طبقه به کمک میدان کششی ایجاد شده پس از کماتش قطری در ورق فولادی تحمل می‌شود. در دیوار برشی مرکب، دیوار بتنی ورق فولادی را محدود می‌کند و قبل از جاری شدن ورق از کماتش آن جلوگیری می‌شود. در نتیجه، ورق فولادی نیروی برشی طبقه را به کمک جاری شدن در برش تحمل می‌کند. ظرفیت برشی ورق فولادی در جاری شدن بسیار بیشتر از ظرفیت آن در حالت میدان کششی پس از کماتش است. علاوه بر آن، در دیوارهای برشی مرکب، دیوار بتنی باعث ایجاد عایق صوتی و حرارتی و همچنین محافظ آتش‌سوزی ورق فولادی می‌شود.

۴. پس از وقوع زلزله‌های متوسط، در دیوارهای برشی فولادی کماتش و در دیوارهای برشی بتنی گسترش ترک‌ها رخ می‌دهند و نیاز به تعمیرات دارند. هزینه‌ی این تعمیرات در دیوارهای برشی مرکب به علت جلوگیری از کماتش ورق فولادی و کاهش ترک‌ها و خسارت‌های بوجود آمده در دیوار بتنی، کاهش می‌یابند. علاوه بر کاهش هزینه‌ها، کارایی مناسب‌تری در این دیوارها مشاهده می‌شود.

اجزای اصلی دیوار برشی مرکب در شکل ۲ نشان داده شده است [۵].

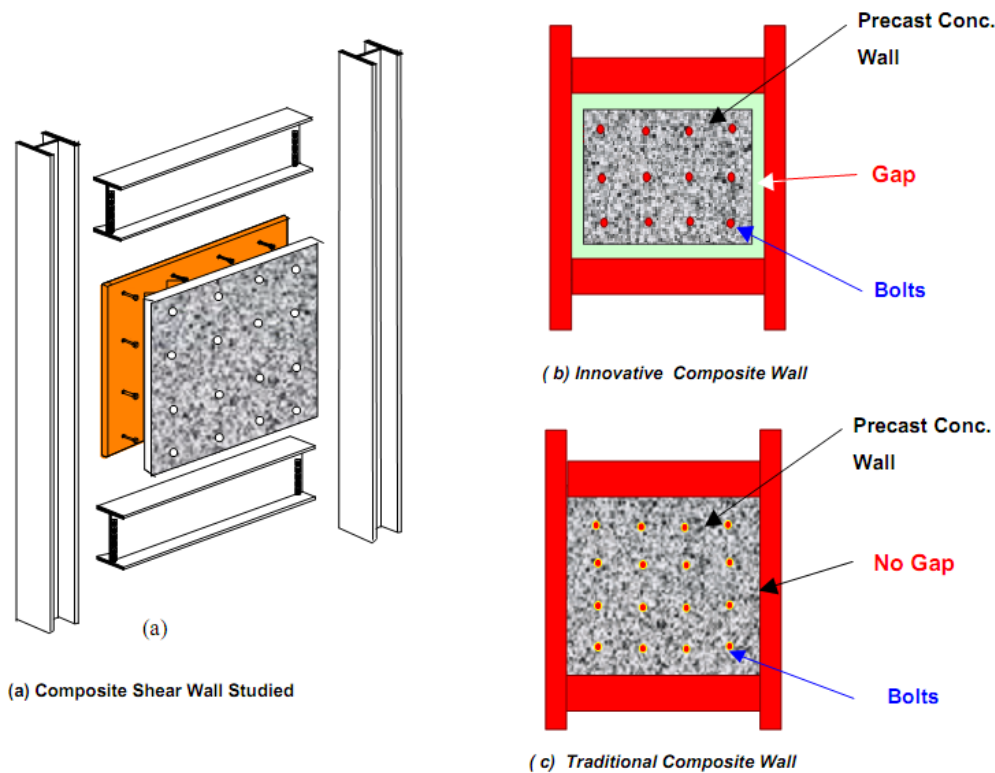


کل ۲ - اجزای اصلی دیوار برشی مرکب [۵]

این اجزا شامل دیوار فولادی، دیوار بتنی، اتصال‌های برشی، ستون‌ها و تیرهای مرزی، اتصال دیوار فولادی به تیرها و ستون‌های مرزی و اتصال‌های تیر به ستون‌ها می‌باشد [۵].

## ۲- سیستم نوین دیوارهای برشی فولادی مرکب

شناخت ویژگی‌های دیوارهای برشی فولادی مرکب، پژوهشگران را بر آن داشت تا از این دیوارها به عنوان سیستمی نوین در مهار جانبی سازه‌ها استفاده کنند. در این بخش به بررسی رفتار و برخی از کاربردهای دیوارهای برشی فولادی مرکب در سیستم‌های مختلف سازه‌ای پرداخته می‌شود. در پژوهشی Zhao و Astaneh-Asl به بررسی رفتار دیوارهای برشی مرکب پرداختند. آن‌ها رفتار لرزه‌ای دو گونه دیوار برشی مرکب سنتی و نوین را مطالعه و آزمایش کردند. شکل ۳ نمای این دو دیوار را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۳ - a: نمای دو گونه دیوار برشی مرکب، b: نوین و c: سنتی [۶]

هر دو سیستم سنتی و نوین دیوارهای برشی مرکب در یک سیستم دوگانه قاب خمشی سه طبقه در نظر گرفته شدند. تنها تفاوت این دو دیوار، وجود فاصله‌ای بین دیوار بتنی با تیرها و ستون‌های مرزی است. در دیوار برشی مرکب سنتی، دیوار بتنی بدون هیچ‌گونه فاصله‌ای به تیرها و ستون‌های مرزی متصل شده است.

در زلزله‌هایی با احتمال وقوع زیاد و شدت کم و متوسط، به علت فاصله‌ی بین دیوار بتنی و تیرها و ستون‌های مرزی در سیستم نوین دیوار برشی مرکب، دیوار بتنی با قاب درگیر نمی‌شود. در نتیجه، دیوار برشی فولادی المان اصلی در تحمل نیروی برشی و کاهش دررفت طبقه‌ها خواهد بود. برای چنین زلزله‌هایی، ورق فولادی به تنهایی جواب‌گوی بارهای جانبی می‌باشد. در این حالت، دیوار بتنی نقشی در تحمل بارهای جانبی ندارد و بدون آسیب باقی می‌ماند. دیوار بتنی مهاربند دیوار برشی فولادی می‌شود و از کمانش آن جلوگیری می‌کند [۶].

در زلزله‌هایی با شدت بیشتر، دیوار بتنی نیز در باربری برشی نقش ایفا می‌کند. در این حالت، مقاومت برشی دیوار بتنی به مقاومت برشی دیوار برشی مرکب اضافه می‌شود و در کاهش دررفت طبقه مفید خواهد بود.

### ۳- الگوی عددی

به منظور مدل‌سازی سیستم نوین دیوار برشی فولادی مرکب، از آن‌جا که بتن با المان‌های مرزی فاصله دارد و اثری در باربری جانبی ندارد، در مدل آورده نمی‌شود و اثر آن در جلوگیری از کماتش ورق فولادی در نمودار تنش- کرنش مصالح و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری برای ورق فولادی وارد می‌شود. بنابراین، الگوی عددی دیوار برشی فولادی مرکب فقط با مدل کردن ورق فولادی و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری علاوه بر مقاومت آن در میدان عمل کششی در نمودار تنش- کرنش مصالح ایجاد می‌شود.

Driver و گروه تحقیقاتی وی [۷] بر اساس نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان دادند که زاویه‌ی میدان عمل کششی در ورق فولادی دیوارهای برشی بین ۴۲ تا ۵۰ درجه تغییر می‌کند. تحلیل‌های عددی نیز نشان می‌دهند تغییر زاویه میدان عمل کششی بین این دو عدد، اثر قابل توجهی روی نتیجه‌های نهایی نیروهای برشی و دررفت طبقه‌ها ندارد. بنابراین، برای سادگی می‌توان این زاویه را برابر ۴۵ درجه در نظر گرفت.

برای دست‌یابی به مقاومت فشاری مصالح در دیوار برشی فولادی مرکب، رفتار کششی و فشاری بصورت کشسان- مومسان فرض می‌شوند. با در نظر گرفتن شرایط تعادل برای یک قاب با اتصالات مفصلی و عضوهای مرزی صلب که با ورق فولادی مرکب پوشانده شده است، سهم بار افقی که در میدان عمل کششی تحمل می‌شود بصورت زیر به دست می‌آید [۸]:

$$V_T = 0.5 f_y L t \sin 2\alpha \quad (1)$$

که با در نظر گرفتن زاویه میدان عمل کششی برابر  $\alpha = 45^\circ$  خواهیم داشت:

$$V_T = 0.5 f_y L t \quad (2)$$

به طور مشابه، سهم قسمت‌های فشاری ورق فولادی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V_C = 0.5 f'_y L t \quad (3)$$

که در رابطه‌های (۲) و (۳)،  $f_y$  و  $f'_y$  به ترتیب مقاومت جاری شدن مصالح در کشش و فشار هستند. از این رو، ظرفیت کلی سیستم بصورت زیر خواهد بود:

$$V = V_T + V_C = 0.5(f_y + f'_y)Lt \quad (4)$$

از طرف دیگر، بر اساس آیین‌نامه AISC [۹] ظرفیت دیوارهای برشی فولادی مرکب از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V = 0.6 f_y L t \quad (5)$$

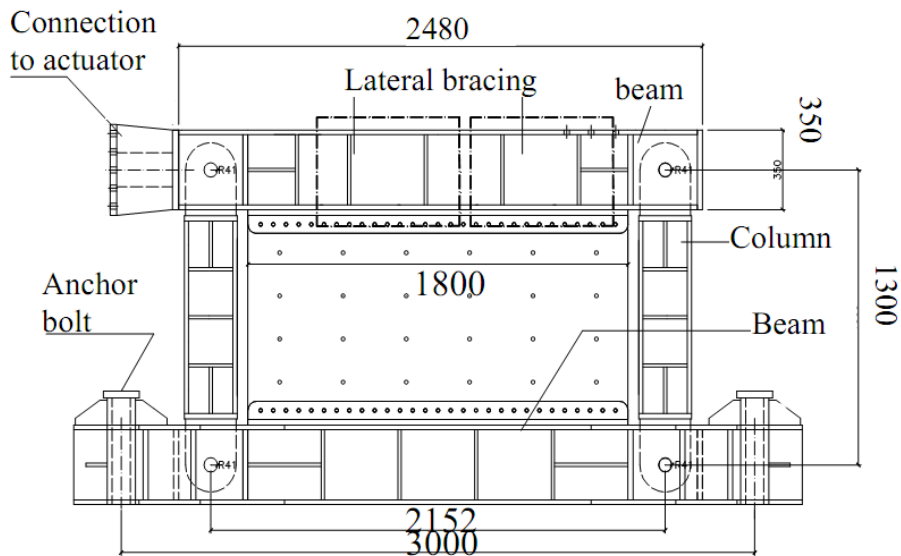
مقایسه‌ی رابطه‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهد که:

$$f'_y = 0.2f_y \quad (6)$$

این رابطه بیان‌گر این مطلب است که مقاومت فشاری ورق فولادی در دیوار برشی فولادی مرکب ۲۰٪ مقاومت کششی آن می‌باشد. از این رو، با در نظر گرفتن این مقاومت فشاری علاوه بر مقاومت میدان عمل کششی برای ورق فولادی می‌توان بدون مدل کردن بتن در دیوار برشی فولادی مرکب آن را الگوسازی کرد.

#### ۴- تحلیل عددی

نتیجه‌های آزمایش Gao و گروه پژوهشی وی برای صحت سنجی الگوی عددی مورد استفاده قرار گرفتند [۱۰]. در یکی از نمونه‌های آزمایشی آن‌ها، دیوار برشی فولادی مرکب به المان‌های مرزی قاب یک دهانه و یک طبقه متصل شده است. این قاب مطابق شکل زیر دارای اتصال‌های مفصلی با دهانه‌ای برابر ۲۴۸۰ mm و ارتفاع ۱۳۰۰ mm است. ارتفاع، عرض و ضخامت ورق فولادی به کار رفته در این نمونه به ترتیب برابر ۹۰۰ mm، ۱۸۰۰ mm و ۲ mm می‌باشند. ویژگی مصالح به کار رفته در نمونه‌ی آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است.



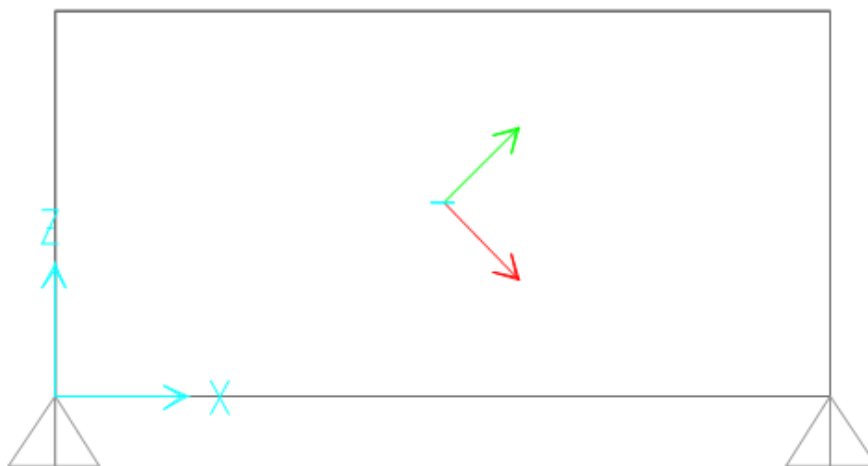
شکل ۴ - نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۰]



جدول ۱- ویژگی‌های مصالح نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۰]

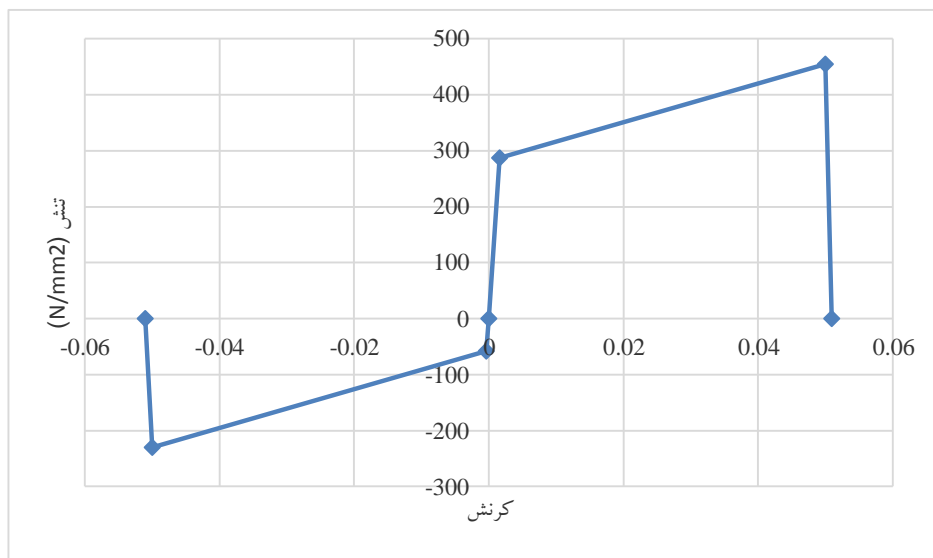
| ضخامت ورق<br>(mm) | مقاومت کششی<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | تنش جاری شدن<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ضریب کشسانی<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ۲                 | ۳۶۲/۹                               | ۲۸۷/۰                                | ۱۷۴۴۹۹/۴                            |

از نرم‌افزار SAP2000 برای مدل‌سازی نمونه استفاده شد. شکل زیر نمونه‌ی ساخته شده در این نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

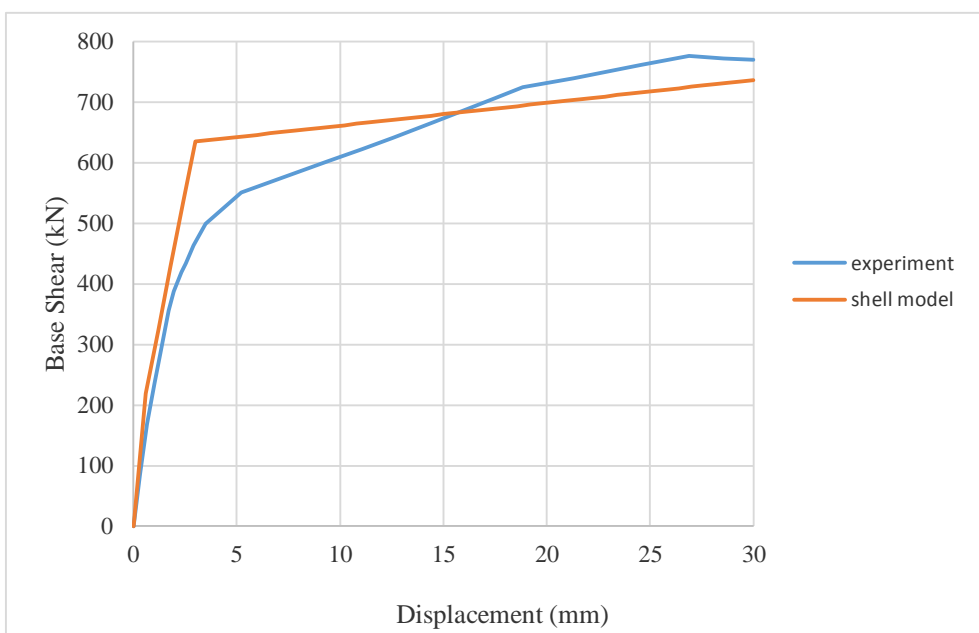


شکل ۵ - مدل نمونه‌ی آزمایشگاهی در نرم‌افزار SAP2000

رفتار عضوهای مرزی در نمونه بصورت ارتجاعی فرض می‌شود. برای ورق فولادی از المان shell با محورهای محلی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و مصالح غیرخطی استفاده شده است. شکل زیر نمودار تنش- کرنش مصالح ورق دیوار برشی در الگوی نمونه را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری در این نمودار ۲۰٪ مقاومت کششی و ضریب سخت شوندگی آن ۲٪ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۶ - نمودار تنش - کرنش مصالح در الگوی عددی



شکل ۷ - نمودار پوش اور الگوی عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی

همان‌طور که دیده می‌شود، نمودار پوش اور به دست آمده از الگوی عددی با دقت مناسبی برآزش نمودار پوش اور نمونه‌ی آزمایشگاهی نظیر خود است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، این الگو می‌تواند جایگزینی مناسب برای مدل‌سازی نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی مرکب در عمل باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب پرداخته شد و بخش‌های مختلف آن معرفی گردید. تفاوت‌های این دیوارها با دیوارهای برشی بتنی مورد بررسی قرار گرفت و سیستم نوین آن‌ها و تفاوت آن با سیستم‌های سنتی مقایسه شدند. به منظور ارزیابی رفتار این دیوارها، الگویی عددی بر اساس ظرفیت باربری جانبی دیوارهای برشی فولادی مرکب و با تعریف مصالح پیشنهاد شد. نتیجه‌ها نشان دادند که این الگو، با در نظر گرفتن مقاومت فشاری علاوه بر مقاومت کششی برای ورق فولادی، بدون نیاز به مدل‌سازی بتن، توانایی برآورد رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب را دارد و می‌توان با دقت مناسبی از آن برای بررسی رفتار این گونه دیوارها بهره جست.

## ۶- مراجع

1. Allen H.G., Bulson P.S. "Background to Buckling." McGraw Hill Book Company, U.K. 1980.
2. Dean R.G., Canon T.J., Poland C.D. "Unusual Structural Aspects of H.C. Moffit Hospital." Proceedings of the 46th Annual Convention, SEAOC, Coronado, CA. 1977.
3. Zhao Q., Astaneh-Asl A. "Cyclic Behavior of an Innovative Steel Shear Wall System." Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada. 2004
4. Astaneh-Asl A. "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls." Steel TIPS Report. Structural Steel Educational Council. Moraga, CA. 2001.
5. Astaneh-Asl A. "Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls." Steel TIPS Report. Structural Steel Educational Council. Moraga, CA. 2002.
6. Zhao Q., Astaneh-Asl A. "Cyclic Behavior of Composite Shear Wall Systems." Journal of Structural Engineering. ASCE. February 2003
7. Driver R.G., Kulak G.L., Elwi A.E. and Kennedy D.J.L. (1998). FE and simplified models of steel plate shear wall. ASCE Journal of Structure Engineering 124:2, 121-30.
8. Berman, J. and Bruneau, M. (2003). Plastic analysis and design of steel plate shear walls, Journal of Structural Engineering 129:11, 1448-1456.
9. AISC. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, USA. Trifunac, M. D. (2011), "Wind and Microtremor Induced Vibration of a 22 Story Steel Frame Building," Earthquake Engineering Research Lab., Report EERL 70-01, California Institute of Technology, Pasadena California.
10. Gao Hui. (2007). Experimental and Theoretical Studies on Composite Steel Plate Shear Walls, A dissertation submitted to Tongji University in conformity with the requirements for the degree of Master, Shanghai, China.