

Numerical investigation of an innovative steel plate shear wall with concentric circular rings under cyclic loading

Ali Akbar Farrokhi¹, Sepideh Rahimi^{2*}, Morteza Hoseinali Beigi³, Mohaman Hoseinzadeh²

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Islamic Azad University Nour Branch, Nour, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Islamic Azad University Nour Branch, Nour, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT

Steel plate shear walls (SPSWs) are one of the most important and widely used lateral load-bearing systems. The reason for this is easier execution than reinforced concrete (RC) shear walls, faster construction time, and lower final weight of the structure. However, the main drawback of SPSWs is premature buckling in low drift ratios, which affects the energy absorption capacity and global performance of the system. To address this problem, two groups of SPSWs under cyclic loading were investigated using the finite element method (FEM). In the first group, several series of circular rings have been used and in the second group, a new type of SPSW with concentric circular rings (CCRs) has been introduced. Numerous parameters include in yield stress of steel plate wall materials, steel panel thickness, and ring width were considered in nonlinear static analysis. At first, a three-dimensional (3D) numerical model was validated using three sets of laboratory SPSWs and the difference in results between numerical models and experimental specimens was less than 5% in all cases. The results of numerical models revealed that the full SPSW undergoes shear buckling at a drift ratio of 0.2% and its hysteresis behavior has a pinching in the middle part of load-drift ratio curve. Whereas, in the two categories of proposed SPSWs, the hysteresis behavior is complete and stable, and in most cases no capacity degradation of up to 6% drift ratio has been observed. Also, in most numerical models, the tangential stiffness remains almost constant in each cycle. Finally, for the innovative SPSW, a relationship was suggested to determine the shear capacity of the proposed steel wall relative to the wall slenderness coefficient.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 October 2021

Revise Date: 24 July 2022

Accept Date: 10 August 2022

Keywords:

Steel plate shear wall
Concentric circular rings
Shear capacity
Energy absorption
Shear buckling
Slenderness ratio

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.309593.2602>

*Corresponding author: Sepideh Rahimi

Email address: s_rahimi@iaunour.ac.ir

مطالعه عددی رفتار دیوارهای برشی فولادی با حلقه‌های دایروی متحدالمرکز تحت بارگذاری چرخه‌ای

علی اکبر فرخی^۱، سپیده رحیمی^{۲*}، مرتضی حسینعلی بیگی^۳، محمد حسین زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

دیوارهای برشی فولادی از مهم‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌های باربر جانبی محسوب می‌شوند. اما ضعف عمده دیوارهای برشی فولادی در کماتش زودهنگام در نسبت‌های دررفت پائین است که این امر روی ظرفیت جذب انرژی و عملکرد کلی سیستم تاثیر می‌گذارد. برای رفع این معضل، دو نوع از دیوارهای برشی فولادی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفتند. در نوع اول، حلقه‌های متعدد استفاده شده است و در نوع دوم، سیستم جدیدی از دیوارهای برشی فولادی دارای حلقه‌های دایروی متحدالمرکز معرفی شده است. پارامترهای متعددی از قبیل تنش تسلیم مصالح ورق فولادی دیوار برشی، ضخامت ورق فولادی و عرض حلقه‌ها در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی در نظر گرفته شدند. در ابتدا مدل عددی سه بعدی با استفاده از سه دسته دیوار برشی فولادی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و میزان اختلاف نتایج بین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد در تمام موارد مشاهده شد. نتایج مدل‌های عددی نشان دادند که دیوار برشی فولادی کامل در نسبت دررفت ۰/۲ درصد دچار کماتش برشی می‌شود و رفتار هیستریزیس آن دارای باریک‌شدگی می‌باشد. اما در دو دسته دیوار برشی فولادی پیشنهادی، رفتار هیستریزیس کامل و پایدار است و در اکثر موارد تا نسبت دررفت ۶ درصد ظرفیت مشاهده نشده است. همچنین در بیشتر مدل‌های عددی، سختی مماسی در هر سیکل تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در پایان، برای نمونه دیوار برشی فولادی پیشنهادی، رابطه‌ای برای تعیین ظرفیت برشی دیوار فولادی نسبت به ضریب لاغری دیوار ارائه شد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، حلقه‌های متحدالمرکز، ظرفیت برشی، جذب انرژی، کماتش برشی، نسبت لاغری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.309593.2602	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.309593.2602	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۱۹	۱۴۰۱/۰۵/۱۹	۱۴۰۱/۰۵/۰۲	۱۴۰۰/۰۷/۱۶
سپیده رحیمی sepideh.rahimi@iau.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی عمدتاً با استفاده از ورق‌های فولادی نازک و بدون سخت‌کننده در داخل یک قاب خمشی فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیوار برشی فولادی، سختی پیش‌کمانشی قابل توجهی نسبت به وزنش را فراهم می‌کند که موجب ساخت سریع و اقتصادی آن‌ها می‌شود و همچنین دارای ضخامت خیلی کمتری نسبت به دیوارهای برشی بتنی معادل هستند. با این وجود، علیرغم مزایای این سیستم، چالش‌هایی نظیر لاغر بودن و ورق بدون سخت‌کننده که منجر به کمانش زودرس در اثر اعمال نیروی فشاری بخصوص در سیکل‌های ابتدائی بارگذاری را دارد. به طور مثال، ورق دیوار تحت بارهای جانبی نسبتاً کوچک کمانش می‌کند که موجب افت در جذب انرژی و باریک‌تر شدن حلقه‌های هیستریزیس می‌شود. علاوه بر این، بعد از کمانش ورق، ورق دیوار ظرفیت باربری جانبی کمی را در مقابله با بارهای جانبی خواهد داشت. به همین دلیل استفاده از یک قاب خمشی مکمل برای فراهم نمودن ظرفیت باربری جانبی و افزایش جذب انرژی توصیه شده است [۱].

در دهه‌های اخیر، رویکردهای مختلفی برای بهبود بخشیدن مشخصات رفتاری دیوار برشی فولادی پیشنهاد شده است. از این روش‌ها می‌توان به استفاده از ورق ضخیم فولادی، سخت‌کننده‌های عرضی و قطری، پنل‌های بتنی در یک یا دو طرف ورق دیوار برشی فولادی، استفاده از حفره و بازشوها با اشکال مختلف در داخل و لبه دیوار برشی فولادی و استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پائین اشاره نمود. حفره‌ها در ورق‌های فولادی به طور چشمگیری نیروهای طراحی روی المان‌های مرزی را از طریق تضعیف نمودن ورق دیوار برشی یا کاستن از ممان اینرسی آن کاهش می‌دهند. گزینه‌های مختلفی برای کاهش مقاومت ورق‌های دیوار ارائه شد، یکی از این موارد استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پائین در مقایسه با ورق فولادی معمولی بود. گزینه‌ی دیگر، مربوط به ایجاد حفره‌های دایروی در ورق فولادی بود. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحقیق ویان و برونو^۱، این پنل‌های حفره‌دار می‌توانند به منظور تحمل نیروهای جانبی تخمین زده شده استفاده شوند. گزینه دیگر اختصاص به استفاده نمودن از شیارهای عمودی در ورق‌های دیوار دارد [۲]. تمام روش‌های ارائه شده در جهت کاهش ممان اینرسی دیوار برشی فولادی و اعمال نیروی جانبی کمتر به المان‌های عمودی مرزی می‌باشند.

رابرتز^۲ و صبوری‌قمی [۳]، ۱۶ نمونه کوچک مقیاس از پنل دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده را با بازشوهای دایروی با قطرهای متغییر در مرکز را تحت آزمایش قرار داده و نتایج آن‌ها را تحت بارگذاری رفت و برگشتی بررسی نمودند. با توجه به نتایج، یک ضریب تقریبی برای کاهش مقاومت و سختی یک پنل با یک بازشوی دایروی پیشنهاد دادند. علاوه بر این، کورتز و لیو^۳ [۴] حفره‌ها با الگوهای مختلف به منظور محدود کردن مقاومت مجاز پنل‌های برشی ضخیم را مورد بررسی قرار دادند. فورمیسانو^۴ و همکاران [۵] رفتار دیوارهای برشی ساخته شده از ورق آلومینیومی به عنوان یک سیستم نوین که قادر به فراهم نمودن ظرفیت چشمگیری برای سازه‌های موجود تحت بارهای باد و زلزله بود، را ارتقاء دادند. نتایج نشان داد که این وسایل می‌توانند رفتار لرزه‌ای را بهبود ببخشند و دو ویژگی مقاومت و جذب انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقا بدهند. با این وجود، وقتی که این ورق‌ها در قالب یک ورق کامل و بدون شکاف مورد استفاده قرار گرفت، تنش مضاعف در اطراف محل نصب گسترش یافت. به منظور برطرف نمودن این معضل، حفره‌هایی در ورق‌ها ایجاد شد. الگوی حفره با نسبت‌های بازشوی مختلف در ورق‌های آلومینیومی در نظر گرفته شدند. یافته‌ها نشان داد که ورق‌های حفره‌دار جایگزین مناسب برای ورق‌های توپر برای مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و جدید می‌باشد.

ویان [۶] یک مطالعه آزمایشگاهی را به منظور مشخص نمودن عملکرد پنل‌های فولادی با حفره‌های دایروی انجام داد. عملکرد نمونه آزمایشگاهی در قالب حلقه‌های هیستریزیس S-شکل با باریک‌شدگی خیلی کم نشان داده شد. علاوه بر این، مقیمی و درایور^۵ [۷] تاثیر الگوهای بازشوی منظم بر تقاضای ستون‌ها را در یک سیستم بررسی نمودند و دریافتند که اگرچه بازشوها موجب کاهش قابل ملاحظه ظرفیت برشی ورق دیوار می‌شوند، اما آن‌ها نمی‌توانند تقاضای نیروی ستون‌ها را کاهش دهند. ولیزاده و همکاران [۸] و فورمیسانو و

1-Vian and Bruneau

2-Roberts

3-Cortes and Liu

4-Formisano

5-Moghimi and Driver

همکاران [۹] رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی با بازشوی دایروی ایجاد شده در مرکز ورق را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و تاثیر این بازشوی مرکزی و ابعاد آن بر سختی اولیه، مقاومت و جذب انرژی مورد ارزیابی قرار دادند.

برخورداری و همکاران [۱۰]، یک تحلیل عددی روی عملکرد دیوارهای برشی فولادی دارای بازشوهای مستطیلی و سخت‌کننده انجام دادند و پارامترهای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری را بررسی نمودند. علاوه بر این، عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مجهز به سخت‌کننده با دو بازشوی مستطیلی توسط صبورقمی و مامازیزی^۶ [۱۱] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تاثیر فاصله بین دو بازشو روی سختی، مقاومت برشی نهائی و جذب انرژی قابل چشم‌پوشی است، در حالی که حضور بازشوها موجب کاهش پارامترهای فوق می‌شود. پوربا^۷ و برونو [۱۲] عملکرد دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده با بازشوها را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. هیتاکا و ماتسویی^۸ [۱۳، ۱۴] بررسی جامع و گسترده روی دیوارهای برشی فولادی با شیارهای عمودی را انجام دادند. در این مطالعات مشخص شد که بخش‌هایی از پنل فولادی که بین شیارها قرار داشتند همانند یک سری از لینک‌های خمشی رفتار می‌کنند. بنابراین، یک رفتار نسبتاً شکل‌پذیر در نتایج آن‌ها مشاهده شد.

فورمیسانو و همکاران [۱۴] رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی حفره‌دار را بررسی نمودند. در این تحقیق، یک ساختمان بتن مسلح پنج طبقه موجود که در دهه ۱۹۶۰ طراحی شده بود با دیوارهای برشی فولادی حفره‌دار با تنش تسلیم پائین مقاوم‌سازی شد. نتایج نشان داد که این روش مقاوم‌سازی، رفتار لرزه‌ای سیستم سازه‌ای را بهبود بخشید و مقرون به صرفه نیز است. در یک مطالعه صورت گرفته توسط فورمیسانو و همکاران [۱۵]، رفتار غیرخطی قاب بتنی مسلح مجهز به دیوار برشی فولادی حفره‌دار به صورت عددی توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس^۹ بررسی شد. در این مطالعات سه نوع بازشو با درصد‌های مختلف و آرایش‌های مختلف در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مقاومت برشی و شکل‌پذیری سازه بتن‌آرمه مجهز به دیوارهای برشی فولادی حفره‌دار به طور چشمگیری نسبت به سازه بتن‌آرمه با دیوار فولادی توپر بهبود یافتند. علاوه بر این، مقاومت برشی سازه بتن‌آرمه با دیوار برشی فولادی حفره‌دار با بازشویی به نسبت سطح اشغال ۱۳، ۴۰ و ۴۲ درصد به ترتیب به مقادیر ۲۶، ۴۶ و ۵۱ درصد کمتر از دیوار فولادی کامل بودند.

منصف احمدی و همکاران [۱۶] یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی روی رفتار برشی سیستم‌های شبکه با لینک‌ها داخلی انجام دادند و تاثیر هندسه لینک داخلی روی عملکرد چرخه‌ای سیستم‌ها را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عرض لینک، مقاومت نهائی، سختی و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، لینک‌های با شکل پروانه‌ای با طول میانی متغییر اعمال شدند که موجب بهبود رفتار برشی و تمایل به گسیختگی شد. منصف احمدی و متیز^{۱۰} [۱۷] پنل‌های برشی فولادی با لینک‌های پروانه‌ای شکل را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تعداد لینک‌های پروانه‌ای شکل موجب کنترل مقاومت برشی، سختی اولیه و استهلاک انرژی می‌شود. استهلاک انرژی پنل‌های برشی با این لینک‌ها به دلیل کمانش لینک‌های پروانه‌ای شکل به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

زرین کلایی و همکاران [۱۸] تاثیر بازشوها با دو شکل دایره و بیضی و با آرایش‌های مختلف را به صورت عددی تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج در قالب میزان جذب انرژی مدلهای عددی، ظرفیت باربری کل و توزیع تنش در ۱۷ مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش ۱۰ برابری درصد بازشو از ۱/۴۵ به ۱۴/۵ درصد، ظرفیت جذب انرژی به طور میانگین ۲۰ درصد کاهش یافت. فیلیپس و ایترتن^{۱۱} [۱۹] مطالعه عددی بر روی رفتار دیوار برشی فولادی دارای حلقه‌های فولادی انجام دادند. اگوروا^{۱۲} و همکاران [۲۰] مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۸ نمونه از دیوار برشی فولادی دارای حلقه‌های فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام دادند. تاثیر پارامترهای هندسی مختلف نتایج مطلوبی را روی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی از ورق فولادی نشان داد.

⁶-Mamazizi

⁷-Purba

⁸-Hitaka and Matsui

⁹-ABAQUS

¹⁰-Monsef Ahmadi and Matteis

¹¹-Phillips and Eatherton

¹²-Egorova

در اکثر تحقیقات پیشین، تنش‌های زیادی به دلیل اتصال مستقیم ورق فولادی دیوار به المان عمودی ستون در اثر بارگذاری جانبی وارد می‌شود که این امر موجب لحاظ نمودن ابعاد بزرگ برای طراحی ستون می‌شود. از این حیث برای کاهش دادن اثرات تنش‌های زیاد اعمالی به ستون، حفره‌های دایروی متحد‌المرکز در داخل ورق فولادی ایجاد شدند تا در اثر اعمال نیروهای جانبی، لینک‌های بین حفره‌ها و بخش‌های نوار دایروی در کشش تحمل نیرو کنند و بدین ترتیب شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی و همچنین باعث می‌شود تا تسلیم ورق فولادی قبل از تسلیم اجزای مرزی اتفاق افتد، از خود نشان دهند. علاوه بر این، اکثر مطالعات پیشین بازشوهای دایروی را مورد بررسی قرار دادند و بررسی روی اشکال تداخلی و استفاده از لینک‌های بین آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفت. از این‌رو، تحقیق حاضر به منظور پر کردن این شکاف با استفاده از بررسی جامع به کمک روش المان اجزای محدود در برنامه آباکوس [۲۱] و مطالعه تأثیر دو نوع از حلقه‌ها با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر آرایش حفره‌ها، ضخامت ورق، تنش تسلیم ورق بر رفتار سیستم دیوار برشی فولادی، انجام می‌گیرد.

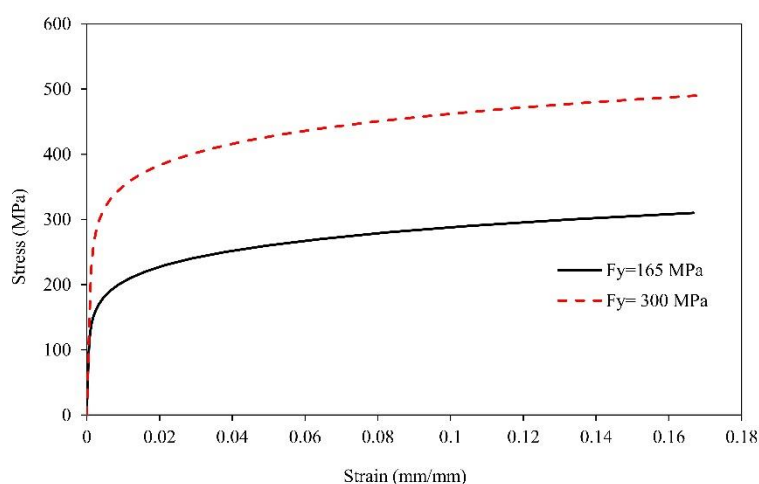
۲- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

۲-۱- مدل رفتاری مصالح فولادی

علاوه بر مدل ساده الاستوپلاستیک کامل، با یا بدون سخت‌شوندگی کرنشی، مدل‌هایی با رفتار مصالح مختلفی برای شناسایی پاسخ تنش-کرنش برای وضعیت‌های بارگذاری مونوتونیک و چرخه‌ای پیشنهاد شده است که از این میان می‌توان به مدل رمبرگ-اسگود^{۱۳} [۲۲] و منگوتو-پینتو^{۱۴} [۲۳] اشاره نمود. به دلیل سادگی و زمان محاسباتی کم، مدل دو یا سه خطی از منحنی تنش-کرنش واقعی بیشتر در مدل‌سازی المان محدود کاربرد و عمومیت دارد. با این وجود، چنین مدل ساده‌شونده‌ای همیشه نمی‌تواند به خوبی منحنی پوش رفتار چرخه‌ای را بیان نماید. مدل‌های مصالح به صورت نمایی اغلب می‌توانند سخت‌شوندگی کرنشی را در بارگذاری چرخه‌ای بهتر بیان کنند. به همین دلیل در این تحقیق از مدل رمبرگ-اسگود برای مصالح فولادی استفاده شده است. در رابطه‌ی (۱) تنش تسلیم ماده می‌باشد.

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.002 (\sigma / \sigma_y)^n \quad (1)$$

در شکل (۱)، نمودار تنش-کرنش مطابق با رابطه‌ی (۱) برای فولادی با تنش تسلیم ۱۶۵ و ۳۰۰ مگاپاسکال نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل رفتاری مصالح فولادی مطابق با مدل رمبرگ-اسگود.

¹³-Ramberg-Osgood

¹⁴-Menegotto-Pinto

۲-۲- ناکاملی اولیه هندسی

ناکاملی‌های اولیه در ورق‌های فولادی نازک با توجه به دو مورد در نظر گرفته شدند. مورد اول اینکه در واقعیت، ورق‌های فولادی پرکننده قاب به دلیل فرآیند ساخت و جابجایی کمی دچار تغییرشکل می‌شوند و مورد دوم اینکه تحلیل با مسئله کمانش غیرخطی مواجه خواهد شد. دلیل آن این است که برای برنامه آباکوس سخت است که کمانش اولیه‌ی ورق‌های کاملاً صاف را محاسبه کند و مشکلات همگرایی متعددی رخ خواهد داد. بنابراین، به طور دستی ناکاملی هندسی اولیه هم از نظر اجرایی و هم از جنبه‌ی تحلیلی ضروری است. به منظور بررسی تاثیر مقدار ناکاملی هندسی اولیه، مقادیر متفاوت از آن انتخاب شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. الگوی ناکاملی اولیه براساس شکل مود کمانش الاستیک تعیین شد. مقادیر حداکثر کمانش از $0/01$ درصد تا 2 درصد عرض ورق متغیر می‌باشند. همچنین در تحقیقی که توسط علی‌نیا و صراف شیرازی [۲۴] در سال ۲۰۰۹ صورت گرفت، آن‌ها تأیید کردند که به دلیل نازک بودن ورق دیوار برشی فولادی، آن‌ها در مراحل اولیه بارگذاری کمانش می‌کنند و رفتار پس از کمانش آن‌ها تأثیر چشمگیری بر مقدار ناکاملی هندسی اولیه نخواهد داشت. علاوه بر رفتار پس کمانشی، کمانش مرحله اولیه یکی از جنبه‌های مهم رفتار این سیستم است که باید توجه شود. اگر مقدار ناکاملی هندسی اولیه عدد بزرگی باشد، کمانش در مراحل نخست توسط مدل‌های شبیه‌سازی شده شناسایی نمی‌شود. بدین ترتیب برای مدل عددی مقدار 1 درصد ناکاملی هندسی برای تطبیق با سختی اولیه نمونه‌ی آزمایشگاهی انتخاب شد. اعمال ناکاملی هندسی با استفاده از دستور IMPERFECTION و پس از انجام تحلیل کمانش الاستیک روی سیستم انجام شد و مقدار $0/01$ از مود اول ملاک عمل قرار گرفت.

۲-۳- مشخصات المان‌ها

المان‌های مرزی تیر و ستون و ورق دیوار برشی فولادی با المان S4R مدل شده است. المان S4R، یک المان پوسته‌ای چهار گره-ای از نوع مرتبه اول با شش درجه آزادی برای هر گره می‌باشد. در تمام مدل‌های عددی از روش کنترل ساعت شنی در برنامه المان اجزای محدود آباکوس برای لحاظ نمودن سختی خمشی و غشایی استفاده شده است [۲۵]. در نظر نگرفتن روش ساعت شنی می‌تواند منجر به نرمی بیش از حد عضو مورد نظر در باربری جانبی شود. از آنجائی که اتصال المان‌های مرزی به ورق دیوار برشی فولادی در این تحقیق به صورت جوشی بوده است، تمرکز و توجه تحقیق در این مطالعه بر روی آن نیست. به همین منظور، فرض شده است که ورق فولادی دیوار برشی به صورت مستقیم به المان‌های مرزی افقی و عمودی به کمک قید tie به یکدیگر متصل شده است. از قید مذکور برای اتصال دو بخش مورد نظر به یکدیگر با توجه به مقید نمودن گره‌های آن نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود. الگوی مش‌بندی به صورت اتوماتیک برای کل سازه در برنامه در نظر گرفته شده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی چرخه‌ای انجام شد و برای تعیین اندازه و تعداد مش معیارهایی نظیر حداکثر تغییر مکان کلی سیستم و حداکثر تنش فون-میسز^{۱۵} در نظر گرفته شدند. پس از انجام آنالیز حساسیت و تحلیل‌های متعدد، تعداد کل گره‌ها برابر با ۲۷۵۳ و تعداد کل المان‌ها ۲۶۴۳ می‌باشد. برای انجام تحلیل حساسیت از چهار مقدار برای اندازه المان در ورق دیوار فولادی برابر با ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شد که اندازه ۵۰ میلی‌متر برای ورق فولادی دیوار انتخاب شد. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین نتایج نمونه‌ها با اندازه المان مختلف ارائه شده است.

¹⁵ Mises

جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل	نام مدل	اندازه المان برابر با ۲۰ میلیمتر		اندازه المان برابر با ۱۰۰ میلیمتر		اندازه المان برابر با ۵۰ میلیمتر		اندازه المان برابر با ۲۰ میلیمتر	
		سختی اولیه (kN/m)	حداکثر نیرو (kN)	سختی اولیه (kN/m)	حداکثر نیرو (kN)	سختی اولیه (kN/m)	حداکثر نیرو (kN)	سختی اولیه (kN/m)	حداکثر نیرو (kN)
اعتبارسنجی اول	102(C)	۱۶۰۸۶	۱۰۷/۷	۱۵۶۵۷	۱۰۸/۳	۱۶۰۲۵	۱۰۸/۳	۱۶۰۲۵	۱۰۷/۷
	202(C)	۷۳۵۶	۲۰۶	۶۸۴۵	۲۰۷/۲	۷۲۷۳	۲۰۷/۲	۷۲۷۳	۲۰۶
اعتبارسنجی دوم	چن و جیانگ	۱۱۷۰۷۰	۱۱۵۹	۱۱۵۲۶۰	۱۱۸۸	۱۱۷۰۶۸	۱۱۸۸	۱۱۷۰۶۸	۱۱۵۹
اعتبارسنجی سوم	اگوروا و همکاران	۷۹۷	۳۸۲	۷۲۳	۳۸۳	۷۹۶/۷	۳۸۳	۷۹۶/۷	۳۸۲

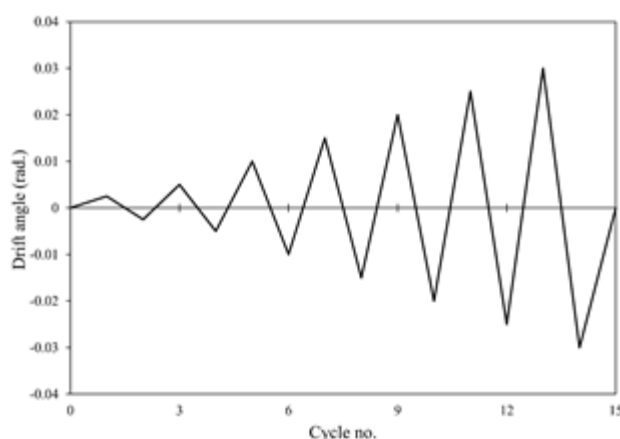
۲-۴- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل عددی، از سه مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. در مدل نخست، دو نمونه ورق فولادی دارای دو ردیف شیار تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط هیتاکا و ماتسویی [۱۳] در سال ۲۰۰۳ قرار داده شد. در مدل دوم، رفتار یک دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه با ورق فولادی دارای تنش تسلیم پائین تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط چن و جیانگ^{۱۶} [۲۶] در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار گرفت. در مدل اعتبارسنجی سوم، از یک مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی دارای حلقه‌های فولادی متعدد که توسط اگوروا و همکاران [۲۰] انجام گرفت، استفاده گردید. در ادامه جزئیات و نتایج هر سه مدل اعتبارسنجی تشریح می‌شوند.

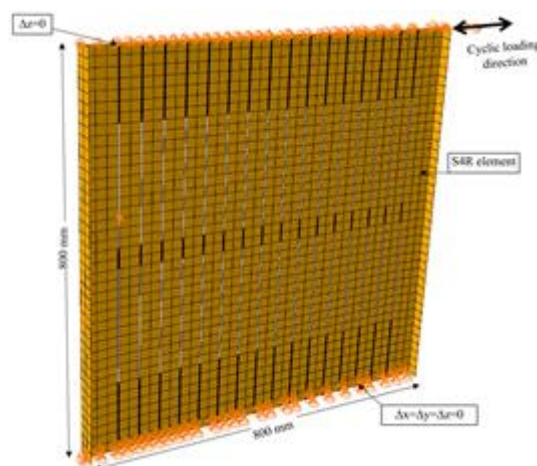
۲-۴-۱- مدل اعتبارسنجی اول

هیتاکا و ماتسویی [۱۳] در سال ۲۰۰۳، به تعداد ۴۲ نمونه آزمایشگاهی شامل ورق فولادی با آرایش‌های مختلف شیارهای عمودی روی ورق فولادی را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند. ورق فولادی مربع شکل به بعد ۸۰۰ میلی‌متر بود که دو سخت کننده به عرض ۵۰ میلی‌متر در دو لبه آن واقع شده است. ضخامت ورق و سخت کننده برابر با ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد. تنش تسلیم و تنش نهائی ورق‌ها به ترتیب برابر با ۲۹۷ و ۳۸۲ مگاپاسکال می‌باشند. از بین نمونه‌های آزمایش شده، دو نمونه با نام‌های A102(C) و A202(C) برای اعتبارسنجی انتخاب شدند. تفاوت بین این نمونه‌ها در فاصله شیارها از یکدیگر و طول شیار می‌باشد. در هر دو نمونه، عرض شیار برابر با ۳ میلی‌متر اختیار شده است. فاصله‌ی شیارها از یکدیگر در نمونه‌های A102(C) و A202(C) به ترتیب برابر با ۴۲ و ۸۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین طول شیارها در دو نمونه برابر با ۲۳۵ و ۱۶۸ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. الگوی بارگذاری چرخه‌ای در شکل (۲) به همراه نمونه مش‌بندی شده نشان داده شده است.

¹⁶-Chen and Jhang



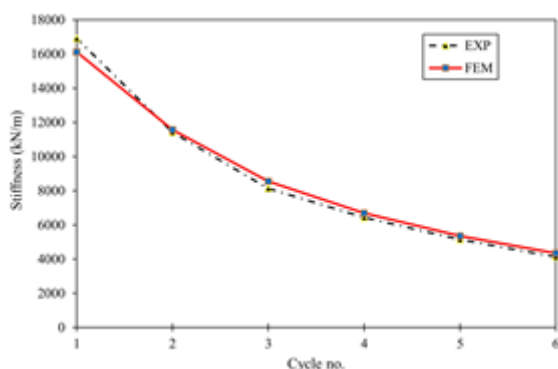
(الف)



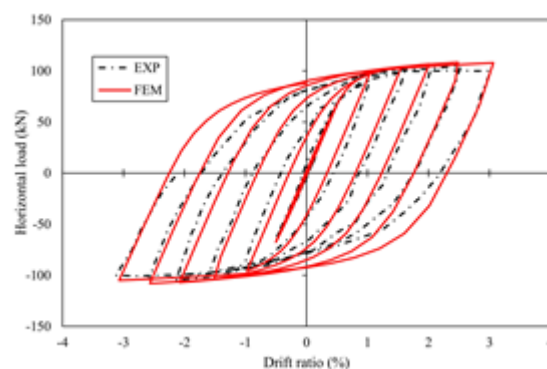
(ب)

شکل ۲: (الف) الگوی بارگذاری [۱۳]، (ب) شرایط مرزی در مدل مش‌بندی شده.

در شکل‌های (۳) و (۴) مقایسه‌ای بین نتایج نمودارهای نیرو-دوران و تغییرات سختی-شماره سیکل برای دو نمونه 102(C) و 202(C) صورت گرفته است. با توجه به نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه عددی 102(C) برابر با $108/3$ کیلونیوتن است که تقریباً $1/5$ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی است. همچنین براساس تغییرات سختی سیکل‌ها مشخص می‌شود که حداکثر اختلاف در مقدار سختی در سیکل‌های اول و سوم به میزان ۵ درصد بین دو نمونه المان اجزای محدود و آزمایشگاهی وجود دارد. با توجه به شکل (۴) حداکثر اختلاف سختی بین دو نمونه آزمایشگاهی و عددی تقریباً به ۸ درصد می‌رسد که در سیکل شماره ۱ اتفاق می‌افتد. برای مدل کردن افت در سختی و باربری از مدل آسیب نرم استفاده شده است. این مدل برای مسایل حجمی، صفحه‌ای و پوسته‌ای فولادی کاربرد دارد. در این مدل فرض می‌شود کرنش پلاستیک معادل در مدل آسیب، تابعی از نسبت تنش سه محوره و نرخ کرنش است که برای مواد همسانگرد، نسبت تنش سه محوره در حالت کشش دو محوری یکسان برابر با $0/67$ و در حالت فشار دو محوری یکسان برابر با $0/67$ می‌باشد. این مدل به خوبی توانسته مقدار افت ظرفیت و سختی را پس از بار بیشینه لحاظ نماید. همچنین مقدار نیرو بدست آمده از تحلیل عددی برابر با $207/2$ کیلونیوتن بود که اختلافی کمتر از $0/2$ درصد با مقدار مرتبط با نمونه آزمایشگاهی دارد. علاوه بر این در شکل (۵) مقایسه‌ای بین دو شکل مود نهایی دو نمونه آزمایشگاهی و عددی 202(C) نشان داده شده است. مقایسه دو شکل نشان داده است که مدل‌سازی عددی توانسته است توسعه میدان‌های کششی موجود در نمونه آزمایشگاهی را به نحو مناسبی شبیه‌سازی نماید. نحوه صحیح رفتار غیرارتجاعی مصالح و تشکیل میدان کششی در ورق فولادی دیوار از ویژگی‌های مهم در عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی است که باید در مدل‌سازی عددی لحاظ شود. همچنین قابل ذکر است که حداکثر تغییر مکان برون صفحه‌ای ورق فولادی دیوار حاصل از تحلیل عددی برابر با ۳۷ میلی‌متر بود که نسبت به نمونه آزمایشگاهی اختلاف ناچیز ۲ درصد داشت. مجموعه نتایج حاصل از شکل‌های (۳) تا (۵)، مبین عملکرد مطلوب مدل‌سازی عددی می‌باشد.

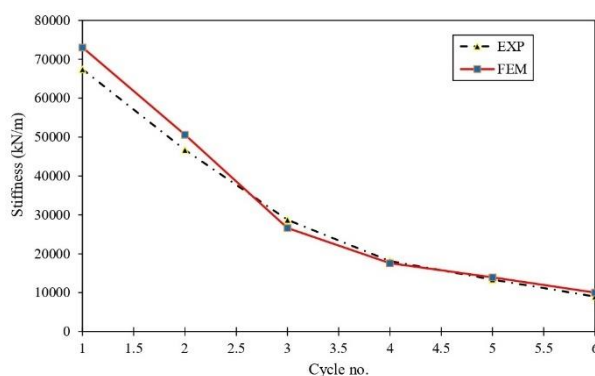


(ب)

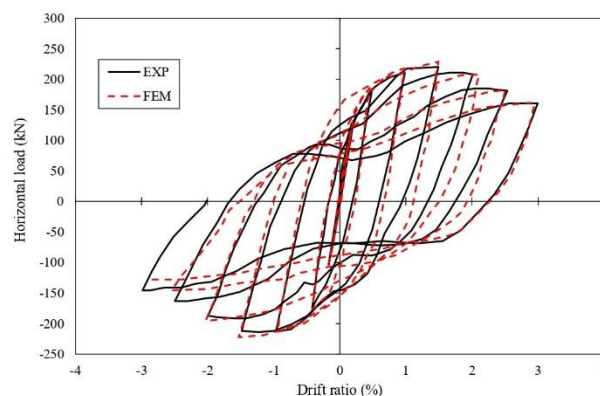


(الف)

شکل ۳: (الف) مقایسه بین منحنی نیروی جانبی و نسبت دررفت، (ب) مقایسه بین تغییرات سختی در هر سیکل بارگذاری در دو مدل آزمایشگاهی [۱۳] و عددی 102(C)

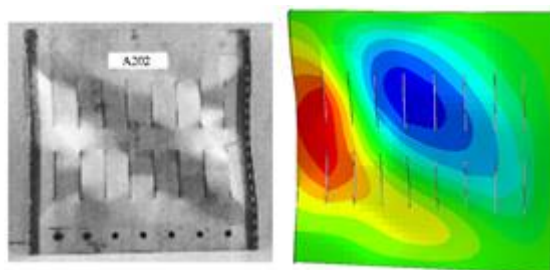


(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) مقایسه بین منحنی نیروی جانبی و نسبت دررفت، (ب) مقایسه بین تغییرات سختی در هر سیکل بارگذاری در دو مدل آزمایشگاهی [۱۳] و عددی 202(C)



شکل ۵: مقایسه تغییر شکل نهایی دو مدل آزمایشگاهی [۱۳] و عددی 202(C)

۲-۴-۲- مدل اعتبارسنجی دوم

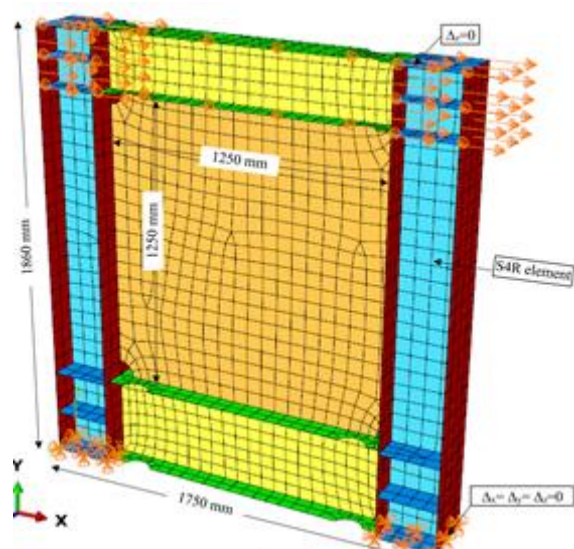
مدل صحت‌سنجی دوم از تحقیق انجام گرفته توسط چن و جیانگ [۲۶] در سال ۲۰۰۶ بر روی دیوار فولادی برشی متشکل از ورق فولادی با تنش تسلیم پائین انتخاب شده است. آن‌ها در این تحقیق، از ورق فولادی به ترتیب با تنش تسلیم و تنش نهایی ۹۳ و ۲۷۲ مگاپاسکال استفاده نمودند. عملکرد پنج نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نمونه شماره ۱ از تحقیق آن‌ها برای اعتبارسنجی مرحله دوم انتخاب شده است. ورق مربع شکل دیوار فولادی به بعد ۱۲۵۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. برای تیر و

ستون‌های اطراف ورق فولادی دیوار برشی به ترتیب از مقاطع $H244 \times 175 \times 7 \times 11$ و $H250 \times 250 \times 9 \times 14$ استفاده شده است. در جدول (۲)، مشخصات مکانیکی مصالح ارائه شده است.

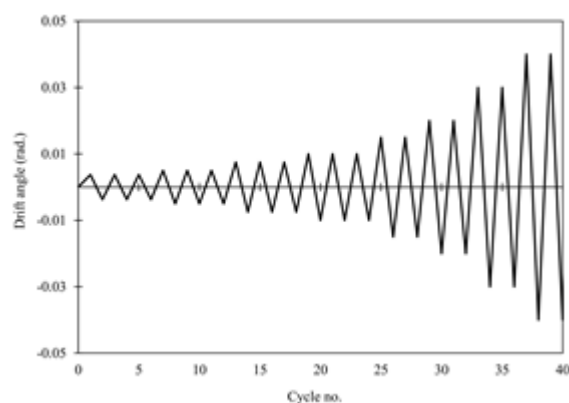
جدول ۲: مشخصات مکانیکی مصالح فولادی [۲۶]

ضخامت ورق (میلیمتر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (%)
۷	۴۴۵	۵۵۶	۰/۱۳
۹	۳۳۶	۴۵۴	۰/۱۲
۱۱	۴۳۹	۵۴۱	۰/۱۳
۱۴	۳۱۷	۴۴۲	۰/۱۲

در شکل (۶) الگوی بارگذاری بکار رفته در مدل شماره ۱ و مدل مش‌بندی شده به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل (۷) مقایسه‌ای بین نمودارهای نیرو-تغییر مکان دو نمونه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است. با توجه به اشکال و نمودارها نتیجه می‌شود که حداکثر نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونه آزمایشگاهی برابر با ۱۱۹۰ کیلونیوتن است که تقریباً ۲/۵ درصد بیشتر از همان نیرو در مدل عددی است. همچنین از شکل (۷-ب) دریافت می‌شود که حداکثر اختلاف تغییرات سختی در سیکل اول و به مقدار ۸ درصد می‌باشد. در شکل (۸) مقایسه‌ای بین تغییر شکل نهایی دو مدل عددی و آزمایشگاهی شماره ۱ نشان داده شده است که نشان دهنده صحت نتایج تحلیل عددی می‌باشد.

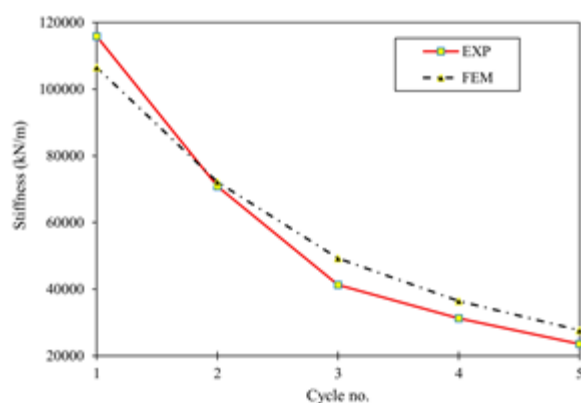


(ب)

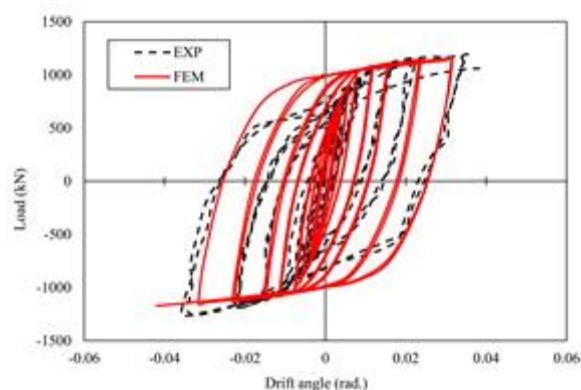


(الف)

شکل ۶: (الف) الگوی بارگذاری [۲۶]، (ب) شرایط مرزی و مشخصات هندسی مدل صحت‌سنجی.

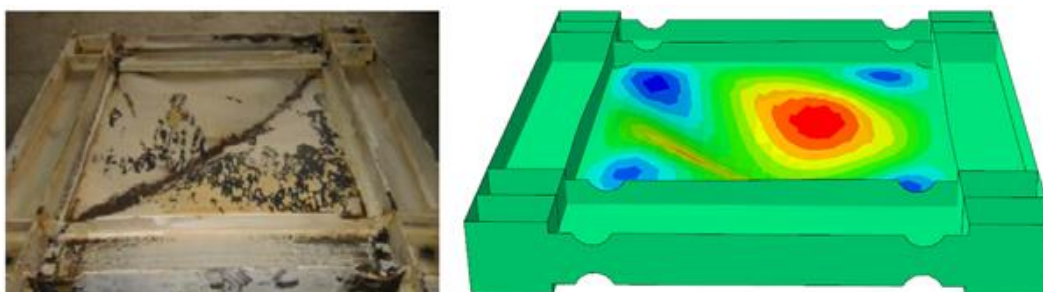


(ب)



(ف)

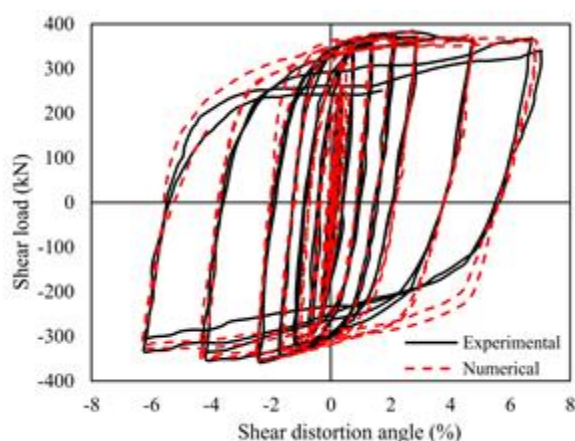
شکل ۷- (الف) مقایسه نمودار نیرو-نسبت دررفت، (ب) تغییرات سختی در هر سیکل بین دو مدل آزمایشگاهی [۲۶] و عددی.



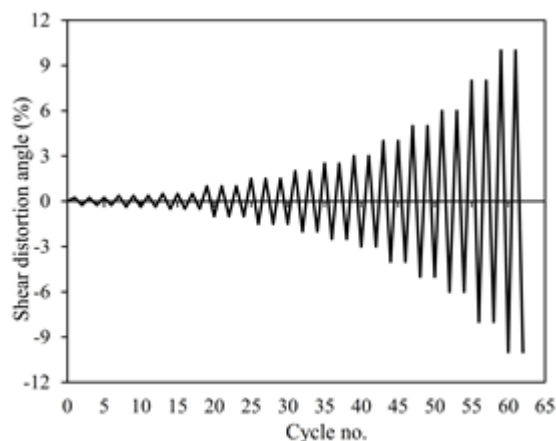
شکل ۸: مقایسه تغییرشکل نهایی بین دو مدل آزمایشگاهی [۲۶] و عددی

۲-۴-۳- مدل اعتبارسنجی سوم

مدل ۲-۱۳-۱ برای صحت‌سنجی مرحله سوم در نظر گرفته شده است. در این مدل، ضخامت ورق ۱۲/۷ میلی‌متر است و دو ردیف حلقه فولادی با شعاع ۱۵۰ میلی‌متر در آن استفاده شد. ابعاد کلی ورق مربع شکل برابر با ۷۱۱ میلی‌متر می‌باشد. همچنین تنش تسلیم و تنش نهائی ورق به ترتیب برابر با ۳۳۱ و ۴۰۰ مگاپاسکال است. بارگذاری مطابق با پروتوکول بارگذاری ATC-24 [۲۷] با اتخاذ نمودن زاویه تسلیم اعوجاج برشی برابر با ۰/۵ درصد به نمونه اعمال شد. نیرو به صورت کنترل تغییرمکان به محل اتصال دو المان مرزی وارد شد. در شکل (۹-الف) الگوی بارگذاری به طور کامل نشان داده شده است. در شکل (۹-ب) مقایسه‌ای بین دو منحنی نیروی برشی-زاویه برشی نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹) مشخص می‌شود که سختی اولیه نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب برابر با ۸۰۷/۶ و ۷۹۶/۷ نیوتن بر میلی‌متر است که اختلاف ۱/۳ درصد مشاهده می‌شود. همچنین اختلاف بین دو مقدار حداکثر نیروی برشی بین دو نمونه آزمایشگاهی و عددی تقریباً ۲ درصد می‌باشد که دقت مناسب در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۹- مقایسه نتایج بین دو مدل عددی و آزمایشگاهی [۲۰]، (الف) الگوی بارگذاری، (ب) نمودار نیروی جانبی-نسبت دریافت.

۳- معرفی مدل‌های دیوار برشی فولادی

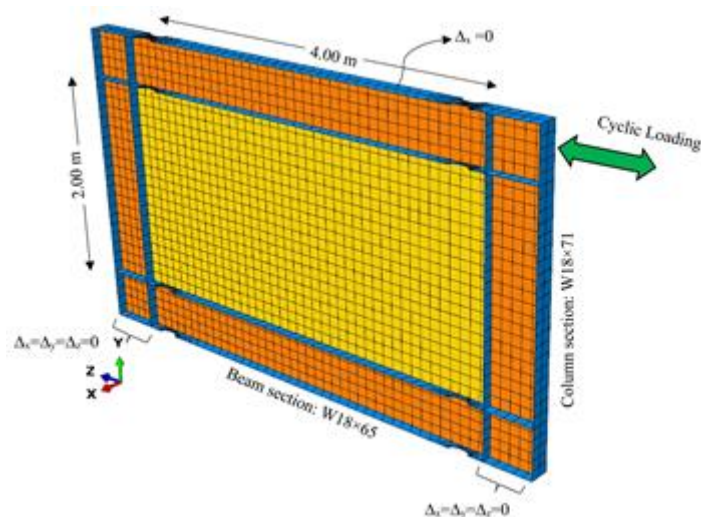
به منظور بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی حفره‌دار، دو نوع دیوار برشی فولادی متشکل از حلقه‌های متعدد تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. دیوار برشی نوع اول که شامل ۸ مدل عددی می‌باشد، مشابه با دیوارهای معرفی شده توسط فیلیپس و ایثارتن [۱۹] می‌باشد که در این دیوارها پارامترهایی نظیر ضخامت ورق، قطر حلقه و تعداد ردیف‌های حلقه‌ها و تنش تسلیم ورق فولادی دیوار برشی به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر رفتار دیوار برشی در نظر گرفته شدند. در تمامی این نوع مدل‌ها، عرض حلقه‌ها و عرض لینک‌های بین حلقه‌ها با یکدیگر برابر می‌باشد و مقدار آن برابر با ۱۰۰ میلی‌متر است. دیوار برشی نوع دوم که شامل ۸ مدل عددی است، نمونه جدیدی است که شامل حلقه‌های دایروی داخل یکدیگر می‌باشد. بدین ترتیب با احتساب مدل دیوار برشی فولادی بدون شیار، تعداد کل مدل‌های عددی برابر با ۱۷ می‌باشد. در این دیوارها متغیرها شامل عرض حلقه، ضخامت ورق و تنش تسلیم مصالح فولادی ورق دیوار برشی می‌باشند. مدل‌ها در فرم Model A.B نامگذاری شده‌اند که A بیانگر شماره گروه که شامل دو عدد ۱ یا ۲ می‌باشد و حرف B بیانگر شماره مدل در هر گروه می‌باشد. در تمام نمونه‌ها تنش تسلیم و نهائی‌المان‌های تیر و ستون به ترتیب برابر با ۳۴۵ و ۵۲۰ مگاپاسکال می‌باشند. در جدول ۳، تمام مدل‌های عددی در برنامه آباکوس لیست شده‌اند.

در دیوار برشی فولادی از ورق با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است. دلیل استفاده از این مقدار برای ضخامت ورق فولادی در دیوار بدون حفره این است که ظرفیت برشی یکسانی با مدل‌های دارای حفره داشته باشد. زیرا که استفاده از ضخامت بیشتر برای دیوار برشی فولادی بدون حفره کمتر مورد توجه می‌باشد. در شکل (۱۰) مشخصات هندسی مقاطع، ابعاد سیستم و شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل (۱۱) شکل دو گروه از دیوارهای برشی فولادی مشخص است که دیوار برشی گروه دوم (۱۱-ب) مدل نوین ارائه شده در این تحقیق می‌باشد.

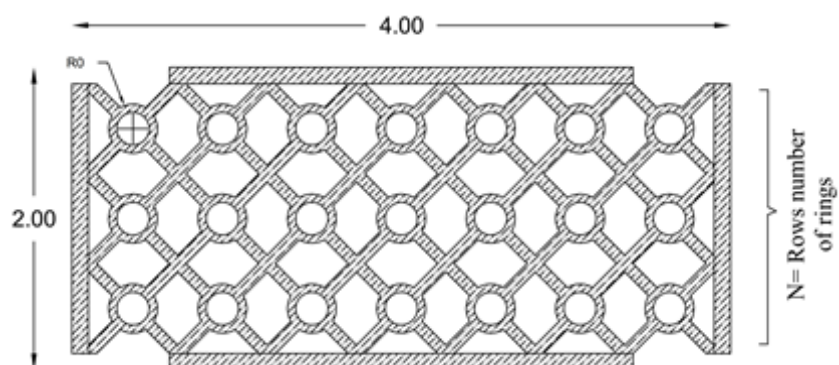
جدول ۳: معرفی مدل های عددی دیوار برشی فولادی

شماره	نام مدل	F_y (MPa)	N	R_o (mm)	t_w (mm)	نسبت وزنی به نمونه ۱	شماره	نام مدل	F_y (MPa)	N	R_o (mm)	t_w (mm)	نسبت وزنی به نمونه ۱
۱	Solid panel	۱۶۵	-	-	۱/۵	۱	۱۰	Model2.1	۱۶۵	۵	۱۰۰	۱/۴۵	۱
۲	Model1.1	۱۶۵	۳	۱۵۰	۵	۱/۶۷	۱۱	Model2.2	۱۶۵	۵	۱۰۰	۱/۴۵	۱
۳	Model1.2	۳۰۰	۳	۱۵۰	۵	۱/۶۷	۱۲	Model2.3	۱۶۵	۱۰	۱۰۰	۲/۹۱	۱
۴	Model1.3	۱۶۵	۲	۳۰۰	۵	۱/۶۰	۱۳	Model2.4	۳۰۰	۱۰	۱۰۰	۲/۹۱	۱
۵	Model1.4	۳۰۰	۲	۳۰۰	۵	۱/۶۰	۱۴	Model2.5	۱۶۵	۵	۱۵۰	۲/۱۸	۱
۶	Model1.5	۱۶۵	۳	۱۵۰	۱۰	۳/۳۴	۱۵	Model2.6	۳۰۰	۵	۱۵۰	۲/۱۸	۱
۷	Model1.6	۳۰۰	۳	۱۵۰	۱۰	۳/۳۴	۱۶	Model2.7	۱۶۵	۱۰	۱۵۰	۴/۳۵	۱
۸	Model1.7	۱۶۵	۲	۳۰۰	۱۰	۳/۲۰	۱۷	Model2.8	۳۰۰	۱۰	۱۵۰	۴/۳۵	۱
۹	Model1.8	۳۰۰	۲	۳۰۰	۱۰	۳/۲۰							

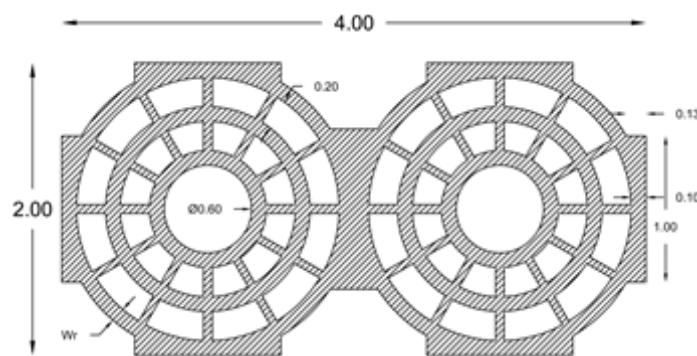
F_y = تنش تسلیم، N = تعداد حلقه، R_o = شعاع خارجی دایره حلقه، t_w = ضخامت ورق دیوار فولادی، W_r = عرض حلقه



شکل ۱۰: اعمال شرایط مرزی و مشخصات هندسی در مدل های عددی.



(الف)



(ب)

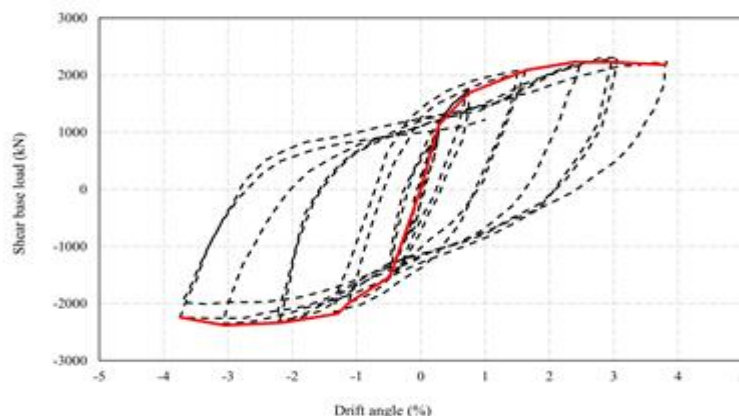
شکل ۱۱: ارائه دو مدل از دیوارهای برشی فولادی، (الف) دیوار فولادی دارای حلقه‌های متعدد فولادی در ردیف‌های مختلف، (ب) دیوار فولادی دارای حلقه‌های فولادی متحدالمرکز.

۴- نتایج مدل‌های عددی

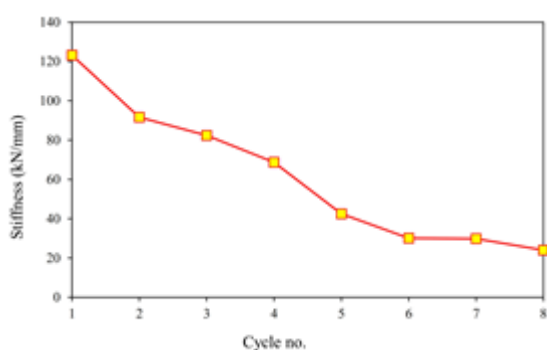
۴-۱- نمونه با دیوار برشی بدون حفره

شکل (۱۲) نمودار نیروی برشی-نسبت دررفت مربوط به مدل با ورق کامل نشان داده شده است. حداکثر ظرفیت باربری مدل برابر با ۲۲۶۱ کیلونیوتن حاصل شد که در نسبت دررفت ۳ درصد اتفاق افتاد. مطابق با یافته‌ها، تسلیم و کمانش مدل ورق کامل در نسبت دررفت ۰/۴ درصد اتفاق افتاد. رفتار هیستریزس مدل همانند یک مهاربند کششی می‌باشد که دارای کمی باریک‌شدگی است. همچنین با افزایش زاویه برش، کمانش نیز افزایش یافت. مود کمانشی مدل از نوع کمانش برش کلی بود.

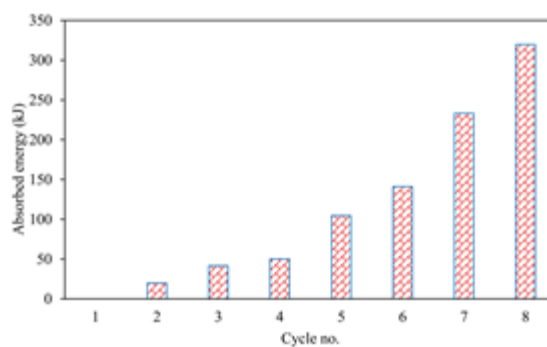
یکی از ویژگی‌های مهم برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای، جذب انرژی اعضای آن است. در این تحقیق، انرژی در قالب انرژی جذب شده از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک اعضای سازه‌ای مختلف بیان می‌شود که در برنامه آباکوس [۲۱] از گزینه "ALLPD" استفاده می‌شود. مقدار انرژی جذب شده از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک سیستم برای دیوار برشی فولادی بدون حفره در شکل (۱۳-الف) نشان داده است که بر این اساس، مجموع انرژی جذب شده برابر با ۹۱۰ کیلوژول است که دو سیکل آخر تقریباً ۵۵ درصد از کل انرژی جذبی را تشکیل می‌دهند. در شکل (۱۳-ب) تغییرات سختی در هر سیکل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، سختی کاهش چشمگیری دارد به طوری که در سیکل آخر بارگذاری، سختی به میزان تقریباً ۸۷ درصد نسبت به سیکل اول کاهش یافته است.



شکل ۱۲: نمودار نیرو-نسبت دررفت مدل Solid panel



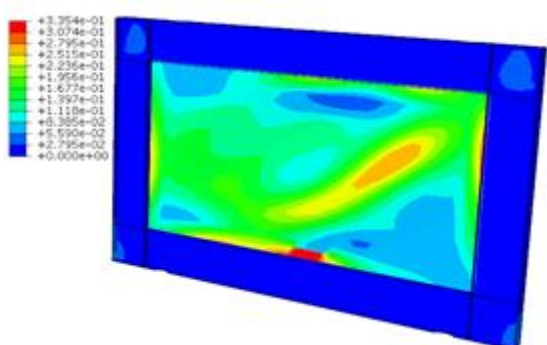
(ب)



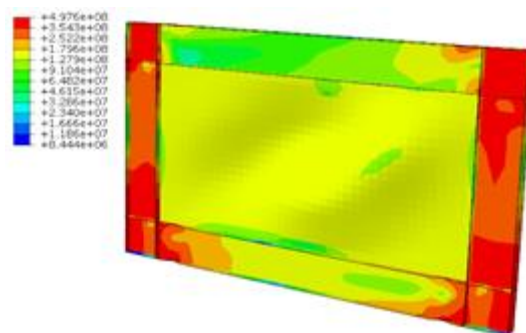
(الف)

شکل ۱۳: (الف) تغییرات انرژی جذب شده و (ب) تغییرات سختی در سیکل‌های مختلف مدل Solid panel

در شکل (۱۴-الف) توزیع تنش فون میسز ارائه شده است. در شکل (۱۴-ب) توزیع کرنش پلاستیک در مدل دیوار برشی بدون حفره نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین ناحیه پلاستیک در داخل دیوار و به ویژه در بخش قطری دیوار اتفاق می‌افتد. زاویه کمانش برشی تقریباً ۴۰ درجه بدست آمده است.



(ب)

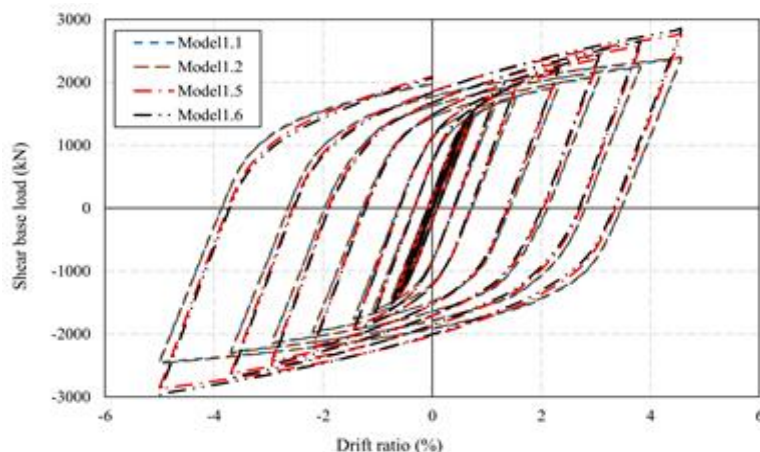


(الف)

شکل ۱۴: (الف) توزیع تنش فون میسز، (ب) توزیع کرنش پلاستیک در ورق فولادی دیوار Solid panel

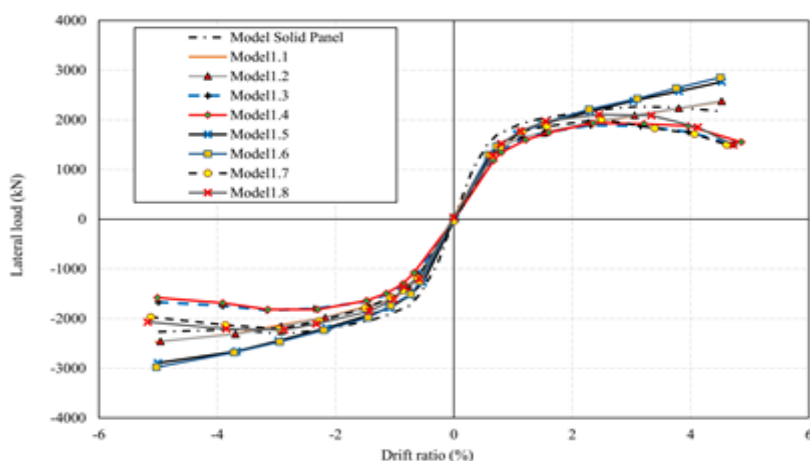
۴-۲- مدل دیوارهای برشی فولادی با حلقه در گروه اول

زمانی که اشکال حلقه‌ای در اثر نیروی کششی شبیه به شکل بیضوی می‌شوند، تمایل دارند تا حالت صفحه‌ای خود را حفظ نمایند. همان‌طور که حلقه کشیده می‌شود، لنگرهای بزرگی در محل تقاطع حلقه و لینک بوجود می‌آید که این نواحی محل تشکیل مفاصل پلاستیک هستند. در شکل (۱۵) مقایسه‌ای بین رفتار هیستریزیس چهار مدل از دیوارهای برشی فولادی دارای سه ردیف حلقه صورت گرفته است. در اکثر نمونه‌های دارای حلقه، ابتدا تغییر شکل الاستیک رخ داد. سپس تسلیم از نواحی شعاع داخلی و خارجی حلقه در محل‌های نزدیک به اتصال لینک به حلقه رخ داد. در تمام نمونه‌ها تا قبل از نسبت دریافت ۳ درصد هیچ کمانشی مشاهده نشد. بعد از نسبت دریافت ۳ درصد در برخی نمونه‌ها با دو ردیف حلقه، کمانش مشاهده شد. همچنین هیچ‌گونه کمانش پیشگی جانبی در مدل‌ها مشاهده نشد. علاوه بر این، در تمام مدل‌ها، رفتار هیستریزیس نمونه‌ها پایدار است که همانند یک مهاربند کمانش تاب رفتار می‌کند.



شکل ۱۵: نمودارهای نیرو-نسبت دررفت برای مدل‌ها.

در شکل (۱۶) مقایسه‌ای بین منحنی پوش نمودارهای نیروی جانبی و نسبت دررفت برای تمام مدل‌های دارای حلقه انجام گرفته است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که نمونه‌های دارای دو ردیف حلقه، بعد از نسبت دررفت ۳ درصد دچار افت ظرفیت شده‌اند. اما همچنان منحنی‌های آن‌ها پایدار و چاق می‌باشد. در جدول (۴) نتایج مدل‌های عددی ارائه شده است. نکته قابل توجهی که باید به آن اشاره نمود این است که در مدل‌های دارای حلقه، سختی مماسی در اکثر سیکل‌های بارگذاری تقریباً ثابت و برابر با ۸۰ کیلونیوتن بر میلیمتر می‌باشد که در نمونه دیوار برشی کامل این سختی در سیکل‌های متفاوت کمتر می‌شد.

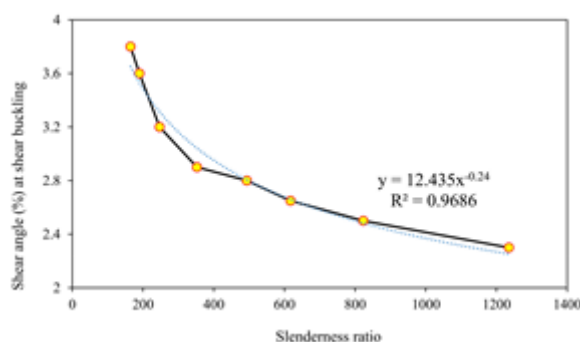


شکل ۱۶: مقایسه منحنی پوش نمودارهای هیستریزیس تمام مدل‌های عددی گروه اول.

جدول ۴: خلاصه نتایج مدل‌های عددی گروه اول.

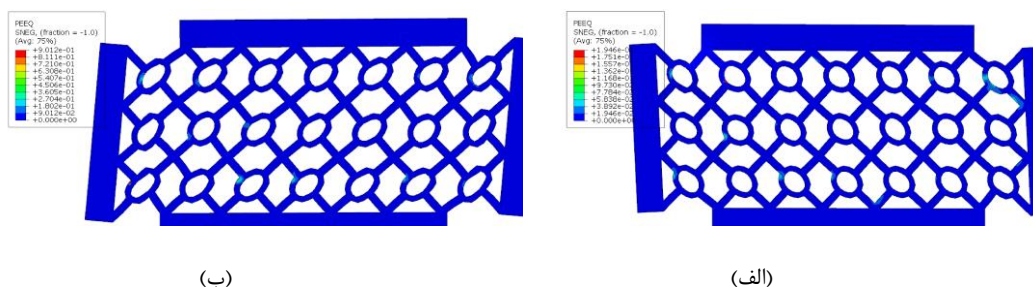
نسبت دررفت در بار بیشینه (%)	سختی اولیه (kN/mm)	نیروی نهایی (kN)	نام مدل
۴/۵	۸۹/۲	۲۳۷۴/۳	Model1.1
۴/۵	۸۵/۶	۲۳۷۷/۷	Model1.2
۳/۴	۷۴/۱	۱۸۹۱/۶	Model1.3
۳/۱	۷۱/۱	۱۹۳۶/۰	Model1.4
۴/۲	۸۶/۳	۲۷۶۶/۰	Model1.5
۴/۳	۸۹/۳	۲۸۵۱/۱	Model1.6
۳/۰	۸۰/۱	۲۰۰۹/۹	Model1.7
۳/۰	۷۹/۰	۲۱۰۸/۴	Model1.8

همچنین به طور کلی، نمونه‌های دارای ضخامت کمتر، در نسبت دریافت کمتری به حداکثر ظرفیت باربری می‌رسند. همان‌طور که حلقه‌ها و لینک‌ها متحمل تغییر طول‌های محوری غیرالاستیک می‌شوند، مکانیزمی که به موجب آن حلقه دایره‌ای به شکل بیضی در می‌آید در اثر نیروی فشاری قطری عملکردش را از دست می‌دهد. همان‌طور که اتصالات قاب خمشی تحت سیکل‌های متوالی دچار دوران‌های غیرالاستیک می‌شوند، بدون در نظر گرفتن میزان فشردگی مقطع، در نهایت کمانش موضعی ایجاد می‌شود. RS-SPSW در صورت قرار گرفتن در سیکل‌های به اندازه کافی بزرگ بدون در نظر گرفتن لاغری صفحه، کمانش برشی ایجاد می‌کند. با اینحال، به نظر می‌رسد که لاغری صفحه (نسبت بعد صفحه به ضخامت صفحه) به شدت با زاویه اعواج برشی در کمانش بستگی دارد. برای این منظور هشت مدل اضافی ساخته و تحلیل شد تا بحث تاثیر لاغری مورد بررسی قرار بگیرد. در شکل (۱۷) رابطه بین لاغری صفحه و زاویه برش در کمانش برشی برای مدل دارای سه ردیف حلقه نشان داده شده است.



شکل ۱۷: رابطه بین زاویه برشی و نسبت لاغری ورق فولادی.

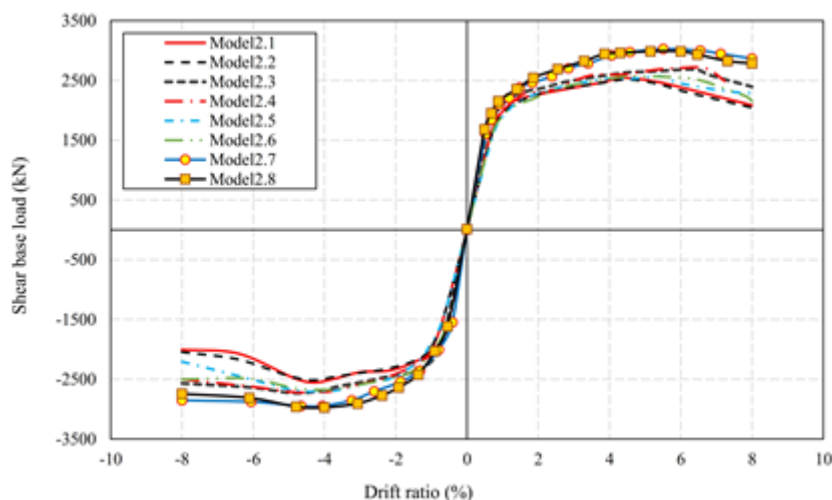
در شکل (۱۸) برای دو مدل Model1.1 و Model1.2 در دریافت‌های ۲٪ و ۵٪ توزیع مفاصل پلاستیک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمام نواحی پلاستیک در اطراف محل اتصال حلقه به لینک متمرکز شده است. با وارد شدن این نواحی به بخش غیرالاستیک، سایر اعضای سازه در ناحیه الاستیک باقی ماندند.



شکل ۱۸: توزیع کرنش پلاستیک در دریافت (الف) ۲ درصد و (ب) ۵ درصد.

۳-۴- مدل دیوارهای برشی فولادی با حلقه در گروه دوم

در این بخش، نتایج نمودارهای نیروی برشی-نسبت دریافت برای هشت نمونه ارائه می‌شود. در شکل (۱۹) نمودار پوش مدل‌های عددی ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که سختی اولیه در نمونه 2.1 برابر با ۹۵/۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌شود. با افزایش ضخامت، سختی جانبی بین ۱۵ درصد تا ۴۰ درصد در مدل‌ها افزایش یافته است. همچنین حداکثر ظرفیت باربری جانبی در مدل‌های 2.7 و 2.8 با مقدارهای ۳۰۲۷ و ۲۹۸۷ کیلونیوتن اتفاق افتاده است. در جدول (۵) خلاصه‌ای از نتایج مدل‌ها ارائه شده است.

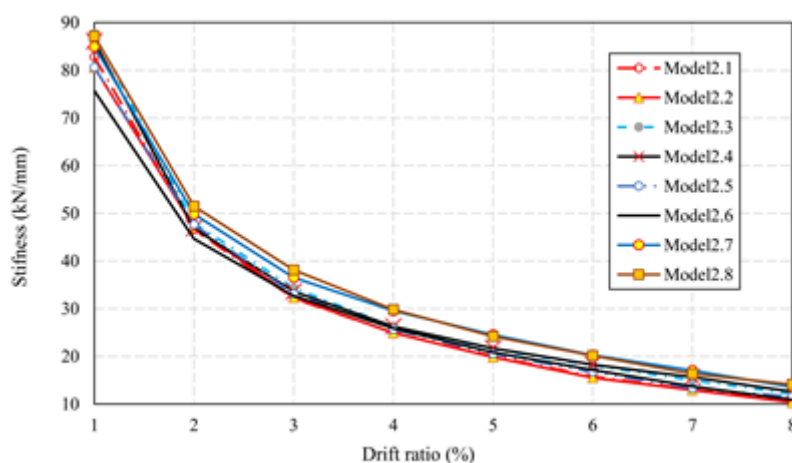


شکل ۱۹: مقایسه منحنی پوش نمودارهای نیرو-نسبت دررفت برای تمام مدل های عددی گروه دوم.

جدول ۵: خلاصه ای از نتایج مدل های عددی گروه دوم

نام مدل	نیروی نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	نسبت دررفت در بار بیشینه (%)	E_d/E_{EPP}
Model2.1	۲۵۴۲/۶	۹۵/۵	۴/۴	۶۷
Model2.2	۲۵۱۵/۷	۹۳/۲	۴/۵	۷۱
Model2.3	۲۶۷۷/۱	۱۱۰/۲	۵/۹	۸۳
Model2.4	۲۷۰۴/۰	۱۲۰/۳	۵/۸	۸۵
Model2.5	۲۵۶۹/۵	۹۳/۲	۵/۴	۶۹
Model2.6	۲۶۶۸/۵	۸۶/۵	۴/۹	۷۲
Model2.7	۳۰۲۶/۹	۱۱۳/۷	۵/۵	۸۸
Model2.8	۲۹۸۶/۶	۱۲۵/۹	۵/۳	۹۱

در شکل (۲۰) تغییرات سختی در سیکل های متوالی برای مدل های عددی نشان داده شده است. بر این اساس مشخص می شود که با توالی بارگذاری، سختی در هر گام تغییر می یابد. به عنوان مثال، سختی در سیکل دوم نسبت به سیکل اول در مدل 2.6 تقریباً ۴۱ درصد کاهش یافته است. اما نکته جالب توجه اینکه در تمام نمونه ها تا سیکل ششم، سختی مماسی تقریباً ثابت باقی مانده است.



شکل ۲۰: تغییرات سختی در هر سیکل بارگذاری در تمام مدل های عددی گروه دوم

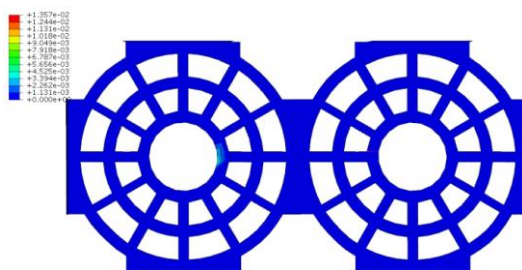
در شکل (۲۱) توزیع کرنش پلاستیک و توالی تشکیل مفصل پلاستیک در مدل 2.1 را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌ها، مشخص می‌شود که شروع تشکیل مفصل پلاستیک از حلقه داخلی در محل اتصال با لینک‌ها شروع می‌شود. سپس در محل اتصال لینک به حلقه بیرونی و در ناحیه بیرونی متصل به المان مرزی عمودی کرنش پلاستیک گسترش می‌یابد. برای مشخص شدن ارتباط بین نسبت لاغری دیوار و ظرفیت برشی و جذب انرژی، نمودارها در شکل (۲۲) ارائه شده است. این نمودارها تنها برای مدل 2.1 ولی با ضخامت‌های متعدد ارائه شده است.

بعد از انجام تحلیل‌های غیرخطی متعدد بر روی نمونه‌های ۲,۱ تا ۲,۸ (۸ نمونه)، جهت کاربردی نمودن نتایج آن‌ها در این مطالعه، سعی شده است تا با استخراج نتایج ظرفیت برشی و جذب انرژی بر مبنای نسبت لاغری به توسعه روابطی مابین پارامترهای مذکور پرداخته شود. بر این اساس، رابطه بین ظرفیت برشی (S) و نسبت لاغری (λ) با استفاده از برازش منحنی درجه ۲ روی نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی مدل‌های مورد بررسی بدست آمده است (رابطه (۲)) و نسبت طول دیوار به ضخامت ورق در قالب پارامتر نسبت لاغری بیان می‌شود.

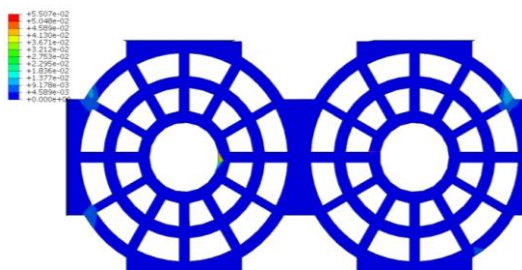
$$S = 0.0018\lambda^2 - 3.6385\lambda + 3548.4 \quad (2)$$

همچنین با توجه به شکل (۲۲-ب) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت لاغری، ظرفیت جذب انرژی کاهش می‌یابد. به طوری که با کاهش ضخامت ورق از ۱۵ به ۲ میلیمتر، جذب انرژی تقریباً ۴۰ درصد کم می‌شود. رابطه (۳) نیز از برازش منحنی تابع نمایی بر پاسخ انرژی-نسبت لاغری بدست آمده که می‌تواند ارتباط بین نسبت جذب انرژی (E_d/E_{EPP}) و نسبت لاغری (λ) را برای این مدل عددی محاسبه نماید.

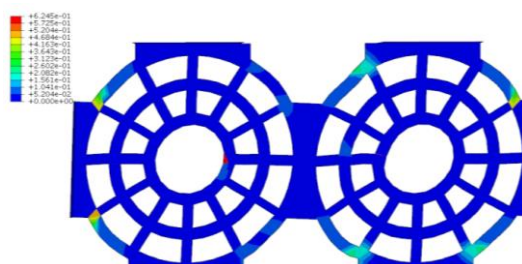
$$E_d/E_{EPP} = 258.81\lambda^{-0.23} \quad (3)$$



(الف)

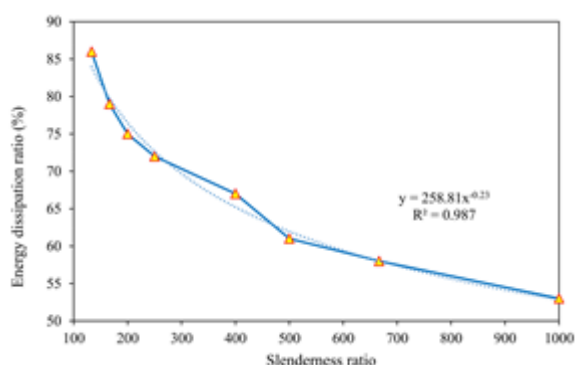


(ب)

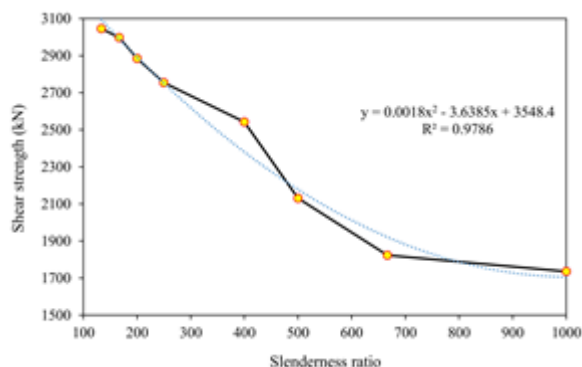


(ج)

شکل ۲۱: توزیع مفاصل پلاستیک در Model 2.1 در نسبت‌های دررفت (الف) ۴٪، (ب) ۱٪ و (ج) ۴٪.



(ب)



(الف)

شکل ۲۲: (الف) تغییرات ظرفیت باربری نسبت به نسبت لاغری برای نمونه با ضخامت‌های مختلف، (ب) تغییرات انرژی جذب برای نمونه با ضخامت‌های مختلف نسبت به نسبت لاغری.

در روابط (۲) و (۳)، منظور از نسبت لاغری، نسبت طول به ارتفاع ورق فولادی دیوار است و E_d بیانگر مقدار انرژی جذب شده در نسبت دررفت ۴ درصد است و E_{EPP} بیانگر انرژی جذبی توسط یک سیستم الاستوپلاستیک کامل است. هر دو رابطه (۲) و (۳)، با استفاده از برازش منحنی درجه ۲ و نمایی روی نتایج تحلیل عددی مدل‌های مورد بررسی آمده و صرفاً محدود به این مدل و تحت این شرایط می‌باشد. هدف اصلی از ارائه این دو رابطه، نمایش میزان تاثیر ضریب لاغری صفحه ورق فولادی بر کماتش برشی و میزان جذب انرژی ورق فولادی می‌باشد. روابط ارائه شده با توجه به بررسی‌های عددی صورت گرفته بر روی فولادی با تنش‌های تسلیم ۱۶۵ و ۳۰۰ مگاپاسکال حاصل شده‌اند. برای فولاد با تنش‌های تسلیم بالاتر یا پائین‌تر توصیه می‌شود تا بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی جامع‌تری صورت پذیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ۱۷ مدل عددی شامل یک دیوار برشی فولادی کامل، ۸ مدل عددی از دیوار فولادی دارای حلقه‌های متعدد و ۸ مدل عددی از دیوارهای برشی فولادی نوین شامل حلقه‌های متحدالمرکز تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. رفتار نمونه‌ها در قالب نمودارهای هیستریزس، جذب انرژی و توزیع کرنش پلاستیک ارائه شد. خلاصه مهم‌ترین یافته‌های تحقیق در ادامه ارائه می‌شوند.

(۱) مدل عددی با سه گروه از نمونه‌های دیوار برشی فولادی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و اختلاف بین سختی در نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی در تمام مدل‌ها کمتر از ۵ درصد بود. همچنین تطبیق خوبی بین نتایج در قالب مود تسلیم و ظرفیت باربری بین مدل‌ها حاصل شد.

۲) کمانش برشی در دیوار برشی فولادی بدون حفره در نیرویی برابر با تقریباً نصف ظرفیت برشی پیل فولادی و در نسبت دررفت ۰/۲ درصد اتفاق افتاد. همچنین پس از کمانش برشی، رفتار هیستریزیس مدل دیوار فولادی کامل به مقدار اندکی دچار باریک شدگی شد و افت ظرفیت باربری از سیکل‌های چهارم به بعد مشاهده شد.

۳) مدل‌های دارای دیوار برشی فولادی دارای حلقه‌های متعدد نشان داد که قابلیت مناسبی در گسترش مفصل پلاستیک حلقه‌ها دارد که منجر به رفتار هیستریزیس پایدار در سیستم گردید. علاوه بر این، در این مدل‌ها، کمانش برشی در نسبت‌های دررفت بزرگی اتفاق می‌افتد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که کمانش برشی کاملاً وابسته به میزان لاغری صفحه ورق فولادی می‌باشد. همچنین میزان جذب انرژی مدل‌های عددی با نسبت لاغری صفحه یک رابطه با توان ۳ را تشکیل می‌دهد.

۴) در مدل‌های دیوار برشی فولادی دارای حلقه‌های متحدالمرکز مشاهده شد که مقادیر سختی تقریباً مشابه با مدل‌های گروه اول بود. اما شکل‌پذیری این نمونه‌ها بیشتر از گروه اول است. همچنین ظرفیت برشی این نمونه‌ها به میزان تقریباً ۱۰ درصد بیشتر از نمونه‌های گروه اول بود. همچنین رابطه جدیدی برای تعیین ظرفیت برشی مدل دیوار برشی نوین و نسبت لاغری ارائه شد. البته این رابطه برای نمونه مشخصی می‌باشد و مطالعات بیشتر در این زمینه نیاز است.

۵) نمونه‌های با نسبت عرض لینک به ضخامت ورق فولادی برابر با ۱۵ و ۲۰ عملکرد مناسبی در دو جنبه مقاومت برشی و جذب انرژی را در بین نمونه‌های معرفی شده دارند. چرا که در نمونه‌های با نسبت ۳۰، کمانش پیچشی جانبی رخ می‌دهد که ضعف این مدل‌ها می‌باشد.

مراجع

- [1] Driver, R. G., and University of Alberta. Dept. of Civil and Environmental Engineering. (1997). "Seismic behaviour of steel plate shear walls", (Doctoral dissertation, University of Alberta, Canada).
- [2] Vian, D., and Bruneau, M. (2005). "Testing of special LYS steel plate shear walls", Technical Report MCEER-05-0010, University at Buffalo, State University of New York.
- [3] Roberts, T. M., and Sabouri-Ghomi, S. (1992). "Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels", *Thin-Walled Structures*, 14(2), 139-151.
- [4] Cortes, G., and Liu, J. (2011). "Experimental evaluation of steel slit panel-frames for seismic resistance", *Journal of Constructional Steel Research*, 67(2), 181-191.
- [5] Formisano, A., and Mazzolani, F. M. (2016). "Numerical non-linear behaviour of Aluminium Perforated Shear Walls: A parametric study", *Key Engineering Materials*, 710, 250-255, Trans Tech Publications Ltd.
- [6] Vian, D. (2005). "Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structures", State University of New York at Buffalo.
- [7] Moghimi, H., and Driver, R. G. (2011). "Effect of regular perforation patterns on steel plate shear wall column demands", *Structures Congress 2011*, 2917-2928.
- [8] Valizadeh, H., Sheidaii, M., and Showkati, H. (2012). "Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 308-316.
- [9] Formisano, A., Sheidaii, M. R., Ahmadi, H. M., and Fabbrocino, F. (2018). "Numerical calibration of experimental tests on perforated Steel Plate Shear Walls: influence of the tightening torque in the plate-frame members bolted connections", *AIP Conference Proceedings*, 1978(1), p. 450005, AIP Publishing LLC.
- [10] Barkhordari, M. A., Hosseinzadeh, S. A., and Seddighi, M. (2014). "Behavior of steel plate shear walls with stiffened full-height rectangular openings", *Asian Journal of Civil Engineering*, 15(5), 741-759.
- [11] 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.
- [12] Purba, R., and Bruneau, M. (2009). "Finite-element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, 135(11), 1367-1376.
- [13] Hitaka, T., and Matsui, C. (2003). "Experimental study on steel shear wall with slits", *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 586-595.
- [14] Formisano, A., and Lombardi, L. (2018). "Low yield metals and perforated steel shear walls for seismic protection of existing RC buildings", *Cogent Engineering*, 5(1), 1525813.
- [15] Formisano, A., Ahmadi, H. M., and Mazzolani, F. M. (2018). "Ductility and behaviour factor of RC frame-perforated SPSW dual systems", *Key Engineering Materials*, 763, 835-845, Trans Tech Publications Ltd

- [16] Monsef Ahmadi, H., Sheidaii, M. R., Boudaghi, H., and De Matteis, G. (2020). "Experimental and numerical study on largely perforated steel shear plates with rectangular tube-shaped links", *Advances in Structural Engineering*, 23(15), 3307-3322.
- [17] Ahmadi, H. M., and De Matteis, G. (2020). "Seismic performance of steel shear panels with butterfly-shaped links", *International Journal of Earthquake Engineering*, 37.
- [18] Zarrinkolaei, F. A., Naseri, A., and Gholampour, S. (2021). "Numerical assessment of effect of opening on behavior of perforated steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106587.
- [19] Phillips, A. R., and Eatherton, M. R. (2018). "Large-scale experimental study of ring shaped-steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, 144(8), 04018106.
- [20] Egorova, N., Eatherton, M. R., and Maurya, A. (2014). "Experimental study of ring-shaped steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 179-189.
- [21] Systèmes, D. (2014). ABAQUS 6.14, ABAQUS/CAE user's guide. [http://130.149, 89\(2080\)](http://130.149.89(2080)), v6.
- [22] Ramberg, W., and Osgood, W. R. (1943). "Description of stress-strain curves by three parameters", *NACA Technical Notes*, Report no. NACA-TN-902
- [23] Menegotto, M., and Pinto, P. E. (1973). "Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending", *Proc IABSE Symp of resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated loads*, vol. 13. Libson, Portugal: International Association of Bridge and Structural Engineering, 15-22.
- [24] Alinia, M. M., and Shirazi, R. S. (2009). "On the design of stiffeners in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), 2069-2077.
- [25] Salimi, S. M., Rahimi, S., Hoseinzadeh, M., Kontoni, D. P. N., and Ebadi-Jamkhaneh, M. (2021). "Numerical 3D Finite Element Assessment of Bending Moment-Resisting Frame Equipped with Semi-Disconnected Steel Plate Shear Wall and Yielding Plate Connection", *Metals*, 11(4), 604.
- [26] Chen, S. J., and Jhang, C. (2006). "Cyclic behavior of low yield point steel shear walls", *Thin-walled structures*, 44(7), 730-738.
- [27] Applied Technology Council. (1992). "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures", *ATC-24*.