

## Evaluation of the performance of perforated steel shear wall with different layers and geometric shapes of holes

Hamid Saberi<sup>1\*</sup>, Vahid Saberi<sup>2</sup>, Mehrdad Hossaini<sup>3</sup>, Saed Habibzadeh<sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

3 -Master of Structural Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

4- Graduate student of Structural Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

### ABSTRACT

Steel shear walls are one of the most commonly used systems for resistance and stability of structures to lateral loads, which are used to rehabilitate and improve the seismicity of structures in seismic zones. Among the advantages of this lateral load resistance system, similar to high-performance systems, high ductility, high absorption capacity and energy depreciation, high initial hardness, light weight relative to similar concrete, saving materials, reduced time and the cost of construction pointed out. Recent research has shown that the buckling of these plates before the submission of environmental elements would produce a better performance of this kind of lateral load system. This leads to the expansion of the use of thin-walled plates that lead to emerging executive problems and affect the economic benefits of the plan. In order to overcome the dilemmas and accelerate the buckling of these sheets, the idea of using a perforated steel plate was introduced. In this paper, the behavior of steel shear walls with perforated plates is investigated. To perform a parametric study of the effects of holes with different geometric shapes on the shear wall, the method of laying and placing holes in the shear wall on structural performance, in terms of energy absorption, the total load bearing capacity of the system was investigated. For modeling the samples, Abaqus finite element software was used. Parametric results on 60 finite element models under cyclic loading of displacement type showed that if using the same hole percentage, the maximum bearing capacity was attributed to the shear wall model with holes with circular geometry. It shows the best seismic behavior.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 20 April 2019

Revise Date: 20 March 2020

Accept Date: 26 April 2020

### Keywords:

Perforated steel shear wall  
Ductility  
Absorbing energy  
Finite element  
Cyclic loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.182476.1834>

\*Corresponding author: Hamid Saberi.  
Email address: Saberi.hamid@eyc.ac.ir

## ارزیابی عملکرد دیوار برشی فولادی مجوف با اشکال و آرایش مختلف سوراخ‌ها

حمید صابری<sup>۱\*</sup>، وحید صابری<sup>۲</sup>، سید مهرداد حسینی<sup>۳</sup>، ساعد حبیب زاده<sup>۴</sup>

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران.

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران.

۳- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران.

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

### چکیده

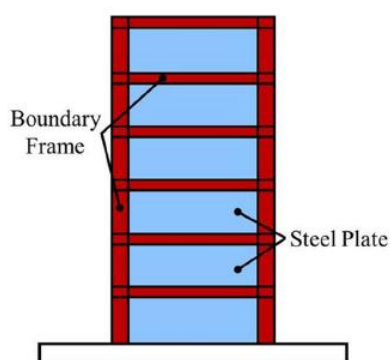
دیوارهای برشی فولادی یکی از مناسب‌ترین سیستم‌های رایج جهت مقاومت و پایداری سازه در برابر بارهای جانبی می‌باشد؛ که در مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز بکار گرفته می‌شوند. از جمله مزیت‌هایی این سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی نسبت به سیستم‌های مشابه می‌توان به شکل‌پذیری بالا، ظرفیت جذب و استهلاک انرژی فراوان، سختی اولیه‌ی بالا، سبک بودن نسبت به مشابه بتنی خود، صرفه‌جویی در مصالح مصرفی، کاهش زمان و هزینه‌ی ساخت اشاره نمود. تحقیقات اخیر نشان داده است که کماتش این صفحات پیش از تسلیم‌المان‌های محیطی موجب عملکرد بهتر این‌گونه از سیستم باربر جانبی خواهد شد. این موضوع موجب گسترش استفاده از صفحات باضخامت کم شده که منجر به پیدایش مشکلات اجرایی و تحت شعاع قرار دادن منافع اقتصادی طرح می‌گردد. به‌منظور غلبه بر معضلات اجرایی و تسریع در کماتش این صفحات، ایده استفاده از دیوار برشی فولادی با ورق میانی سوراخ‌دار مطرح گردید. در این مقاله، رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های دارای حفره بررسی شده است. جهت انجام یک مطالعه پارامتریک اثر سوراخ‌هایی با اشکال مختلف در ورق دیوار، نحوه چیدمان و قرارگیری سوراخ‌ها در دیوار بر عملکرد سازه برحسب میزان جذب انرژی، ظرفیت باربری کل سیستم بررسی شده است. جهت مدل‌سازی نمونه‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شد. نتایج پارامتریک انجام‌گرفته بر روی ۶۰ نمونه‌ی مدل اجزاء محدود ایجادشده تحت بارگذاری چرخه‌ای از نوع تغییر مکان، نشان داد که در صورت استفاده از درصد سوراخ‌های یکسان، بیشترین ظرفیت باربری به مدل دیوار برشی فولادی با سوراخ‌های با هندسه دایره‌ای شکل تعلق داشته است و بهترین رفتار لرزه‌ای را از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، اجزاء محدود، بارگذاری چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.182476.1834	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.182476.1834	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۹/۰۲/۰۷	۱۳۹۹/۰۲/۰۷	۱۳۹۹/۰۱/۰۱	۱۳۹۸/۰۱/۳۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حمید صابری		
				Saberi.hamid@eyc.ac.ir		

## ۱- مقدمه

دیوار برشی با ورق‌های فولادی SPSW<sup>۱</sup> به‌عنوان اولین یا بخشی از سیستم اولیه مقاوم در برابر نیروهای جانبی، در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند. توسعه و استفاده از فولاد با نقطه تسلیم کم و تنش تسلیم قابل توجه و همچنین ظرفیت انعطاف بالا، این روزها امکان طراحی سیستم‌های دیوار برشی فولادی باقابلیت کارایی و عملکرد سازه‌ای بهتر و ویژگی جذب انرژی بالا، افزایش یافته است. دیوار برشی با ورق فولادی به‌عنوان سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی از سال ۱۹۷۰ میلادی مورداستفاده قرار گرفته است و مزایای بسیاری را نسبت به سیستم‌های مشابه مانند قاب‌های صلب و قاب‌های مهاربندی شده دارا هستند و به‌خوبی دیوارهای برشی بتنی، از نظر اقتصادی و کارایی و سهولت طراحی مورداستفاده قرار می‌گیرند [۱]. سیستم دیوار برشی ورق فولادی



شکل ۱ سیستم دیوار برشی ورق فولادی [۲]

شکل‌پذیری خوب و ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند و مزیت شناخته‌شده دیگر آن‌ها، کاهش یافتن وزن سازه‌ها با استفاده از ورق‌های فولادی نازک است. یک دیوار برشی ورق فولادی شامل یک قاب با تیر و ستون‌های صلب است که با یک ورق فولادی نازک پر شده و درون ناحیه بین ستون‌ها و تیرها قرار گرفته است. ستون‌ها به‌عنوان المان‌های مرزی عمودی VBE<sup>۲</sup> سیستم دیوار برشی فولادی تا حدی شبیه به بال تیرورق‌ها و تیرها به‌عنوان المان‌های مرزی افقی HBE<sup>۳</sup> تا حدی شبیه به سخت‌کننده‌ها در تیرورق‌ها و دیوارهای ورق فولادی مشابه جان تیرورق در یک سیستم دیوار برشی فولادی به شمار می‌روند. تحت بارهای جانبی، این صفحات تحت فشردگی قطری دچار کمانش شده و سپس حوزه میدان کششی توسعه می‌یابد. شکل ۱ سیستم دیوار برشی ورق فولادی را نشان می‌دهد [۲].

سیستم‌های دیوار برشی فولادی ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. این سیستم بسیار اقتصادی و مقرون به‌صرفه تر از سیستم قاب خمشی است. علاوه بر این، تمام مشخصات یک سیستم مهاربندی هم‌مرکز را دارد و بازده بهتری نسبت به سیستم‌های مهاربندی دارد. سیستم دیوار برشی فولادی در یک رویکرد کامل سازه‌ای اجرا می‌گردد و این بدان معنا است که فضای تمام بین دو ستون پر می‌گردد، باوجود ظرفیت بارگذاری بالاتر این روش دارای نواقصی است. یکی از ضعف‌های اصلی سیستم دیوار برشی ورق فولادی، اعمال نیروی برشی



شکل ۲ سیستم دیوار برشی ورق فولادی ناصر نیا و شوکتی، ۲۰۱۷

شوکتی، ۲۰۱۷

قابل توجه به ستون‌ها در هنگام بارگذاری جانبی است. برای حذف این نقص نیاز است سطح مقطع ستون‌ها را افزایش دهیم که هزینه ساخت و ساز را افزایش می‌دهد. برای غلبه بر این مشکل ناصر نیا و شوکتی در سال ۲۰۱۷ میلادی روش جدیدی را ارائه دادند؛ سیستم دیوار برشی فولادی میانی که به ستون‌های ثانویه با ابعاد کوچک‌تری به‌جای ستون اصلی متصل می‌شوند. در این روش هرچند که نیروی برشی مستقیماً به ستون‌های اعمال نمی‌شود، اما به دلیل وجود سوراخ‌ها در هر دو سمت پانل‌ها، ظرفیت جذب انرژی به‌طور فراوانی کاهش می‌یابد و احتمال کمانش خارج از صفحه‌ای تحت بارهای جانبی افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش ناصر نیا و شوکتی نشان داد؛ سیستم دیوار برشی فولادی میانی، رفتار سازه‌ای مناسب و قابل قبولی حتی در دریافت‌هایی با سطح بالا از خود نشان می‌دهند. شکل ۲ نمونه‌ی پیشنهادی دیوار برشی فولادی میانی با ستون‌های ثانویه ناصر نیا و شوکتی در سال ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد [۳].

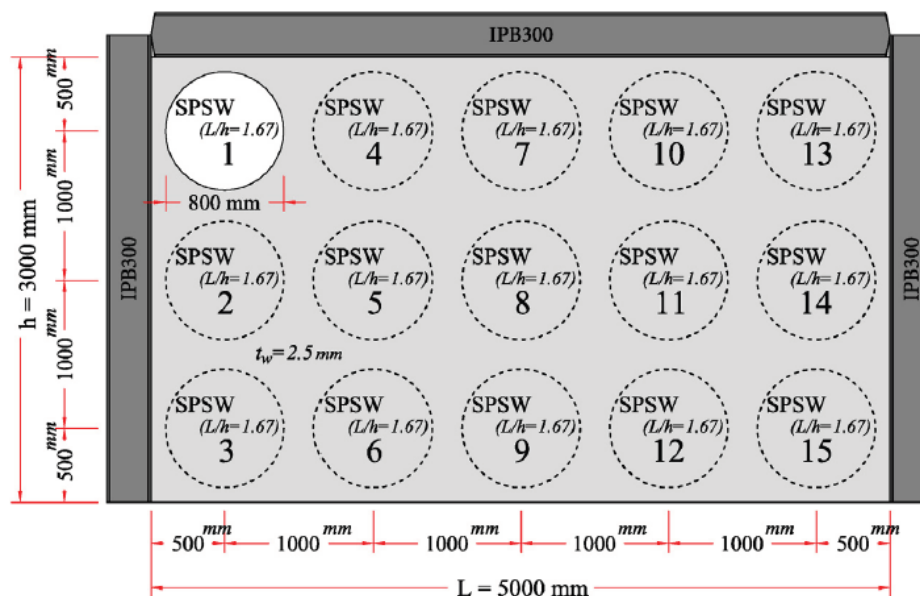
<sup>۱</sup> Steel Plate Shear Wall.

<sup>۲</sup> Vertical boundary element.

<sup>۳</sup> Horizontal boundary element.

با توجه به قابلیت شکل پذیری و پتانسیل دیوار برشی ورق فولادی در جذب انرژی، لازم است که ضخامت ورقها به خصوص در طبقات بالاتر ساختمانها نازکتر شوند تا زمانی که مقاومت کردن در مقابل بارهای جانبی، گاهی اوقات در محاسبات به کسری از میلی متر برسد. از آنجائی که تهیه چنین ورقهای فولادی نازک به سادگی امکان پذیر نیست؛ یک ورق فولادی ضخیمتر با یک سوراخ برای کاهش سختی استفاده می شود. از سوی دیگر وجود سوراخ به دلیل ملاحظات معماری مانند نورپردازی اجتنابناپذیر است. افزایش و قللهکی در سال ۲۰۱۸ میلادی به بررسی و مطالعه مقاومت برشی در دیوارهای برشی ورق فولادی دارای سوراخ در محل های مختلف ورق به روش اجزاء محدود پرداختند. در نتیجه یک معادله تجربی ساده بدون بعد برای تخمین دقیقی برای میزان کاهش مقاومت برشی دیوارها با در نظر گرفتن موقعیت مکانی سوراخ در هر نقطه دلخواه از صفحه توسط افزایش و قللهکی در سال ۲۰۱۸ میلادی ارائه شد. برای تأیید صحت رابطه پیشنهاد شده تعداد زیادی از مدل های اجزاء محدود با خواص هندسی مختلف مانند شکل، قطر، محل سوراخ، ضخامت و نسبت طول به ارتفاع ورق توسط افزایش و قللهکی شبیه سازی و مورد تحلیل به روش بار افزون قرار گرفت. [۴].

شکل ۳ پانزده مدل انتخاب شده نامتقارن برای بررسی مقاومت برشی دیوار برشی فولادی دارای سوراخ دایره ای شکل با قطر ۰/۸ متر در نظر گرفته شده توسط افزایش و قللهکی در سال ۲۰۱۸ را نشان می دهد [۴].



شکل ۳ دیوار برشی فولادی دارای بازو نامتقارن، افزایش و قللهکی، ۲۰۱۸

نتایج پژوهش افزایش و قللهکی در سال ۲۰۱۸ بر اساس نتایج مدل سازی استفاده شده از معادله پیشنهادی آنها (۱) برای تمام پانل های مستطیلی با نسبت عرض به ارتفاع بیش از یک و پانل های مربعی با هر ضخامت معتبر است [۴].

$$\frac{V_y \text{ per } f}{V_y \text{ panel}} = \frac{K \text{ per } f}{K \text{ panel}} = \left(1 - \frac{D}{L}\right)$$

معادله (۱)، افزایش و قللهکی، ۲۰۱۸

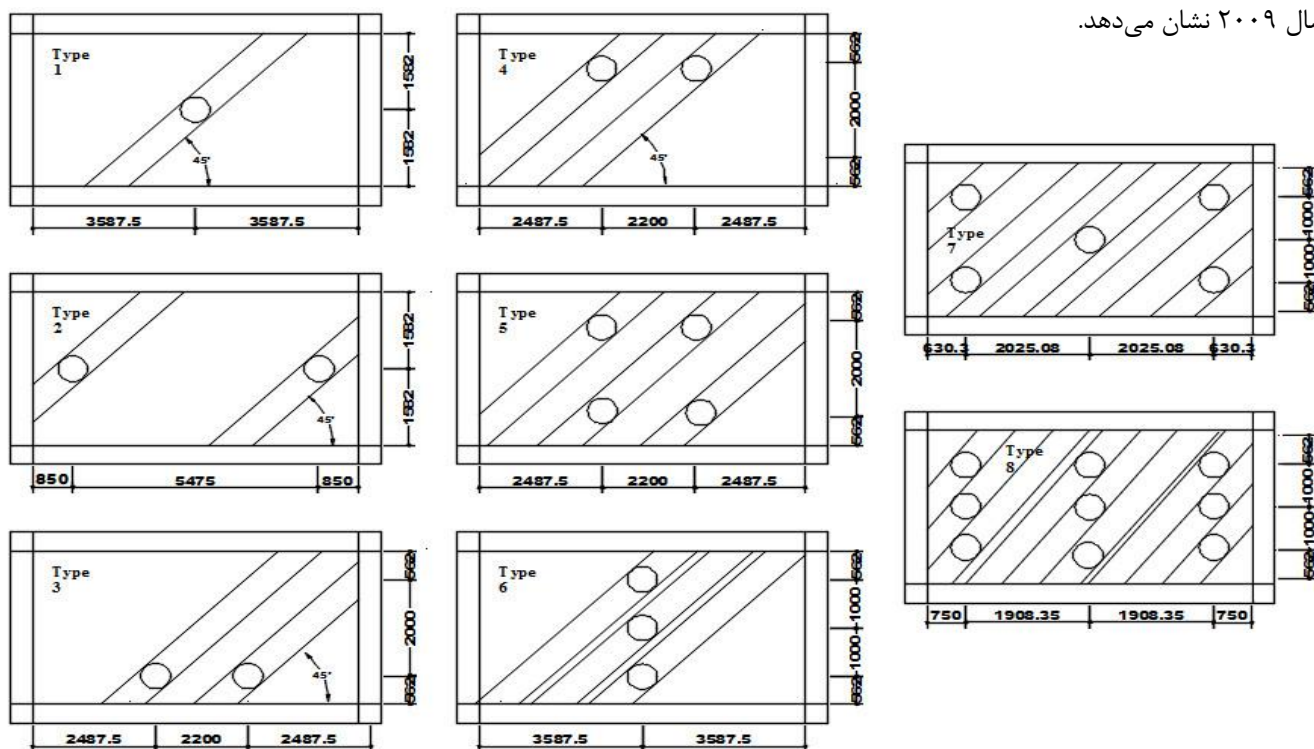
در معادله (۱) قطر سوراخها،  $L$  طول سوراخها،  $V_y \text{ per } f / V_y \text{ panel}$  و  $K \text{ per } f / K \text{ panel}$  نسبت مقاومت و سختی پانل با سوراخ به پاسخ نمونه های متناظر بدون سوراخ است [۴].

در پژوهشی دیگر، بومک و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به آنالیز لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با توجه به ضریب کرنش و اثر P-Delta پرداخته و مجموعه‌ای از آنالیزهای المان محدود را بر روی دیوار برشی ورق فولادی تقویت نشده با الگوی مختلف سوراخ انجام دادند. تجزیه و تحلیل‌ها بومک و همکارانش نشان دادند که مقاومت برشی یک ورق پرکننده با سوراخ‌های دایره‌ای شکل، می‌تواند به وسیله کاهش مقاومت برشی ورق پرکننده صلب با ضریب داده شده در معادله (۲) محاسبه شود [۵].

$$\frac{V_{op}}{V_p} = \left( 1 - \beta N_r \frac{D}{L_p \cos \alpha} \right)$$

معادله (۲)، بومک و همکارانش، ۲۰۰۹

در معادله (۲) پارامترهای  $\beta$  ضریب کاهش به منظور کاهش تأثیر سوراخ کاری در نوار قطری،  $N_r$  حداکثر تعداد نوارهای قطری (در هر مقطع، برش موازی با طول  $L_p$ ، بر روی ارتفاع پانل) با سوراخ‌های دایره‌ای که باید نادیده گرفته شوند،  $L_p$  ول ورق پرکننده،  $D$  قطر سوراخ‌ها،  $\alpha$  زاویه انحراف نوارهای قطری است. شکل ۴ دیوار برشی ورق فولادی با الگوهای مختلف سوراخ پژوهش بومک و همکارانش را در سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد.



شکل ۴ دیوار برشی ورق فولادی با الگوهای مختلف بازشو، بومک و همکارانش، ۲۰۰۹

نتایج تحلیل بومک و همکارانش نشان داد، مقدار  $0.7/\beta$  برای  $\beta$ ، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهد. همچنین مشخص شد که معادله (۲) پیشنهاد شده، پیش‌بینی‌های خوبی از مقاومت کاهش یافته دیوار برشی ورق فولادی با الگوهای مختلف سوراخ کاری، قطر سوراخ-های متفاوت و نسبت منظرهای متفاوت ورق پرکننده ارائه می‌دهد [۵].

ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ چهار عدد دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه‌ای را که از فولاد  $L_{YS}^4$  ساخته شده بود، مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایش قاب محیطی از اعضای با تنش تسلیم ۳۴۵ مگا پاسکال و در ابعاد  $2000 \times 4000$  میلی‌متر بودند و مقطع هر تیر، در نقطه اتصال تیر به ستون، کاهش یافته  $RBS^5$  بود. پانل‌های پرکننده دارای ضخامت  $2/6$  میلی‌متر و از فولاد  $L_{YS}$  با تنش‌های تسلیم و نهایی ۱۶۵ و ۳۰۰ مگا پاسکال ساخته شده بودند. دو نمونه ساخته شده با صفحات صلب و ۲ نمونه دیگر با ایجاد تغییراتی ساخته و مورد بررسی قرار گرفتند. تغییرات شامل یک مدل که گوشه بالایی پانل بریده شده و توسط سخت‌کننده‌ها تقویت شده بود و نمونه

<sup>4</sup> Low yield strength.

<sup>5</sup> Reduced beam section.

P که دارای ۲۰ عدد سوراخ به عنوان سوراخ در پانل پرکننده بود. نتایج پژوهش ویان و برونو نشان داد منحنی‌های هیستریزیس پایدار با میزان فشردگی پائین به دست آمد و خسارت‌های قابل توجه در محدوده‌ی جابجایی‌های بزرگ داد [۶].

در طراحی دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده سه مسئله باعث افزایش هزینه بهره‌برداری می‌گردد؛ نخست ستون‌های بزرگ در نتیجه نیروی جانبی اعمال شده از دیوار برشی به ستون، دوم اتصالات خمشی گران‌قیمت و سوم کمانش دیوارهای برشی فولادی تحت بارگذاری زلزله و باد. سیستم جدید و خلاقانه‌ای به نام سیستم دیوار برشی فولادی با کارایی بالا برای حل این مشکلات مطرح شده توسط شین کیان و آستانه در سال ۲۰۱۶ تهیه و پیشنهاد گردید. در این سیستم نوین نخست دیوار برشی فولادی به ستون‌ها متصل نمی‌شود، بنابراین ستون‌ها نیروی جانبی بزرگی را تجربه نمی‌کنند. دوم اتصال تیر به ستون با یک اتصال خمشی با ورق اتصال که مقرون به صرفه است. سوم ضخامت ورق‌ها مستقل از سایز ستون‌ها است و امکان استفاده از صفحات ضخیم‌تر برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی تحت بارگذاری وجود دارد [۷].

متقی، وتر، سید ابراهیمی در سال ۲۰۱۴ به بررسی میزان کاهش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در دیوارهای برشی سوراخ‌دار پرداختند. متقی و همکارانش در سال ۲۰۱۴، میزان شکل‌پذیری و استهلاک ۶ نمونه از دیوارهای برشی سوراخ‌دار به ضخامت ۵ میلی‌متر، با آرایش‌های مختلف سوراخ و با میزان کاهش سطح مقطع برابر هم را بررسی کردند. نتایج به دست آمده از ۶ مدل با ۲ مدل دیوار برشی بدون سوراخ با ضخامت‌های ۲ و ۵ میلی‌متر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد در نمونه دیوار برشی‌هایی که گوشه‌های ورق برش خورده است تغییر مکان تسلیم کاهش پیدا می‌کند. در نمونه‌ای سوراخ میانی و گوشه هم‌زمان ایجاد شده است عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری در زمینه استهلاک انرژی و شکل‌پذیری مشاهده شد. دلیل این رفتار دیوار برشی را می‌توان چنین برشمرد که با توجه به اینکه ۴ سوراخ در گوشه‌ها در نظر گرفته می‌شود سوراخ‌های میانی فاصله بیشتری از هم یافته و توزیع تنش در سطح ورق گسترده می‌شود و همین موضوع باعث رفتار لرزه‌ای مناسب این نوع دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار می‌گردد [۸].

چیدمان سوراخ‌های دیوارهای برشی فولادی ساختمان‌ها به دلایل معماری و به همان اندازه الزامات دسترسی مهم تلقی می‌شود. با وجود اینکه کاهش سختی و مقاومت در پانل‌های دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار، خوب درک شده است. انجام مطالعات بیشتر به منظور مشخص کردن هر دو مکانیسم و درجه تنزل و همچنین وابسته بودن آن به محل و اندازه سوراخ‌ها ضروری است [۹].

از آنجائی که اتصال پیوسته صفحه فولادی دیوار برشی به اعضای مرزی، تنش‌های قابل ملاحظه‌ای از ورق فولادی دیوار به ستون‌های اطراف وارد کرده و منجر به ایجاد نیروی محوری بالایی در ستون می‌گردد، پس جهت کاهش اثرات ورق فولادی بر اعضای قائم مرزی از الگویی خاص سوراخ‌های دایره‌ای و بیضوی بر روی ورق فولادی می‌توان استفاده کرد تا کمانش و تسلیم صفحات داخلی تنش‌های محوری به مراتب کم‌تری را در اعضای مرزی ایجاد کند. عادل و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به مقایسه اثر سوراخ‌های دایره‌ای و بیضوی بر رفتار دیوارهای برشی فولادی سوراخ‌دار پرداختند. نتایج نشان داد از میان آرایش‌های قرارگیری سوراخ‌ها بر روی ورق فولادی دیوار برشی، فرم قرارگیری ضربدری و قطری به ترتیب سبب ایجاد رفتار سازه‌ای بهتری در سیستم دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار شده است [۱۰].

در دیوارهای برشی فولادی برخی از نقاط ورق، تنش بسیار اندک است. به همین دلیل می‌توان ورق آن نواحی را حذف کرد. به عبارت دیگر، می‌توان از دیوار برشی فولادی با ورق سوراخ‌دار به جای تو پر استفاده کرد. حسینی و زحمت‌کش در سال ۲۰۱۷، به ارزیابی شکل سوراخ در رفتار دیوارهای برشی فولادی سوراخ‌دار پرداختند. حسینی و زحمت‌کش، دیوار برشی فولادی با ضخامت‌های متفاوت از ۲، ۵ و ۸ میلی‌متر را در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که وجود ورق فولادی دیوار موجب افزایش قابل ملاحظه در انرژی مستهلک شده شد. همچنین، افزایش ضخامت به کاررفته برای ورق نیز این میزان استهلاک انرژی را زیادتیر کرد. البته با افزایش ضخامت ورق، زیاده شدن انرژی مستهلک شده کمتر شد. به عبارت دیگر، ورق با ضخامت زیاد الزاماً نتایج متفاوت‌تری با ضخامت کمتر نداشت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار، درحالی که گوشه‌های شکل سوراخ به صورت تیز باشد، نسبت به گوشه‌هایی که لبه‌های گرد دارند ضعیف‌تر است [۱۱].

یک امر مهم در دیوار برشی فولادی دارای سوراخ، دستیابی به بهترین چیدمان و آرایش قرارگیری سوراخ در سطح دیوار برشی است تا از یک سو اعضای اصلی سازه‌های شامل ستون‌ها دیرتر وارد فاز تسلیم شوند و از سوی دیگر با ایجاد سوراخ و افزایش شکل‌پذیری دیوار سبب اتلاف انرژی و جذب انرژی بیشتری در این نوع سیستم سازه‌ای گردد. در این مقاله رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های دارای سوراخ بررسی شده است. جهت انجام یک مطالعه پارامتریک اثر سوراخ‌هایی با اشکال مختلف در ورق دیوار، نحوه چیدمان و قرارگیری سوراخ‌ها در دیوار بر عملکرد سازه برحسب میزان جذب انرژی (سطح زیر منحنی هیستریزیس)، ظرفیت باربری کل سیستم و نیز توزیع تنش ایجاد شده در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای مدل‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق و صحت سنجی

### ۲-۱- جزئیات مدل‌سازی عددی

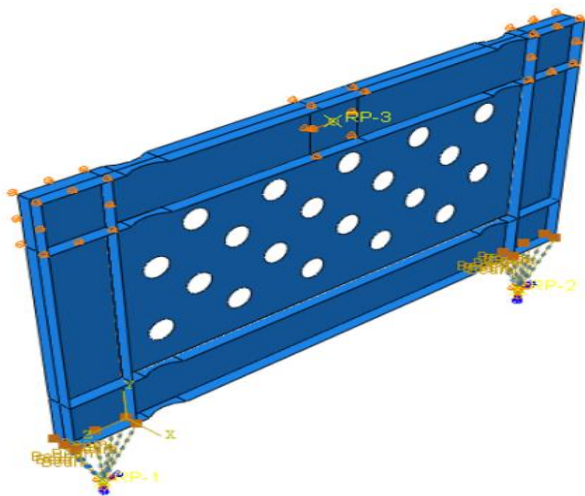
در این تحقیق ۶۰ مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی جهت مطالعه پارامتریک اثر سوراخ‌ها با اشکال هندسی مختلف در ورق دیوار برشی، نحوه چیدمان و قرارگیری سوراخ‌ها در دیوار برشی بررسی شده است. مشخصات مکانیکی ورق پرکننده قاب و اجزا قاب (تیر و ستون) مدل عددی در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی قاب دیوار برشی

وزن حجمی - کیلوگرم بر سانتی مترمکعب	۰/۰۷۸۴۹	
مدول الاستیسیته - کیلوگرم بر سانتی مترمکعب	۲۱۰۰۰۰	
ضریب پواسون	۰/۳	
رفتار پلاستیک	کرنش پلاستیک	تنش تسلیم
	۰	۳۴۵۱
	۰/۰۸	۴۵۰۰
	۰/۱۷	۴۸۰۰

جدول ۱ مشخصات مکانیکی فولاد LYS جهت ورق دیوار برشی

وزن حجمی - کیلوگرم بر سانتی مترمکعب	۰/۰۷۸۴۹	
مدول الاستیسیته - کیلوگرم بر سانتی مترمکعب	۲۱۰۰۰۰	
ضریب پواسون	۰/۳	
رفتار پلاستیک	کرنش پلاستیک	تنش تسلیم
	۰	۱۶۵۱
	۰/۰۴	۲۵۰۰
	۰/۱	۲۹۰۰
	۰/۲	۳۰۵۰



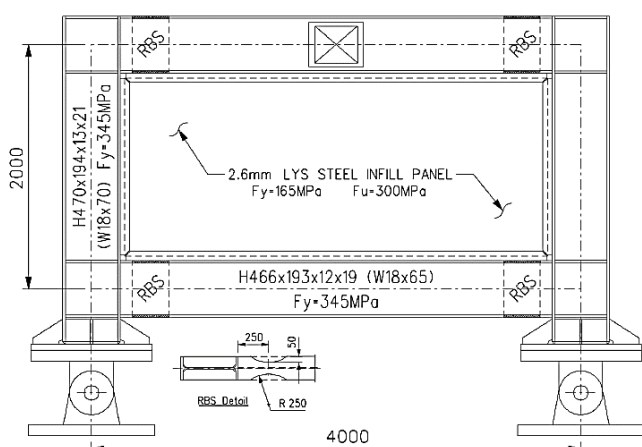
شکل ۵ مشخصات نمونه عددی در این پژوهش

در اعمال شرایط مرزی، جهت ایجاد مفصل در پای ستون، به‌جز دوران در جهت اعمال بار، تمام درجات آزادی بسته شد. همچنین با توجه به تعبیه مهار جانبی تیر تراز طبقات به علت وجود عناصر سقف سازه‌ای، تغییر مکان عمود بر صفحه در قسمت فوقانی و همچنین به دلیل عدم جابجایی در محل اعمال بار به سیستم، جابجایی عمود بر صفحه در محل‌های ذکر شده، بسته در نظر گرفته شد. برای مطالعه مطلوب بررسی ظرفیت دیوار برشی فولادی، باید نتایج تا نزدیکی قسمت‌های حد باربری اعضاء قابل‌بررسی باشند. در نمونه عددی نیز بارگذاری به‌صورت چرخه‌ای و از نوع کنترل تغییر مکان بوده و مقدار جابجایی به‌اندازه ۶۰ میلی‌متر در طول و در امتداد جان تیر فوقانی قاب در دهانه و به‌صورت رفت‌وبرگشت وارد شد. شکل ۵

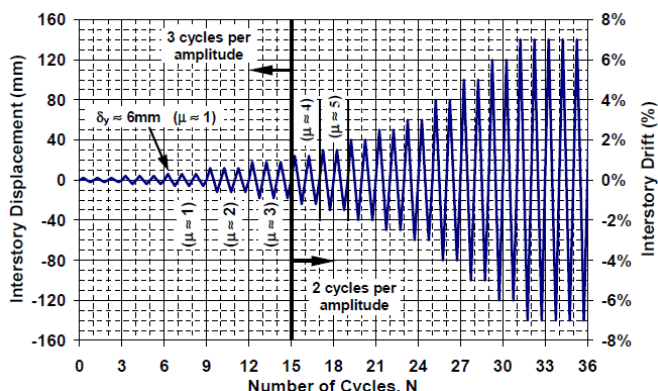
مشخصات مدل سازی و شرایط مرزی نمونه عددی این پژوهش در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس را که مطابق نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ است، نشان می دهد.

## ۲-۲ - شیوه مدل سازی عددی و صحت آن

جهت اطمینان از صحت مدل سازی ها و نتایج به دست آمده در تحلیل های انجام گرفته به وسیله نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، می توان مدل سازی ها انجام شده را با پژوهش های آزمایشگاهی دیگر مدل سازی کرد و با مقایسه نتایج به دست آمده از صحت مدل سازی و نتایج به دست آمده اطمینان حاصل نمود. به منظور بررسی صحت مدل سازی عددی از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی دیوار برشی فولادی یک دهانه و یک طبقه توسط ویان و برونو در سال ۲۰۰۹ در این پژوهش استفاده گردید. ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ در مدل آزمایشگاهی خود، دیوار برشی فولادی شبیه سازی شده کردند که شامل دو ستون به مقطع H470 و دو تیر با مقطع H466، آن ها را به صورت صلب به یکدیگر وصل نموده است و دارای صفحه داخلی یکپارچه است. طول دهانه و ارتفاع پانل برشی مورد آزمایش ویان و برونو به ترتیب ۴ و ۲ متر بود و برای مفصل کردن پای ستون، تمام درجات آزادی به جز دوران در جهت اعمال بار بسته شد. در وسط پانل از یک ورق به ضخامت ۲/۶ میلی متر استفاده کردند. در نمونه P صفحه داخلی دارای ۲۰ سوراخ با قطر ۲۰۰ میلی متر و به صورت مشبک و در راستای زاویه ۴۵ درجه و فاصله مرکز به مرکز سوراخ ها ۳۰۰ میلی متر در جهات افقی و عمودی بود. پانل داخلی، فولادی از نوع LYS و نوع فولاد مصرفی از جنس فولاد نورد و تنش تسلیم ورق دیوار برشی ۱۶۵ مگا پاسکال است. شکل ۶ پروتکل بارگذاری چرخه ای مطابق ATC-24 و شکل ۷ پیکربندی نمونه آزمایشگاهی P دیوار برشی فولادی دارای سوراخ، پژوهش ویان و برونو را در سال ۲۰۰۴ نشان می دهد [۶].



شکل ۷ پیکربندی نمونه آزمایشگاهی، ویان و برونو، ۲۰۰۹



شکل ۶ پروتکل بارگذاری چرخه ای ATC-24، ویان و برونو، ۲۰۰۹

شکل ۸ مدل آزمایشگاهی پژوهش ویان و برونو را در سال ۲۰۰۴ نشان می دهد. در آزمایشگاه، تکیه گاه های پانل برشی به صورت مفصل تعبیه شده است. در مدل سازی عددی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس در این پژوهش سعی شده است تا شرایط مشابهی فراهم شود.

پانل داخلی، فولادی از نوع LYS، و نوع فولاد مصرفی از جنس فولاد نورد و تنش تسلیم ورق دیوار برشی ۱۶۵ مگا پاسکال که از طریق آزمایش به دست آمد. در ستون های کناری و مقطع تیر کاهش یافته در بالا و پایین قاب از فولاد مصرفی با تنش تسلیم ۳۴۵ مگا پاسکال بکار گرفته شد [۶].

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL: Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structure.





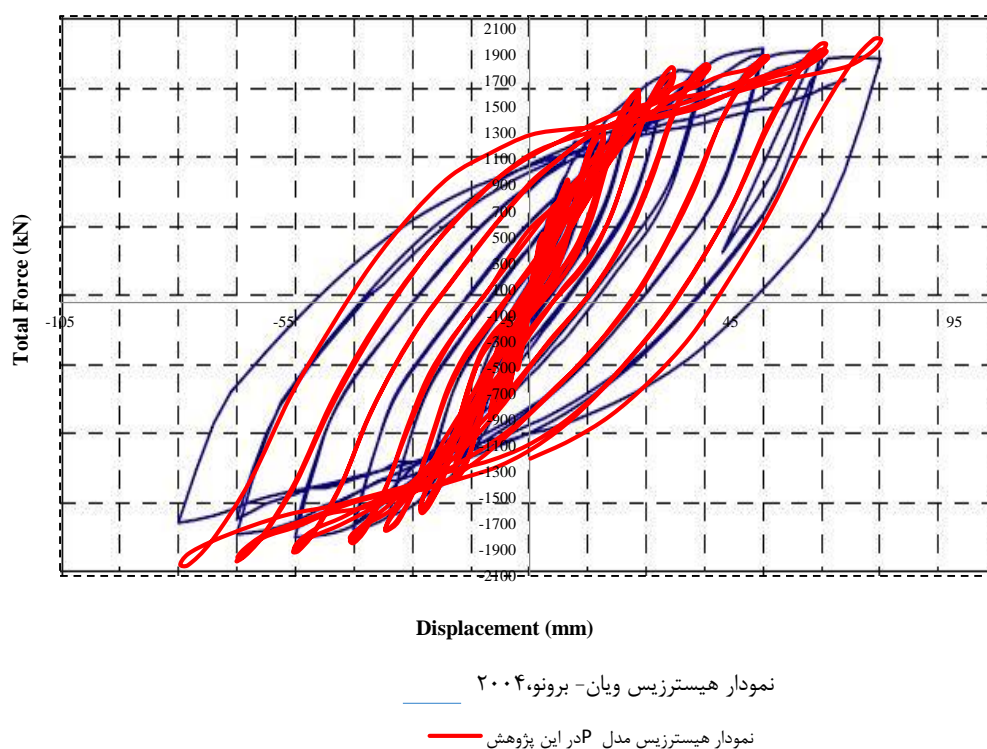
شکل ۸ نمونه P قبل از آزمایش، ویان و برونو، ۲۰۰۹

نتایج گزارش شده پژوهش ویان و برونو در نمونه آزمایشگاهی P، حاکی از آن است که آرایش سوراخ‌ها، سختی پانل را به میزان ۱۷ درصد کاهش داد به طوری که ابتدا تسلیم در صفحه و در دررفت ۰/۳ درصد و بعد در اتصالات مقطع کاهش یافته تیر بالایی، و در دررفت ۱/۲ درصد رخ داد. در دررفت ۲/۵ درصد تسلیم و کمانش ورق‌های لچکی و کمانش موضعی جان در اتصال مقطع کاهش یافته تیر پایین دیده شد و در نتیجه در دررفت ۳ درصد، زمانی که ورق اتصال پیوستگی ستون شکست، آزمایش متوقف شد. اگرچه پانل‌های جان در این دررفت گسیخته نشد. نمونه دارای رفتار هیستریک پایدار و شکل پذیر با کمی جمع شدگی بود و مفاصل پلاستیک در تیرها شکل گرفتند. سختی الاستیک ۱۵۵ کیلو نیوتن بر میلی متر، حداکثر برش پایه ۱۸۱۱ کیلو نیوتن و شکل پذیری جابجایی حدود ۱۰ نیز، در زمان آزمایش برای نمونه ثبت شد [۶].

برای مطالعه مطلوب بررسی ظرفیت دیوار برشی فولادی، باید نتایج تا نزدیکی قسمت‌های حد باربری اعضاء قابل بررسی باشند. در این پژوهش، بارگذاری به صورت چرخه‌ای و از نوع کنترل تغییر مکان بوده و مقدار جابجایی به اندازه ۶۰ میلی متر در طول و در امتداد جان تیر فوقانی قاب در دهانه و به صورت رفت و برگشت وارد شد. بدین ترتیب منحنی جابجایی تراز طبقه در مقابل برش پایه مدل نرم‌افزاری اجزاء محدود آباکوس با نمودار منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید.

منحنی‌های هیستریزس جابجایی - برش پایه، برای نمونه P در دو حالت آزمایشگاهی ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ و روش عددی اجزاء محدود در این پژوهش در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل عددی اجزاء محدود در این پژوهش قادر به مدل‌سازی صحیح رفتار پس از اوج بوده و همچنین مقاومت اندازه‌گیری شده در نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو و نمونه عددی پژوهش حاضر یکسان است. نتایج حاکی از آن است که رفتار مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی چه از نظر سختی (شیب مدل در چرخه‌های مختلف) و چه از نظر مقاومت انطباق خوب و نزدیک به هم دارند. حداکثر مقاومت افزایش در نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو در سال ۲۰۰۴، برابر با ۱۸۱۱ kN و مقاومت به دست آمده از نمونه عددی این پژوهش ۱۹۵۴ kN است؛ که دارای ۷/۸۹ درصد اختلاف نسبت به نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ است.

## منحنی مقایسه ای هیستریزیس نمونه P آزمایشگاهی و عددی

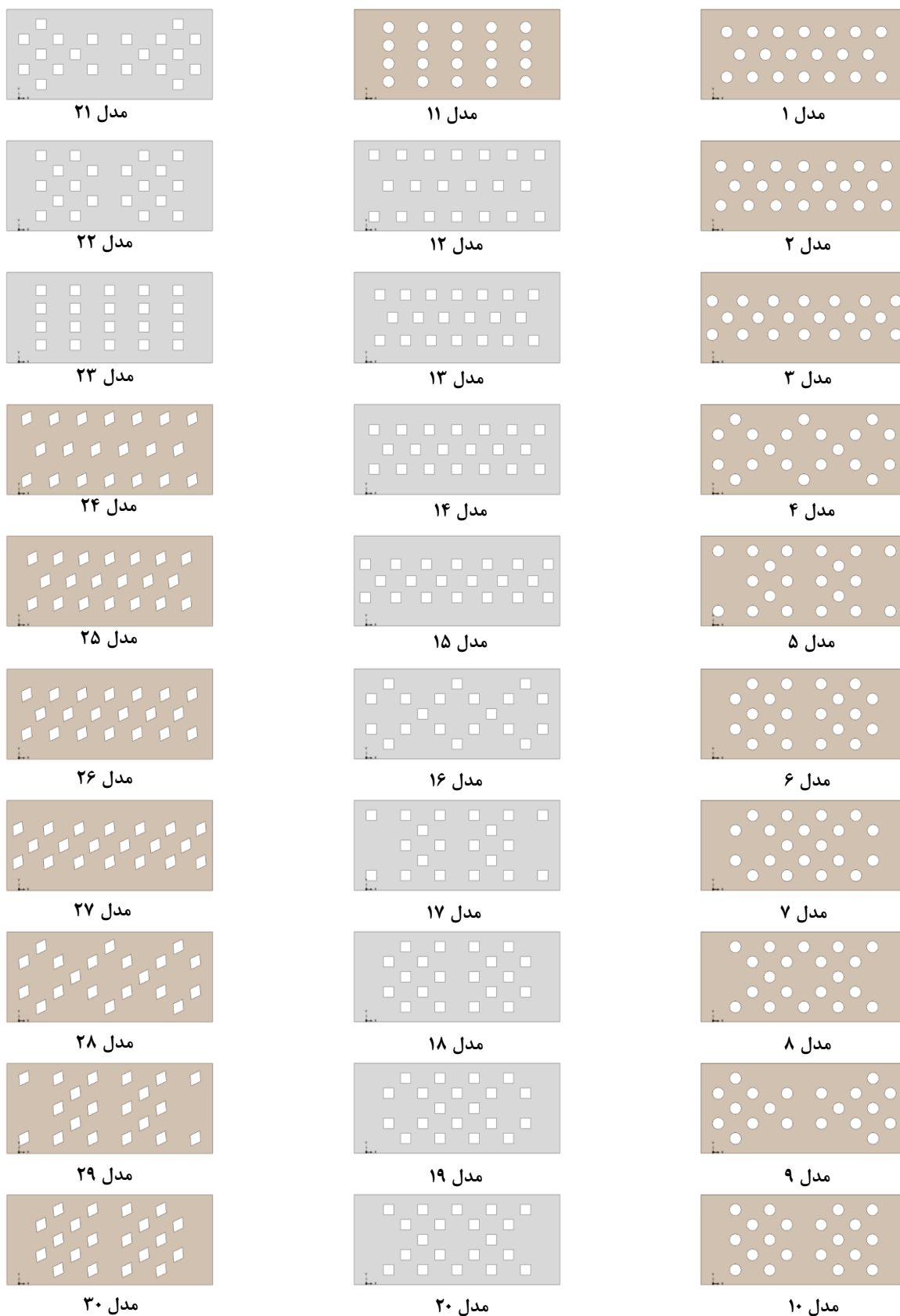


شکل ۹ منحنی مقایسه ای هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو ۲۰۰۹ و این پژوهش

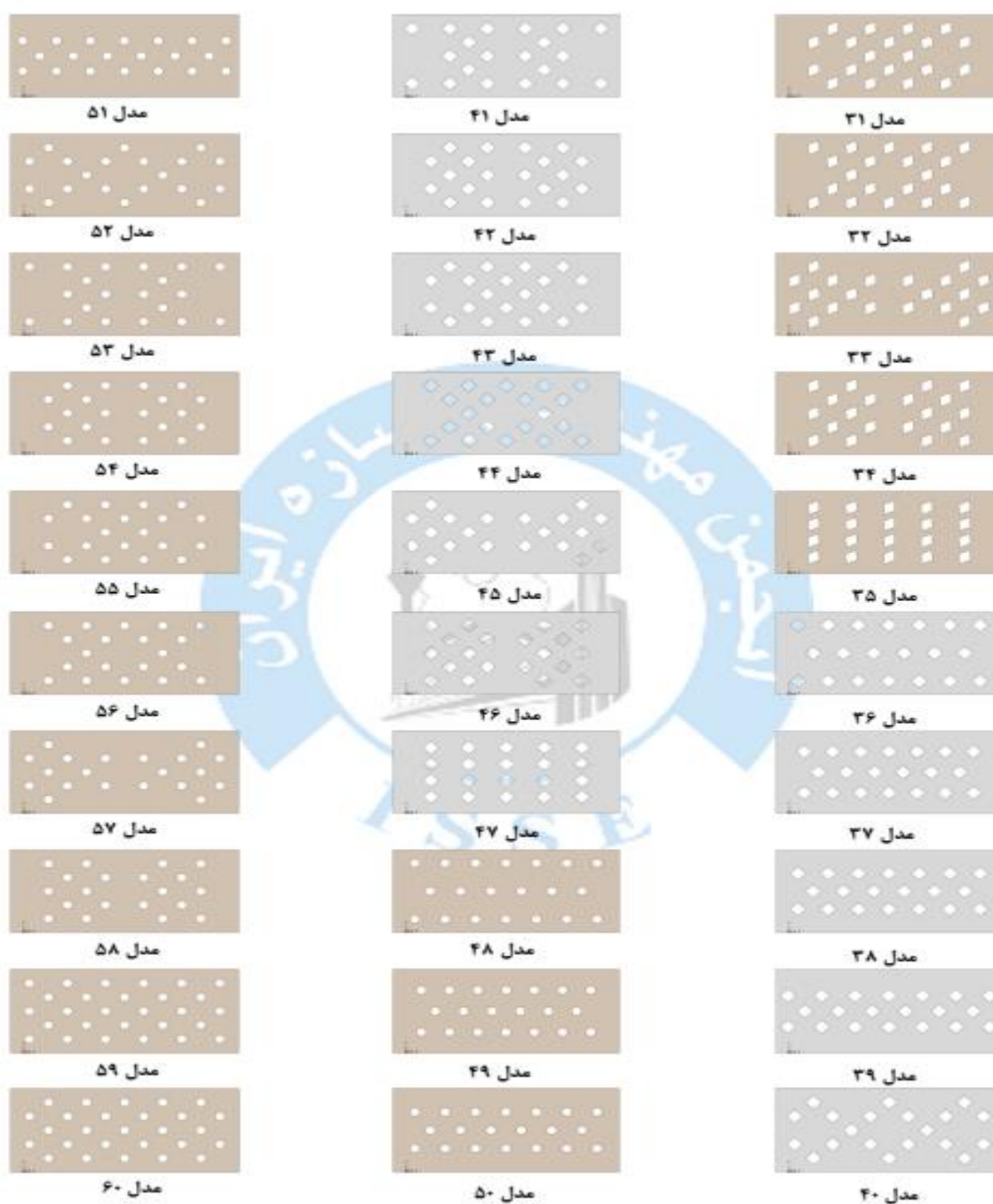
البته اختلاف ناچیزی که بین نتایج مدل آزمایشگاهی و نرم‌افزاری وجود دارد در این است که اولاً شیب اولیه کم نمودارهای هیستریزیس در نمونه‌های آزمایشگاهی، نشان از صحت نرم‌افزار است چراکه دیوار یک طبقه آزمایشگاهی، یک بار در سال ۲۰۰۴ تحت آزمایش قرار گرفته بود و تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های اولیه‌ی زیادی در آن وجود داشت لذا کاملاً منطقی است که سختی آن از مدل نرم‌افزاری کمتر باشد. دلیل دیگر عدم مطابقت کامل دو نمودار، تفاوت مشخصات مصالح مصرفی در مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود است. چون در مدل نرم‌افزاری، رفتار واقعی مصالح فولادی تعریف نشده است.

### ۳-۲ - معرفی نمونه‌های عددی

۶۰ مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار، جهت مطالعه پارامتریک اثر سوراخ‌ها با اشکال هندسی مختلف در ورق دیوار برشی، نحوه چیدمان و قرارگیری سوراخ‌ها در دیوار برشی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شد. هندسه سوراخ ورق دیوار برشی فولادی به صورت دایره، لوزی، مربع و لوزی است. در هر آرایش هندسی ۱۲ مدل چیدمان محل سوراخ‌ها در دیوار برشی فولادی در نظر گرفته شده و مساحت تمام سوراخ‌ها یکسان و مطابق نمونه آزمایشگاهی P ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ است. اشکال ۱۰ و ۱۱ هندسه و نحوه چیدمان سوراخ‌ها در مدل‌های ۱ تا ۳۰ و مدل‌های ۳۱ تا ۶۰ را به ترتیب نشان می‌دهد.



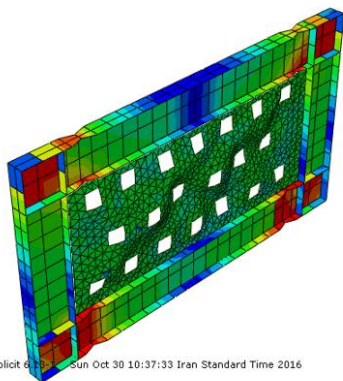
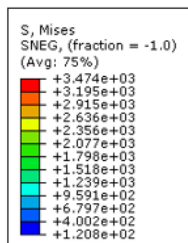
شکل ۱۰ مدل‌های عددی دیوار برشی با هندسه و الگوی چیدمان بازشو دیوار برشی فولادی مدل ۱ تا ۳۰



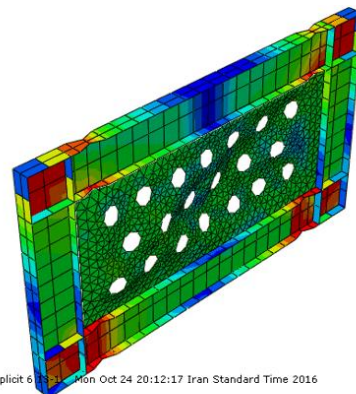
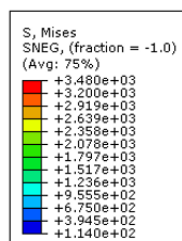
شکل ۱۱ مدل‌های عددی دیوار برشی با هندسه و الگوی چیدمان بازشو دیوار برشی فولادی مدل ۳۱ تا ۶۰

## ۳- توزیع تنش فن میسر در حالت پس کمانشی نمونه‌ها

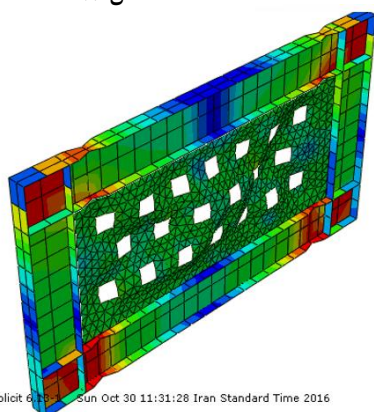
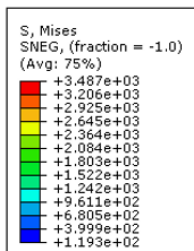
در این بخش توزیع تنش فن میسر در حالت پس کمانشی نمونه‌های دیوار برشی با سوراخ‌های دایره‌ای شکل و دیوار برشی ورق فولادی با سوراخ‌های مربع شکل به ابعاد  $17/72 \times 17/72$  که دارای مساحت یکسان سوراخ‌ها هستند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. حالت پس کمانشی دیوارهای برشی و فولادی در نمونه‌های ۱ تا ۳ و نمونه‌های ۱۲ تا ۱۴ در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. به دلیل کثرت تعداد نمونه‌ها، گنجاندن حالت پس کمانشی کل نمونه‌ها امکان پذیر نیست.



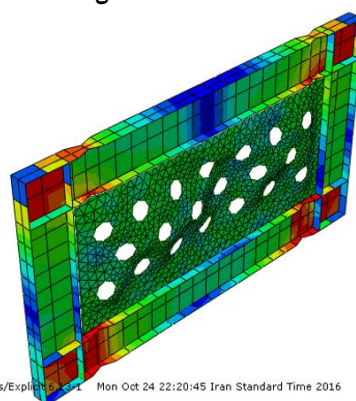
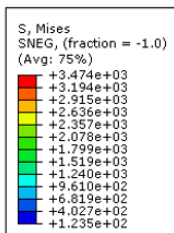
مدل ۱۲



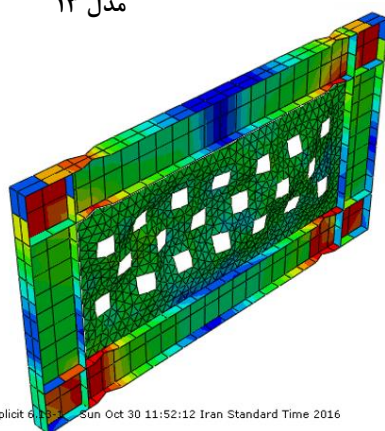
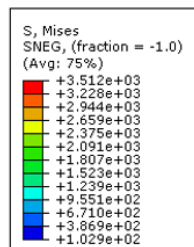
مدل ۱



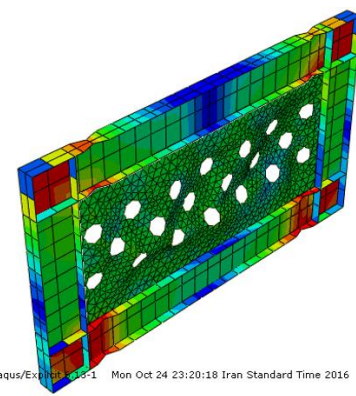
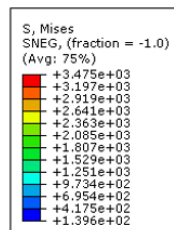
مدل ۱۳



مدل ۲



مدل ۱۴



مدل ۳

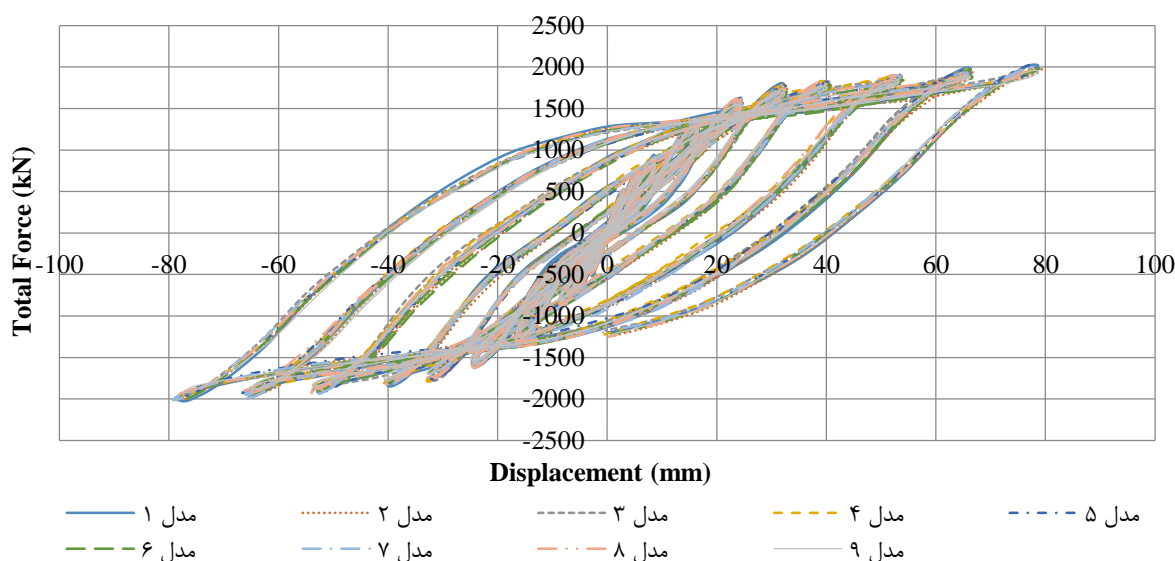
شکل ۱۲ توزیع تنش در حالت پس کمانشی

### ۳- ارزیابی انرژی مستهلک شده مدل های عددی دیوار برشی فولادی

#### ۳-۱- ارزیابی انرژی مستهلک شده مدل های ۱۱-۱

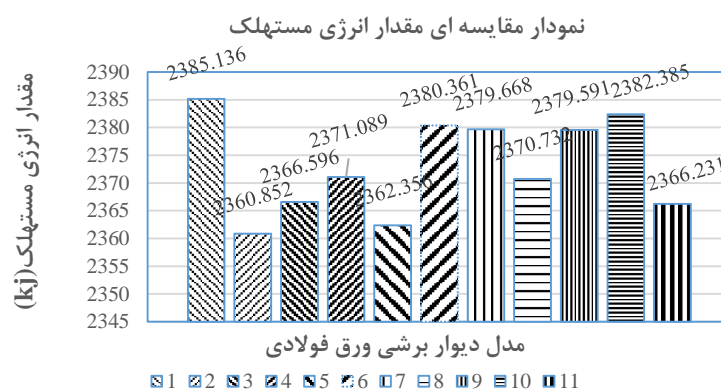
در این بخش نتایج تحلیل مدل دیوار برشی ورق فولادی، دارای سوراخ با هندسه دایره‌ای شکل و قطر ۲۰ سانتی‌متر با چیدمان‌های مختلف سوراخ‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین به مقایسه بهترین سیستم از نظر میزان استهلاک انرژی در این گروه پرداخته می‌شود. شکل ۱۳ منحنی هیستریزس نمونه‌های ۱۱-۱ را نشان می‌دهد.

نمودار مقایسه‌ای هیستریزس مدل ۱۱-۱



شکل ۱۳ نمودار مقایسه‌ای هیستریزس مدل ۱۱-۱ دیوار برشی ورق فولادی

در تمامی نمودارهای هیستریزس ترسیم‌شده در شکل ۱۳، تقارن منحنی مشهود است و بیانگر این موضوع است که در بارگذاری رفت و برگشتی اعمال‌شده به قاب‌ها، سیستم عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین تعداد سیکل‌های منحنی هیستریزس بیشتر است و نشان‌دهنده ورود دیرتر سیستم به فاز خرابی است. با محاسبه سطح زیر منحنی هیستریزس، مقدار انرژی مستهلک‌شده در کل سیستم به دست می‌آید. با مشاهده شکل ۱۴ می‌توان دریافت آرایش حفره‌ها در مدل دیوار برشی ورق فولادی ۱، بهترین عملکرد سازه‌ای را از خود نشان داده است. مدل ۱ با هندسه دایره‌ای و قطر ۲۰ سانتی‌متر سوراخ در دیوار برشی ورق فولادی، دارای ۵۵ درصد استهلاک انرژی بیشتر نسبت به میانگین مقدار استهلاک انرژی ۱۰ نمونه دیگر است.

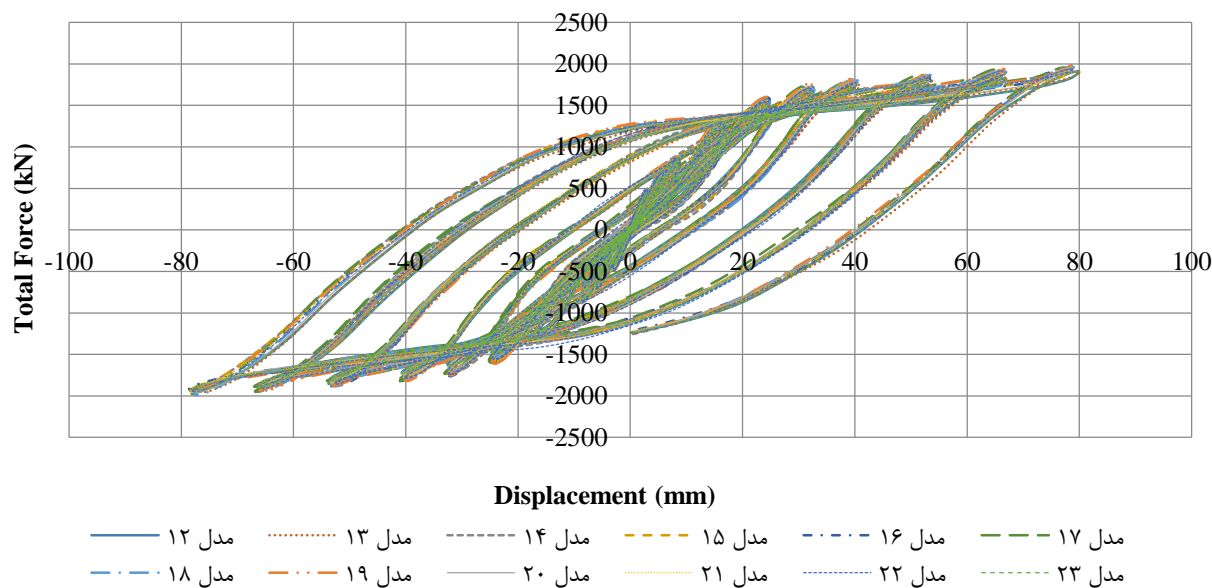


شکل ۱۴ نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۱-۱۱ دیوار برشی فولادی

## ۲-۳- ارزیابی انرژی مستهلک شده مدل های ۱۲-۲۳

در این بخش نتایج مدل دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ با هندسه مربع شکل و ابعاد  $17/72 \times 17/72$  سانتی متر با چیدمان های مختلف سوراخ ها مورد ارزیابی قرار می گیرد. همچنین به مقایسه بهترین سیستم از نظر میزان استهلاک انرژی در این گروه پرداخته می شود. شکل ۱۵ منحنی هیستریزس نمونه های ۱۲-۲۳ را نشان می دهد.

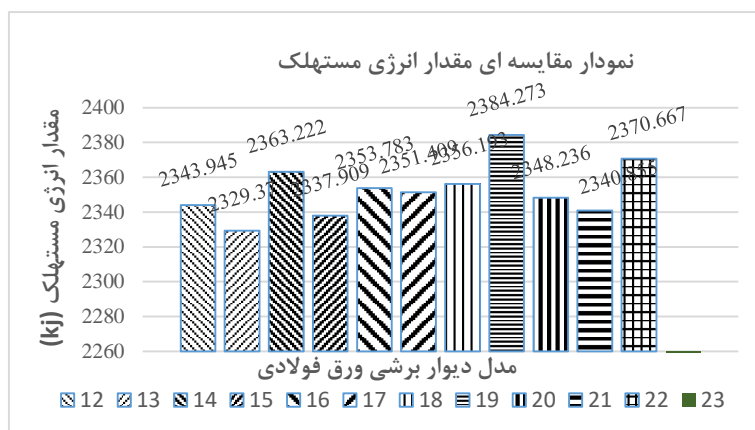
نمودار مقایسه ای هیستریزس مدل ۱۲-۲۳



شکل ۱۵ نمودار مقایسه ای هیستریزس مدل ۱۲-۲۳ دیوار برشی ورق فولادی

در تمام منحنی های هیستریزس شکل ۱۵ تقارن منحنی وجود دارد و مفهوم آن این است که در بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده به قاب ها، سیستم عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین تعداد سیکل های منحنی هیستریزس بیشتر است و نشان دهنده ورود دیرتر سیستم به فاز خرابی است. با محاسبه سطح زیر منحنی هیستریزس، مقدار انرژی مستهلک شده در کل سیستم به دست می آید. با مشاهده شکل ۱۶ می توان دریافت آرایش حفره ها در مدل دیوار برشی ورق فولادی ۱۹، بهترین عملکرد سازه ای را از خود نشان داده است. مدل ۱۹ با هندسه مربع شکل سوراخ در دیوار برشی ورق فولادی، دارای  $1/61$  درصد استهلاک انرژی بیشتر نسبت به میانگین مقدار استهلاک انرژی ۱۱ نمونه دیگر است.



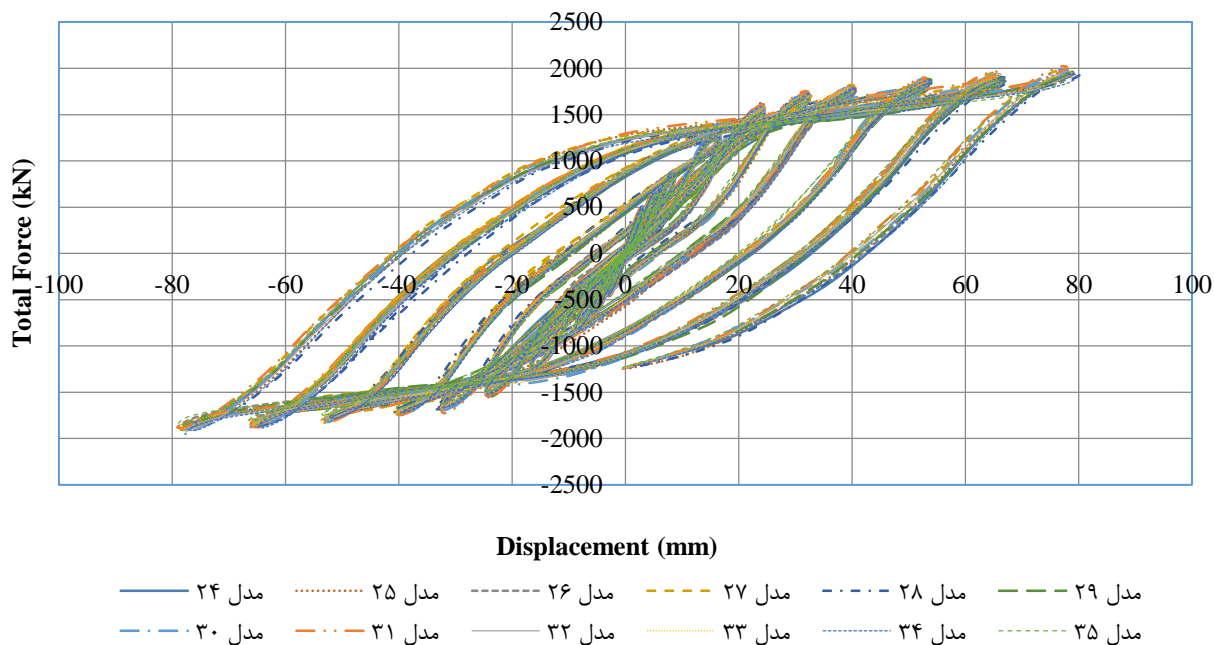


شکل ۱۶ نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۱۲-۲۳ دیوار برشی فولادی

## ۳-۳- ارزیابی انرژی مستهلک شده مدل های ۲۴-۳۵

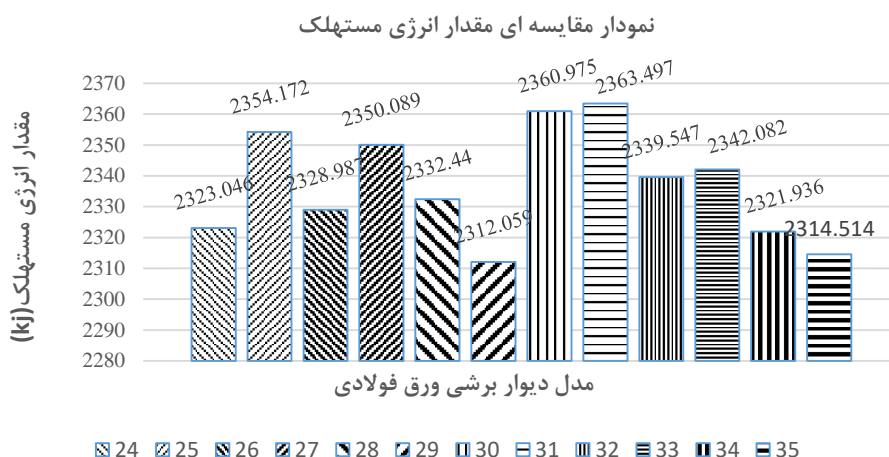
در این بخش نتایج مدل دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ با هندسه لوزی شکل و قطر کوچک ۲۰/۰۴ و قطر بزرگ ۳۰ سانتی متر با چیدمان های مختلف سوراخ ها مورد ارزیابی قرار می گیرد. همچنین به مقایسه بهترین سیستم از نظر میزان استهلاک انرژی در این گروه پرداخته می شود. شکل ۱۷ منحنی هیستریزس نمونه های ۲۴-۳۵ را نشان می دهد.

## نمودار مقایسه ای هیستریزس مدل ۲۴-۳۵



شکل ۱۷ نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۲۴-۳۵ دیوار برشی فولادی

در منحنی های هیستریزس شکل ۱۷ تقارن منحنی وجود دارد و مفهوم آن این است که در بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده به قابها، سیستم عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین تعداد سیکل های منحنی هیستریزس بیشتر است و نشان دهنده ورود دیرتر سیستم به فاز خرابی است. با محاسبه سطح زیر منحنی هیستریزس، مقدار انرژی مستهلک شده در کل سیستم به دست می آید. با مشاهده شکل ۱۸ می توان دریافت آرایش حفره ها در مدل دیوار برشی ورق فولادی ۳۱، بهترین عملکرد سازه ای را از خود نشان داده است. مدل ۳۱ با هندسه لوزی شکل سوراخ در دیوار برشی ورق فولادی، دارای ۱/۲۳ درصد استهلاک انرژی بیشتر نسبت به میانگین مقدار استهلاک انرژی ۱۱ نمونه دیگر است.

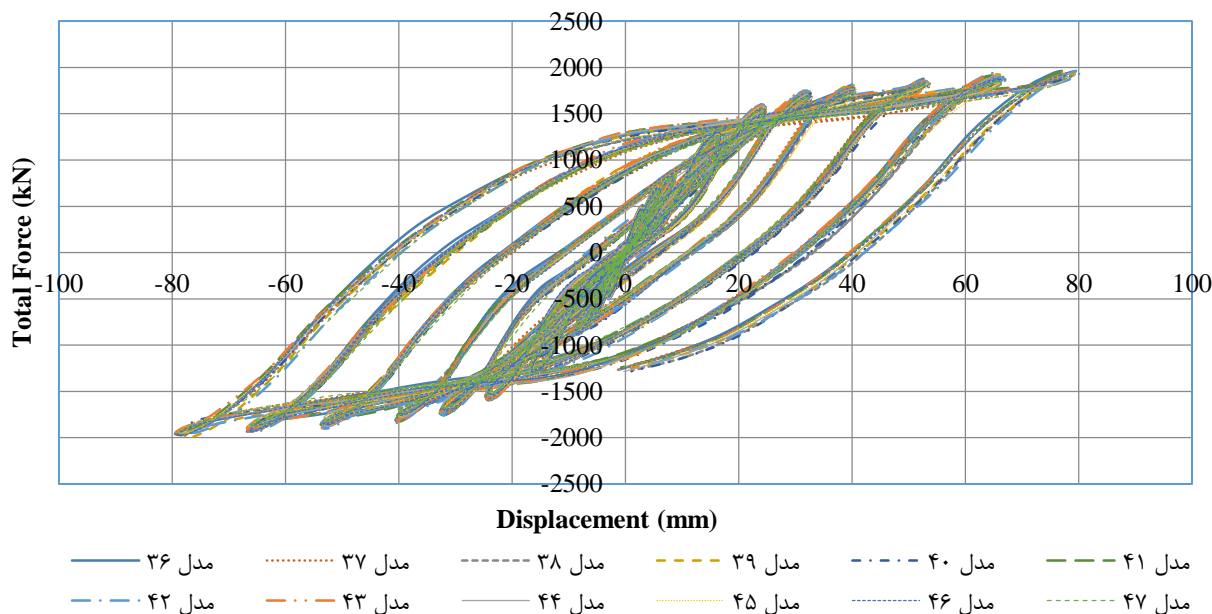


شکل ۱۸ نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۲۴-۳۵ دیوار برشی فولادی

### ۳-۴- ارزیابی انرژی مستهلک شده ۳۶-۴۷

در این بخش نتایج مدل دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ با هندسه لوزی شکل با قطرهای برابر به اندازه ۲۵/۰۶ سانتی متر با چیدمان‌های مختلف سوراخ‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین به مقایسه بهترین سیستم از نظر میزان استهلاک انرژی در این گروه پرداخته می‌شود. شکل ۱۹ منحنی هیستریزس نمونه‌های ۳۶-۴۷ را نشان می‌دهد.

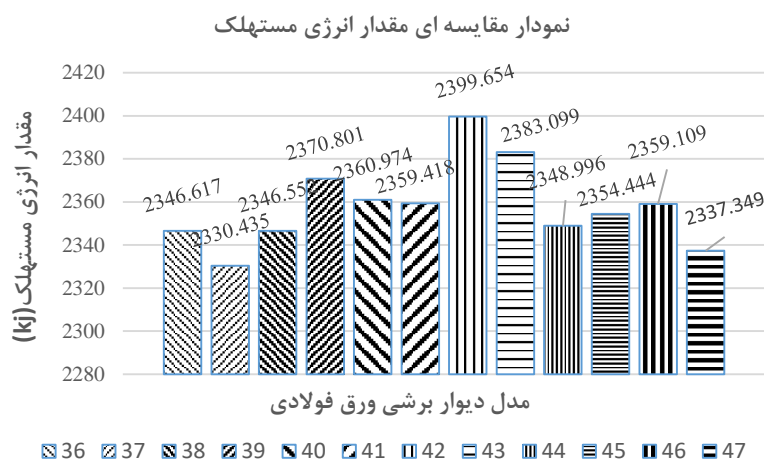
### نمودار مقایسه ای هیستریزس مدل ۳۶-۴۷



شکل ۱۹ نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۳۶-۴۷ دیوار برشی فولادی

در منحنی‌های هیستریزس شکل ۱۹ تقارن منحنی وجود دارد و مفهوم آن این است که در بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده به قاب‌ها، سیستم عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین تعداد سیکل‌های منحنی هیستریزس بیشتر است و نشان‌دهنده ورود دیرتر سیستم به فاز خرابی است. با محاسبه سطح زیر منحنی هیستریزس، مقدار انرژی مستهلک شده در کل سیستم به دست می‌آید. با

مشاهده شکل ۲۰ می‌توان دریافت آرایش حفره‌ها در مدل دیوار برشی ورق فولادی ۴۲، بهترین عملکرد سازه‌ای را از خود نشان داده است. مدل ۴۲ با هندسه لوزی شکل سوراخ با قطرهای یکسان در دیوار برشی ورق فولادی، دارای ۱/۸۹ درصد استهلاک انرژی بیشتر نسبت به میانگین مقدار استهلاک انرژی ۱۱ نمونه دیگر است.

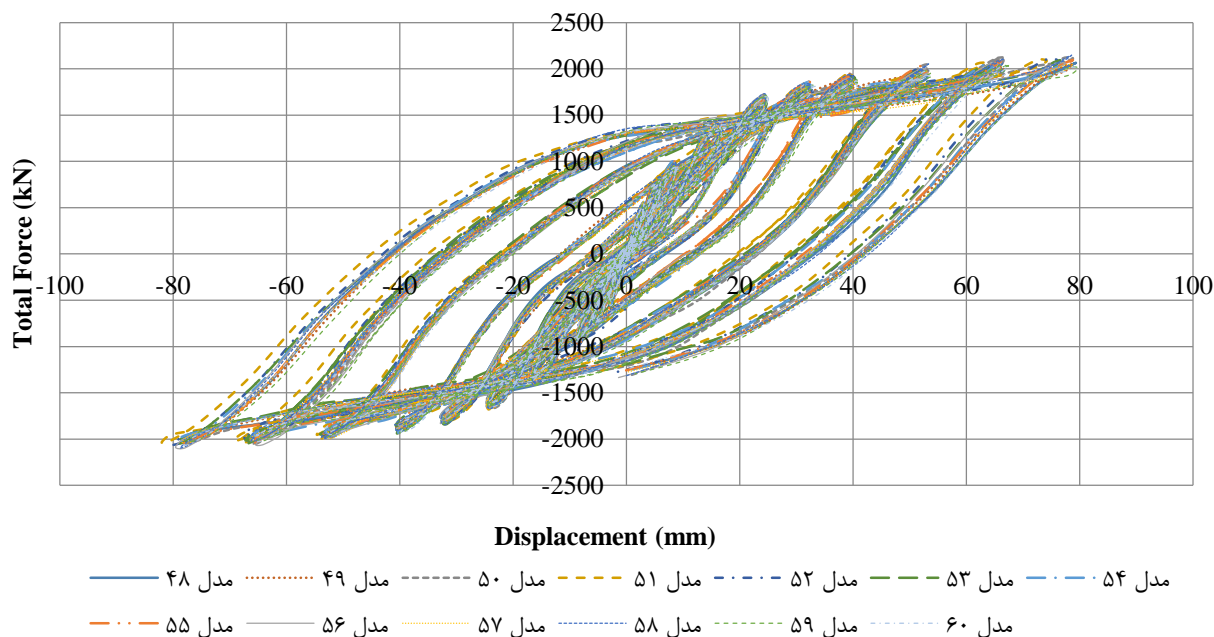


شکل ۲۰ نمودار مقایسه‌ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۳۶-۴۷ دیوار برشی فولادی

### ۳-۵- ارزیابی انرژی مستهلک شده مدل‌های ۴۸-۶۰

در این بخش نتایج مدل دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ با هندسه دایره‌ای شکل با قطر ۱۵ سانتی‌متر با چیدمان‌های مختلف سوراخ‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین به مقایسه بهترین سیستم از نظر میزان استهلاک انرژی در این گروه پرداخته می‌شود. شکل ۲۱ منحنی هیستریزیس نمونه‌های ۴۸-۶۰ را نشان می‌دهد.

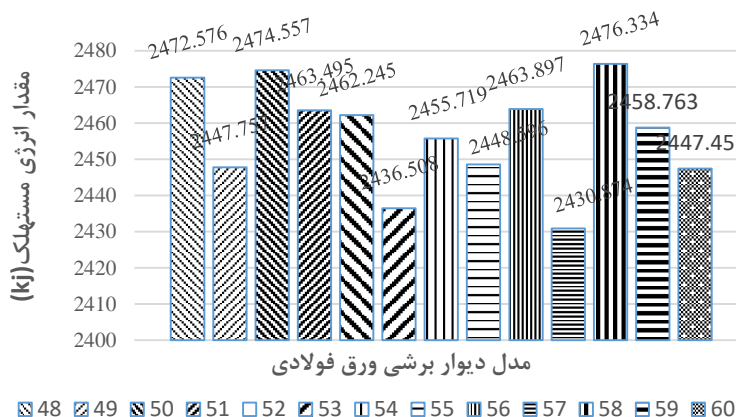
نمودار مقایسه ای هیستریزیس مدل ۴۷-۶۰



شکل ۲۱ نمودار مقایسه‌ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۴۸-۶۰ دیوار برشی فولادی

در منحنی‌های هیستریزیس شکل ۲۰ تقارن منحنی وجود دارد و مفهوم آن این است که در بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده به قابها، سیستم عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. همچنین تعداد سیکل‌های منحنی هیستریزیس بیشتر است و نشان‌دهنده ورود دیرتر سیستم به فاز خرابی است. با محاسبه سطح زیر منحنی هیستریزیس، مقدار انرژی مستهلک شده در کل سیستم به دست می‌آید. با توجه به شکل ۲۲ آرایش حفره‌ها در مدل دیوار برشی ورق فولادی ۵۸، بهترین عملکرد سازه‌ای را از خود نشان داده است. مدل ۵۸ با هندسه دایره‌ای شکل سوراخ در دیوار برشی ورق فولادی، دارای ۰/۸۵ درصد استهلاک انرژی بیشتر نسبت به میانگین مقدار استهلاک انرژی ۱۲ نمونه دیگر است.

نمودار مقایسه ای مقدار انرژی مستهلک

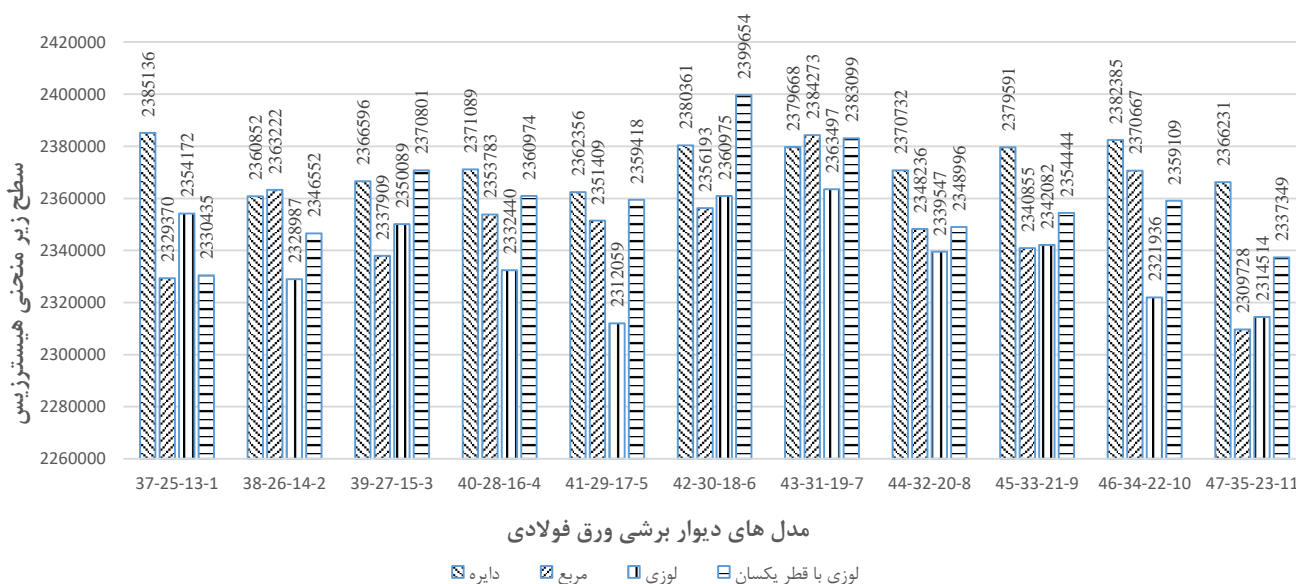


شکل ۲۲ نمودار مقایسه‌ای مقدار انرژی مستهلک شده مدل ۴۸-۶۰ دیوار برشی فولادی

## ۳-۶- مقایسه سطح زیر منحنی هیستریزیس مدل‌های دیوار برشی ورق فولادی

در این بخش به مقایسه سطح زیر منحنی هیستریزیس دیوارهای برشی ورق فولادی که در آن‌ها درصد سوراخ‌ها و چیدمان سوراخ‌ها ثابت و یکسان است با هندسه متفاوت پرداخته می‌شود. در شکل ۲۳ نمودار مقایسه‌ای سطح زیر منحنی هیستریزیس مدل‌های عددی دیوار برشی ورق فولادی در این پژوهش که دارای درصد سوراخ و چیدمان یکسان و هندسه متفاوت هستند ارائه شده است.

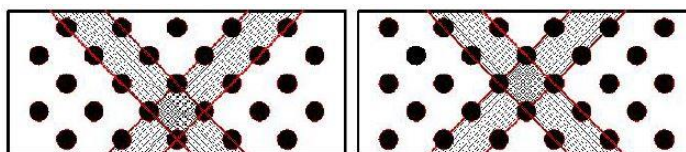
نمودار مقایسه‌ای سطح زیر منحنی هیستریزیس دیوار برشی ورق فولادی



شکل ۲۳ نمودار سطح زیر منحنی مدل‌های عددی دیوار برشی ورق فولادی

با بررسی نمودار مقایسه‌ای شکل ۲۳ می‌توان دریافت که مدل‌های دیوار برشی ورق فولادی که دارای بازشو با شکل هندسی دایره‌ای هستند به میزان ۶۳/۶۴ درصد از کل نمونه‌های دیوار برشی دارای سوراخ، عملکرد مناسبی در استهلاک انرژی دارند. همچنین وجود سوراخ در دیوار برشی ورق فولادی با اشکال هندسی مربع و لوزی با قطرهای برابر، ۱۸/۱۸ درصد کل نمونه‌های دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ، رفتار مناسبی را در استهلاک انرژی از خود نشان دادند. در این میان مدل دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ و هندسه لوزی شکل با قطر کوچک ۲۰/۰۴ و قطر بزرگ ۳۰ سانتیمتر، به دلیل هندسه سوراخ که قطر بزرگ در راستای نوارهای طراحی قرار گرفته، در این حالت ورق دیوار برشی فولادی زودتر وارد فاز کمانشی شده و شکل هندسه سوراخ سختی ناچیزی در سطح ورق ایجاد می‌کند. دیوار برشی ورق فولادی با هندسه لوزی شکل با قطر کوچک ۲۰/۰۴ و قطر بزرگ ۳۰ سانتیمتر، دارای بدترین عملکرد در استهلاک انرژی از میان نمونه‌های دیگر است.

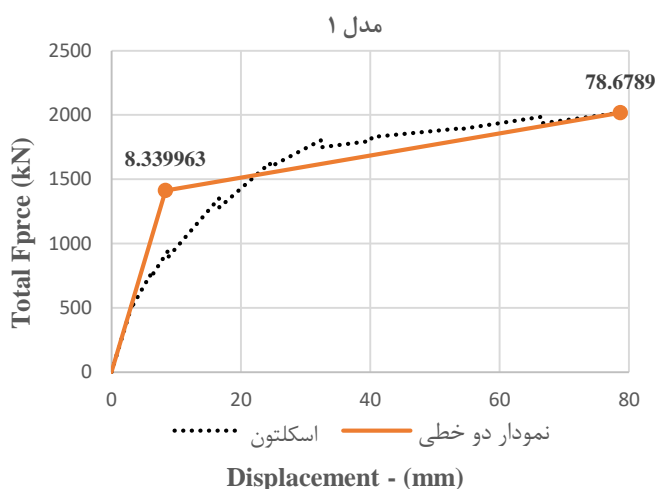
همچنین با بررسی نتایج مشخص می‌شود که مدل‌های با چیدمان دارای تقارن مرکزی با توزیع یکنواخت سوراخ‌ها، دارای چرخه‌های هیستریزیس پایدارتر نسبت به مدل‌های نامتقارن با توزیع غیریکنواخت سوراخ‌ها در سطح ورق دیوار برشی فولادی هستند. شکل ۲۴ تقارن مرکزی و نامتقارن مرکزی در مدل‌های دیوار برشی ورق فولادی را نشان می‌دهد.



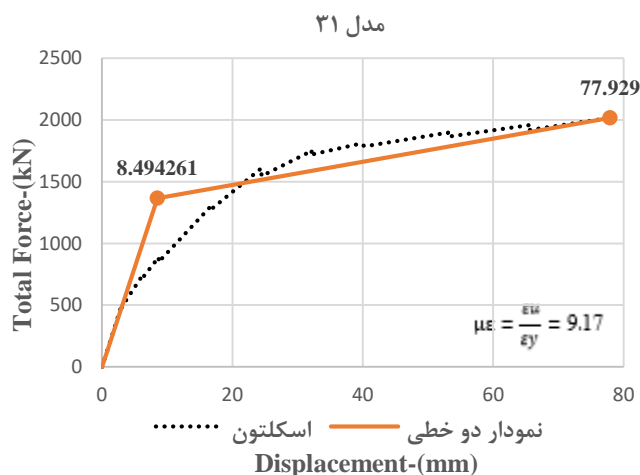
شکل ۲۴ الف) تقارن مرکزی سوراخ‌ها ب) نامتقارن مرکزی سوراخ‌ها

#### ۴- ارزیابی شکل‌پذیری نمونه‌های دیوار برشی ورق فولادی

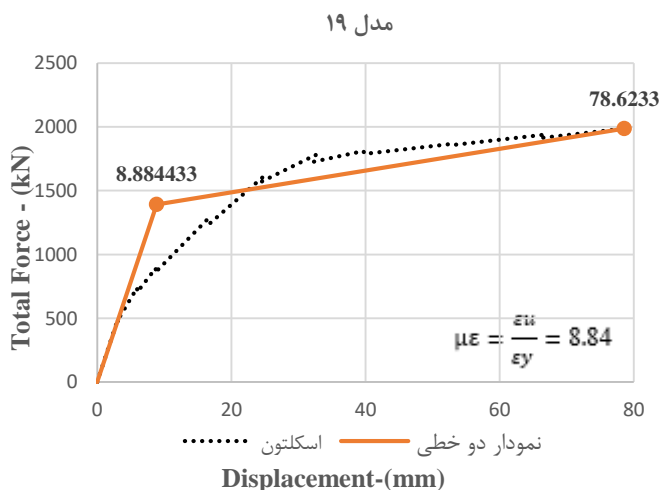
در این بخش به ارزیابی ضریب شکل‌پذیری مدل‌های ۱، ۱۹، ۳۱، ۴۲ و ۵۸ که در بخش ۳- ارزیابی انرژی مستهلک‌شده - دارای عملکرد سازه‌ای بهتری بودند پرداخته می‌شود. ضریب شکل‌پذیری به صورت نسبت کرنش متناظر با حد نهایی به کرنش متناظر با حد تسلیم تعریف می‌شود. اشکال ۲۵ تا ۲۹ منحنی اسکلتون<sup>۷</sup> و دوخطی نمونه‌ها و ضریب شکل‌پذیری، نقطه تغییر مکان نظیر جاری شدن و نقطه تغییر مکان نهایی هر نمونه را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده حاصل از نمودارها، نشان می‌دهد که مدل ۴۲ دارای بیشترین عدد شکل‌پذیری ۹/۶۱ است. ضریب شکل‌پذیری مدل ۴۲ با هندسه لوزی با قطر برابر ۳/۱۸ درصد از میانگین ضریب شکل‌پذیری ۴ مدل دیگر بیشتر است.



شکل ۲۵ نمودار اسکلتون و دو خطی مدل ۱

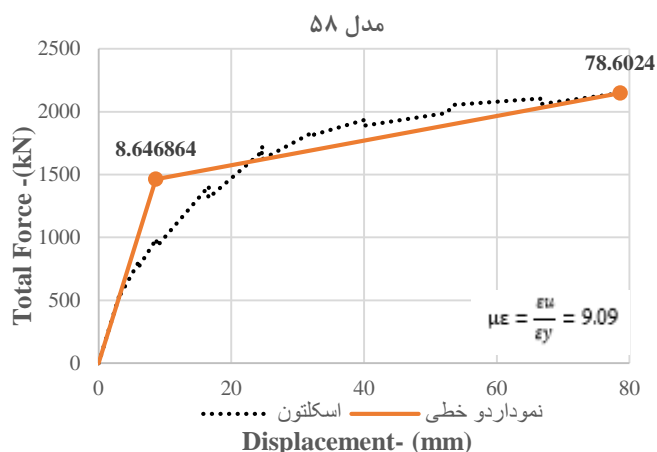


شکل ۲۷ نمودار اسکلتون و دو خطی مدل ۳۱

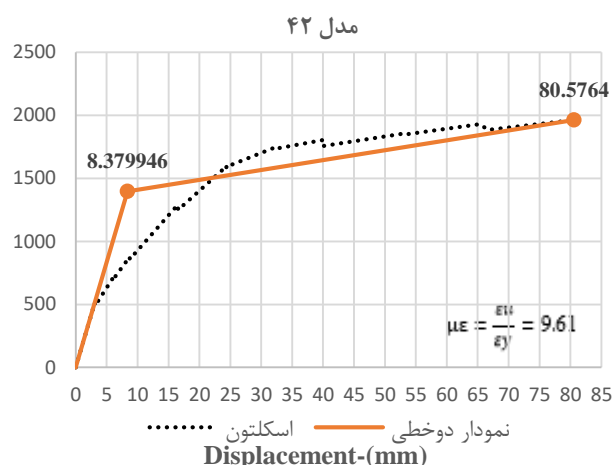


شکل ۲۶ نمودار اسکلتون و دو خطی مدل ۱۹

<sup>7</sup> Skeleton Curve



شکل ۲۹ نمودار اسکلتون و دو خطی مدل ۱۹

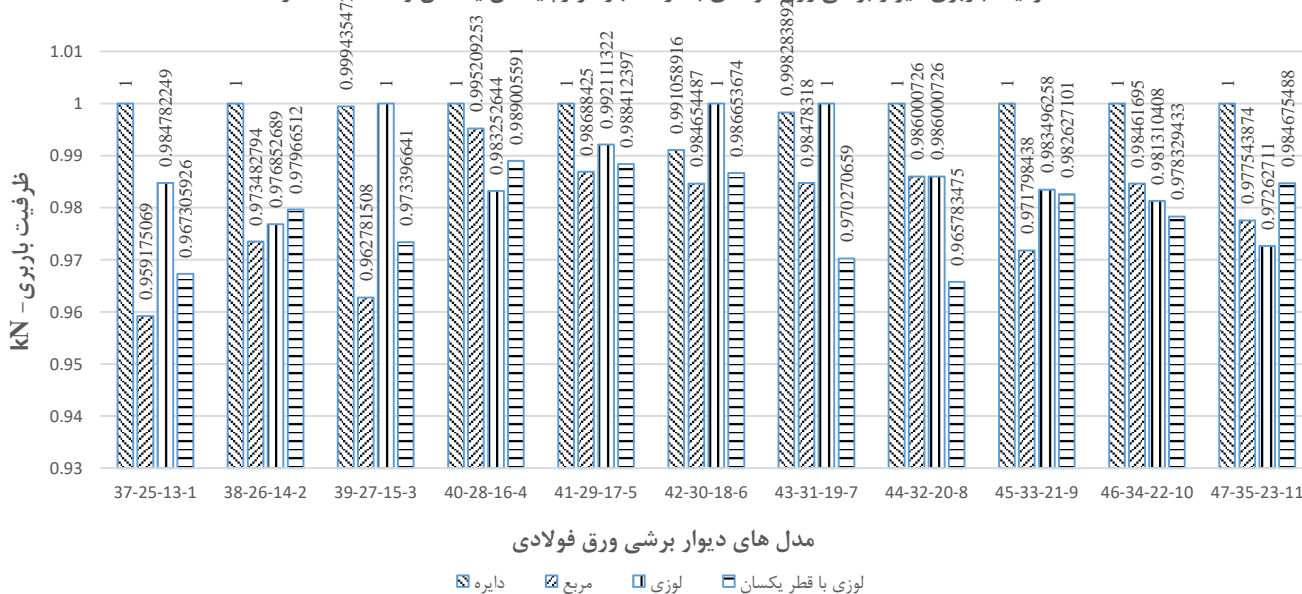


شکل ۲۸ نمودار اسکلتون و دو خطی مدل ۴۲

### ۵- ارزیابی ظرفیت باربری نمونه‌های دیوار برشی ورق فولادی

در این بخش به ارزیابی مقایسه‌ای ظرفیت باربری دیوارهای برشی ورق فولادی که در آن‌ها درصد سوراخ‌ها و چیدمان سوراخ‌ها ثابت و یکسان است با هندسه متفاوت پرداخته می‌شود. شکل ۳۰ نمودار مقایسه‌ای نرمالایزر ظرفیت باربری مدل‌های دیوار برشی که دارای درصد سوراخ و چیدمان یکسان و هندسه متفاوت هستند ارائه شده است.

ظرفیت باربری دیوار برشی ورق فولادی با درصد بازو و چیدمان یکسان و هندسه متفاوت



شکل ۳۰ نمودار نرمالایزر ظرفیت باربری دیوار برشی ورق

با بررسی نمودار مقایسه‌ای شکل ۳۰ می‌توان دریافت، مدل‌های دیوار برشی ورق فولادی که دارای سوراخ با هندسه دایره‌ای شکل هستند ۲ درصد از میانگین کل نمونه‌ها، دارای ظرفیت باربری بیشتری هستند.



## ۶- نتیجه گیری

۶۰ نمونه دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ با هندسه دایره‌ای، لوزی، مربع و لوزی با اضلاع برابر تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردید. با بررسی نتایج شامل منحنی‌های هیستریزیس، مقدار استهلاک انرژی، سطح زیر منحنی‌های هیستریزیس، ضریب شکل‌پذیری و ظرفیت باربری نمونه‌های عددی نتایج زیر حاصل شد.

از نقطه نظر انرژی مستهلک شده؛ با بررسی منحنی‌های هیستریزیس، درصد جذب انرژی و میزان ظرفیت باربری مدل‌های ارائه‌شده، مدل‌هایی که سوراخ ورق دیوار برشی دارای هندسه دایره‌ای شکل بودند، پاسخ‌های سازه‌ای مناسب‌تری در استهلاک انرژی داشتند. مدل‌های دیوار برشی که دارای بازشو با شکل هندسی دایره‌ای شکل بودند به میزان ۶۳/۶۴ درصد از کل نمونه‌های دیوار برشی دارای سوراخ، عملکرد مناسبی در استهلاک انرژی داشتند.

از منظر ظرفیت شکل‌پذیری؛ ضرایب شکل‌پذیری مدل‌های که در بخش ۳ مربوط به استهلاک انرژی، دارای عملکرد سازه‌ای مناسب‌تری بودند؛ با ارزیابی نمودارهای اسکلتون مدل‌ها، مدل ۴۲ با هندسه سوراخ لوزی شکل با قطر برابر دارای بیشترین ضریب شکل‌پذیری ۹/۶۱ بود. مدل ۴۲ دیوار برشی فولادی با هندسه بازشو لوزی با قطر برابر ۳/۱۸ درصد از میانگین ضریب شکل‌پذیری مدل‌های دیگر بیشتر است.

از منظر ظرفیت باربری؛ با بررسی نمودار مقایسه‌ای ظرفیت باربری کل نمونه‌های دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار مشاهده شد؛ نمونه‌های دیوار برشی ورق فولادی که دارای سوراخ با هندسه دایره‌ای شکل هستند، ظرفیت باربری آن‌ها ۲ درصد از میانگین ظرفیت باربری کل نمونه‌های دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار بیشتر است. از جمیع موارد مطرح شده در بخش نتیجه‌گیری می‌توان دریافت که:

در دیوارهای برشی ورق فولادی سوراخ‌دار، در صورتی که بازشوها به صورت متقارن در دیوار فولادی قرار گیرند مناسب‌ترین عملکرد سازه‌ای را در دیوار به وجود می‌آورند که باعث افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و میزان اتلاف انرژی این سیستم‌ها می‌گردد. در دیوارهای برشی ورق فولادی سوراخ‌دار، کاهش درصد بازشو تأثیر فراوانی بر پاسخ‌های سازه‌ای دیوار برشی فولادی دارد؛ که این امر نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده‌ی مقدار سطح سوراخ‌ها بر رفتار دیوار برشی فولادی است.

در مدل‌های دیوار برشی ورق فولادی دارای سوراخ، تقارن مرکزی نوارها سبب تشکیل چرخه‌های هیستریزیس پایدارتر نسبت به مدل‌های نامتقارن می‌گردد.

در صورت استفاده از آرایش مورب سوراخ‌ها در دیوار برشی ورق فولادی، در ابتدا بهتر است شکل بازشو به صورت هندسه دایره‌ای شکل باشد و از چیدمان مورب محل بازشوه‌های مدل عددی ۷ استفاده شود.

## مراجع

- [1] Zirakian T, Boyajian D . 2016. *Recent Studies on Steel Plate Shear Wall Systems*. California, USA. Journal of steel structure & construction, Volume 2 • Issue 1, 1000e104.
- [2] Keunyeong Oh, Heonjun Ha, Kangmin Lee. 2019. *An Analytical Study on Structural Performance Evaluation of Coupled Steel Plate Shear Wall Systems*. Int J steel Struct 19,1-13(2019). <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0082-2>.
- [3] Nassernia S, Showkati H. 2017. *Experimental study of opening effects on mid-span steel plate shear walls*. Journal of Constructional Steel Research. 137 (2017) 8–18.
- [4] Afshari J.M, Gholhaki M. 2018. *Shear strength degradation of steel plate shear walls with optional located opening*, archives of civil and mechanical engineering. 18 (2018) 1547 – 1561.
- [5] Anjan K.Bhawmick, Robert G. Driver, Gilbert Y.Gronidin. 2009. *Seismic Analysis of Steel Plate Shear Walls Considering Strain Rate and P-Delta Effects*. Journal of Constructional Steel Research, Volume 65, Issue 5, May 2009, pages 1149-1159.
- [6] vian D, Bruneau M, 2004, *Testing of special LYS steel plate shear wall*, 13th World conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. Canada, August 1-6,2004. Paper No.978.

- [7] Qian X, Astaneh-Asl A. 2016. *Development of a high-performance steel plate shear wall system*, University of California at Berkeley. Int. J. Earthquake and Impact Engineering, Vol. 1, Nos. 1/2, 2016.
- [8] Motaghi M.R, Vetr Gh.M, Ebrahimi S.K. 2014. Evaluation of the reduction of ductility and energy dissipation in perforated steel shear walls. *2<sup>nd</sup> international congress on structure, Architecture & urban Development*. Tabriz, Iran. 16-18 December.
- [9] Sabouri-Ghomi S, Ahouri E, Sajadi R, Alavi M, Roufegarinejad A, Bradford M.A. 2012. *Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening*. Journal of Constructional Steel Research 79 (2012) 91–100.
- [10] Adeli Y, Salehi S.S, Yadollahi Y. 2016. *Comparison of the effect of circular and elliptical holes on the behaviour of perforated steel shear walls*. 4<sup>th</sup> National conference on development of civil engineering, Architecture, Electricity And Mechanical. Iran, Gorgan, 22 December 2016.
- [11] Zahmatkesh A, Hossaine A. 2017. *Evaluation of hole shape in the behaviour of perforated steel shear walls*. 2<sup>nd</sup> NCMMAU. Iran, Mashhad. ISCEAU02\_007.