

## اصلاح پارامترهای رابطه تنش- کرنش المان‌های نواری در مدل‌سازی دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای

مهدی بن‌زاده\*، سید مصطفی حسینی، سید علیرضا جلالی

دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ آبان ۱۳۹۳  
بازنگری: ۳۰ آذر ۱۳۹۳  
پذیرش: ۲۲ دی ۱۳۹۳  
ارائه آنلاین: ۱۱ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی  
منحنی چرخه‌ای  
رابطه تنش-کرنش المان‌های نواری  
مدل‌سازی نواری  
تحلیل چرخه‌ای

**چکیده:** سیستم دیواربرشی فولادی امروزه به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بارچاقی مطرح می‌باشد. علی‌رغم مزایای متعددی همچون وزن کم، سختی و شکل‌پذیری بالا و سرعت اجرای زیاد، استفاده از آن در مقایسه با سایر سیستم‌های باربرچاقی نظیر سیستم مهاربندی و دیواربرشی بتنی آنچنان فراگیر نشده است. برای حل این مشکل انجام مطالعات عددی پارامتریک از سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های لرزه‌ای که خود مستلزم داشتن مدل‌های غیرخطی دقیق شامل زوال رفتاری از سیستم است، ضروری است. از این رو در این مقاله ضمن مطالعه و بررسی مدل‌های ماکروسکوپی موجود از سیستم، به ارائه مدل جدیدی اقدام شده است که شکل اصلاح شده‌ای از کاربرد مدل نواری با تکیه بر منحنی تنش-کرنش پیشنهاد شده برای المان‌های نواری توسط یکی از محققین پیشین می‌باشد. پس از پیشنهاد اصلاحات لازم در این مدل و نشان دادن ضرورت آن‌ها با تکیه بر نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، صحت مدل پیشنهادی با استفاده از تحلیل‌های اجزای محدود متعدد از مدل‌های با ضخامت و نسبت طول دهانه به ارتفاع مختلف به تایید رسانده شد و مقادیر مناسب جهت پارامترهای به کار رفته در مدل برای مدل‌های دیوار برشی فولادی انتخابی پیشنهاد گردید.

### ۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی یک سیستم اقتصادی و کارآمد مقاوم در برابر بارهای جانبی به ویژه زلزله است. محققین زیادی در سال‌های گذشته بر روی کاربرد دیوار برشی فولادی و نحوه تحلیل و طراحی آن مطالعاتی انجام داده‌اند [۱ و ۲]. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و عددی گذشته نشان می‌دهد که در صورت طراحی و اجرای صحیح، دیوار برشی فولادی می‌تواند به عنوان یکی از اقتصادی‌ترین و مؤثرترین سیستم‌های سازه‌ای در مناطق با خطر لرزه‌خیزی زیاد در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای مطرح گردد [۳-۶]. یکی از معایب موجود در ارتباط با سیستم دیوار برشی فولادی، مدل‌سازی‌های عددی مورد استفاده برای این سیستم می‌باشد که برای مهندسان طاق‌فرسا و زمان‌بر است. در حال حاضر، مدل‌سازی دقیق عددی و انجام تحلیل‌های غیرخطی در نرم‌افزارهای المان محدود موجود نیاز به تخصص ویژه داشته و با دشواری‌های خاص خود در تحلیل‌ها (دشواری مدل‌سازی، تعداد زیاد المان‌های مورد نیاز، نیاز به وقت و هزینه قابل توجه، مشکلات همگرایی در تحلیل‌ها و غیره) همراه است. مطالعه بر روی مدل‌های رفتاری ساده از دیوارهای برشی فولادی که با دقت مناسب رفتار سیستم را برای حالات مختلف پیش‌بینی کند و در عین حال نیز به سادگی توسط مهندسان مورد استفاده باشد، زمینه مناسبی برای انجام تحقیقات بیشتر است. در همین راستا

روش‌های مدل‌سازی ماکروی<sup>۱</sup>، سیستم دیوار برشی فولادی نازک نظیر مدل‌سازی نواری<sup>۲</sup> و مدل خریابی معادل<sup>۳</sup> ارائه شدند. توربورن<sup>۴</sup> و همکاران [۷] در سال ۱۹۸۳ به منظور مطالعه مقاومت دیوارهای برشی فولادی تقویت نشده بر مبنای تئوری میدان کشش قطری ارائه شده توسط واگنر<sup>۵</sup> [۸]، مدل نوارکششی را ارائه کردند. در این مدل پانل‌های برشی به صورت مجموعه‌ای از اعضای نواری مورب که در آن‌ها از مقاومت فشاری نوارها صرف‌نظر شده و تنها قادر به انتقال نیروهای کششی هستند و در جهت تنش‌های کشش اصلی در پانل قرار دارند، مدل می‌شود. در این مدل رفتار قیل از کمانش ورق نادیده گرفته می‌شود و تمرکز بر رفتار پس از کمانش ورق مبتنی بر حوزه کششی قطری است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که به دلیل فرضیات ساده‌کننده‌ای همچون صرف‌نظر کردن از مقاومت فشاری ورق، نتایج نسبتاً محافظه‌کارانه‌ای در این روش بدست می‌آید. به علاوه، مطالعه مقدماتی صورت گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که جمع‌شدگی موجود در منحنی‌های هیستریتیک بدست‌آمده از این روش شدیدتر از نتایج آزمایشگاهی است و این روش تخمین بسیار

- 1 Macro Modeling
- 2 Tension Strip Model
- 3 Equivalent Truss Model
- 4 L.J. Thorburn
- 5 H. Wagner

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mbanazadeh@aut.ac.ir

مطالعات تحلیلی کار خود، مدل نواری غیرموازی را برای مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده پیشنهاد کرد. در این مدل برای سادگی یک نوار کششی قطری بین دو گوشه و دو نوار از هر گوشه به وسط تیر و ستون مقابل آن متصل شده است. این مدل نیز توانست سختی الاستیک را پیش‌بینی کند ولی مقادیر ظرفیت نهایی سیستم نسبتاً محافظه‌کارانه بود. این روش نسبت به روش مدل نواری معمول مقادیر سختی الاستیک و ظرفیت نهایی را بیشتر برآورد می‌کند و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. چوی و پارک<sup>۴</sup> [۱۲] در سال ۲۰۱۲ به منظور اختصاص رفتاری دقیق به المان‌های نواری در مدل‌سازی نواری معمول، با در نظر گرفتن اثر کماتش ورق و ضوابط تسلیم مصالح فولادی ورق، مدلی هیسترتیک برای المان‌های نواری ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ای بر روی یک مدل ساده‌ی اجزا محدود دیوار برشی فولادی، منحنی تنش-کرنش را برای المان‌های نواری استخراج کردند و در نرم‌افزار اپنسیس<sup>۵</sup> [۱۳] توسعه دادند (شکل ۱). آن‌ها با مدل‌سازی برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار اپنسیس به بررسی درستی آن پرداختند که به نسبت مدل‌های قبلی ارائه شده نتایج با دقت بالاتری بدست آمد.

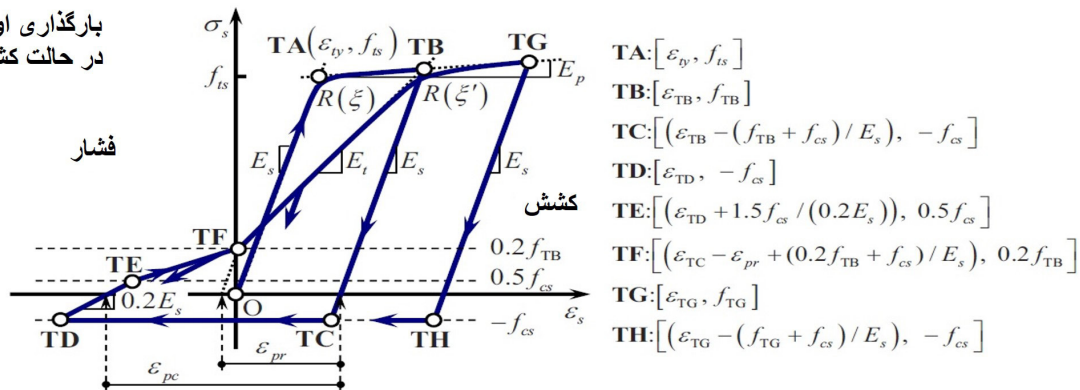
از محدودیت‌های این مدل می‌توان به عدم بررسی مدل ارائه شده در حالت‌های مختلف ضخامت و نسبت طول دهانه به ارتفاع در مدل‌های واقعی با اعضای مرزی غیر صلب و اتصال غیر مفصلی اشاره کرد. به همین منظور در این مقاله به منظور افزایش دقت مدل پیشنهادی چوی و پارک، به بررسی اثر پارامترهای ضخامت ورق ( $t$ ) و نسبت طول دهانه به ارتفاع ( $L/h$ ) در منحنی تنش-کرنش بدست آمده از مدل‌های واقعی یک طبقه در آنالیز اجزا محدود پرداخته شده است و برخی اصلاحات در ضرایب موجود در این مدل پیشنهاد شده است.

محافظه‌کارانه‌ای از انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه می‌کند.

یک روش جدید برای مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی نازک بر مبنای مجموعه‌ای از نوارهای کشش قطری متصل به تیرها و ستون‌های پیرامونی به‌وسیله ورق‌های لچکی، توسط الگالی<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۳) [۹] پیشنهاد شد. در مدل‌های تحلیلی، ورق‌های پرکننده توسط نوارهای ۴۵ درجه جایگزین شدند و یک رابطه تنش-کرنش سه خطی تجربی به المان‌های نواری اختصاص داده شد که خصوصیات این منحنی با استفاده از مفهوم المان نوار-لچکی<sup>۲</sup> بدست می‌آید. ابعاد ورق‌های لچکی با فرض این که قبل از کماتش ورق تسلیم می‌شوند و از هم‌ارزسازی تنش برشی کماتش ورق مربعی با تنش تسلیم برشی مصالح ورق محاسبه می‌شود. مدل‌های تحلیلی قادر به پیش‌بینی منحنی‌های هیسترتیک و پوش بار افزون با دقت قابل قبولی بودند.

در تحقیقات انجام‌گرفته توسط رضایی [۱۰] و دراپور<sup>۳</sup> [۱۱]، نشان داده شد که برخلاف مدل نواری مبنی بر یکنواخت بودن میدان کششی تولید شده توسط تنش‌های صفحه‌ای در عرض هر پانل دیوار برشی فولادی، میدان تنش‌های صفحه‌ای در عرض ورق یکنواخت نبوده و رفتار واقعی دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده پیچیده‌تر از آن است که بتوان آن را توسط یک سری المان خردپای موازی مدل‌سازی نمود. در تحقیقات انجام‌شده توسط رضایی [۱۰] نشان داده شد که زاویه نوارهای کششی در گوشه‌های ورق به قائم و در وسط ورق به افقی بودن تمایل دارد که این موضوع به دلیل اندرکنش ورق و اعضای پیرامونی در گوشه‌ها است. به همین منظور رضایی در قسمت

پارگذاری اولیه  
در حالت کشش



شکل ۱: منحنی تنش-کرنش پیشنهادی چوی و پارک برای المان‌های نواری [۱۲]

Fig. 1. Stress-strain curve recommended by Choi and Park for strip elements [12]

4 I. R. Choi and H. G. Park  
5 OpenSees

1 M. Elgaaly  
2 Strip-gusset element  
3 R.G. Driver

## ۲- روش مطالعه

### ۲-۱- صحت سنجی مدل چوی و پارک

به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی چوی و پارک، نمونه یک طبقه آزمایشگاهی صبوری قمی و سجادی [۱۴] که در شکل ۲ نشان داده شده است در نرم افزار اپنسیس به روش مدل نواری مدل سازی و مورد تحلیل چرخه ای قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. ابعاد تیر و ستون و جزئیات مدل سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. ضخامت ورق فولادی برابر ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. خصوصیات مصالح استفاده شده برای ورق فولادی و اعضای مرزی در جدول ۱ داده شده است.

### ۲-۱-۱- نحوه مدل سازی در اپنسیس

به منظور مدل سازی اعضای مرزی از المان تیر ستون غیرخطی با پلاستیسیته گسترده و با فرمول بندی سختی استفاده شد. نیروی های کششی و فشاری ایجاد شده در المان های نواری، نیروی محوری قابل توجهی در تیر و ستون ایجاد می کنند. در تیرهای معمول می توان از مفهوم مفصل پلاستیک استفاده کرد ولی در سیستم دیوار برشی فولادی، برای لحاظ کردن اندرکنش نیروی محوری و ممان خمشی، مقاطع فایبر تعریف شده است. از مصالح ۰۲ Steel برای مدل سازی مصالح تیر و ستون استفاده شد. همچنین از مدل پیشنهادی چوی و پارک برای شبیه سازی رفتار چرخه ای المان های نواری استفاده شد (شکل ۱). با توجه به شکل ۱، مقدار مقاومت فشاری ورق ( $f_{cs}$ ) با فرض بارگذاری برش خالص و تئوری کمانش ورق ها بدست می آید. به عبارت دیگر بعد از کمانش ورق، میدان کششی به صورت مایل در جهت قطری گسترش می یابد و تنش های فشاری در جهت قطری در مقداری نزدیک به تنش برشی کمانش ورق ثابت باقی می ماند. بنابراین بیشینه تنش فشاری برابر تنش برشی کمانش ورق فرض شد و با استفاده از ضوابط تسلیم فون میزس، بیشینه تنش کششی ( $f_{ts}$ ) در جهت قطری به صورت رابطه ۱ محاسبه شد:

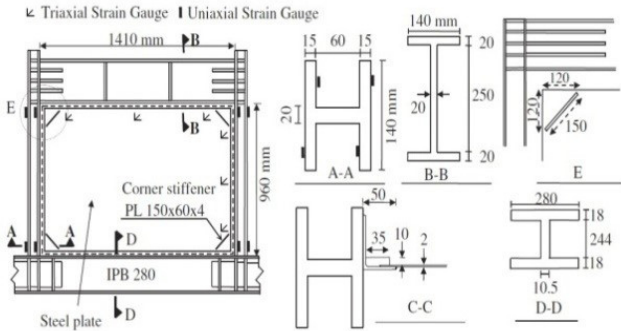
$$f_{ts} = \sqrt{f_{py}^2 - 0.75f_{cs}^2} - 0.5f_{cs} \quad (1)$$

پارامتر  $\epsilon_{pr}$  در تعیین کرنش پلاستیک نقطه TF نیز به صورت رابطه ۲ توسط چوی و پارک بیان شده است.

که  $\epsilon_{pc}$  مقدار کرنش متناظر بین نقاط TC و TD است. شکل ۳ نمونه ای از مدل ساخته شده در نرم افزار اپنسیس را نشان می دهد.

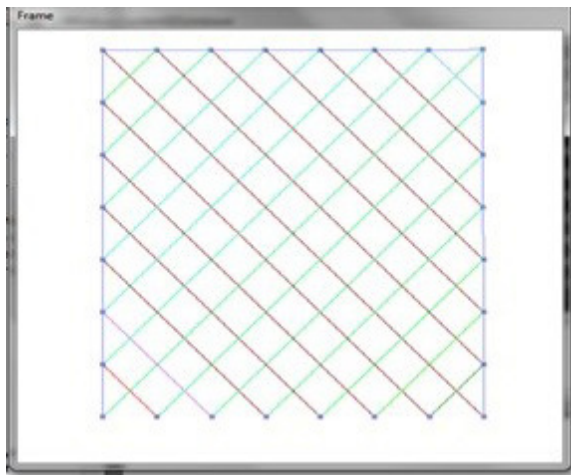
$$\epsilon_{pr} = 0.5\epsilon_{pc} \left[ 0.7 + \frac{0.3}{1 + \frac{\epsilon_{pc}}{6\epsilon_{pr}}} \right] \quad (2)$$

1 Von mises



شکل ۲: جزئیات نمونه آزمایش شده (DS-PSW) توسط صبوری قمی و سجادی در سال ۲۰۱۲ [۱۴]

Fig. 2. specimen details tested by Sabouri-Ghomi and sajadi [14]



شکل ۳: مدل سازی نواری دیوار برشی فولادی در اپنسیس  
Fig. 3. Strip modeling of steel shear wall in Opensys

### ۲-۱-۲- مقایسه نتیجه مدل تحلیلی با آزمایش

شکل ۴-الف مقایسه منحنی چرخه ای حاصل از مدل سازی در اپنسیس و نتایج آزمایشگاهی است. با توجه به شکل، بیشینه مقاومت بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد اما نقطه ورود منحنی هیسترتیک به شاخه بارگذاری در جهت مخالف در هر دو جهت مثبت و منفی جابجا شده است به طوری که باعث کاهش مساحت زیر منحنی هیسترتیک می شود. یکی از عوامل موثر بر این موضوع، فرض ساده کننده به کاررفته در مدل پیشنهادی چوی و پارک برای مقدار مقاومت فشاری ورق ( $f_{cs}$ ) و محاسبه مقاومت کششی ( $f_{ts}$ ) بر اساس آن است. در حالیکه مطالعات گذشته انجام شده توسط علی نیا و حبشی [۱۹] نشان داد که بر خلاف تئوری های موجود در زمینه رفتار پس از کمانش برشی ورق ها که به طور صریح تاکید بر ثابت ماندن تنش های فشاری اصلی پس از کمانش دارند، تنش های اصلی فشاری در تمام نقاط ورق به مقدار چشمگیری بیش تر از تنش بحرانی ورق رشد می کنند. از عوامل موثر دیگر می توان به وجود برخی ضرایب ثابت همچون ضرایب موجود برای معرفی مختصات قائم نقاط TE و TF، ضریب

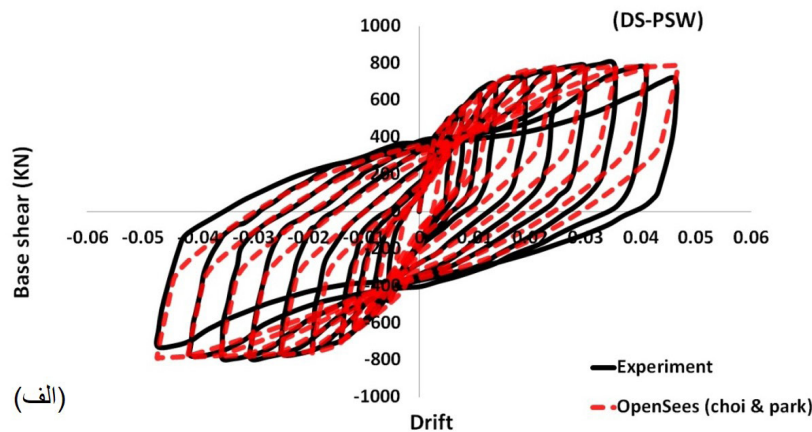
موجود در رابطه  $\epsilon_{pr}$  و شیب خط بارگذاری مجدد در کشش ( $0.2E_s$ ) در مدل پیشنهادی اشاره کرد (شکل ۱). بنابراین در ادامه به بررسی اثر هریک از این پارامترها بر منحنی هسترتیک خواهیم پرداخت.

جدول ۱: خصوصیات مصالح به کار رفته برای ورق، اعضای مرزی و سخت کننده‌های استفاده شده در تیر [۱۴]

Table 1. Material properties used for plate, boundary components and beam stiffeners [14]

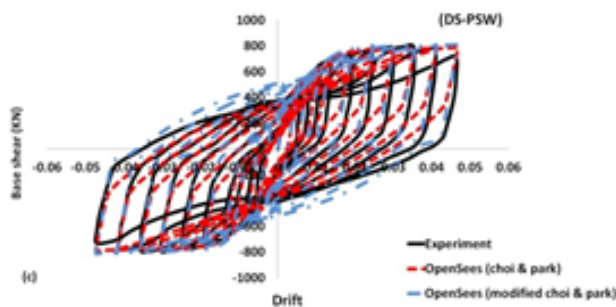
	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
Plate	۱۹۲/۴	۲۷۷/۲
Column and Beam	۴۱۴/۹	۵۵۱/۸
Stiffeners	۲۵۸/۳	۳۹۰/۴

۲-۲- بررسی تاثیر هر یک از پارامترها بر منحنی هسترتیک  
 به منظور بررسی اثر هریک از پارامترهای مدل بر منحنی هسترتیک، سیکل پنجم بارگذاری نمونه آزمایشگاهی صبوری قمی و سجادی [۱۴] برای مقادیر مختلف یک پارامتر با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها انجام شد که منحنی برش پایه-دریفت حاصل برای هریک از حالات در این سیکل به صورت شکل‌های ۵-الف تا ج به دست آمده است.  
 با توجه به شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که افزایش نقطه تسلیم المان‌های نواری سبب افزایش برش تسلیم مجموعه می‌شود. افزایش مقاومت فشاری المان نواری سبب جابجا شدن نقطه ورود منحنی هسترتیک به شاخه بارگذاری در جهت مخالف در هر دو جهت مثبت و منفی می‌شود و حرکت آن در جهت افزایش مساحت منحنی هسترتیک است. البته افزایش سطح زیر منحنی، ناشی از عامل افزایش نقطه تسلیم منحنی نیز می‌باشد (شکل ۵-ب).



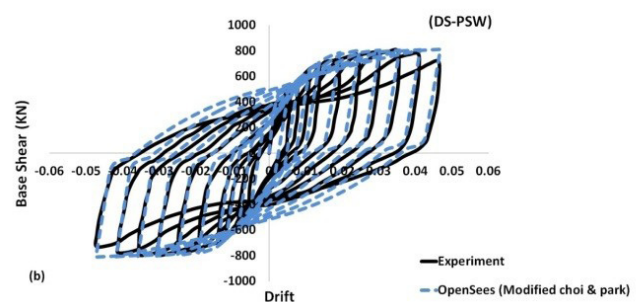
شکل ۴-الف: مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در اپنسیس با مصالح پیشنهادی چوی و پارک و نتایج آزمایش

Fig. 4-1. Results comparison of Opensys modeling using Choi and Park materials and experimental study



شکل ۴-ب: مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلی چوی و پارک، مدل با ضرایب اصلاح شده و آزمایش

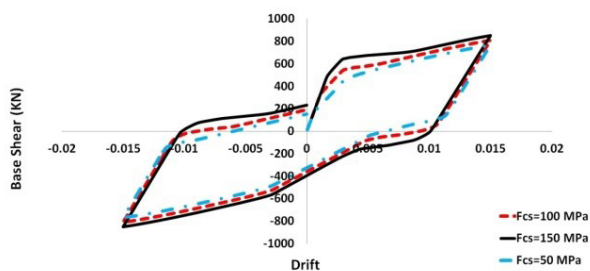
Fig. 4-3. Results comparison of Choi and Park model using modified coefficients and experimental study



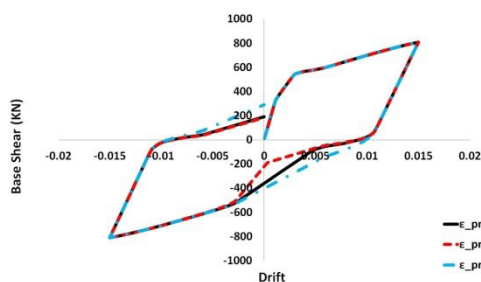
شکل ۴-ب: مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در اپنسیس با ضرایب اصلاح شده با آزمایش

Fig. 4-2. Results comparison of Opensys modeling using modified coefficients and experimental study

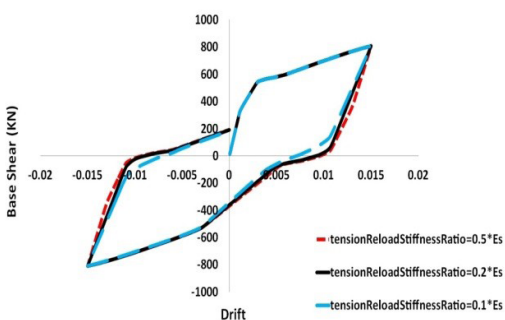




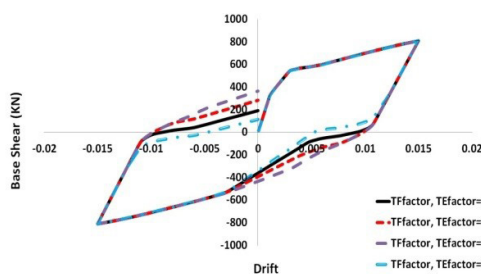
شکل ۵-ب: اثر  $f_{cs}$  بر روی منحنی برش پایه-دریفت  
Fig. 5-2. Effect of  $f_{cs}$  on base shear- drift curve



شکل ۵-پ: اثر  $\epsilon_{pr}$  بر روی منحنی برش پایه-دریفت  
Fig. 5-3. Effect of  $\epsilon_{pr}$  on base shear- drift curve



شکل ۵-ت: اثر  $\beta$  (tensionReloadStiffRat) بر روی منحنی برش پایه-دریفت  
Fig. 5-4. Effect of tension reload stiffness ratio ( $\beta$ ) on base shear- drift curve



شکل ۵-ث: اثر تغییر همزمان مقادیر ضرایب مختصات قائم نقاط TF, TE بر روی منحنی برش پایه-دریفت  
Fig. 5-5. Effect of simultaneous changing of the coefficients values of vertical coordinates of TF and TE points on base shear- drift curve

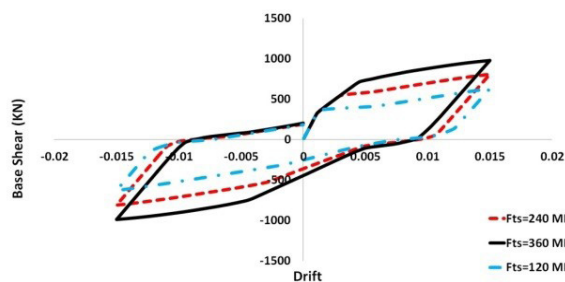
افزایش ضریب  $\epsilon_{pr}$  سبب جابه‌جا شدن افقی نقطه شکستگی نمودار نیرو-تغییرمکان المان نواری در شاخه بارگذاری کششی بعد از کمانش می‌شود (شکل ۱). این جابه‌جایی در منحنی هیستریتیک نیز همانطور که در شکل ۵-پ نشان داده شده است، سبب افزایش یا کاهش سطح (باریک‌شدگی یا بازشدگی) زیر نمودار می‌شود. شکل ۵-ت نشان می‌دهد که با افزایش شیب اولیه نمودار نیرو-تغییرمکان المان نواری در شاخه بارگذاری مجدد کششی، شیب منحنی هیستریتیک در ناحیه ورود به شاخه‌های مثبت و منفی قدری افزایش می‌یابد. شکل ۵-ث تغییر همزمان ضرایب مختصات قائم نقاط TF و TE را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش این ضرایب (بالارفتن نقطه ورود منحنی بار-تغییرمکان المان نواری)، نقطه ورود نمودار از نواحی مثبت و منفی نیز قدری جابه‌جا می‌شود و این جابه‌جایی در جهت چاق‌تر شدن منحنی است.

به همین منظور ۶ پارامتر موردنظر به عنوان پارامترهای متغیر مدل در نظر گرفته شدند و مقادیر مناسب این پارامترها برای مدل آزمایشگاهی صبوری قمی و سجادی به صورت جدول ۲ کالیبره شدند که با استفاده از این مقادیر تطابق بهتری بین نتیجه آزمایش و مدل‌سازی در اینسیس به صورت شکل ۴-ب بدست آمده است. شکل ۴-پ کلیه نتایج حاصل را در کنار هم نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر کالیبره شده برای نمونه آزمایشگاهی صبوری

Table 2. Calibrated values of Sabouri experimental tested specimen

پارامترهای مصالح	مدل اصلاح شده	مدل چوی و پارک
$f_{ts} / F_y$	۰/۸۷	۰/۹۷
$f_{cs} / F_y$	۰/۳	۰/۰۵
Tension Reload Stiffness Ratio ( $\beta$ ) / $E_s$	۰/۲	۰/۲
TFfactor / $f_{TB}$	۰/۵۲	۰/۲
TEfactor / $f_{CS}$	۰/۳	۰/۵
$\epsilon_{pr}$	۰/۶	۰/۵



شکل ۵-الف: اثر  $f_{ts}$  بر روی منحنی برش پایه-دریفت  
Fig. 5-1. Effect of  $f_{ts}$  on base shear- drift curve

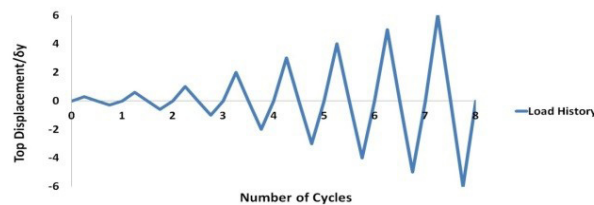
### ۳- کالیبراسیون پارامترهای مدل پیشنهادی چوبی و پارک برای مدل های واقعی

به منظور تصحیح پارامترهای مدل پیشنهادی چوبی و پارک، ۸ مدل مختلف از دیوار برشی فولادی یک طبقه با نسبت های طول دهانه به ارتفاع مختلف و ضخامت ورق مختلف بر مبنای اصول طراحی بر اساس ظرفیت [۱۵]، طراحی شدند.

ارتفاع طبقه که از تراز پایه تا مرکز تیر بالایی سنجیده می شود، در همه مدل ها ثابت و برابر با ۳۰۰۰ میلی متر فرض شده است. با توجه به محدوده مورد قبول از نسبت طول دهانه به ارتفاع در آیین نامه های طراحی [۱۶] و [۱۵] و همچنین به جهت پوشش دامنه وسیعی از محدوده مذکور، طول دهانه دیوار که از مرکز تا مرکز ستون ها سنجیده می شود بین ۲۵۵۰ تا ۷۵۰۰ میلی متر متغیر فرض شده است (نسبت های طول به ارتفاع ۰/۸۵، ۱/۴، ۲/۰، ۲/۵) (جدول ۳-الف).

همچنین ضخامت ورق های مدل ها مطابق با ضخامت های موجود در استاندارد ASTM A36 [۱۵] انتخاب شده اند. بنابراین، برای طراحی، پنج ضخامت مختلف ورق که در جدول ۳-ب نشان داده شده است، اختیار گردیدند. مشخصات مدل های یک طبقه طراحی شده و هندسه اتصال RBS تیرهای مورد استفاده در مدل های مختلف مطابق با استاندارد AISC 358-05 [۱۷] در این جداول ارائه شده است.

مدل های دیوار برشی فولادی مذکور با استفاده از نرم افزارهای آباکوس<sup>۱</sup> [۱۸] و اپنسیس مدل سازی و مطابق با تاریخچه ارائه شده در شکل ۶ تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفتند و تحلیل با کنترل جابجایی<sup>۲</sup> با اعمال جابجایی هایی در حدود دررفت ۲ تا ۳% (تغییر مکان های ۵ تا ۶ برابر تغییر مکان فرضی معادل با تسلیم دیوار ( $\delta_p$ )) در تراز بام صورت گرفته است. مقادیر تغییر مکان های تسلیم در مدل ها با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل مدل ها با تحلیل پوش اور تخمین زده شده است.



شکل ۶: تاریخچه تغییر مکان بام در مدل ها  
Fig. 6. Models roof displacement history

### جدول ۳-الف: مشخصات مدل های با ضخامت ثابت و نسبت طول دهانه به ارتفاع متغیر

Table 3-1. Model details of constant thickness and variable ratio of span length to the height

مدل	ضخامت ورق	طول دهانه L (mm)	نسبت دهانه به ارتفاع L/h	ستون	تیر	مقطع RBS		
	t_w(mm)					a (mm)	b (mm)	c (mm)
۱	۳/۱۸	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۲۱۱	W۱۴x۱۳۲	۹۰	۳۰۰	۲۰۰
۶	۳/۱۸	۴۲۰۰	۴/۸	W۱۴x۳۱۱	W۱۴x۲۳۳	۱۰۰	۳۳۰	۲۲۰
۷	۳/۱۸	۶۰۰۰	۶/۸	W۱۴x۳۹۸	W۲۷x۱۹۴	۸۵	۶۰۰	۲۰۰
۸	۳/۱۸	۷۵۰۰	۸/۵	W۳۶x۳۳۰	W۴۰x۲۱۱	۷۰	۸۰۰	۱۵۰

1 ABAQUS

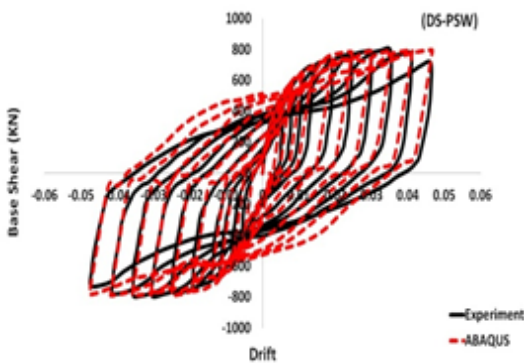
2 Displacement Control

### ۳-۱- نحوه مدل سازی در آباکوس و صحت سنجی آن

در مدل سازی ورق و المان های مرزی دیوار از المان پوسته چهارگره ای با خاصیت انتگرال گیری کاهش یافته استفاده شده است. به جهت مدل سازی اتصال گیردار پای ستون ها، درجات آزادی انتقالی گره های زیرین بال و جان ستون ها بسته شدند. همچنین به جهت شبیه سازی اثر دال طبقات، درجه آزادی انتقالی جان تیر طبقه در جهت خارج از صفحه مقید شده است. با توجه به اینکه مدل ها فاقد تیر تحتانی در قسمت پایه بوده اند، درجات آزادی انتقالی گره های تحتانی ورق نیز بسته شدند. از مصالح فولادی رده ASTM-A36 برای ورق فولادی و ASTM-A572 برای اعضای مرزی دیوار برشی فولادی استفاده شده است. ضریب پواسن و مدول الاستیسیته نیز به ترتیب برابر  $0/3$  و  $210$  گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در تحلیل های شبه استاتیکی، علاوه بر خصوصیات غیرخطی مصالح، اثرات غیرخطی هندسی (تغییر شکل های بزرگ) نیز در نظر گرفته شدند.

در شرایط واقعی، ورق های فولادی در دیوارهای برشی فولادی به جهت تغییر شکل های ناشی از جوشکاری به اعضای مرزی، خروج از مرکزیت احتمالی در ناحیه اتصال به اعضای مرزی و تغییر شکل ناشی از بارهای ثقلی در قاب دیوار برشی فولادی، دارای نقص اولیه<sup>۱</sup> می باشند. در نظر گرفتن این تغییر شکل اولیه می تواند بر رفتار اولیه سیستم در شروع بارگذاری تاثیر گذار باشد. بدین ترتیب، اثر نقص اولیه در مدل های المان محدود دیوار برشی فولادی، با ایجاد یک تغییر شکل اولیه کوچک مطابق با حالت<sup>۲</sup> اول یا دوم کماتش در ورق پانل های مختلف اعمال می شود. به جهت شبیه سازی اثرات تغییر شکل های اولیه ورق در مدل سازی، تغییر شکل اولیه مطابق با مدل اول کماتش ورق برابر  $1/100000$  th اعمال شد.

به منظور صحت سنجی نحوه مدل سازی در آباکوس ابتدا نمونه آزمایشگاهی صبور و سجادی [۱۴] در نرم افزار آباکوس مدل سازی و با نتایج بدست آمده از آزمایش مقایسه شد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود، به طور کلی مدل المان محدود توانسته است در حد قابل قبولی رفتار چرخه ای نمونه آزمایشگاهی را پیش بینی کند. با توجه به نتایج، بیشینه مقاومت سیستم توسط نرم افزار در حدود  $796/5$  کیلونیوتن بدست آمده که در مقایسه با نتایج آزمایش ( $789/6$  کیلونیوتن) در حدود  $1\%$  بیشتر پیش بینی شده است. در مورد سختی سیستم، نتایج تحلیل المان محدود تا حدی سختی سیستم را بیشتر از نتایج آزمایش ارزیابی می کند. همچنین، نتایج آزمایش حاکی از افت تدریجی سختی سیستم در سیکل های آخر می باشد که این مورد در نتایج المان محدود چندان مشاهده نمی شود.



شکل ۷: مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی در آباکوس با آزمایش  
Fig. 7. Results comparison of ABAQUS modeling and experimental study

۳-۲- بحث روی نتایج بدست آمده از کالیبراسیون ۸ مدل طراحی شده با استفاده از مدل سازی نمونه ها در آباکوس و منحنی های حاصل، مقادیر مناسب هریک از پارامترهای مدل پیشنهادی چوبی و پارک برای مدل سازی نمونه ها در اپنسیس بدست آمده است که خلاصه نتایج در جداول ۴ و ۵ برای حالت های مختلف ضخامت و نسبت طول دهانه به ارتفاع آورده شده است. شکل های ۸ تا ۱۳ به ترتیب رفتار هیستریک برخی از مدل ها که در نرم افزار آباکوس و اپنسیس مدل شده اند را نشان می دهد.

### ۳-۲-۱- حالت ضخامت ثابت و نسبت طول دهانه به ارتفاع متغیر

همانطور که نتایج کالیبراسیون نشان می دهد رفتار سیستم دیوار برشی فولادی برای مدل های با نسبت طول دهانه به ارتفاع مختلف، تا حدی متفاوت است که به طور خلاصه می توان به نتایج زیر اشاره کرد:  
با توجه به نتایج، افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع باعث بالارفتن مقدار مقاومت کششی المان های نواری می شود به طوریکه به نقطه تسلیم ورق ( $F_y$ ) نزدیک تر می شود اما تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری المان های نواری ندارد. به عبارتی دیگر برای ضخامت ورق  $3/18$  میلی متر و  $L/h$  های مختلف می توان مقدار  $f_{cs}$  را برابر  $0/1$  در نظر گرفت. با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، ضریب  $\epsilon_{pr}$  کاهش یافته است. به عبارت دیگر کاهش  $\epsilon_{pr}$  نشان می دهد مقدار زیادی از کرنش های پلاستیک ایجاد شده در ورق ناشی از سیکل  $n$ ام بارگذاری، در بارگذاری مجدد در سیکل  $n+1$ ام جبران شده است و در لحظه ی آغاز میدان کششی قطری، ورق به حالت اولیه خود نزدیک تر شده است.

تغییرات ضریب مختصات قائم نقطه TE خیلی منظم نبوده و به طور کلی در نسبت طول دهانه به ارتفاع کوچک و بزرگ ( $L/h=2/5$  و  $0/85$ )، این ضریب کمتر از  $0/5$  و در نسبت طول دهانه به ارتفاع متوسط ( $L/h > 2/5$ ) بزرگ تر از  $0/5$  می باشد. در واقع مقدار پیشنهاد شده توسط چوبی و پارک (مقدار  $0/5$ ) به نوعی مقداری میانگین از مقادیر کالیبره شده می باشد. در نسبت طول دهانه به ارتفاع کوچک مقدار ضریب مختصات قائم نقطه TF از مقدار بدست آمده برای  $L/h$  های متوسط و بزرگ که در حدود  $0/32$

1 Initial Imperfection

2 mode

است بسیار کوچکتر می باشد. مقادیر بدست آمده برای ضریب  $\beta$  حاکی از افزایش آن با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع می باشد به طوری که در  $L/h$  های بزرگتر از ۲ این مقدار برابر  $0.5$  بدست آمده است که از عوامل مؤثر بر آن افزایش سختی سیستم ناشی از قاب و اثر قاب روی ورق می باشد که اثر آن در این ضریب مشاهده شده است.

جدول ۳-ب: مشخصات مدل های با ضخامت متغیر و نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت

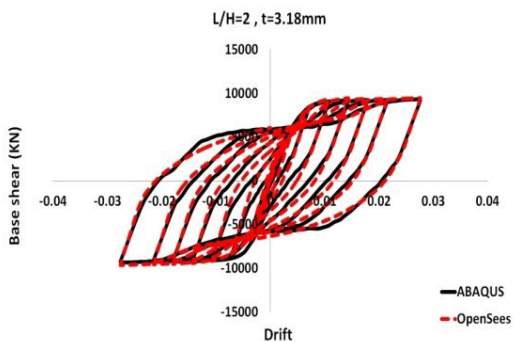
Table 3-2. Model details of variable thickness and constant ratio of span length to the height

مدل	ضخامت ورق $t_w$ (mm)	طول دهانه L (mm)	نسبت دهانه به ارتفاع L/h	ستون	تیر	مقطع RBS		
						a (mm)	b (mm)	c (mm)
۱	۳/۱۸	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۲۱۱	W۱۴x۱۳۲	۹۰	۳۰۰	۲۰۰
۲	۳/۴۲	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۲۳۳	W۱۴x۱۵۹	۹۰	۳۰۰	۲۰۰
۳	۴/۷۶	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۳۱۱	W۱۴x۱۹۳	۹۰	۳۰۰	۲۰۰
۴	۶/۳۵	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۳۹۸	W۱۴x۲۵۷	۱۰۰	۳۵۰	۲۱۰
۵	۹/۵۳	۲۵۵۰	۰/۸۵	W۱۴x۵۵۰	W۱۴x۳۴۲	۱۰۰	۳۵۰	۲۰۰

جدول ۴: خلاصه نتایج کالیبراسیون برای مدل های با ضخامت ثابت و نسبت طول دهانه به ارتفاع متغیر

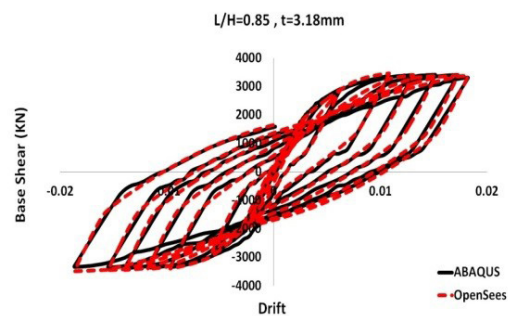
Table 4. Calibration results of constant thickness and variable ratio of span length to the height models

L/H	۰/۸۵	۱/۴	۲	۲/۵
$f_{ts} / F_y$	۰/۷	۰/۷۹	۰/۸۸	۰/۹۵
$f_{cs} / F_y$	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲
$\beta$	۰/۲	۰/۲	۰/۵	۰/۵
TEfactor / $f_{Cs}$	۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۳۴
TFfactor / $f_{TB}$	۰/۳۳	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۴۵
$\epsilon_{pr}$	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۱



شکل ۹: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۷

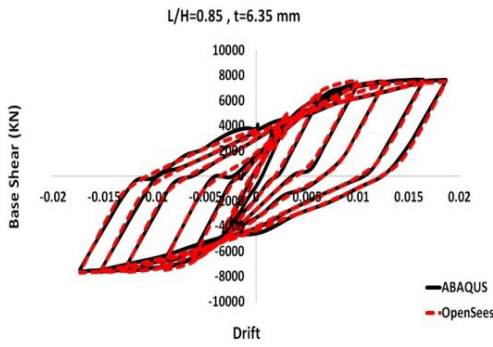
Fig. 9. Hysteresis curve of model no.7



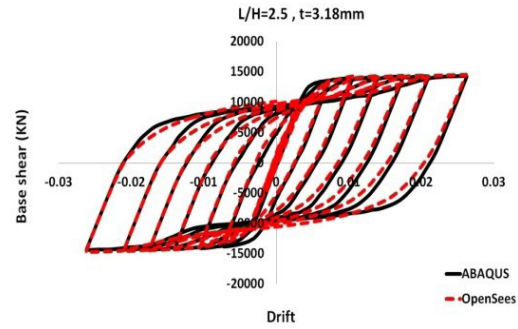
شکل ۸: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۱

Fig. 8. Hysteresis curve of model no.1

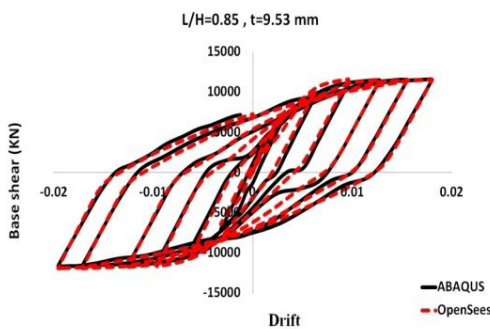




شکل ۱۲: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۴  
Fig. 12. Hysteresis curve of model no.4



شکل ۱۰: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۸  
Fig. 10. Hysteresis curve of model no.8



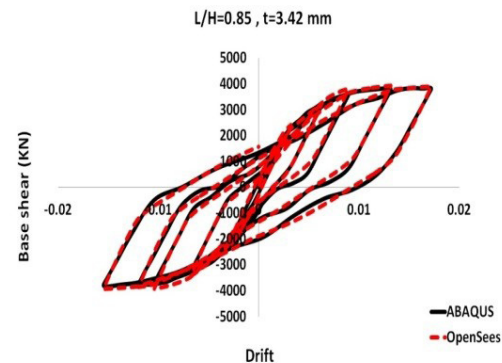
شکل ۱۳: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۵  
Fig. 13. Hysteresis curve of model no.5

جدول ۵: خلاصه نتایج کالیبراسیون برای مدل‌های با ضخامت متغیر و نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت

Table 5. Calibration results of variable thickness and constant ratio of span length to the height models

Thickness (mm)	۳/۱۸	۳/۴۲	۴/۷۶	۶/۳۵	۹/۳۵
$f_{ts} / F_y$	۰/۷	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۸۵
$f_{ts} / F_y$	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۹
$\beta$	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
TEfactor / $f_{Cs}$	۰/۰۷	۰/۰۶۵	۰/۰۵۸	۰/۰۵۶	۰/۰۵
TFfactor / $f_{TB}$	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۸
$\epsilon_{pr}$	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۸

۳-۲-۲- حالت ضخامت متغیر و نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت  
نتایج کالیبراسیون مدل‌های با ضخامت متغیر و نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود به طوری که در ورق ضخیم ( $t=9.53$  mm) این مقدار در حدود  $0.4$  برابر مقاومت تسلیم ورق شده است اما مقدار مقاومت کششی ورق با شیب خیلی کمی افزایش یافته است. همچنین مقدار ضریب  $\beta$  به ضخامت ورق وابسته نبوده و برای تمامی حالات برابر با مقدار پیشنهاد شده در مدل اصلی یعنی  $0.2$  می‌باشد. با افزایش ضخامت ورق مقدار ضرایب مختصات نقاط TE و TF کاهش یافته است طوری که مقادیر بدست آمده همواره کمتر از مقادیر پیشنهادی در مدل اصلی است. مقادیر حاصل برای ضریب  $\epsilon_{pr}$  نیز نشان می‌دهد که در ورق‌های نازک ( $3/18$  و  $3/42$  میلی‌متر) برابر با  $0.4$  است و در ورق‌های با ضخامت متوسط ( $4/76$  و  $6/35$  میلی‌متر) برابر با  $0.6$  و همچنین در ورق‌های ضخیم  $0.8$  می‌باشد که نشان می‌دهد هر چه ورق ضخیم‌تر شده است کرنش پلاستیک بیشتری ناشی از سیکل قبل در ورق مانده است.



شکل ۱۱: منحنی هیستریتیک حاصل برای مدل شماره ۲  
Fig. 11. Hysteresis curve of model no.2

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی روش ارائه شده توسط توربورن و همکاران برای مدل سازی چرخه ای ورق فولادی با استفاده از المان های نواری و با صرف نظر از مقاومت فشاری، نشان دهنده این است که جمع شدگی موجود در منحنی های هیستریتیک بدست آمده از این روش شدیدتر از نتایج آزمایشگاهی است و این روش تخمین بسیار محافظه کارانه ای از انرژی جذب شده توسط نمونه های آزمایشگاهی ارائه می کند. در ادامه به بررسی مدل ارائه شده توسط چوی و پارک که به منظور افزایش دقت مدل نواری انجام شده بود، پرداخته شد و مشخص شد که مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای مدل که با تکیه بر مبانی نظری توسط چوی و پارک پیشنهاد شده است در مدل های مختلف به نتایج یکسانی از نظر دقت و صحت منجر نمی شود. به عبارت دیگر این ضرایب تابعی از پارامترهای هندسی و مقاومتی مدل مورد مطالعه (نسبت طول دهانه به ارتفاع دیوار و ضخامت ورق) هستند.

در همین راستا به ارائه مدل چوی و پارک اصلاح شده مبادرت شد که در آن پارامترهای مدل به صورت تابعی از خصوصیات هندسی و مقاومتی نمونه در نظر گرفته شد. جهت تعیین مقادیر مناسب این پارامترها چند سیستم دیوار برشی فولادی یک طبقه با ضخامت ورق و نسبت طول دهانه به ارتفاع مختلف به روش طراحی بر اساس ظرفیت طراحی و در نرم افزارهای آباکوس و اپنسیس مدل سازی شدند و با نتایج بدست آمده از تحلیل در نرم افزار اجزا محدود، مقادیر مناسب پارامترهای مدل پیشنهادی چوی و پارک برای هریک از شرایط کالیبره شدند. تفاوت های عمده بین مقادیر پارامترهای مدل چوی و پارک اصلاح شده و مدل چوی و پارک را به شرح زیر می توان برشمرد:

- مطالعه صورت گرفته توسط علی نیا و حبشی نشان می دهد که بر خلاف تئوری های موجود در رابطه با کماتش ورق ها که به طور صریح تاکید بر ثابت ماندن تنش های فشاری اصلی پس از کماتش دارند، تنش های فشاری اصلی نیز رشد قابل توجهی می کند. به همین دلیل در محاسبه مقاومت فشاری المان های نواری ( $f_{cs}$ ) به جای فرض ساده کننده بارگذاری برش خالص و برابر قراردادن آن با تنش کماتش ورق، به نتایج بدست آمده از آباکوس تکیه شده و بر اساس شرایط هندسی و مقاومتی هر مدل، به طور مستقل کالیبره گردید. نتایج نشان می دهند که با افزایش ضخامت، مقدار  $f_{cs}$  افزایش می یابد که دامنه تغییرات آن بین ۰/۱ تا ۰/۴ می باشد و برای مقادیر مختلف نسبت طول دهانه به ارتفاع مختلف مقدار  $f_{cs}$  را می توان در حدود ۰/۱ در نظر گرفت.
- مقدار مقاومت تسلیم المان های نواری ( $f_{ts}$ ) نیز با تکیه بر نتایج بدست آمده از آباکوس بدون استفاده از ضوابط تسلیم فون میزس بدست آمده است که برای ضخامت های مختلف، دامنه تغییرات آن بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ می باشد و برای نسبت طول دهانه به ارتفاع مختلف بین ۰/۷ تا ۰/۹۵ تغییر می کند.

- مقدار ضریب اولیه منحنی تنش-کرنش المان های نواری در شاخه بارگذاری مجدد کششی ( $\beta$ ) با تغییر ضخامت، ثابت باقی می ماند و به ضخامت بستگی ندارد ولی با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع رابطه مستقیم دارد و با افزایش آن مقدار  $\beta$  نیز افزایش می یابد.
- با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، مقدار  $\epsilon_{pr}$  کاهش می یابد و با افزایش ضخامت مقدار آن نیز افزایش می یابد.
- ضرایب مختصات قائم نقاط TF و TE با افزایش ضخامت کاهش می یابد و با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، مقدار ضریب TE افزایش می یابد ولی تغییرات ضریب TF نامنظم است.

#### مراجع

- [1] P.A. Timler, C.E. Ventura, H. Prion and R. Anjam, "Experimental and Analytical studies of steel plate shear walls as applied to the design of tall buildings", *Struct. Design Tall Build*, (1998) 233-249.
- [2] A. Astaneh-Asl, "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", *Steel Technical Information and Product Services Report*, (Steel Tips), Structural Educational Council, Maraga, CA, 2000.
- [3] M. Rezai, "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls by Shake Table Testing", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, 1999.
- [4] M. Elgaaly, V. Caccese and C. Du, "Post buckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls under Cyclic Load", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (1993) 588-605.
- [5] T.M. Roberts and S. Sabouri-Ghomi, "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", *Thin-Walled Structures*, (1991) 145-162.
- [6] R.G. Driver, G.L. Kulak, D.G.L. Kennedy, A.E. Elwi, "Cyclic Test of Four-Story Steel Plate Shear Wall", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (1998) 112-120.
- [7] L.J. Thorburn, G.L. Kulak, and C.J. Montgomery, C.J., "Analysis of Steel Plate Shear Walls", *Structural Engineering Report No. 107*, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, 1983.
- [8] M. Elgaaly and Y. Liu, "Analysis of Thin-Steel-Plate Shear Walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (1997) 1487- 1496.
- [9] M. Elgaaly and Y. Liu, "Analysis of Thin-Steel-Plate Shear Walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (1997) 1487- 1496.

- [14] S. Sabouri-Ghomi and S.R.A. Sajadi, "Experimental and Theoretical studies of steel plate shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, (2012) 152-159.
- [15] AISC 820, "Steel Design Guide 20", Steel Plate Shear Walls, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2007.
- [16] AISC 341, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2005.
- [17] AISC, ANSI/AISC 358-05, "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications", American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2005.
- [18] ABAQUS theory manual, Version 6.10.1, Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc., (HKS).
- [19] H.R. Habashi and M.M. Alinia, "Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, (2010) 150-158.
- [10] M. Rezaei, C.E. Ventura, H.G.L. Prion, "Numerical investigation of thin Unstiffened Steel Plate Shear Walls", *Proceedings, 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, 2000.
- [11] R.G. Driver, "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, 1997.
- [12] I.R. Choi and H.G. Park, "Hysteresis Model of Thin Infill Plate for Cyclic Nonlinear Analysis of Steel Plate shear Walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (2008) 1423-1434.
- [13] Open system for earthquake engineering simulate on, user command Language manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif., <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/index.html>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Banazade, S. M. Hosseini, S. A. Jalali, "Adjustment of parameters in stress-strain relationship of strip elements in steel plate shear wall model under cyclic loading", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 431-442.

DOI: 10.22060/ceej.2016.677



