

بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان

سعید صبوری

استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
sabouri@kntu.ac.ir

سید پیمان موسوی قبه قشلاقی

دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
Peiman.mousavi@gmail.com

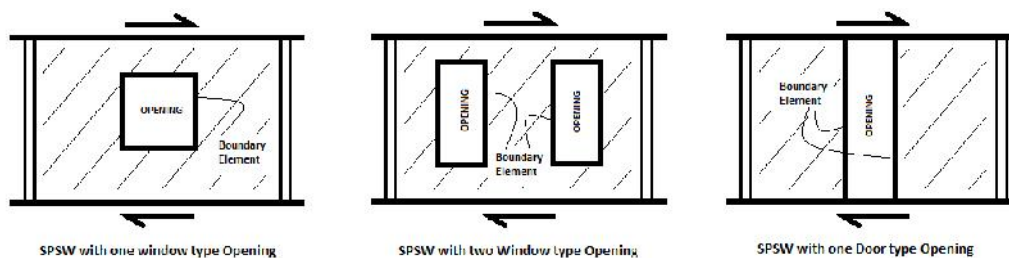
کلید واژه‌ها: دیوار برشی فولادی، بازشوی دروازه‌ای، مدل اندرکنش ورق و قاب، میدان کششی قطری، دیوار برشی فولادی با ستونهای غیریکسان

چکیده

دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو در سال‌های اخیر به دلیل عملکرد مناسب معماری، بسیار مورد توجه و اقبال مهندسين بوده است. نوع خاصی از این سیستم‌ها، دیوار برشی دارای بازشوی درب شکل است که بازشو از کف تا تیر بالایی امتداد می‌یابد. در چنین سیستمی پانل‌های طرفین بازشو به دلیل نامتقارن بودن وضعیت المان‌های مرزی خود رفتار متفاوتی را نسبت به دیوارهای برشی متداول، دارا می‌باشند و بالتبع رفتار هر کدام از پانل‌های طرفین بازشو را می‌توان در قالب یک دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان مطالعه نمود. در این مقاله به بررسی تحلیلی رفتار یک سیستم دیوار برشی فولادی با یک ستون قوی و یک ستون ضعیف که تداعی کننده یکی از پانل‌های طرفین بازشو یک دیوار برشی با بازشوی دروازه‌ای شکل است پرداخته شده و سعی گردیده تا روابط تحلیلی برای پیشگویی رفتار چنین سیستم‌هایی ارائه گردد. در ادامه برای بررسی صحت این روابط از مدلسازی عددی با نرم افزار اجزای محدود استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق مناسب روابط تحلیلی با مدلسازی عددی بوده و سودمندی استفاده از روابط مذکور را بیان می‌دارد.

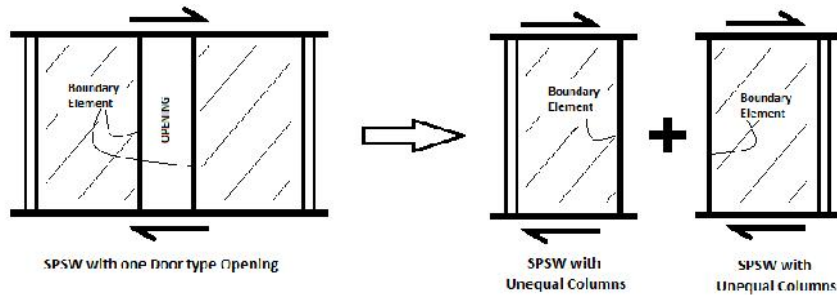
مقدمه

دیوارهای برشی فولادی سیستم‌های جدید و نو مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند که هم در برابر هر دو گونه بارهای جانبی باد و زلزله عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند. مقاومت و شکل‌پذیری این سیستم‌ها، آنها را برای استفاده در مناطق با خطر بالای وقوع زلزله یا باد مناسب نموده است. کارایی این سیستم با سایر سیستم‌های مقاوم جانبی اعم از سیستم‌های قاب خمشی یا سیستم‌های دیوار برشی بتنی مقایسه شده است و در نهایت به عنوان یک سیستم مهاربندی مناسب و اقتصادی برای ساختمان‌هایی در محدوده ۱۵ الی ۴۰ طبقه پذیرفته شده است. یکی از ویژگی‌های مناسب این سیستم‌ها امکان تعبیه بازشو در دیوار برشی است که در برخی مواقع به دلیل الزامات معماری اجتناب ناپذیر می‌باشد. این بازشوها در ابعاد مختلف به صورت مربعی و مستطیلی و در نقاط مختلف دیوار می‌تواند تعبیه شود. در شکل ۱ چندین نمونه از دیوارهای برشی فولادی با بازشوهای متداول نشان داده شده است.



شکل ۱: انواع بازشوهای متداول در دیوارهای برشی فولادی

گونه‌ای از بازشوها به صورت بازشو سرتاسری درب شکل است که در تمام امتداد ارتفاعی دیوار قرار می‌گیرد. در این حالت المان مرزی کناری بازشو چه از دید اقتصادی و چه از دید زیبایی نمی‌تواند ابعادی برابر با ستون اصلی قاب داشته باشد. در این صورت هر کدام از پانل‌های طرفین بازشو به صورت یک دیوار برشی فولادی با ستون‌های نامساوی خواهد بود. در شکل ۲ مفهوم وجودی دیوارهای برشی با ستون‌های غیر یکسان که در اصل پانل‌های طرفین یک دیوار برشی با بازشو درب شکل می‌باشند نشان داده شده است.



شکل ۲: بازشو درب شکل در یک دیوار برشی فولادی و معادل سازی پانل‌های طرفین بازشو با دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان

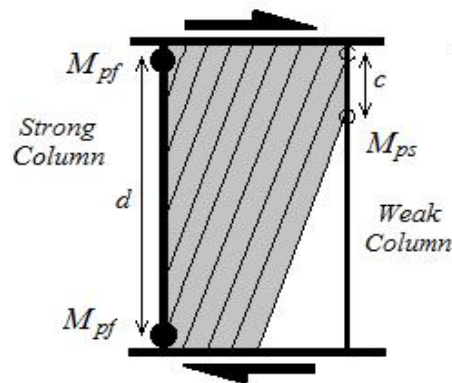
تحقیقات اولیه بر روی رفتار برشی ورق‌ها، توسط واگنر در سال ۱۹۳۱، Wagner H (1931) انجام گرفت. وی بر اساس آزمایش‌هایی که بر روی پانل‌های برشی نازک از جنس آلومینیوم انجام داد، تئوری میدان کششی قطری را ارائه کرد. پس از او محققان زیادی همچون باسلر Basler (1961) و پورتر Porter DM and et al. (1975) بر روی مقاومت حوزه کشش قطری در تیورق‌ها مطالعه کردند و اثر سختی بالها و سخت کننده‌ها را نیز روی مقاومت پانل‌های برشی بررسی کردند. در ادامه مقوله دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بدون سخت کننده توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (کاسیس و همکاران در سال ۱۹۹۳؛ درایور و همکاران در سال ۱۹۹۷؛ الغالی ۱۹۹۸؛ لوبل و همکاران ۲۰۰۰؛ بهبهانی فرد ۲۰۰۳؛ برمن و برنو ۲۰۰۳؛ پارک و همکاران ۲۰۰۷). می‌توان گفت اولین مطالعه تحلیلی بر روی سیستم دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده در سال ۱۹۸۳ در دانشگاه آلبرتا و توسط توربورن و همکارانش Thorburn, L. J. and, et al. (1983) صورت گرفت. در این مطالعات توربورن بیان نمود که ظرفیت نهایی سیستم دیوار برشی فولادی محدود به کمناش ورق نمی‌شود و میدان کششی قطری ایجاد شده در ورق بخش اعظمی از ظرفیت برشی سیستم را شامل می‌شود. وی با توسعه تحقیقات خود یک مدل تحلیلی به نام مدل نواری را برای شبیه‌سازی عملکرد میدان کششی در ورق پیشنهاد نمود. در سال ۱۹۸۳ تیملر و کولاک Timler PA and Kulak GL (1983) به منظور بررسی صحت روابط تحلیلی پیشنهاد شده توسط توربورن، آزمایشی را بر روی یک نمونه دیوار برشی فولادی یک طبقه انجام دادند. بر پایه این مطالعات مشخص گردید که باید سهم عملکرد خمشی ستون‌های سازه علاوه بر عوامل قبلی در روابط تعیین زاویه میدان کششی در نظر گرفته شود. از آنجائیکه مدل نواری پیشنهاد شده قبلی تنها محدود به دیوارهای با صفحات فولادی نازک بوده و برای دیوارهای با بازشو یا دیوارهای با صفحات ضخیم‌تر و یا دیوارهای دارای سخت کننده قابل استفاده نبود، برای از میان بردن محدودیت‌های روش نواری، صبوری و رابرتز Roberts TM and Sabouri Ghomi S (1991) یک روش کلی برای تحلیل و آنالیز دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های مختلف با سخت کننده بدون سخت کننده با بازشو و بدون بازشو با ورق نازک و ضخیم ارائه دادند. در این مدل ابتدا رفتار ورق فولادی و قاب محیطی به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته و سپس با جمع نیروهای ورق و قاب محیطی، رفتار سیستم محاسبه می‌گردد. این مدل ارائه شده به نام مدل اندرکنش ورق و قاب PFI موسوم می‌باشد. مزیت این روش آن است که می‌تواند بسیاری از پارامترهای طراحی مانند رابطه بار- تغییر مکان برشی، مقاومت و سختی را با لحاظ کردن اندرکنش قاب و ورق فولادی در نظر بگیرد و اثر آنها را روی ظرفیت کلی دیوار مورد بررسی قرار دهد. از طرف دیگر قابل استفاده در دیوارهای با و بدون سخت کننده و همچنین با بازشو و یا بدون آن است. همچنین در آنالیزهای چرخه‌ای و دینامیکی نیز می‌توان از آن استفاده کرد. چوی و پارک Choi I R and Park H (2009) طی مطالعاتی بر روی سیستم‌های مختلف دیوار برشی فولادی، مطالعاتی را نیز بر روی دیوارهای برشی درب شکل انجام دادند. در مطالعات ایشان مفاهیم میدان کششی قطری با مشارکت کامل و جزئی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین رفتار سیستم‌های دیوار برشی دارای بازشو درب شکل، همچون ظرفیت برشی، محل تشکیل مفاصل پلاستیک و همچنین امتداد شکل‌گیری میدان کششی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این مطالعه تحقیقی سعی بر آنست تا با بررسی و تحلیل رفتار یک سیستم دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان، روابطی تحلیلی برای پیشگویی رفتار این سیستم ارائه گردد. به منظور بررسی صحت روابط پیشنهادی سعی گردیده تا با استفاده از مدلسازی عددی صحت سنجی شده، درستی روابط بیان شده ارزیابی شود.

بیان روابط تحلیلی

مفاهیم پایه

به محض اینکه به یک پانل فولادی نیروی برشی اعمال می‌گردد، نیروهای کششی و فشاری در امتداد میدان کششی قطری ورق تشکیل می‌شوند. با از بین رفتن مقاومت در امتداد فشاری ورق که ناشی از مقاومت کمانشی ناچیز ورق می‌باشد به تدریج تمام نیروی تحمل شده در ورق در امتداد کششی توسعه یافته و به اصطلاح میدان کششی قطری در ورق شکل می‌گیرد. در طراحی المان‌های مرزی شرط مهم دارا بودن مقاومت و سختی کافی برای ایستادگی در برابر نیروهای حاصل از میدان کششی قطری می‌باشد. همچنین روابط معمول بیان شده برای سیستم‌های دیوار برشی فولادی برای حالتی هستند که توزیع میدان برشی در داخل مقطع به صورت یکنواخت صورت گرفته باشد. همانگونه که از مطالعات انجام شده بر می‌آید توزیع یکنواخت دیوار زمانی بوجود می‌آید که المان‌های مرزی ورق مقاومت و سختی کافی برای ایستادگی در برابر نیروهای حاصل از میدان کششی قطری را داشته باشند. در اثر توزیع یکنواخت میدان کششی در دیوار تمامی نقاط دیوار در باربری سیستم مشارکت می‌نمایند. در صورتی که المان‌های مرزی مقاومت لازم جهت ایستادگی در برابر نیروهای حاصل از میدان را نداشته باشند میدان کششی به طور کامل تشکیل نشده و به اصطلاح میدان به صورت جزئی تشکیل می‌شود. با اعمال نیرو یا تغییر شکل جانبی به دیوار برشی، میدان کششی قطری در ورق تشکیل شده و ورق وارد محدوده رفتار پس‌کمانشی می‌گردد. به دلیل تفاوت سختی در المان‌های محیطی ورق، میدان کششی قطری به صورت غیریکنواخت و در بخش‌هایی از ورق نزدیک به ستون قوی تشکیل می‌شود و در نواحی از ورق نزدیک به ستون ضعیف به دلیل عدم سختی کافی ستون جهت مشارکت در تحمل کشش ورق، میدان کششی شکل نمی‌گیرد. با افزایش تغییر شکل‌ها، ستون وارد مرحله پلاستیک شده و دو مفصل پلاستیک در بالا و پایین و در منتهی‌الیه ستون در محل اتصال به تیر تشکیل می‌شوند. با افزایش بیشتر تغییر شکل‌ها ستون ضعیف قاب نیز وارد مرحله پلاستیک شده و دو مفصل پلاستیک در ابتدا و انتهای محدوده مشارکت ستون ضعیف در نیروی میدان کششی تشکیل می‌شود. همانگونه که در شکل مشاهده می‌گردد مفاصل پلاستیک در بالا و پایین ستون‌های اصلی و به فاصله d از هم و مفاصل پلاستیک ستون ضعیف به فاصله C از هم تشکیل می‌شوند. در شکل ۳ نمای یک پانل برشی با ستون‌های غیر یکسان نشان داده شده است. پس از اعمال بار جانبی به قاب و پلاستیک شدن کامل سیستم، نحوه تشکیل میدان کششی قطری و مفاصل پلاستیک در ستون قوی و ستون ضعیف به صورت زیر خواهد بود.



شکل ۳: پانل برشی با ستون‌هایی با سختی متفاوت پس از شکل‌گیری مفاصل پلاستیک

تشریح روابط تحلیلی

مبنای استخراج روابط تحلیلی پیشنهادی، مطالعات رابرتز و صبوری (1991) Roberts TM and Sabouri Ghomi S و تئوری اندرکنش ورق و قاب است. در تعیین روابط سعی گردیده تا رفتار کلی پانل برشی بر مبنای رفتار ورق، ستون قوی و ستون ضعیف به طور جداگانه بررسی شود. فرضیات حاکم بر مسأله در این مطالعات عبارتند از:

المان‌های مرزی بالایی و پایینی پانل کاملاً صلب فرض شده‌اند تا رفتار برشی محض را برای پانل مورد نظر ایجاد نماید.

رفتار بار - تغییر مکان فرض شده برای هر یک از اجزای سیستم به صورت الاستیک - پلاستیک کامل می‌باشد.

زاویه میدان کششی بر اساس رابطه ارائه شده توسط تیملر (1983) Timler PA and Kulak GL و با فرض مشخصات ستون قوی برای هر دو ستون محاسبه می‌گردد.

ظرفیت برشی سیستم V برابر با مجموع ظرفیت برشی ورق V_p و ظرفیت برشی ستون قوی V_{sc} و ظرفیت برشی ستون ضعیف V_{wc} می‌باشد.

$$V = V_p + V_{sc} + V_{wc} \quad (1)$$

ظرفیت برشی ورق فولادی با فرض توزیع غیریکنواخت میدان کششی به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در سخت کننده، از رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$V_p = \frac{1}{2} \dagger_{ty} \cdot t \cdot b_q \sin 2\gamma \quad (2)$$

که این رابطه مشابه رابطه پیشنهاد شده توسط صبوری و رابرتز است با این تفاوت که به جای پارامتر b پارامتر b_q جایگزین شده است. با افزودن پانل متقارن به پانل مورد بررسی و محاسبه ظرفیت برشی پانل برآیند و مساوی قرار دادن آن با مجموع ظرفیت دو پانل اصلی و متقارن می توان مقدار b_q را محاسبه نمود. مقدار b_q از رابطه ۳ محاسبه می شود.

$$b_q = b - \frac{(d - c) \tan \gamma}{2} \quad (3)$$

تغییر مکان ورق فولادی را می توان با مساوی قرار دادن کار انجام شده توسط نیروی برشی ناشی از تنش های مذکور با انرژی کرنشی ورق فولادی محاسبه نمود. مقدار این تغییر مکان از رابطه ۴ محاسبه خواهد شد.

$$U_p = \frac{2 \dagger_{ty}}{E \cdot \sin 2\gamma} d_q \quad (4)$$

که این رابطه نیز مشابه رابطه پیشنهاد شده توسط صبوری و رابرتز است که پارامتر d_q جایگزین پارامتر d شده است. پارامتر d_q به صورت رابطه ۵ بدست می آید.

$$d_q = d + c \left(\frac{d}{b} - 1 \right) \quad (5)$$

پارامتر c که در روابط فوق استفاده گردید فاصله مفاصل پلاستیک در ستون ضعیف می باشد که مقدار آن با فرض یک سیستم تیر دو سر گیردار و یک سر غلطکی برای ستون ضعیف و با استفاده از اصل بقای انرژی به صورت رابطه ۶ بدست می آید.

$$c = \sqrt{\frac{4M_{pwc}}{\dagger_{ty} t \sin^2 \gamma}} = \frac{2}{\sin \gamma} \sqrt{\frac{M_{pwc}}{\dagger_{ty} t}} \quad (6)$$

ظرفیت برشی ناشی از ستون قوی قاب را می توان از رابطه ۷ تعیین نمود که محاسبات آن در روش PFI و در مطالعات صبوری و رابرتز انجام شده است.

$$V_{sc} = \frac{2M_{psc}}{d} \quad (7)$$

به طور مشابه، ظرفیت برشی ناشی از عملکرد ستون ضعیف را نیز می توان از رابطه مشابهی تعیین کرد.

$$V_{wc} = \frac{2M_{pwc}}{c} \quad (8)$$

در روابط فوق M_{pwc} لنگر پلاستیک ستون ضعیف، M_{psc} لنگر پلاستیک ستون قوی، d ارتفاع قاب، b دهانه قاب، γ زاویه میدان کششی و t ضخامت ورق برشی، E مدول ارتجاعی و \dagger_{ty} تنش تسلیم کششی ورق برشی می باشد.

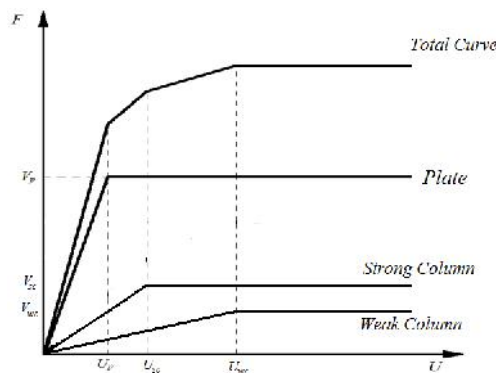
تغییر مکان نقطه بالایی قاب در اثر ایجاد مفصل پلاستیک در ستون قوی را می توان از رابطه ۹ تعیین نمود.

$$U_{sc} = \frac{M_{psc} d^2}{6E I_{sc}} \quad (9)$$

تغییر مکان قاب در اثر ایجاد مفصل پلاستیک در ستون ضعیف که مجموع تغییر مکان الاستیک و پلاستیک می باشد به صورت زیر است.

$$U_{wc} = \frac{M_{pwc} c^2}{6E I_{wc}} + \frac{M_{pwc} \cdot (d - c) \cdot c}{E I_{wc}} \quad (10)$$

با توجه به روابط بدست آمده، نمودار منحنی اندرکنش ورق و قاب برای سیستم مذکور با تجمیع نمودارهای هر یک از اجزای سیستم به صورت شکل ۴ قابل نمایش است.



شکل ۴: نمودار نیرو-تغییر مکان ورق و ستون قوی و ستون ضعیف و نمودار برآیند سیستم

بررسی عددی صحت روابط تحلیلی به روش اجزای محدود

پس از ارائه روابط تحلیلی لازم است تا صحت و درستی این روابط بررسی و اثبات گردد. بدین منظور از مدلسازی عددی به روش اجزای محدود بهره گرفته می شود. یکی از اصول مهم در صحت سنجی به روش عددی ابتدا اطمینان یافتن از صحت عملکرد روش عددی مورد نظر می باشد. بدین منظور از نتایج یک مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی که توسط صبوری و سجادی انجام گرفته استفاده شده است Sabouri Ghomi S and et al. (2012). برای انجام مدلسازی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. از آنجائیکه هدف از این مدلسازی استخراج نیروها و تغییر شکل های کلی سیستم بوده و ضرورتی جهت بررسی مشخصات تنش ها و کرنش ها در نقاط جزئی سیستم وجود نداشته بنابراین جهت کاستن از حجم مدلسازی عددی از المان های خطی برای مدلسازی ستون ها و تیرها استفاده شده است. جهت مدلسازی ورق برشی نیز از المان صفحه ای استفاده شده است. رفتار مصالح در تمامی اعضا به صورت الاستو - پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است.

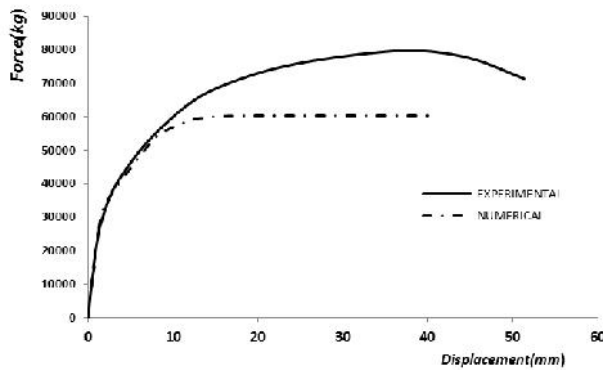
صحت سنجی روش عددی با یک مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی انتخاب شده برای صحت سنجی روش عددی، مربوط به نتایج یک آزمایش بر روی یک سیستم دیوار برشی فولادی با ستون های یکسان در طرفین می باشد. مدل مورد آزمایش در مقیاس ۱/۳ بوده و تحت بارگذاری چرخه ای تحت پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار گرفته است. شکل ۵ نمای کلی از نمونه مورد آزمایش را نشان می دهد. برای تیرها و ستون ها از فولاد با تنش تسلیم 4230 kg/cm^2 و تنش نهایی 5547 kg/cm^2 و برای ورق برشی از فولاد با تنش تسلیم 1961 kg/cm^2 و تنش نهایی 2943 kg/cm^2 استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل آزمایشگاهی بیان شده است.

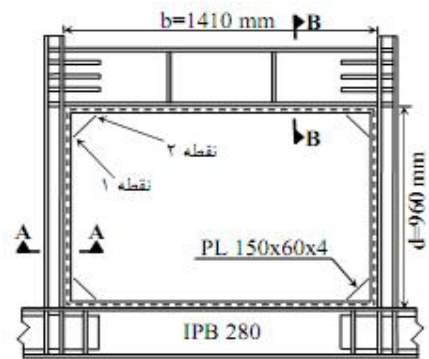
جدول ۱: مشخصات هندسی مقاطع مدل آزمایشگاهی استفاده شده

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





شکل ۶: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود



شکل ۵: شمای کلی نمونه آزمایشگاهی

همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، در محدوده الاستیک و نیز در ناحیه جاری شدگی دو نمودار انطباق مناسبی دارند. پس از این ناحیه، از آنجایی که در نمونه آزمایشگاهی سخت شوندهگی کرنش اتفاق می‌افتد و در مدل اجزای محدود سخت شوندهگی کرنش در نظر گرفته نشده، دو منحنی از هم فاصله می‌گیرند.

صحت سنجی روابط تحلیلی با روش عددی

پس از اطمینان از دقت مدل اجزای محدود در محدوده الاستیک و ناحیه ابتدایی عملکرد پلاستیک، دو مدل عددی با ارتفاع ثابت اما با ابعاد دهانه متفاوت در نظر گرفته می‌شود. مدل اول با نسبت عرض دهانه به ارتفاع کمتر از یک برای حالتی که سیستم از عملکرد خمشی تا حدودی متأثر باشد و مدل دوم با نسبت عرض دهانه به ارتفاع بزرگتر از یک برای حالتی که سیستم بیشتر تحت تأثیر عملکرد برشی باشد در نظر گرفته شده است. برای مدل اول ارتفاع برابر با ۱۰۰۰ mm و عرض دهانه برابر با ۷۰۰ mm که دارای نسبت عرض دهانه به ارتفاع $\omega = 0.7$ و برای مدل دوم ارتفاع برابر با ۱۰۰۰ mm و عرض دهانه برابر با ۱۵۰۰ mm با نسبت عرض به ارتفاع $\omega = 1.5$ در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در دو مدل عددی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل‌های عددی

اعضا	مدل عددی اول $\omega = 0.7$				مدل عددی دوم $\omega = 1.5$			
	جان		بال		جان		بال	
	عرض (mm)	ضخامت (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
تیر	۲۰۰	۲۰	۲۰۰	۲۰	۲۳۰	۲۰	۲۳۰	۲۰
ستون قوی	۱۸۰	۱۸	۱۸۰	۱۰	۱۴۴	۱۸	۱۴۴	۱۰
ستون ضعیف	۸۰	۱۰	۸۰	۵	۶۰	۱۰	۶۰	۵

همچنین در جدول ۳ خواص هندسی مصالح استفاده شده در مدل عددی نشان داده شده است. در انتخاب خواص مصالح سعی شده تا نمودار مصالح با سخت شوندهگی کرنشی ناچیز در نظر گرفته شوند تا تداعی کننده رفتار الاستو پلاستیک کامل مصالح در مدل عددی باشد.

جدول ۳: خواص مصالح استفاده شده در مدل‌های عددی

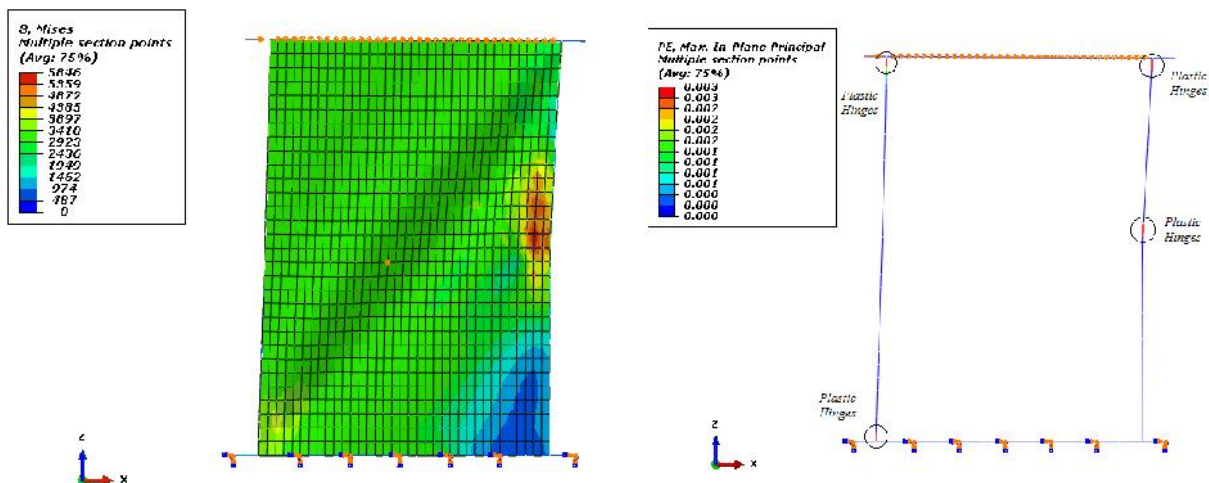
خواص مصالح	تیر	ستون قوی	ستون ضعیف	ورق برشی
تنش تسلیم f_y (kg/cm ²)	۳۲۹۳	۲۹۶۷	۲۹۴۷	۳۲۹۳
تنش کششی نهایی f_u (kg/cm ²)	۳۴۵۵	۳۱۴۵	۳۱۹۶	۳۴۵۵

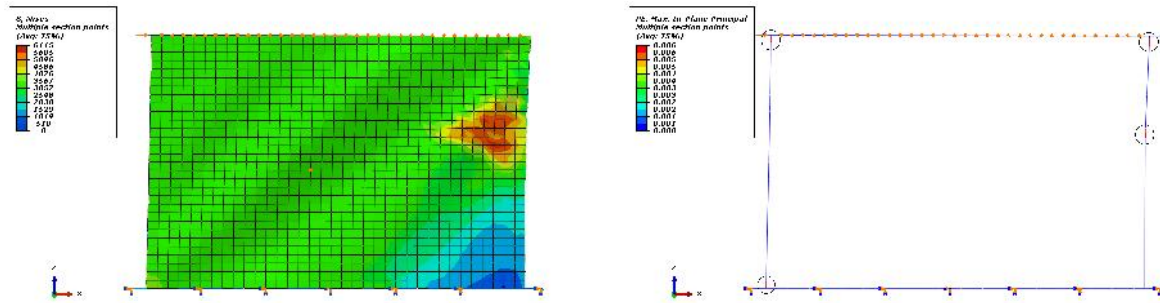
برای دو مدل پیشنهاد شده روابط تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر نیرو و تغییرمکان مربوط به هر کدام از اجزای دو مدل استخراج می‌گردد. در جدول ۴ مقادیر هر کدام از پارامترهای روابط تحلیلی و مراحل استخراج آنها برای هر کدام از دو مدل مورد بررسی نشان داده شده است.

جدول ۴: خلاصه روابط تحلیلی و محاسبات مربوط به مدل عددی اول و دوم

گام	مراحل استخراج روابط	روابط تحلیلی حاکم بر سیستم	مدل عددی اول $\bar{S} = 0.7$	مدل عددی دوم $\bar{S} = 1/5$
۱	فرض اولیه ضخامت ورق و مقاطع ستون‌ها			
۲	محاسبه زاویه Γ از رابطه تیمبلر و کولاک ۱۹۸۳		۲۷/۳۳ deg	۳۱/۷۲ deg
۳	محاسبه مقدار c ستون ضعیف با استفاده از مقدار Γ جدید	$c = \frac{\sqrt{4M_{ps}}}{\sqrt{\dagger_{ry}t \sin^2 \Gamma}} = \frac{2}{\sin \Gamma} \sqrt{\frac{M_{ps}}{\dagger_{ry}t}}$	۵۹۸ mm	۵۲۳ mm
۴	محاسبه مقدار b_q	$b_q = b - \frac{(d-c) \tan \Gamma}{2}$	۵۹۶ mm	۱۳۵۳ mm
۵	محاسبه مقدار d_q	$d_q = d + c \left(\frac{b}{b_q} - 1\right)$	۱۱۰۴ mm	۱۰۵۷ mm
۶	محاسبه V ورق	$V_p = \frac{1}{2} \dagger_{ry} . t . b_q \sin 2\Gamma$	۱۶۰۱۵ kg	۳۹۸۴۲ kg
۷	محاسبه U ورق	$U_p = \frac{2\dagger_{ry}}{E_s \cdot \sin 2\Gamma} . d_q$	۴/۲ mm	۳/۷ mm
۸	محاسبه V ستون قوی	$V_{sc} = \frac{2M_{psc}}{d}$	۱۲۸۴۸ kg	۱۲۸۴۸ kg
۹	محاسبه U ستون قوی	$U_{sc} = \frac{M_{psc} . d^2}{6EI_{sc}}$	۷/۵ mm	۷/۵ mm
۱۰	محاسبه V ستون ضعیف	$V_{wc} = \frac{2M_{pwc}}{c}$	۴۱۵۷ kg	۴۷۵۳ kg
۱۱	محاسبه U ستون ضعیف	$U_{wc} = \frac{M_{pwc} c^2}{6EI_{wc}} + \frac{2M_{pwc}}{c} \times \frac{(d-c)^3}{3EI_{wc}}$	۱۸/۹ mm	۱۸/۶ mm
۱۲	محاسبه رابطه مجموع	$V = V_p + V_{sc} + V_{ws}$	۳۳۰۲۰ kg	۵۷۴۴۳ kg

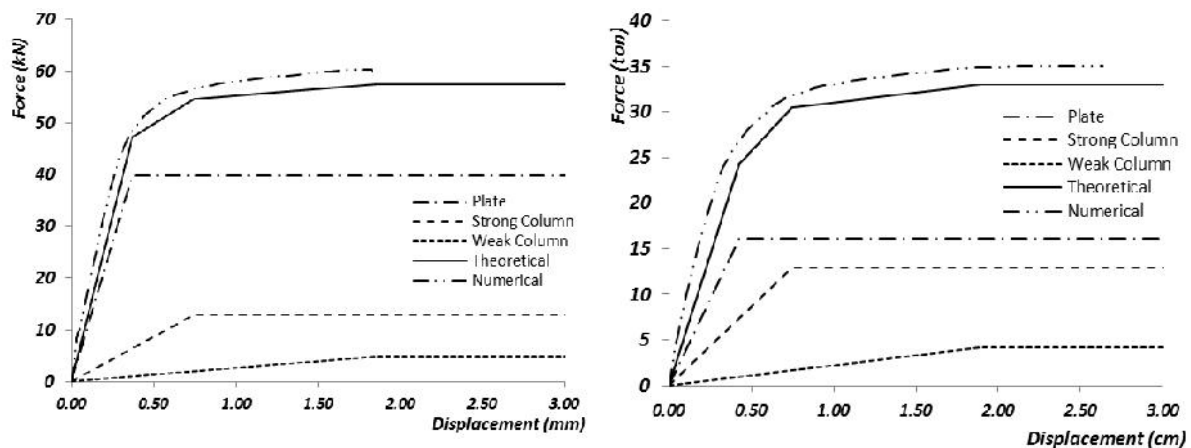
کانتور توزیع تنش‌ها و تغییرشکل‌ها و محل وقوع مفاصل پلاستیک در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد ناحیه مثلثی پائین ورق و مجاور ستون ضعیف در تراز تنش پائین تری نسبت به سایر نقاط ورق قرار دارد و این مسئله مفاهیم فرض شده در استخراج روابط تحلیلی یعنی وجود یک ناحیه مثلثی عدم مشارکت میدان در پانل برشی را تثبیت می‌نماید. یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی فاصله بین مفاصل پلاستیک در ستون ضعیف می‌باشد که این مقدار برای نمونه اول طبق روابط تحلیلی مطابق جدول ۴ برابر با ۵۹/۸ cm و طبق مدل سازی عددی همانگونه که در شکل ۷ مشخص است در حدود ۵۵ cm می‌باشد. برای نمونه دوم نیز این مقدار برابر با ۵۲/۳ cm برای مدل تحلیلی و حدود ۴۹ cm برای مدل عددی می‌باشد.

شکل ۷: کانتور توزیع تنش در ورق برشی و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل عددی $\bar{S} = 0.7$ 



شکل ۸: کانتور توزیع تنش در ورق برشی و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل عددی $\bar{S} = 1/5$

نمودار بار تغییرمکان مربوط به دو سیستم مورد بررسی به همراه منحنی‌های بار تغییرمکان هر کدام از مولفه‌های سیستم به همراه منحنی بار تغییرمکان عددی در شکل ۱۱ نشان داده است. برای هر کدام از دو حالت $\bar{\omega} = 1/5$ و $\bar{\omega} = 0/7$ منحنی اجزای سیستم اعم از منحنی ورق برشی، ستون قوی و ستون ضعیف و در نهایت منحنی کلی سیستم در نمودار مربوطه نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود انطباق مناسبی بین نمودار حاصل از روابط تحلیلی و نمودار عددی در هر دو حالت وجود دارد که حاکی از توانایی انطباق روابط تحلیلی برای حالت‌های مختلف عرض به ارتفاع سیستم دارد.



شکل ۹: نمودار بار تغییرمکان مربوط به دو مدل عددی $\bar{S} = 1/5$ و $\bar{S} = 0/7$

نتیجه گیری

در این مقاله رفتار یک سیستم دیوار برشی فولادی با یک ستون قوی و یک ستون ضعیف که تداعی کننده رفتار یکی از پانل‌های طرفین یک دیوار برشی با باز شو درب شکل سرتاسری است پرداخته شده است. روابط تحلیلی برای محاسبه ظرفیت برشی و تغییرمکان ورق، ستون قوی و ستون ضعیف ارائه شد. همچنین روابطی برای محاسبه فاصله مفاصل پلاستیک در ستون ضعیف ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل مدل‌های عددی صحت سنجی شده با روابط تحلیلی نشانگر انطباق مناسب بین نتایج و در نتیجه صحت و کفایت روابط تحلیلی پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است در محاسبه روابط تحلیلی از رابطه اولیه زاویه میدان کششی پیشنهاد شده توسط تیملر که برای یک سیستم دیوار برشی با ستون‌های یکسان پیشنهاد شده بود استفاده شده است. جهت تکمیل تحقیقات انجام گرفته پیشنهاد می‌گردد تا روابطی نیز جهت محاسبه زاویه میدان کششی در حالت مورد بررسی این مقاله یعنی سیستم دیوار برشی با ستون‌های غیریکسان توسعه یابد.

مراجع

- Basler K (1961) *Strength of Plate Girders in Shear*, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 87, n. ST7
- Choi IR and Park H (2009) *Steel Plate Shear Walls with Various Infill Plate Designs*, *Journal Of Structural Engineering, ASCE*, pp 785-796
- Porter DM, Rocky KL and Evans MD (1975) *The collapse behavior of plate girders loaded in shear*, *The Structural Engineer*, 53(8), pp 314-325

- Roberts TM and Sabouri Ghomi S (1991) Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels, *Thin Walled Structure*, 12(7), PP 145-162
- Sabouri-Ghomi S and Mamazizi S (2015) Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings, *Thin Walled Structures*, 86: 56–66
- Sabouri-Ghomi S, Ahouri E, Sajadi R, Alavi M, Roufegarinejad A, Bradford M A (2012) Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening, *Journal of Constructional Steel Research* 79 91–100
- Thorburn LJ, Kulak GL and Montgomery CJ (1983) Analysis and design of steel shear wall system, Structural Engineering Rep.No. 107, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Alberta
- Timler PA and Kulak GL (1983) Experimental study of steel plate shear walls, Structural Engineering Rep. No. 114, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Alberta, Canada
- Wagner H (1931) Flat sheet metal girders with very thin metal webs, Part I -General theories and assumption. NASA