



بررسی تحلیلی و عددی عملکرد دیوارهای برشی فولادی با ستون‌های نابرابر

سعید صبوری قمی^{۱*}، سید پیمان موسوی قیه قشلاقی^۲

۱- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳، mousavi@dena.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰)

چکیده

دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو، به دلیل عملکرد مناسب معماری، مورد اقبال چشمگیر بوده است. نوع خاصی از این سیستم‌ها، دیوارهای برشی دارای بازشوی درب شکل است که در آن بازشو همانند یک دروازه از کف تا تیر بالایی امتداد می‌یابد و المان‌های مرزی ضعیف‌تر نسبت به ستون‌های اصلی در طرفین بازشو تعبیه می‌شوند. با فرض رفتار برشی محض برای این سیستم می‌توان هر کدام از پانل‌های طرفین بازشو را به عنوان یک دیوار برشی با المان‌های مرزی قائم غیریکسان در نظر گرفت. رفتار این نوع دیوار برشی با استفاده از روابط متداول دیوارهای برشی فولادی قابل بیان نبوده و در ادبیات فنی تاکنون به دقت مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه رفتار دیوار برشی فولادی با یک ستون قوی و یک ستون ضعیف به صورت تحلیلی و عددی بررسی شده است. روابط تحلیلی برای تعیین منحنی بار تغییر مکان سیستم با تفکیک عملکرد ورق، ستون قوی و ستون ضعیف ارائه شده است. به منظور بررسی صحت روابط تحلیلی، ۱۲ مدل عددی دیوار برشی با تغییر ابعاد کلی سیستم و مقاطع مختلف ستون‌ها به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته و میزان خطاهای بین نتایج نیز بررسی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق مناسب روابط تحلیلی با رفتار واقعی این سیستم بوده و قابل استفاده بودن این روابط در طراحی این نوع دیوارهای برشی را بیان می‌دارد.

واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، بازشوی دروازه‌ای، مدل اندرکنش ورق و قاب، میدان کششی قطری، المان‌های مرزی غیریکسان

Theoretical and Numerical Study of Steel Plate Shear Walls with Unequal Columns

S. Sabouri Ghomi, S.P. Mousavi Gieh Geshlagi

Abstract

Steel plate shear walls with openings are highly interested because of their architectural aspects. A particular type of these systems is the steel plate shear wall with door-shaped opening; the opening is continued from the base to top beam and surrounded by boundary elements relatively weaker to main columns. Assuming the pure shear behaviour for this system, each of the side panels can be considered a steel plate shear wall with unequal VBEs (vertical boundary elements). Behaviour of this type of steel shear walls cannot be predicted by the common relations of steel shear walls; therefore, it has not been covered in technical literatures until now. In this study the behaviour of steel plate shear wall with one strong and one weak column is theoretically and numerically investigated. Theoretical relations to define the load-displacement curve were proposed. In order to study the theoretical relations comprehensively, 12 numerical models with various overall dimensions and column cross sections were investigated by finite element method; the probable errors of the results were also analysed. The obtained results show good agreement between theoretical relations and real behaviour of steel plate shear walls with unequal columns and persists the applicability of the relations in design of these systems.

Keywords

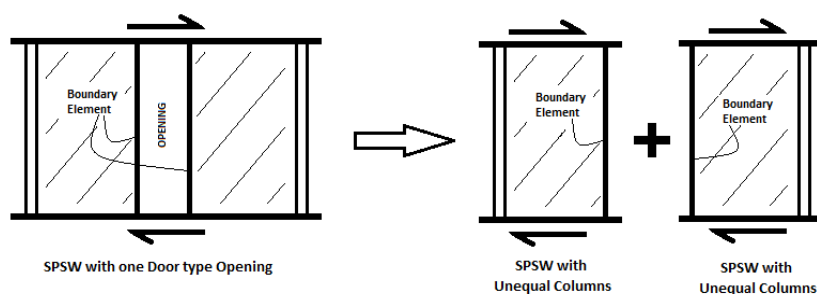
Steel plate shear walls, Door type opening, Unequal columns, Plate-frame interaction theory, Tension field action



سیستم‌هایی با رفتار دیوارهای برشی متداول متفاوت خواهد بود. بدین منظور مطالعه رفتار سیستم‌های دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان ضروری و راهگشا خواهد بود.

اولین مطالعه تحلیلی بر روی سیستم دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده توسط Thorburn و همکارانش [۴] صورت گرفت. آنها در این مطالعات با بیان تأثیر عمده عملکرد کششی ورق در ظرفیت برشی سیستم، مدلی موسوم به مدل نواری برای شبیه‌سازی عملکرد میدان کششی در ورق پیشنهاد نمودند. آنها همچنین با استفاده از اصل مینیمم بودن کار انجام شده توسط ورق و المان‌های مرزی آن رابطه‌ای را برای محاسبه زاویه میدان کششی پیشنهاد نمودند. Timler و Kulak [۵]، 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 رابطه زاویه میدان کششی اصلاح گردید و سهم عملکرد خمشی ستون‌های سازه علاوه بر عوامل قبلی در روابط تعیین زاویه میدان کششی در نظر گرفته شد. در سال ۱۹۹۱ Roberts و Sabouri Ghomi [۶] روشی موسوم به تئوری اندرکنش ورق و قاب برای تحلیل 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 روش، رفتار یک دیوار برشی فولادی با تجميع رفتار هر کدام از المان‌های ورق و قاب به تنهایی بیان می‌گردد [۷ و ۸].

دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم‌های موثر و کارآمد جهت مقابله با بارهای جانبی شناخته شده‌اند. در چند دهه گذشته اقبال زیادی برای توسعه استفاده از دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی در ساختمان‌ها ایجاد شده است [۱]. به دلیل جذب انرژی زیاد، این سیستم‌ها قابلیت استفاده در نواحی با خطر لرزه خیزی بالا را دارا می‌باشند [۲]. یکی از ویژگی‌های مناسب این سیستم‌ها امکان تعبیه بازشو در دیوار برشی است که در برخی مواقع به دلیل الزامات معماری اجتناب ناپذیر می‌باشد [۳]. این بازشوها در ابعاد و اشکال متنوع در نقاط مختلف دیوار می‌توانند تعبیه شوند. گونه خاصی از بازشوها، بازشو سرتاسری درب شکل است که در تمام ارتفاع دیوار امتداد می‌یابد. در این حالت المان مرزی کناری بازشو چه از دید اقتصادی و چه از دید معماری می‌تواند ابعادی کوچکتر از ستون اصلی قاب داشته باشد. در این صورت هر کدام از پانل‌های طرفین بازشو را می‌توان به صورت یک دیوار برشی فولادی با ستون‌های نابرابر در نظر گرفت. شکل شماتیک دیوارهای برشی با ستون‌های غیریکسان که در اصل پانل‌های طرفین یک دیوار برشی با بازشو درب شکل می‌باشند در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که عملکرد سیستم‌های دیوار برشی فولادی بسیار متأثر از المان‌های مرزی دیوار علی‌الخصوص المان‌های مرزی قائم می‌باشند به دلیل تفاوت المان‌های مرزی قائم در این سیستم، رفتار چنین



شکل ۱- بازشو درب شکل در یک دیوار برشی فولادی و معادل سازی هر یک از پانل‌های طرفین بازشو با یک دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان

که به عنوان یک دیوار برشی همبند معرفی شده بود انجام دادند. در مطالعات ایشان مفهوم میدان کششی موثر که بیانگر ناحیه مشارکت ورق در میدان کششی می‌باشد نیز معرفی گردید. همچنین روابطی برای تعیین زاویه میدان کششی و ظرفیت برشی در دیوار برشی با اتصال جزئی به المان‌های محیطی ارائه

Park و Choi در سال ۲۰۰۹ [۹]، مطالعات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با مشخصات مختلف ورق پر کننده داخلی از جمله دیوار برشی بدون اتصال ورق به المان‌های مرزی قائم طرفین موسوم به دیوار با اتصال جزئی به المان‌های محیطی و همچنین دیوار برشی با بازشو درب شکل

گردید. Sabouri-Ghomi و Sajjadi [۱۰ و ۱۱] در سال ۲۰۰۹ مطالعات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با و بدون سخت کننده انجام دادند. همچنین در مطالعات آنها تأثیر وجود بازشو در مرکز دیوار و کاهش سختی اولیه و مقاومت برشی نهایی سیستم به نسبت افزایش عرض بازشو مورد توجه قرار گرفت. در سال ۲۰۱۵ Wang و همکارانش [۱۲] مجموعه‌ای از بررسی‌های عددی بر روی مشخصات مختلف ورق برشی شامل ورق سخت نشده، ورق سخت شده صلیبی، ورق با برش های منظم عمودی، ورق سوراخدار منظم، ورق با مقاومت پائین، ورق با سخت کننده قطری، ورق بدون اتصال به المان‌های مرزی قائم طرفین و دیوار برشی با بازشو درب شکل در یک سمت را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. در سال ۲۰۱۵ Sabouri-Ghomi و Mousavi [۱۵] با انجام مجموعه‌ای از مطالعات عددی به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ستون های غیریکسان پرداختند. در این مطالعات تأثیر ضعیف بودن یکی از ستون‌ها نسبت به ستون دیگر در عملکرد دیوار برشی فولادی و همچنین مفهوم ناحیه مشارکت و عدم مشارکت میدان کششی و همچنین تفاوت محل تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون ضعیف نسبت به حالت‌های متداول دیوار برشی مورد بررسی قرار گرفت.

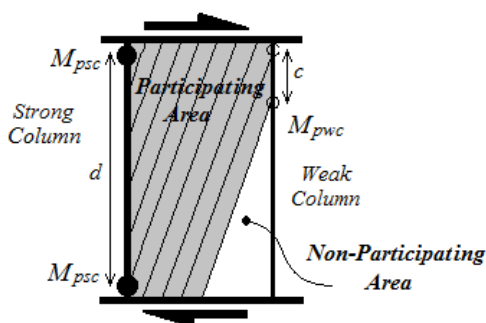
در مطالعه تحقیقی حاضر رفتار دیوار برشی فولادی با یک ستون قوی و یک ستون ضعیف به صورت تحلیلی و عددی بررسی شده و روابط تحلیلی برای تعیین منحنی بار تغییر مکان سیستم با تفکیک عملکرد ورق، ستون قوی و ستون ضعیف ارائه شده است. به منظور بررسی صحت روابط تحلیلی، ۱۲ مدل عددی صحت سنجی شده دیوار برشی با ابعاد و مقاطع مختلف ستون به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته و میزان خطاهای احتمالی بین نتایج نیز تحلیل شده است. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق مناسب روابط تحلیلی با رفتار واقعی این سیستم بوده و قابل استفاده بودن این روابط در طراحی این نوع دیوارهای برشی را بیان می‌دارد.

۲- روابط تحلیلی

۲-۱ مفاهیم پایه

با اعمال نیروی جانبی به یک پانل برشی، میدان کششی قطری در ورق برشی پس از وقوع کمانش شکل می‌گیرد. نیروهایی که تحت اثر میدان کششی قطری در ورق توسعه می‌یابند بایستی توسط سختی خمشی المان‌های مرزی تحمل گردند [۱۳].

المان‌های مرزی به خصوص المان‌های مرزی قائم بایستی دارای مقاومت و سختی کافی باشند تا بتوانند در برابر نیروهای گسترده ایجاد شده در ورق برشی تا محدوده تسلیم شدگی کامل ورق مقاومت نمایند [۱۳]. در صورتی که یکی از المان‌های مرزی قائم دارای مقاومت و سختی کافی نباشد، توان ایستادگی در برابر نیروهای وارده از میدان کششی را نداشته و بنابراین بخش‌هایی از ورق در مجاورت المان مرزی ضعیف به مرحله تسلیم شدگی کامل نخواهند رسید و بنابراین در این حالت گفته می‌شود که میدان کششی به طور جزئی شکل گرفته است به این مفهوم در مطالعات Choi و Park [۹] به صورت ضمنی اشاره شده و همچنین در مطالعه مشابه مولفین [۱۵] نیز این مفاهیم تحت عنوان ناحیه مشارکت و عدم مشارکت ورق در میدان کششی مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفته است. در این حالت نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در المان مرزی ضعیف با حالت معمول دیوار برشی متفاوت خواهد بود. به طوریکه با افزایش تغییر مکان جانبی سیستم ابتدا دو مفصل پلاستیک در بالا و پائین ستون قوی و سپس دو مفصل پلاستیک در ابتدا و انتهای محدوده مشارکت ستون ضعیف در عملکرد میدان کششی تشکیل می‌شود. در شکل (۲) نحوه شکل‌گیری میدان کششی قطری و مفاصل پلاستیک در المان‌های مرزی قوی و ضعیف و همچنین نواحی مشارکت و عدم مشارکت میدان کششی در یک سیستم دیوار برشی با ستون‌های غیریکسان نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و میدان کششی قطری در یک پانل برشی با ستون‌های غیر یکسان

۲-۲ ظرفیت سازه‌ای

مبنای استخراج روابط تحلیلی پیشنهادی، مطالعات Roberts [۶] و Sabouri-Ghomi [۷] بر مبنای تئوری اندرکنش ورق و قاب است. در استخراج روابط، رفتار کلی پانل برشی بر مبنای رفتار

ورق، ستون قوی و ستون ضعیف به طور جداگانه بررسی شده است. در توسعه روابط فرضیات زیر به کار رفته است:

- المان‌های مرزی فوقانی و تحتانی کاملاً صلب می‌باشند.
- رفتار بار-تغییر مکان هر یک از اجزای سیستم الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشد.
- اتصال ورق به قاب توان تأمین مقاومت کششی ورق را دارد.

- نسبت دهانه به ارتفاع طوری در نظر گرفته شده تا رفتار پانل به صورت برشی محض باشد.

با توجه به مفاهیم ارائه شده در روش PFI [V] مبنی بر محاسبه ظرفیت تک تک اعضای قاب و تجميع آنها، ظرفیت برشی کل 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.

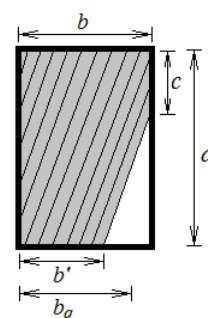
$$V = V_p + V_{sc} + V_{wc} \quad (1)$$

ظرفیت برشی ورق فولادی با فرض توزیع غیریکنواخت میدان کششی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

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

که در آن σ_{ty} تنش تسلیم کششی ورق برشی، t ضخامت ورق، α زاویه میدان کششی و b_q دهانه موثر برای عملکرد برشی پانل می‌باشد. رابطه فوق مشابه رابطه پیشنهادی Sabouri-Ghomi [V] می‌باشد که به جای پارامتر b پارامتر b_q جایگزین شده است. دهانه موثر ورق بخشی از دهانه ورق است که تأثیر ناحیه عدم مشارکت ورق در آن لحاظ شده است.

با توجه به عدم برقراری میدان کششی در کل ورق نه می‌توان کل دهانه یعنی مقدار b را به عنوان دهانه موثر در نظر گرفت و نه می‌توان تنها عرض ناحیه مشارکت b' را در نظر گرفت. یعنی b_q مقداری ما بین b و b' می‌باشد. در شکل (۳) مفهوم پارامتر b_q و b' به طور شماتیک توضیح داده شده است.

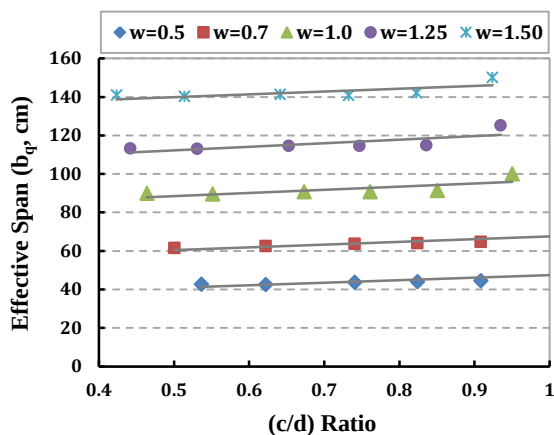


شکل ۳- پارامترهای میدان کششی با توزیع جزئی

با توجه به پیچیدگی رفتار ورق در شکل تسلیم نامتقارن خود ارائه یک رابطه هندسی ممکن است اندکی غیر دقیق و گمراه کننده باشد. از این رو بهتر است رابطه‌ای بر مبنای مطالعات عددی پیشنهاد گردد. بنابراین یک مجموعه مطالعه عددی با نرم افزار ABAQUS و با فرض المان shell برای ورق و المان beam برای تیرها و ستون‌ها برای تخمین رابطه‌ای برای b_q انجام می‌گیرد. این مدل‌های عددی محدوده‌ای از تغییرات w یعنی نسبت دهانه به ارتفاع ($w=b/d$) و نسبت اساس مقطع پلاستیک ستون ضعیف به قوی که در نهایت منجر به استخراج پارامتر (c/d) می‌شود را در بر می‌گیرد. در نهایت رابطه عددی پیشنهادی برای b_q به شرح زیر می‌باشد.

$$b_q = \left[-15.26 \left(\frac{b}{d} \right)^2 + 32.26 \left(\frac{b}{d} \right) \right] \left(\frac{c}{d} \right) + 96.61 \left(\frac{b}{d} \right) - 14.92 \quad (3)$$

در این رابطه b دهانه پانل برشی، d ارتفاع پانل برشی و c طول مشارکت ستون ضعیف در عملکرد میدان کششی می‌باشد. شکل (۴) نمودار تغییرات b_q در مقابل نسبت (c/d) و برای نسبت‌های مختلف ($w=b/d$) را نشان می‌دهد که رابطه (۳) از آن استخراج شده است.



شکل ۴- نمودارهای تغییرات b_q در مقابل نسبت (c/d) برای مقادیر مختلف نسبت $(w=b/d)$

تغییر مکان ورق فولادی را می‌توان با مساوی قرار دادن کار انجام شده توسط نیروی برشی ناشی از تنش‌های مذکور در میدان کششی موثر ورق با انرژی کرنشی میدان کششی موثر ورق فولادی محاسبه نمود.

$$\frac{1}{2} \sigma_{ty} \cdot t \cdot b_q \cdot \sin(2\alpha) \times U_p = \frac{\sigma_{ty}^2}{2E_s} t \cdot b_q \cdot d \quad (4)$$

$$U_p = \frac{2\sigma_{ty}}{E \sin(2\alpha)} d \quad (5)$$



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

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

که M_{psc} لنگر پلاستیک ستون قوی می باشد.

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

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

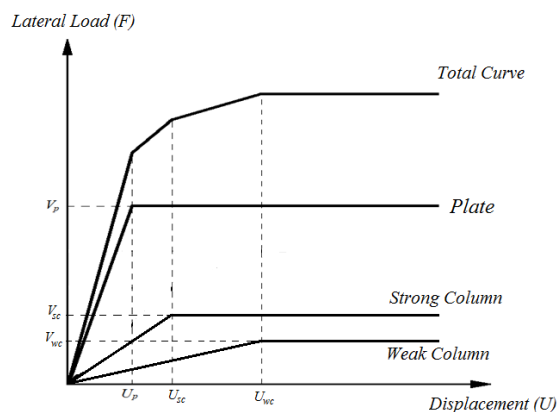
که در آن I_{sc} ممان اینرسی ستون قوی می باشد.

تغییر مکان جانبی قاب در اثر ایجاد مفصل پلاستیک در ستون ضعیف که شامل تغییر مکان الاستیک و پلاستیک است به صورت زیر می باشد:

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

که در آن I_{wc} ممان اینرسی ستون ضعیف می باشد.

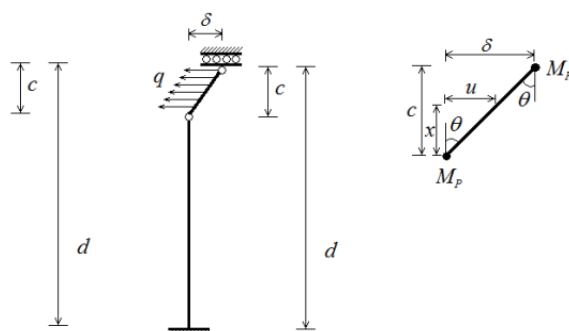
با توجه به روابط شماره (۲)، (۷) و (۸) می توان به ترتیب ظرفیت ورق، ستون قوی و ستون ضعیف را محاسبه کرد. همچنین با استفاده از روابط شماره (۵)، (۹) و (۱۰) به ترتیب تغییر مکان سه مؤلفه مذکور محاسبه می گردد. با تجميع این روابط، منحنی اندرکنش ورق و قاب برای سیستم مذکور به صورت شکل (۶) قابل نمایش است.



شکل ۶- نمودار نیرو-تغییر مکان ورق، ستون قوی و ستون ضعیف و نمودار برآیند سیستم

حالت خاصی از روابط فوق حالتی است که مشخصات ستون ضعیف برابر با مشخصات ستون قوی باشد که در این حالت با جاگذاری مقدار d به جای پارامتر c روابط پیشنهاد شده توسط Sabouri-Ghomi و Roberts [۶] بدست می آیند که صحت عملکرد روابط پیشنهاد شده برای حالت خاص $c=d$ را نشان می دهد.

که در این رابطه E مدول ارتجاعی مقطع و d ارتفاع پائل برشی می باشد. رابطه (۵) کاملاً مشابه رابطه پیشنهاد شده توسط Roberts و Sabouri-Ghomi [۷ و ۶] می باشد. لازم به ذکر است در محاسبه انرژی کرنشی ورق فولادی، جهت سادگی از در نظر گرفتن ناحیه دوزنقه ای بالای ناحیه عدم مشارکت صرف نظر شده است.



شکل ۵- دیاگرام نیروها در ستون ضعیف و نحوه محاسبه پارامتر c

برای محاسبه پارامتر c یعنی طول مشارکت المان مرزی ضعیف در باربری نیروهای میدان کششی، مطابق شکل (۵)، با فرض رفتار تیر یک سرگیردار و یک سر غلطکی برای ستون ضعیف و با برابر قرار دادن کار خارجی انجام شده توسط سیستم با کار داخلی سیستم، به صورت زیر خواهیم داشت [۹]:

$$C = \frac{4M_{pwc}}{\sigma_{ty}t \sin^2(\alpha)} = \frac{2}{\sin(\alpha)} \sqrt{\frac{M_{pwc}}{\sigma_{ty}t}} \quad (6)$$

که در آن M_{pwc} ممان پلاستیک ستون ضعیف می باشد. در شکل (۵) مقدار q برابر با مؤلفه افقی بار گسترده اعمال شده از سمت ورق به ستون ضعیف، δ برابر با تغییر مکان جانبی ستون ضعیف، θ زاویه دوران محل مفصل پلاستیک در ستون ضعیف می باشد که برای محاسبه مقدار c در رابطه (۶) مورد استفاده قرار می گیرند که به منظور خلاصه سازی از بیان تفصیلی نحوه محاسبه اجتناب شده است. با استناد به تئوری PFI و مطالعات انجام شده Sabouri-Ghomi و Roberts [۶]، Sabouri-Ghomi و Ventura [۸]، برای سیستم های متداول دیوار برشی در نظر گرفتن مقدار $\alpha = 45^\circ$ برای زاویه امتداد میدان کششی فرض قابل قبول می باشد. در این مطالعه نیز برای ساده سازی محاسبات مقدار 45° درجه برای زاویه میدان کششی فرض می گردد. ظرفیت برشی ستون قوی و ستون ضعیف قاب را می توان به ترتیب از روابط (۷) و (۸) تعیین نمود که محاسبات آن در روش PFI و در مطالعات Roberts و Sabouri-Ghomi [۶] ارائه شده است.

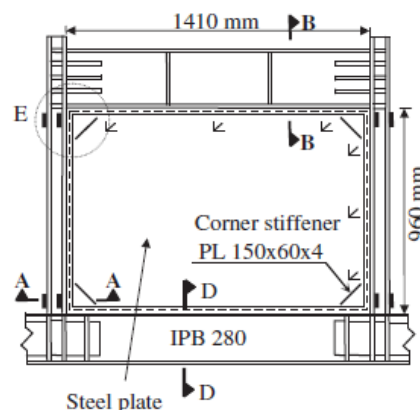


۳- بررسی‌های عددی اجزای محدود

در این مطالعه برای نمایش صحت فرضیات به کار گرفته شده در توسعه روابط تحلیلی از مدلسازی عددی بهره گرفته می‌شود. در ابتدا به منظور اطمینان از صحت مدلسازی عددی، رفتار یک دیوار برشی با ستون‌های یکسان بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی Sabouri-Ghomi و Sajjadi در سال ۲۰۱۲ [۱۰] به روش عددی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردد. پس از اطمینان از صحت نتایج، رفتار نمونه‌های مختلف دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان بررسی می‌شود. برای انجام مدلسازی عددی از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است [۱۴]. از آنجائیکه هدف از این مدلسازی استخراج نیروها و تغییرشکل‌های کلی سیستم بوده و ضرورتی جهت بررسی مشخصات تنش‌ها و کرنش‌ها در نقاط جزئی سیستم وجود نداشته بنابراین جهت کاستن از حجم مدلسازی عددی از المان‌های خطی B31 برای مدلسازی ستون‌ها و تیرها استفاده شده است. جهت مدلسازی ورق برشی نیز از المان صفحه‌ای S4 استفاده شده است.

۳-۱ 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 ستون‌های یکسان در طرفین می‌باشد. مدل مورد آزمایش در مقیاس ۱/۳ بوده و تحت بارگذاری چرخه‌ای تحت پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار گرفته است. شکل ۷ نمای کلی از نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. برای تیرها و ستون‌ها از فولاد با تنش تسلیم $414/9 \text{ MPa}$ و تنش نهایی $551/8 \text{ MPa}$ و برای ورق برشی از فولاد با تنش تسلیم $192/4 \text{ MPa}$ و تنش نهایی $277/2 \text{ MPa}$ استفاده شده است.



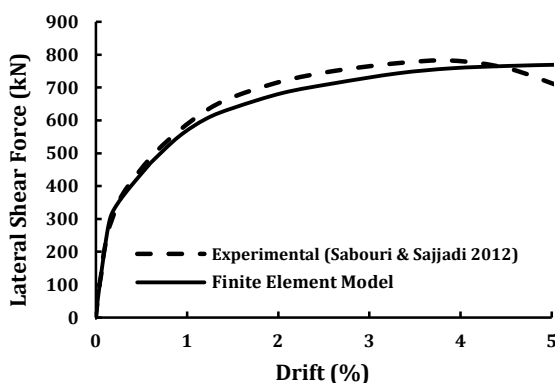
شکل ۷- شمای کلی نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده [۱۰]

در جدول (۱) مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل آزمایشگاهی بیان شده است. همچنین در شکل (۹-الف) مدل عددی اجزای محدود به همراه شرایط تکیه‌گاهی و بارهای وارده ارائه شده است. در مدلسازی عددی استفاده شده برای صحت سنجی روش عددی سعی شده تا رفتار مصالح در محدوده ناحیه پلاستیک در رفتار مصالح در نظر گرفته شود.

جدول ۱- مشخصات هندسی مقاطع مدل آزمایشگاهی

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

همانطور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، انطباق قابل قبولی در منحنی بار تغییرمکان مدلسازی عددی با نمونه آزمایش شده مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است منحنی بار تغییرمکان آزمایشگاهی شکل (۸) پوشش منحنی‌های بار تغییرمکان حاصل از آزمایش سایکلک نمونه بوده است. شکل (۹-ب) کانتور تغییرشکل مدل عددی و شکل (۹-ج) فرم تغییرشکل واقعی نمونه در انتهای آزمایش را نشان می‌دهد که بیانگر انطباق مناسب مدل عددی و نمونه آزمایش از نظر فرم تغییرشکلی و کماتشی ورق نیز می‌باشد.

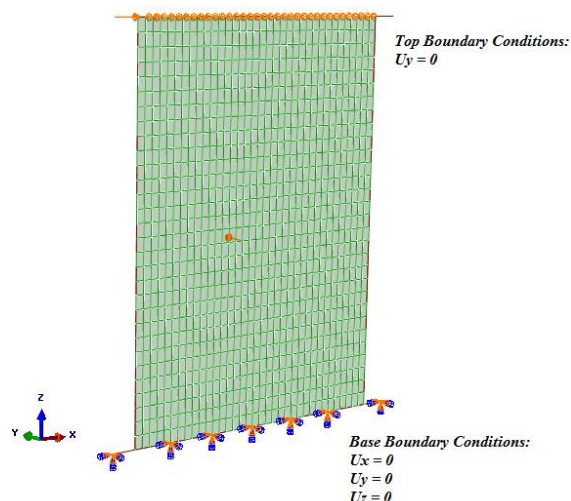


شکل ۸- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود

۳-۲ صحت سنجی روابط تحلیلی با روش عددی

پس از اطمینان از دقت مدل اجزای محدود در محدوده الاستیک و ناحیه سخت شوندگی پلاستیک، مجموعه‌ای از مدلسازی‌های عددی برای بررسی صحت روابط پیشنهاد شده انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه یکی از فرضیات

دیگری بر مبنای تغییر مشخصات هندسی ستون ضعیف از ضعیف به قوی بر روی سیستم انجام می‌گیرد. مصالح انتخاب شده برای هر دو دسته مدل یکسان در نظر گرفته شده است. مدول ارتجاعی در نظر گرفته شده برای فولاد برابر $E=2/1e6$ و مقدار ضریب پواسون برابر با $0/3$ در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم مصالح برای ستون قوی و ضعیف برابر با 289 MPa ، برای ورق برشی برابر با 323 MPa و برای تیر برابر با 328 MPa منظور شده است.



شکل ۱۰- شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل های عددی

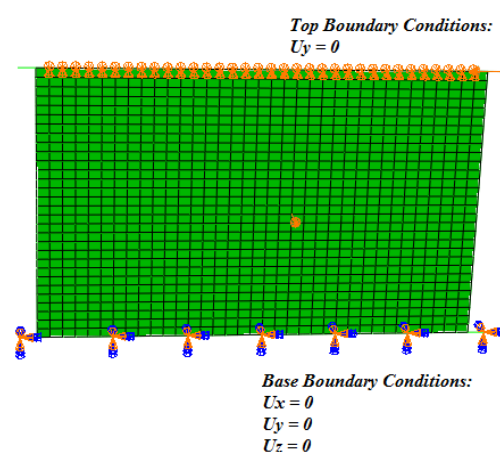
۳-۲-۱ سناریو اول : مدل های عددی با تغییر نسبت دهانه به ارتفاع

بدین منظور پارامتر $\omega = b/d$ به عنوان نسبت دهانه به ارتفاع سیستم انتخاب می‌شود. از آنجائیکه یکی از اصلی ترین فرض های حاکم بر توسعه روابط تحلیلی فرض عملکرد برشی محض سیستم بوده است بنابراین محدوده ω به گونه ای انتخاب می گردد تا از مقدار $0/5$ که رفتار پانل از حالت برش محض دورتر است به مقدار $1/7$ که رفتار پانل به حالت برش محض نزدیک تر است تغییر یابد. تا میزان انطباق و پوشش روابط در محدوده رفتار خمشی و برشی مشخص گردد. در جدول (۲) محدوده انتخاب شده برای ω نشان داده شده است.

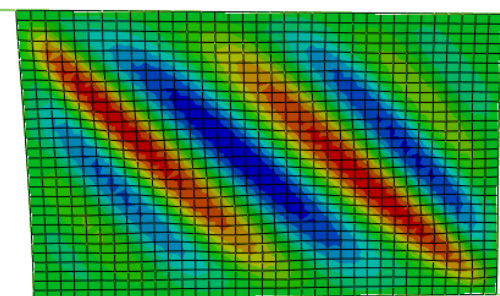
جدول ۲- مشخصات نسبت دهانه به ارتفاع نمونه های مورد بررسی

Case 6	Case 5	Case 4	Case 3	Case 2	Case 1	ω
1/70	1/50	1/25	1/10	0/70	0/50	

برای سهولت در تغییر پارامترها ارتفاع مقطع به صورت ثابت و برابر با 1000 mm در نظر گرفته شده و سعی شده تا



الف) مدل عددی صحت سنجی شده به همراه شرایط مرزی



ب) شکل تغییر شکل یافته نمونه در مدل سازی



ج) شکل تغییر شکل یافته نمونه مورد آزمایش و همخوانی فرم تغییر شکلی نمونه آزمایش با مدل عددی

شکل ۹- نمایش مدل سازی عددی و همخوانی تغییر شکل نمونه عددی و واقعی

اصلی روابط تحلیلی رفتار الاستیک-پلاستیک کامل مصالح بوده است بنابراین در مدل سازی عددی نیز سعی شده تا رفتار مصالح به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شود. شکل (۱۰) شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل های عددی مورد مطالعه را بیان می نماید. برای انجام مطالعات عددی دو سناریو یکی بر مبنای تغییر نسبت دهانه به ارتفاع دیوار و

و تحلیلی بوده و بیانگر جامعیت روابط تحلیلی پیشنهاد شده برای سناریو اول یعنی تغییرات نسبت دهانه به ارتفاع می‌باشد.

۲-۲-۳ سناریو دوم: مدل‌های عددی با تغییر مشخصات مقطع ستون ضعیف

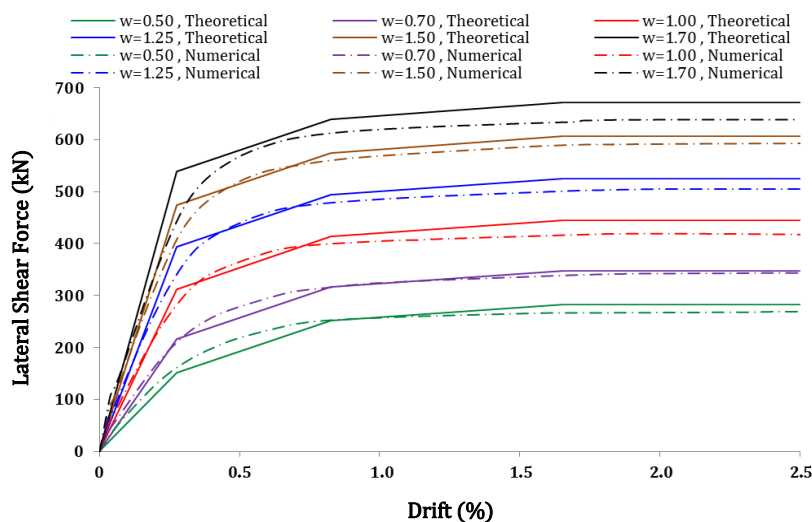
در یک بررسی دیگر ۶ مدل عددی با تغییرات مشخصات سطح مقطع ستون ضعیف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این بررسی برای ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها مقدار دهانه و ارتفاع نمونه در تمامی مدل‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۷۰۰ mm و ۱۰۰۰ mm در نظر گرفته می‌شود. نسبت $\gamma = S_{wc}/S_{sc}$ به عنوان نسبت اساس مقطع پلاستیک ستون ضعیف به ستون قوی، به عنوان پارامتر γ تعریف می‌شود. مقدار γ از مقداری ناچیز و نزدیک به صفر تا مقداری نزدیک به یک برابر با مشخصات ستون قوی انتخاب می‌شود. البته لازم به ذکر است جهت حفظ تناسب در تغییر مکان پلاستیک ستون ضعیف سعی شده تا نسبت ممان اینرسی ستون ضعیف به ستون قوی نیز به این مقدار نزدیک باشد.

تغییرات مدل‌ها با تغییر عرض دهانه محقق گردد. در این سناریو مشخصات هندسی نمونه‌ها مانند مشخصات ستون قوی، مشخصات ستون ضعیف، مشخصات ورق و ویژگی‌های مصالح برای تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل‌های عددی در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل‌های عددی

اعضا	بال		جان	
	عرض (mm)	ضخامت (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
تیر	۲۰۰	۲۰	۲۳۰	۲۰
ستون قوی	۱۸۰	۱۸	۴۴	۱۰
ستون ضعیف	۸۰	۱۰	۶۰	۵

در شکل (۱۱) نمودار منحنی بار-تغییر مکان حاصل از روابط تحلیلی و مدل‌های عددی برای سناریو اول نشان داده شده است. نتایج حاکی از انطباق مناسب بین نمودارهای عددی



شکل ۱۱- منحنی بار-تغییر مکان تحلیلی و عددی برای مدل‌های سناریو اول

نظر گرفته شده است و فقط مشخصات هندسی مقطع ستون ضعیف در مدل‌ها تغییر می‌یابد. مشخصات هندسی مقاطع استفاده شده در مدل‌های عددی در جدول (۵) آورده شده است. در شکل (۱۲) نمودار منحنی‌های بار-تغییر مکان تحلیلی و عددی برای مدل‌های دسته دوم نشان داده شده است. همانگونه که از شکل قابل مشاهده است انطباق مناسبی بین نمودارهای روابط تحلیلی و مدل‌سازی عددی مشاهده می‌شود. در نسبت‌های ۰/۱ و ۰/۲ مقدار ناچیزی اختلاف در سختی اولیه

در جدول شماره (۴) محدوده انتخاب شده برای γ نشان داده شده است.

جدول ۴- نسبت مشخصات هندسی مقطع ستون قوی به ضعیف

γ	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
	۰/۵۰	۰/۷۰	۱/۰۰	۱/۲۵	۱/۵۰	۱/۷۰

مشخصات هندسی نمونه‌ها مانند مشخصات ستون قوی، مشخصات ورق و ویژگی‌های مصالح برای تمام مدل‌ها ثابت در



جدول ۵- مشخصات هندسی مقاطع در مدل‌های عددی

اعضا	بال		جان	
	عرض (mm)	ضخامت (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
$\gamma=0/1$	۵۰	۸	۴۴	۵
$\gamma=0/2$	۸۰	۱۰	۴۰	۵
$\gamma=0/4$	۱۱۰	۱۲	۵۰	۴
$\gamma=0/6$	۱۳۵	۱۴	۴۹	۵
$\gamma=0/8$	۱۶۰	۱۶	۴۶	۵
$\gamma=1/0$	۱۸۰	۱۸	۴۴	۱۰

مشاهده می‌شود اما در مابقی مدل‌ها هم در سختی اولیه و هم در مقاومت نهایی انطباق مناسبی مشاهده می‌شود.

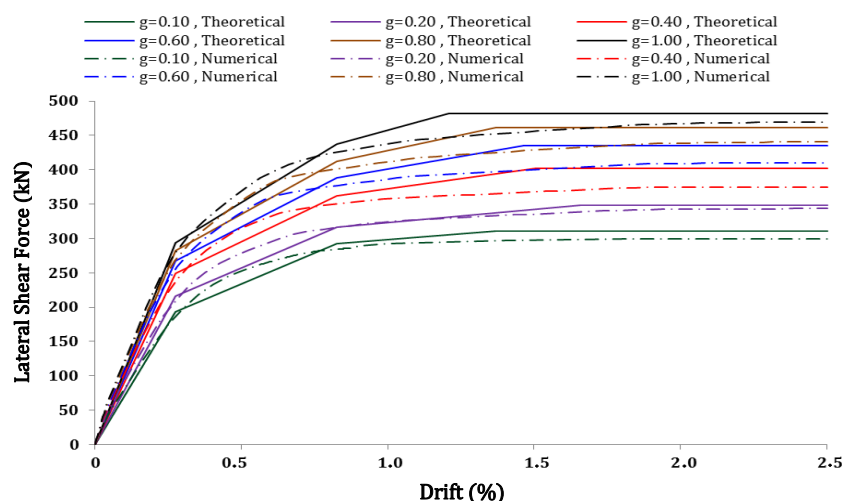
۴- محاسبه و مقایسه خطا

برای ارزیابی میزان خطا و اختلاف مابین نتایج حاصل از روابط تحلیلی و نتایج عددی چهار معیار سختی اولیه، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و مقدار جذب انرژی تا دریافت ۲/۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در ادامه چهار پارامتر معرفی شده فوق برای دو سناریو بیان شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

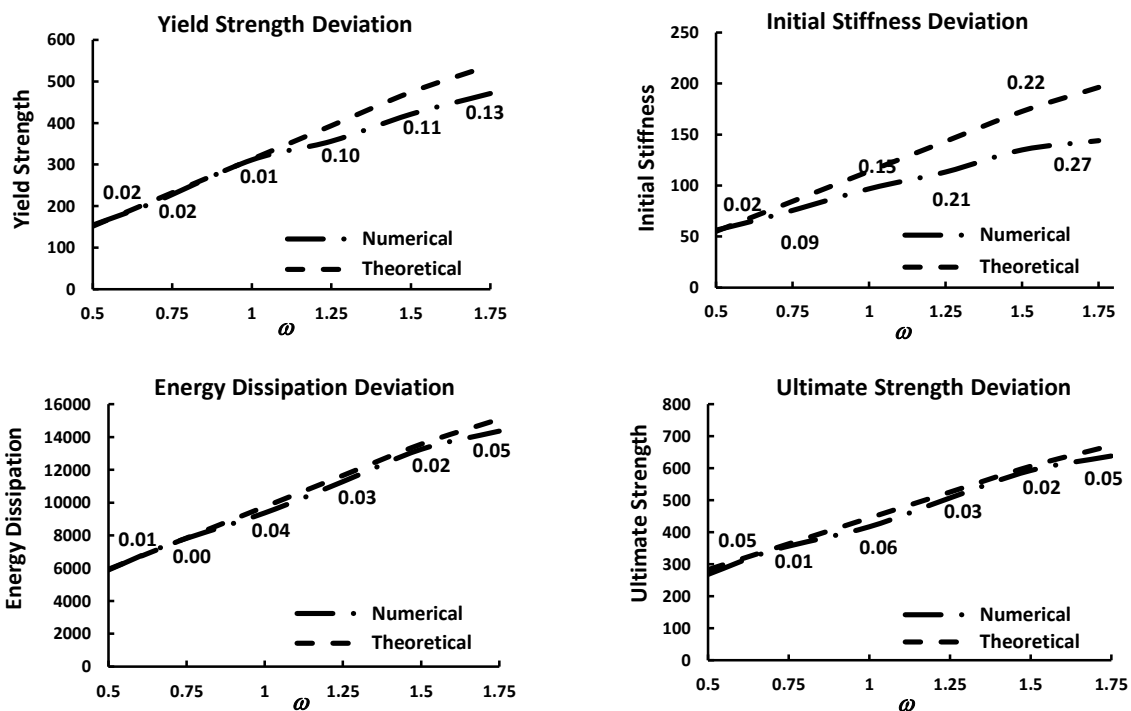
با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که اختلاف در سختی اولیه در حالت عددی و تحلیلی برای نسبت‌های w برابر با ۰/۵ و ۰/۷ ناچیز بوده و برای نسبت‌های بیشتر از ۱ افزایش

چشمگیر می‌باشد. اختلاف بین مقاومت‌های تسلیم در روش عددی و تحلیلی برای نسبت‌های کم ناچیز می‌باشد و برای نسبت بالاتر از ۱ اختلاف قابل توجه می‌باشد. مقدار اختلاف بین مقاومت نهایی در محدوده ۱ الی ۶ درصد می‌باشد. اختلاف بین مقادیر جذب انرژی در حالت عددی و تحلیلی در محدوده بین ۰ الی ۵ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از انطباق مناسب نتایج عددی و تحلیلی برای نسبت‌های مختلف دهانه به ارتفاع بوده و تنها سختی اولیه برای نسبت‌های بیش از ۱ اختلاف قابل توجه دارد. همچنین نمودارهای خطای ۴ پارامتر مذکور برای مدل‌های سناریو دوم به صورت شکل (۱۴) می‌باشد.

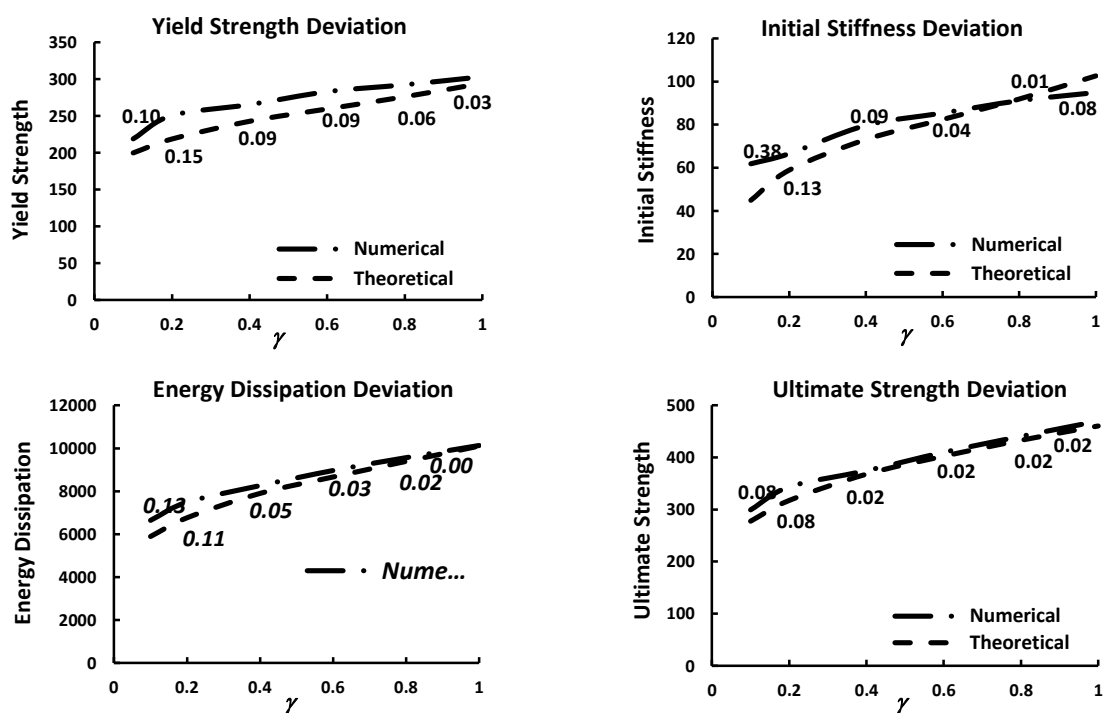
همانگونه که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود مقادیر سختی اولیه که در حالت عددی و تحلیلی ابتدا اختلاف نسبتاً چشمگیر داشته و برای پارامتر γ بزرگتر از ۰/۴ این مقدار کمتر می‌گردد. اختلاف بین مقاومت تسلیم در روش عددی و تحلیلی از محدوده ۱۰ درصد آغاز و در نهایت به ۳ درصد ختم می‌شود. مقدار اختلاف بین مقاومت نهایی در ابتدا در حدود ۸ درصد و پس از $\gamma=0/4$ به حدود ۲ درصد می‌رسد که مقدار بسیار ناچیز و کاملاً قابل قبول می‌باشد. اختلاف بین مقادیر جذب انرژی در حالت عددی و تحلیلی برای دو نسبت ۰/۱ و ۰/۲ کم و در حدود ۱۳ درصد و برای نسبت ۰/۴ و بیشتر برابر بسیار ناچیز بوده و برای نسبت ۱ در حدود صفر درصد می‌باشد. در کل می‌توان مشاهده نمود که مقدار اختلاف بین منحنی‌های عددی و تحلیلی بسیار ناچیز می‌باشد.



شکل ۱۲- منحنی بار-تغییر مکان تحلیلی و عددی برای مدل‌های سناریو دوم



شکل ۱۳- مقایسه نمودار بار تغییر مکان حاصل از روابط تحلیلی و مدل سازی عددی برای مدل های سناریو اول



شکل ۱۴- مقایسه نمودار بار تغییر مکان حاصل از روابط تحلیلی و مدل سازی عددی برای مدل های دسته دوم



در این مطالعه روابط تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار دیوار برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان پیشنهاد شده است. مبنای توسعه روابط تحلیلی بر مبنای روش PFI می‌باشد. مقایسه نتایج مدل‌های عددی صحت سنجی شده با نمونه آزمایشگاهی و روابط تحلیلی پیشنهادی بیانگر انطباق قابل قبول نتایج می‌باشد. برای تغییرات نسبت دهانه به ارتفاع پارامترهای مقاومت نهایی و جذب انرژی انطباق کامل برقرار است. برای پارامتر مقاومت تسلیم انطباق مناسب در حدود ۱۰ درصد اختلاف برقرار بوده و برای پارامتر سختی اولیه اختلاف بیش از ۱۰ درصد می‌باشد. دلیل این مغایرت را می‌توان در فرض ثابت گرفتن و غیردقیق بودن زاویه میدان کششی برای دهانه‌های متفاوت دیوار دانست و پیشنهاد می‌گردد روابطی برای محاسبه دقیق زاویه میدان کششی به عنوان مطالعات تکمیلی توسعه یابد. برای مدل‌های عددی با تغییرات نسبت سختی ستون ضعیف به قوی نیز در پارامترهای جذب انرژی و مقاومت نهایی انطباق مناسب و زیر ۱۰ درصد و برای پارامترهای مقاومت تسلیم و سختی اولیه در حدود ۱۰ درصد می‌باشد که انطباق مناسب و معقولی می‌باشد. در کل انطباق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی نشانگر جامعیت روابط تحلیلی پیشنهادی می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Timler, P., Ventura, C., Prion, H. and Anjan, R. (1998), "Experimental and Analytical Studies of Steel Plate Shear Walls as Applied to the Design of Tall Buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 7, Vol. 3, pp. 233-249.
- [2] Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. (2012), "Experimental Investigation on Cyclic Behavior of Perforated Steel Plate Shear Walls", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 70, pp. 308-316.
- [3] Sabouri-Ghomi, S. and Mamazizi, S. (2015), "Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings", Thin-Walled Structures, Vol. 86, pp. 56-66.
- [4] Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. (1983), "Analysis and Design of Steel Shear Wall System", Structural Engineering Report 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- [5] Timler, P.A. and Kulak, G.L. (1983), "Experimental Study of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- [6] Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1991), "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", Thin Walled Structure, Vol. 12, No. 7, pp. 145-162.
- [7] Sabouri-Ghomi, S. (2002), "Lateral Load Resisting an Introduction to Steel Plate Shear Walls", 1st ed. Anghizeh Publishing Co.; 2002. Tehran, Iran.
- [8] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E. and Kharrazi, M.H.K. (2005), "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate

Walls", Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol. 131, No. 6, pp. 878-889.

- [9] Choi, I.R. and Park, H. (2009), "Steel Plate Shear Walls with Various Infill Plate Designs", Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol. 135, No. 7, pp. 785-796.
- [10] Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S.R.A. (2012), "Experimental and Theoretical Studies of Steel Shear Walls with and without Stiffeners", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 75, pp. 152-159.
- [11] Sajjadi, S.R.A. (2009), Behavior of Steel plate Shear Walls Opening, PhD Thesis, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- [12] Wang, M., Yang, W., Shi, Y. and Xu, J. (2015), "Seismic Behaviors of Steel Plate Shear Wall Structures with Construction Details and Materials", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 107, pp. 194-210.
- [13] Kurata, M., Leon, R.T., Desroches, R. and Nakashima, M. (2012), "Steel Plate Shear Wall with Tension-Bracing for Seismic Rehabilitation of Steel Frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 71, pp. 92-103.
- [14] Abaqus finite element software, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA

[۱۵] صیوری قمی، س.، موسوی قیه قشلاقی، س.پ. (۲۰۱۵)، "بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ستون‌های غیریکسان"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

