

## Investigating the behavior of corrugated steel shear wall with different hole patterns under lateral loading

Seyyed Ata Seyyed Hatami<sup>1</sup>, Adel Ferdousi<sup>2,3\*</sup>

1- M.Sc. of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

Steel plate shear walls are commonly classified into stiffened and unstiffened types. Research suggests that stiffened steel plate shear walls exhibit superior seismic performance and constructability; however, their intricate fabrication details result in higher costs. Recent innovations introduce corrugated steel plates as an alternative to flat plates in steel shear walls. This study investigates the performance of corrugated steel plate shear walls with and without perforations using the ABAQUS finite element software. Nine perforated and unperforated models were analyzed following model validation. Six perforation patterns with a diameter of 120 mm were compared. Results indicate that horizontal corrugation enhances ultimate strength by 16%, while vertical corrugation increases ultimate strength by 18%. Perforations in horizontal corrugated steel plate shear walls reduce ultimate strength compared to unperforated counterparts. Corrugated steel plate shear walls exhibit improved behavior factors compared to traditional steel shear walls, with the highest increase observed in horizontal corrugated plates (4%). The perforation pattern in corrugated plates also influences behavior factors and energy dissipation.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 January 2024

**Revise Date:** 04 May 2024

**Accept Date:** 05 June 2024

### Keywords:

Corrugated steel shear wall,  
Lateral loading,  
Finite element method,  
Hole pattern,  
Behavior factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.432594.3312](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432594.3312)

\*Corresponding author: Adel Ferdousi

Email address: a\_ferdousi@iaut.ac.ir

## بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار با الگوهای مختلف سوراخ تحت بارگذاری

### جانبی

سید عطا سیدحاتمی<sup>1</sup>، عادل فردوسی<sup>2,3</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

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

۳- مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

دیوارهای برشی فولادی معمولاً در دو نوع سخت شده و سخت نشده ساخته می‌شوند. مطالعات نشان داده انواع سخت شده از نظر عملکرد لرزه‌ای و نیز مسائل بهره‌برداری مناسب‌تر می‌باشند، ولی به دلیل جزئیات اجرایی فراوان هزینه زیادی در پی دارند. یکی از نوآوری‌هایی که اخیراً در دیوار برشی فولادی بکار برده می‌شود، استفاده از ورق موج‌دار بجای ورق‌های ساده است. ایده جایگزینی دیوار برشی فولادی موجدار بعنوان دیوار برشی فولادی سخت شده در سالهای اخیر مطرح شده و نتایج مطلوبی نیز بدست آمده است. در این پژوهش، نه مدل مختلف دارای سوراخ و بدون سوراخ با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS پس از صحت سنجی مدلسازی و تحلیل شده است. شش نوع چیدمان سوراخ با قطر 120 میلی‌متر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با موجدار کردن ورق (افقی) مقاومت نهایی حدود 16٪ افزایش یافته است، همچنین، با موجدار کردن ورق قائم مقاومت نهایی به اندازه 18٪ افزایش یافته است. با ایجاد سوراخ در مدل دیوار برشی موجدار (افقی) مشاهده گردید که مقاومت نهایی نسبت به نمونه بدون سوراخ کاهش را نشان می‌دهد. با موجدار کردن ورق دیوار برشی ضریب رفتار نسبت به نوع سنتی آن افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش مربوط به دیوار برشی فولادی موجدار افقی به میزان 4٪ می‌باشد. همچنین الگوی سوراخ در ورق موجدار در ضریب رفتار و جذب انرژی تأثیر دارد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی موجدار، الگوی سوراخ، بارگذاری جانبی، روش اجزا محدود، ضریب رفتار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432594.3312">10.22065/jsce.2024.432594.3312</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432594.3312">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432594.3312</a>	/11/30 1403	/11/30 1403	/03/16 1403	/02/15 1403	1402/10/21
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				عادل فردوسی		
				<a href="mailto:a_ferdousi@iaut.ac.ir">a_ferdousi@iaut.ac.ir</a>		

## 1- مقدمه

از سازه‌های اسکلت فولادی با توجه به سرعت اجرا، شکل‌پذیری مناسب و ابعاد مقاطع کوچکتر به‌طور گسترده حتی در مناطق لرزه‌خیز استفاده می‌شود. سیستم‌های سازه‌ای فولادی شامل سیستم مهاربندی، قاب خمشی و دیوار برشی فولادی می‌باشد که در چهار دهه اخیر سیستم دیوار برشی فولادی به دلیل سختی اولیه زیاد، مقاومت نهایی بالا، جذب انرژی و شکل‌پذیری زیاد و سادگی اجرا مورد توجه قرار گرفته است. در کنار مزایای این سیستم یکی از مهم‌ترین معایب آن کماتش ورق فولادی می‌باشد که این کماتش به علت مقاومت ناچیز ورق در راستای عمود بر صفحه رخ می‌دهد که برای رفع این مشکل از سخت‌کننده استفاده می‌شود که سبب افزایش وزن سازه و هزینه تمام‌شده آن می‌شود [1]. استفاده از دیوار برشی فولادی موج‌دار باعث جلوگیری از کماتش زودهنگام ورق فولادی می‌شود در نتیجه، سختی اولیه، جذب انرژی و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به دیوار برشی فولادی معمولی دارد. دیوارهای برشی فولادی برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمان‌ها به ویژه در ساختمان‌های بلند، در سه دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم نوین که در جهان به سرعت رو به گسترش است، در ساخت ساختمان‌های جدید و همچنین، تقویت ساختمان‌های موجود به خصوص در کشورهای زلزله‌خیزی همچون آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است [2]. استفاده از آن‌ها در مقایسه با قاب‌های خمشی تا حدود 50 درصد صرفه-جویی در مصرف فولاد را به همراه دارد. از آن جا که ایده رسیدن به تنش تسلیم پایین در ورق‌های فولادی با مصالح LYS کمی دور از دسترس و هزینه‌بر می‌باشد، ایده استفاده از دیوار برشی فولادی سوراخدار شکل گرفت که می‌تواند جایگزینی مناسب برای رسیدن به تنش تسلیم پایین در ورق فولادی و بهینه‌سازی اعضای مرزی باشد. در واقع، هدف اصلی در دیوار برشی سوراخدار کاهش تجمعی ظرفیت ورق از طریق تعبیه سوراخ‌هایی است که با نظم و ضوابط خاصی طراحی شده‌اند [3].



شکل 1: فلوجارت روند انجام تحقیق

قلهکی و همکاران در سال 2013 بر روی مدل‌های 3، 7، 15 و 20 طبقه به وسیله طیف‌های نزدیک، دور از گسل و آیین‌نامه 2800 ایران، تحلیل تاریخچه زمانی انجام دادند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که برش و تغییر مکان نسبی بام برای سازه‌ها کوتاه مرتبه در حوزه دور و نزدیک گسل بیشتر است [4]. در سال 2014 چهار مدل 3، 7، 15 و 25 طبقه با دیوار برشی فولادی جدار نازک، به وسیله‌ی تحلیل‌های تاریخچه زمانی تحت چهار زوج شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل قرار داده شده است. در پژوهش مذکور برش و زاویه دریافت طبقات در حوزه دور از گسل، به دلیل آثار بیشتر مودهای بالاتر، بیشتر از حوزه نزدیک گسل مشاهده گردیده است [5]. در سال 2014 یداللهی و همکاران به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی به بررسی عددی رفتار غیرخطی دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای پرداخته شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که دیوار با ابعاد ثابت ورق موجدار دوزنقه‌ای نسبت به ورق موجدار سینوسی از اتلاف انرژی، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی بالاتری برخوردار بوده و همچنین، مقدار فولاد مصرفی کاهش پیدا می‌کند [6]. فرزام‌پور و همکاران در سال 2014 به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دارای بازشو و بدون بازشو پرداختند. آن‌ها در این پژوهش یک سری نمونه‌های دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در نرم‌افزار ABAQUS مورد تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای موجب افزایش سختی اولیه سیستم شده و باعث به تعویق افتادن مقاومت نهایی در مقایسه با دیوار برشی فولادی ساده می‌گردد [7]. کلالی و همکاران در سال 2016 به بررسی عددی دیوار برشی فولادی موجدار سینوسی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که صفحه فولادی با زاویه 30 درجه کاملاً نسبت به ضخامت ورق حساس می‌باشد. به طوری که با افزایش ضخامت ورق از 1/25 به 6 میلی‌متر، مقاومت نهایی قابل تحمل توسط سیستم 3/8 برابر شده است [8]. در سال 2018 پنگ<sup>1</sup> و همکارانش با در نظر گرفتن یک ساختمان اداری 6 طبقه به عنوان نمونه، بر مبنای تئوری طراحی مقاومت برشی اعضای فولادی یک روش طراحی برای دیوار برشی فولادی موجدار ارائه شد که در آن راستای موج، انتخاب شکل موج، ضخامت ورق و مقاومت اتصالات و مفاصل در نظر گرفته شد. در طراحی مدل نمونه، از فولاد Q235 برای ورق فولادی موجدار و فولاد Q345 برای اعضای مرزی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش طراحی ارائه شده، کاربردی و موثر می‌باشد [9]. تانگ<sup>2</sup> و همکاران رفتار کماتش برشی الاستیک و مقاومت برشی الاستوپلاستیک افقی را با سفت کننده‌های عمودی بررسی کردند. نتایج به این شکل شد: اثر مهار خارج از صفحه سفت کننده‌ها بر روی ورق فولادی موجدار تأثیر مثبتی بر عملکرد هیسترتیک دارد. استفاده از سخت کننده‌ها تأثیر قابل توجهی بر منحنی‌های اسکلت و صلبیت‌های مقطعی دیوار برشی صفحه فولادی موجدار دارد. [10] در همین سال، یداللهی و همدانی به بررسی دیوارهای برشی فولادی موجدار سینوسی تحت بار جانبی پرداختند. بر اساس این پژوهش، قاب‌های با ورق‌های دارای سخت کننده سختی بیشتری نسبت به ورق‌های موجدار دارند، اما در مقابل، دیوار برشی فولادی با ورق سینوسی شکل دارای ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و وزن کمتری نسبت به نمونه‌ی دارای سخت کننده بوده است. [11] در سال 1391، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی دیوارهای برشی فولادی با ورق موجدار سینوسی و دوزنقه‌ای توسط قلی‌زاده و یداللهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دیوارهای با ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای، دارای ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به ورق‌های سینوسی شکل هستند، اما اتلاف انرژی و سختی تقریباً یکسانی دارند. [12] در سال 2016 راجیو<sup>3</sup> و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود انسیس به بررسی و مقایسه رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تحت بارگذاری رفت و برگشتی و یکنواخت پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضخامت ورق یک پارامتر هندسی بسیار مؤثر در دیوار برشی فولادی است. به طوری که افزایش کمی در ضخامت ورق منجر به افزایش زیاد سختی اولیه سیستم می‌شود. این

<sup>1</sup> Xiao-Tong PENG

<sup>2</sup> Tong

<sup>3</sup> Rajeev

رفتار دیوار برشی می‌تواند تقاضای غیر سازه‌ای را تحت اثر زلزله کاهش دهد. [13]. در سال 1394، آقابرانی و حسینی با استفاده از تحلیل غیرخطی به روش اجزای محدود به بررسی اثر پارامترهای مختلف مؤثر در تغییر شکل هندسی موج‌های سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای بر رفتار دیوار برشی فولادی موج‌دار و مقایسه‌ی آن‌ها پرداختند. نتایج عددی به دست آمده نشان داد مقاومت اولیه، مقاومت نهایی، میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری نمونه‌های موج‌دار قائم نسبت به نمونه‌های موج‌دار افقی بیشتر است. [14] شون<sup>4</sup> و همکاران در سال 2017 به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای پرداختند. به منظور بررسی رفتار سیستم از بارگذاری رفت و برگشتی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای 1/7 تا 1/9 برابر قاب خمشی تنها می‌باشد و نیز در اثر ایجاد مفاصل پلاستیک در ورق فولادی موج‌دار، جذب انرژی نیز با مقایسه با قاب خمشی معمولی 2/1 برابر افزایش یافته است. [15] حسین‌زاده و همکاران در سال 2017 به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای با زوایای مختلف پرداختند. در این پژوهش اثرات تغییر زاویه موج با سه نمونه با زاویه موج 30، 45 و 60 درجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، تمرکز تنش در گوشه ورق افزایش می‌یابد. همچنین گسترش و تشکیل میدان کشش قطری و گسیختگی دیوار به هندسه ورق وابسته است. با افزایش زاویه ورق، سختی و اتلاف انرژی و مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است. [16] یانگ و همکاران در سال 2016 به بررسی مودهای خرابی و پارامترهای کلیدی دیوار برشی فولادی موج‌دار پرداختند. دیوار برشی فولادی موج‌دار برای مهار کمانش مؤثر و اقتصادی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی مودهای خرابی، کمانش و ظرفیت نهایی بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق موج‌دار، دیوار برشی فولادی موج‌دار سه مود خرابی دارد که شامل کمانش در ورق موج‌دار، خرابی در تیر و خرابی در ستون می‌شود. [17] شهبان و همکاران در سال 1395 به تعیین آسیب‌پذیری لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار پرداختند و به منظور مقایسه و ارزیابی رفتار لرزه‌ای آن‌ها منحنی‌های شکنندگی تولید و ترسیم کردند. نتایج نشان داد که استفاده از ورق موج‌دار به جای ورق صاف، مستقیماً بر ظرفیت نهایی سیستم اثر گذار است. ورق موج‌دار قائم بیشترین مقدار ظرفیت را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. عملکرد دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای نسبت به دیوار برشی فولادی موج‌دار سینوسی بهتر است. [18] در سال 2019 دسوک<sup>5</sup> و همکاران، به بررسی ظرفیت نهایی دیوار برشی فولادی موج‌دار با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. در این پژوهش 30 مدل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ورق موج‌دار به جای ورق صاف، مستقیماً بر ظرفیت نهایی سیستم اثر گذار است [19] یانگ<sup>6</sup> و همکاران در سال 2023 به بررسی عملکرد جانبی دیوارهای برشی صفحه فولادی موج‌دار که به صورت عمودی فقط با تیرها متصل شده است می‌پردازد. یک مدل عددی توسعه داده شد و توسط یک آزمایش آزمایشگاهی تأیید شد. بر اساس مدل عددی تأیید شده، تحلیل‌های پارامتری گسترده‌ای برای بررسی اثرات پارامترهای کلیدی بر عملکرد برشی، از جمله نسبت ارتفاع، نسبت ابعاد، نرخ باز شدن و سختی قاب اطراف انجام شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد: 1- سختی و استحکام اولیه با نسبت ارتفاع به ضخامت رابطه منفی دارد 2- لبه‌های آزاد CSP<sup>v</sup> ها تحت فشار به راحتی کمانش و تغییر شکل می‌دهند، و این دلیلی است که از خواص مکانیکی CSP<sup>v</sup> ها در Cbo SPSW<sup>8</sup> ها به طور کامل استفاده نمی‌شود. [20] در سال 2023، بررسی رفتار یک دیوار برشی فولادی متشکل از دو صفحه موج‌دار در دو مورد مصالح فولاد معمولی ASTM A36 و فولاد با نقطه تسلیم پایین (LYP) توسط حسین‌زاده و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فولاد LYP رفتار لرزه‌ای دیواره‌های دابل موج‌دار را بهبود می‌بخشد و دیوارهایی با هر دو مصالح (A36 و LYP)، با افزایش  $\theta$

<sup>4</sup> Shon<sup>5</sup> Dessouki<sup>6</sup> Qiang<sup>7</sup> Certificated Systems Professional<sup>8</sup> Double corrugated steel plate shear wall

عملکرد لرزه ای دیوار کاهش می یابد.[21] در این تحقیق، عملکرد چرخه ای دیوارهای برشی دو صفحه فولادی موجدار (*DCSPSWs*) به صورت تجربی بررسی و به صورت عددی تایید شده است. سه نمونه نیمه مقیاس یک طبقه تک خلیج با طرح های مختلف صفحه پرکننده ساخته و تحت بارهای چرخه ای جانبی آزمایش شدند. نتایج نشان داد که بدون در نظر گرفتن طراحی صفحه پرکننده، *DCSPSWs* منحنی پسماند دوکی شکل با عملکرد چرخه ای خوب داشتند. با این حال، *DCSPSW* متصل فقط به پرتو مقاومت بار جانبی کمی کمتر نشان داد. مدل های اجزای محدود (FE) نمونه ها توسعه داده شد و نتیجه آنالیزها با آزمایش های تجربی مقایسه شد.[22] صبوری و همکاران در سال 2021 رفتار دیوارهای برشی فولادی با صفحات سوراخ دار را بررسی کردند. برای انجام مطالعه پارامتریک تأثیر سوراخ ها با اشکال هندسی مختلف بر روی آنها. دیوار برشی، روش گذاشتن و سوراخ گذاری دیوار برشی بر عملکرد سازه، از نظر میزان جذب انرژی، ظرفیت باربری کل سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پارامتریک بر روی 60 مدل المان محدود تحت بارگذاری چرخه ای از نوع جابجایی نشان داد که در صورت استفاده از درصد سوراخ یکسان، حداکثر ظرفیت باربری به مدل دیوار برشی با سوراخ هایی با هندسه دایره ای نسبت داده می شود که بهترین رفتار لرزه ای را نشان می دهد.[23] در سال 1399 مجیدی نیا و همکارانش، نمونه ی آزمایشگاهی چوبی<sup>9</sup> و پارک<sup>10</sup> برای راستی آزمایی انتخاب و پس از اطمینان از درستی نتایج، تعداد 8 نمونه ی دیوار برشی فولادی با ورق موج دار توسط نرم افزار *ABAQUS* مدل سازی گردید. نتایج عددی نشان دادند که پایداری چرخه های منحنی هیستریزیس در نمونه با ضخامت ورق 8 میلی متر ثابت نبوده، به طوری که در گام های آخر بارگذاری، افت مقاومت و کمانش موضعی در چرخه های بارگذاری مشاهده شده است.[24]

با توجه به تحقیقات پیشین، در این تحقیق به بررسی الگوی چیدمان سوراخ در دیوارهای برشی فولادی موجدار پرداخته شد. بدین منظور مدل اجزای محدود دیوار برشی فولادی موجدار پس از انجام صحت سنجی با مدل های آزمایشگاهی ایجاد شده در نرم افزار *ABAQUS* مدل سازی و الگوی چیدمان سوراخ در دیوار برشی فولادی موجدار مورد ارزیابی و مقایسه قرار می گیرند. همانطور که بیان شد، هدف اصلی در دیوار برشی سوراخدار کاهش تعمدی ظرفیت ورق از طریق تعبیه سوراخ هایی است که با نظم و ضوابط خاصی طراحی شده اند. پارامترهای زاویه قرارگیری سوراخ ها، قطر سوراخ، فاصله سوراخ ها، نوع آرایش سوراخ ها بر رفتار دیوار برشی فولادی اثرگذار است که همه این موارد در حالت دیوار برشی موجدار بررسی شده است.

## 2- مراحل و روش تحقیق حاضر

### 2-1- صحت سنجی

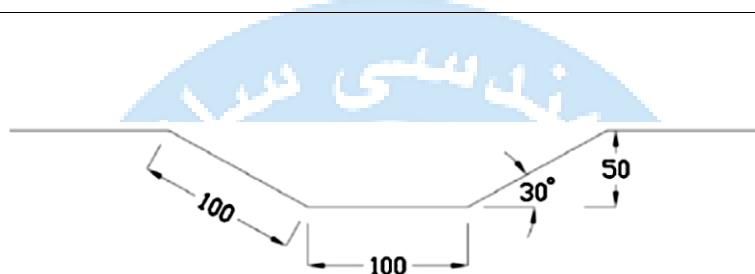
در این تحقیق به منظور صحت سنجی نرم افزار *ABAQUS* از مدل آزمایشگاهی امامی و همکاران [25] استفاده شده است. در این پژوهش از مدل کشسان مومسان برای تعریف نمودار تنش - کرنش فولاد استفاده شده است. طول و ارتفاع تمامی دیوارهای تحت بارگذاری به ترتیب برابر با 2320 میلی متر و 1640 میلی متر است. همچنین طول و عرض ورق جان دیوار برشی فولادی به ترتیب برابر با 2000 میلی متر و 1500 میلی متر است. ستونها از نوع HEB160 و تیر از نوع HEB140 هستند که متناسب با IPB160 می باشند. نحوه ی اتصال تیر به ستون به صورت گیردار می باشد. از ورق های موجدار دوزنقه ای به ضخامت 1.25 میلی متر استفاده شده است. بارگذاری از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در بالای قاب اعمال گردیده است در تحقیق آنها، سه نمونه دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه ای افقی و قائم و همچنین، جهت مقایسه یک دیوار برشی فولادی ساده مورد آزمایش قرار گرفت. در

<sup>9</sup> Choi  
<sup>10</sup> Park

نمونه‌های موجدار، از ورق سرد نورد شده با زاویه موج 30 درجه استفاده شد. در مطالعه حاضر، از مدل کشسان-مومسان برای تعریف نمودار تنش- کرنش فولاد استفاده شده است. این رفتار در فشار و کشش یکسان می‌باشد. همچنین، ضریب کشسانی مصالح در بار برداری برابر با ضریب کشسانی اولیه فرض می‌گردد. مشخصات فولادهای مصرفی در این راستی آزمایی در جدول (1) آورده شده است.

جدول 1: مشخصات فولادهای مصرفی

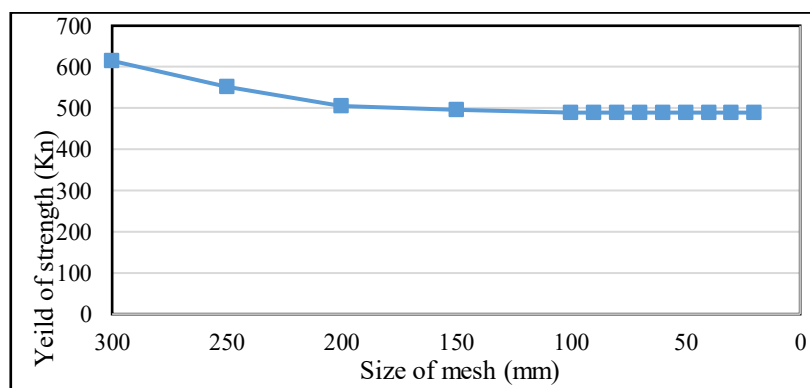
نوع عضو	ضریب کشسانی E (GPa)	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)	ضریب پواسون
ورق	210	207	290	0/3
ستون	210	300	443	0/3
تیر	210	288	456	0/3



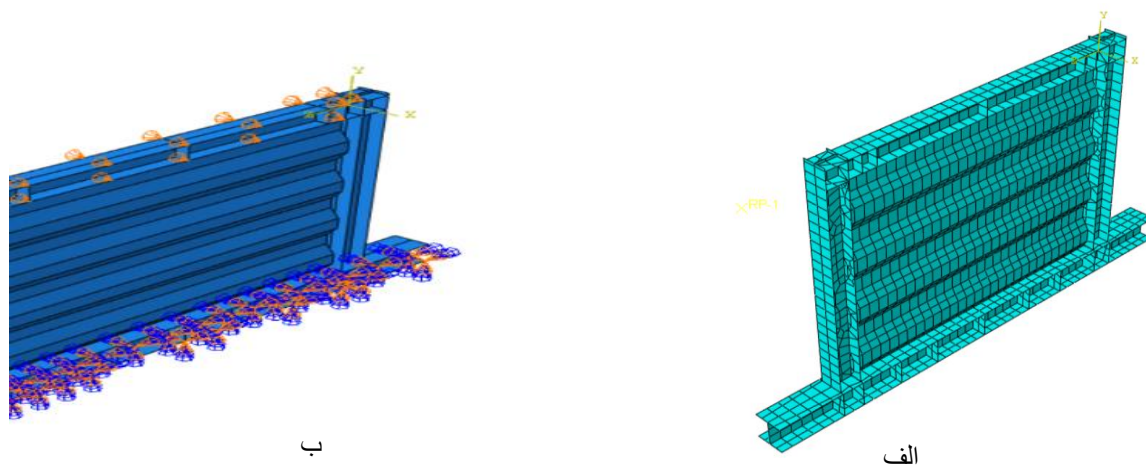
شکل 2: مشخصات هندسی ورق موجدار دوزنقه‌ای [25 و 26]

## ۲-۲- تحلیل حساسیت مش بندی و شرایط مرزی

پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف شکل (3) از جزءهای 75 میلی متری به‌عنوان حالت مناسب استفاده شد. شکل (4) نحوه شبکه‌بندی دیوار برشی فولادی را نشان می‌دهد.



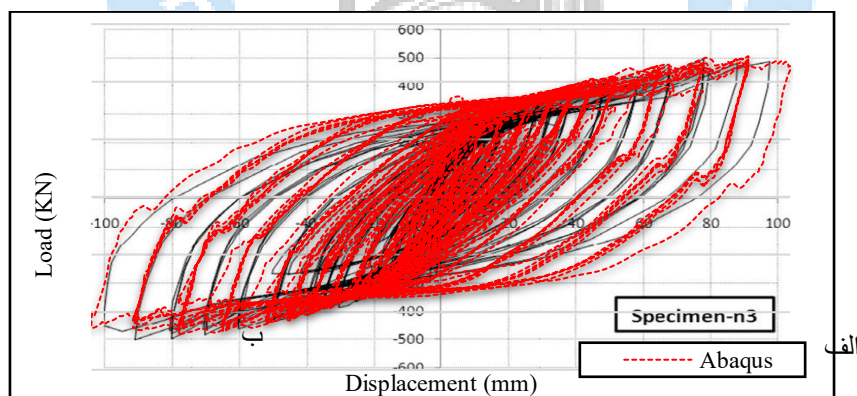
شکل 3: مقایسه‌ی اندازه‌ی شبکه‌بندی‌های مختلف



شکل 4: الف) نحوه‌ی شبکه‌بندی دیوار برشی فولادی موجدار شکل 5: ب) شرایط مرزی ایجاد شده در مدل

شرایط مرزی: چون مدل ما دوبعدی هست و مدل ما در صفحه X, Z هست مجبوریم مدلمان را در محور Y (توسط گره) ببندیم که تغییر مکان ندهد.

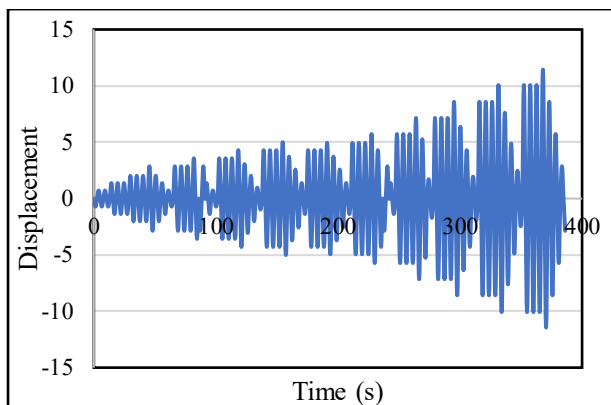
### 3-2- نمودار هیستریزس مربوط به صحت سنجی



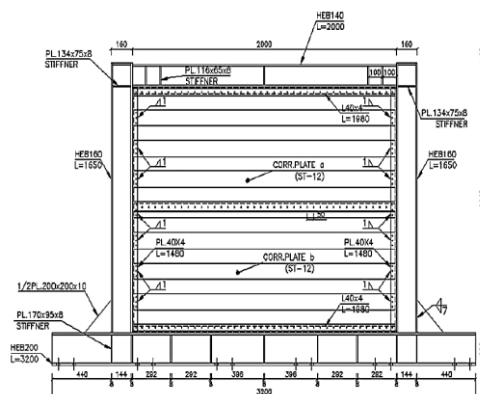
شکل 3: نمودار مقایسه‌ی بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود نمونه‌ی موجدار افقی

در نمونه‌ها اثر بار ثقلی در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، از حرکت خارج از صفحه‌ی تیر و ستون‌ها جلوگیری به عمل آمده است. ورق‌های سخت‌کننده‌ی استفاده شده در نقاط بحرانی تیر و ستون‌ها دارای ضخامت 8 میلی‌متر هستند. جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل (4) نشان داده شده است. همچنین، بارگذاری از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در بالای قاب اعمال گردیده است. الگوی بارگذاری در شکل (5) نشان داده شده است [27,28].





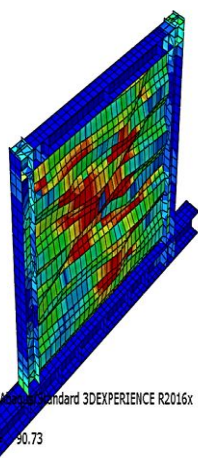
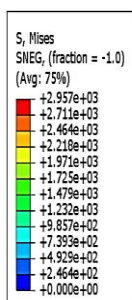
شکل 5: الگوی بارگذاری بر اساس تغییر مکان



شکل 4: جزئیات دیوار موجدار افقی

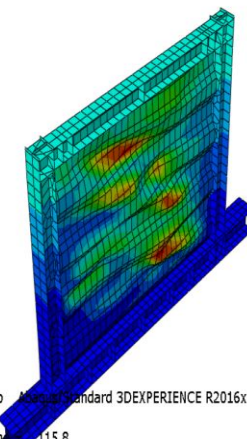
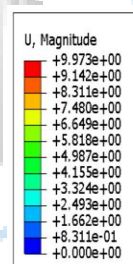
MAX Abaq	490.73	اختلاف %	0.127876
Max Exp	490		

به طوریکه ملاحظه می شود اختلاف از یک درصد هم کمتر بوده و در حد قابل قبول است و مشاهده می شود که در نرم افزار *ABAQUS* دیوار برشی موجدار به درستی مدل سازی شده است.



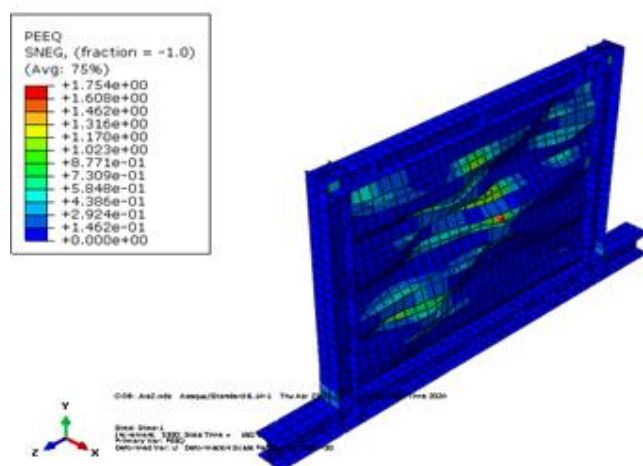
ODB: Job-2-verification.odb Analysis: Standard 3DEXPERIENCE R2016x Sun Feb 06 14:42:34 Iran Standard Time  
Step: Step-1  
Increment: 3650; Step Time: 90.73  
Primary Var: S, Mises

شکل 7: تنش فون میسز نمونه‌ی موجدار افقی



ODB: Job-2-verification.odb Analysis: Standard 3DEXPERIENCE R2016x Sun Feb 06  
Step: Step-1  
Increment: 4410; Step Time: 115.8  
Primary Var: U, Magnitude

شکل 6: تغییر مکان نمونه‌ی موجدار افقی



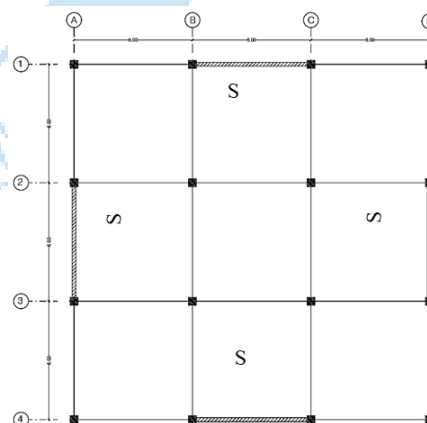
شکل 8: کرنش پلاستیک معادل

## 2-4- طراحی دیوار برشی فولادی

در این پژوهش برای بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی موجدار با الگوهای مختلف سوارخ در ورق میانی، یک ساختمان 10 طبقه در نظر گرفته‌ایم (شکل 9). در این پلان در هر راستا 2 دیوار برشی فولادی قرار گرفته است مشخصات ساختمان مذکور در جدول (2) آورده شده است. ارتفاع هر طبقه 320 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای تمامی اعضای سیستم لرزه‌ای از فولاد St37 با مقاومت تسلیم 2400 کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده شد. برای محاسبه بار ثقلی از ترکیب بار  $1.2D+0.5L$  استفاده شد. در نتیجه وزن هر یک از طبقات 1 تا 9 برابر است با 495966/4 کیلوگرم و وزن طبقه بام برابر با 398133/2 کیلوگرم است و در نتیجه وزن کل ساختمان برابر با 4861830/8 کیلوگرم می‌باشد.

جدول 2: مشخصات ساختمان

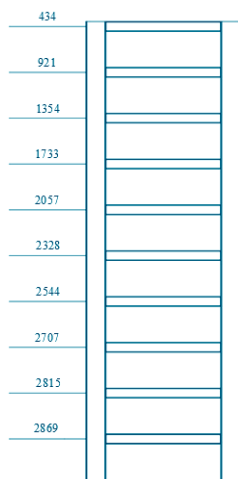
مشخصات	
0/35	(A) شتاب مبنای طرح
1	(I) ضریب اهمیت
8	(R) ضریب رفتار
III	نوع خاک



شکل 9: مشخصات پلان طراحی

در این پژوهش SPSW-1<sup>11</sup> طراحی و مورد بررسی قرار گرفت. برای طراحی اولیه باید نیروی برشی در هر طبقه تعیین شود. در جدول (3) نیروی برشی برای هر طبقه محاسبه شده است. در شکل (10) توزیع نیروی برشی در طبقات نشان داده شده است. این میزان نیروی برشی اساس محاسبات اولیه مقاطع و مشخصات هندسی سیستم دیوار برشی فولادی است.

<sup>11</sup> Steel Plate shear- wall



شکل 10: توزیع نیروی برشی در طبقات (KN)

جدول 3: نیروی برشی در هر طبقه

طبقه	$F_i$ (KN)	$V_i$ (KN)
10	869	869
9	974	1843
8	866	2708
7	757	3466
6	649	4115
5	541	4656
4	433	5089
3	325	5414
2	216	5630
1	108	5738

## ۲-۵- طراحی اولیه ورق فولادی

در طراحی اولیه از آنجایی که ابعاد هندسی تیرها و ستون‌ها مشخص نیست، لذا فرض می‌شود که صفحه جان در هر طبقه در برابر برش کل آن طبقه مقاومت نماید. به دلیل اینکه زاویه میدان کششی در صفحه جان به مشخصات سطح مقطع تیر و ستون، ضخامت صفحه جان و ابعاد قاب وابسته است، لذا زاویه میدان کششی در طراحی اولیه فرض می‌شود. طراحی‌های معمول نشان می‌دهد که مقدار زاویه میدان کششی در محدوده 30 تا 55 درجه متغیر است. لذا در اینجا زاویه  $\alpha$  برابر 40 درجه فرض می‌گردد. بر اساس این زاویه فرضی، ضخامت اولیه ورق جان با مساوی قرار دادن برش پایه حاصل از تحلیل استاتیکی با مقاومت موردنیاز صفحه جان به دست می‌آید. لذا مقدار ضخامت موردنیاز صفحه جان بر اساس رابطه (1) می‌باشد [28].

$$V_u = \phi 0.42 F_{y(\text{plate})} t_w L_{cf} \sin 2\alpha \quad (1)$$

در این رابطه  $F_{y(\text{Plate})}$  تنش تسلیم فولاد،  $t_w$  ضخامت ورق فولادی،  $L_{cf}$  طول مفید ورق فولادی و  $\alpha$  زاویه تشکیل میدان کشش قطری نسبت به محور قائم می‌باشد. که بر اساس این رابطه حداقل ضخامت ورق فولادی از رابطه (2) قابل محاسبه است.

$$t_w \geq \frac{V_u}{\phi 0.42 F_{y(\text{plate})} L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (2)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید  $V_u$  مقاومت برشی موردنیاز بر اساس روش LRFD و  $\Phi$ ، ضریب ایمنی می‌باشد که طبق آیین‌نامه AISC341 [29] برابر 0/9 پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که در رابطه فوق  $L_{cf}$  طول خالص صفحه ورق می‌باشد که باتوجه به اینکه در این مرحله فعلاً ابعاد ستون مشخص نیست، لذا در رابطه فوق  $L_{cf}$  برابر طول دهانه یا همان  $L$  در نظر گرفته می‌شود. باتوجه به اینکه زاویه میدان کششی قطری نیز وابسته به مشخصات قاب و ورق فولادی در هر طبقه است، لذا بایستی فرضیاتی برای به دست آوردن ابعاد اولیه لحاظ شود. ضخامت موردنیاز برای ورق فولادی در طبقه اول برابر با رابطه (3) است. سایر مقادیر ضخامت‌ها در طبقات دیگر در جدول (4) ارائه شده است. بر اساس ضخامت انتخابی مقاومت برشی طراحی صفحه بر اساس ضخامت انتخابی ( $\phi V_n$ ) و نسبت تقاضا به ظرفیت  $\frac{V_u}{\phi V_n}$  در جدول (5) ارائه شده است.

$$t_w = \frac{292.5 \times 10^3}{0.9 \times 0.42 \times 2400 \times 600 \times \sin(2 \times 40)} = 0.54 \text{ cm} \quad (3)$$

جدول 4: محاسبه ضخامت ورق فولادی در هر طبقه

جدول 5: مقایسه نسبت تقاضا به ظرفیت در طبقات مختلف

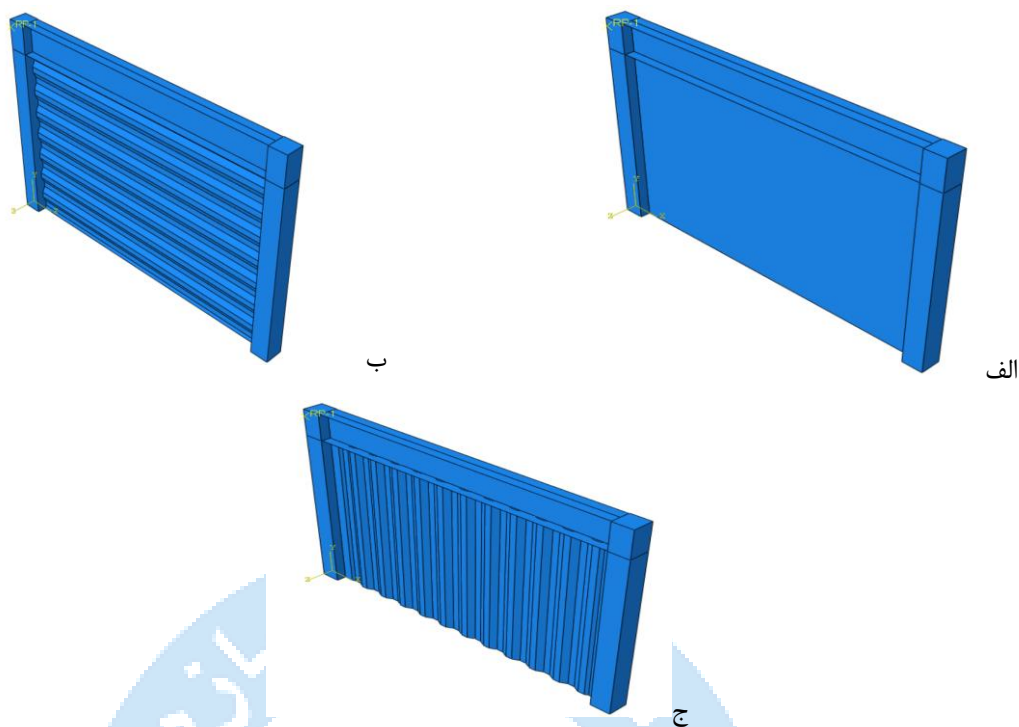
ضخامت ورق انتخابی (mm)	$\phi V_n = 0.42 F_y t_w L_{cf} \sin(2\alpha)$ (KN)	$V_u$ (kN)	$(\frac{V_u}{\phi V_n})$	طبقه	$V_i$ (KN)	$\alpha$	ضخامت (mm)
10	595	434	0.73	10	434	40	1
9	1191	921	0.77	9	921		2
8	1786	1354	0.75	8	1354		3
7	2084	1733	0.83	7	1733		3.5
6	2382	2058	0.86	6	2057		4
5	2978	2328	0.78	5	2328		5
4	2978	2544	0.85	4	2544		5
3	3275	2707	0.83	3	2707		5.5
2	3275	2815	0.86	2	2815		5.5
1	3275	2869	0.876	1	2869		5.5

## 2-6- المان‌های مورد استفاده در نرم‌افزار ABAQUS

برای مدل سازی تمام اعضای مرزی و ورق فولادی در نرم‌افزار ABAQUS، از المان پوسته (S4R) استفاده شده است که یک المان چهار گرهی دو انحنایی با انتگرال گیری کاهش یافته است. هر گره از این المان 6 درجه آزادی یعنی 3 درجه آزادی دورانی و 3 درجه آزادی انتقالی دارد.

## 2-7- مدل سازی و مشخصات مصالح در ABAQUS

برای مدل سازی در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS [30]، همانند مدل صحت سنجی از المان پوسته‌ای استفاده شد. در این حالت برای تیر و ستون، لبه‌های بیرونی (پشت تا پشت مقطع المان) به عنوان مقطع المان در محیط ABAQUS ترسیم و سپس طول عضو به آن اختصاص داده شد. در شکل (11 الف تا ج) مدل‌های دیوار برشی فولادی، موجدار افقی و قائم داده شده است. همچنین، در مرحله بعد ضخامت هر جز از المان‌ها در محیط مشخصات مصالح تعریف و به آن‌ها اختصاص داده شد. همان‌طور که در طراحی اولیه دیوار برشی فولادی گفته شد، در تمامی المان‌ها از فولاد نوع St37 با تنش تسلیم 240 مگاپاسکال و غیر خطی از نوع سخت شدگی سینماتیک بهره گرفته شد. برای مدل سازی تیر و ستون و دیوار برشی نیز از المان پوسته‌ای استفاده شده است.

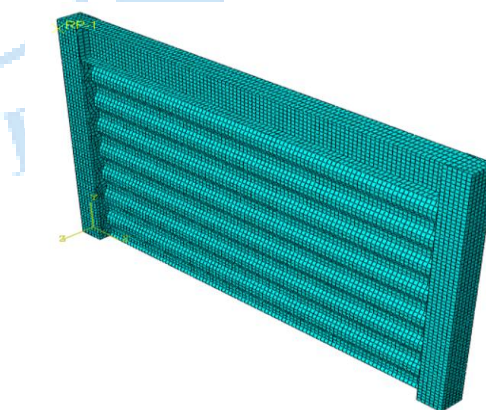


شکل 11: الف: مدل دیوار برشی، ب) مدل دیوار برشی موجدار (افقی)، ج) مدل دیوار برشی موجدار قائم

برای مش بندی همانند مدل صحت سنجی از مش 4 گره‌ای به اندازه 50 میلی‌متر استفاده شد که در شکل (12) مش بندی مدل دیوار برشی موجدار افقی نشان داده شده است. در این مدل‌ها پایین ورق و ستون کاملاً مقید شده و جان تیر به منظور شبیه سازی رفتار 2 بعدی قاب در راستای عمود بر صفحه مقید شده است. همچنین، مطابق با روش صحت سنجی یک نقطه مرجع در تراز تیر معرفی و سپس به لبه بیرونی ستون جفت شده است و بار جانبی به آن نقطه اعمال شد.

جدول 6: جزئیات سوراخ‌ها در مدل‌های دیوار برشی نیمه مقید

قطر سوراخ (mm)	مدل	ردیف
دیوار برشی ساده	A	1
موجدار افقی (بدون سوراخ)	B	2
موجدار قائم (بدون سوراخ)	C	3
120	D	4
120	E	5
120	F	6
120	G	7
120	H	8
120	I	9

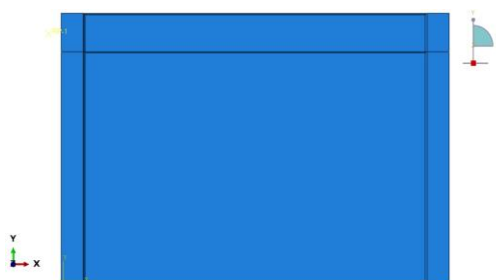


شکل 12: مش بندی مدل دیوار برشی موجدار افقی

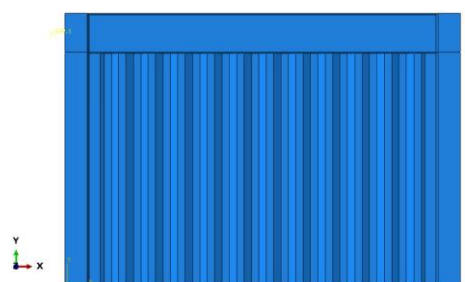
## 2-8- مدل‌های دارای سوراخ

در تمامی نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش، مشخصات مربوط به ابعاد تیرها، ستون‌ها و ورق میانی ثابت نگه داشته شده است. پارامترهای متغیر دیوار برشی فولادی فقط شامل اندازه و محل قرارگیری سوراخ‌ها در ورق میانی دیوار می‌باشد که در جدول (6) مشخصات

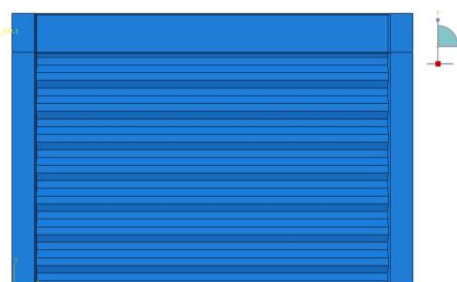
مربوط به سوراخ‌ها نشان داده شده است. در شکل (13) این مدل‌ها نشان داده شده است. در این تحقیق سوراخ‌ها در دیوار برشی موجدار افقی ایجاد شده است.



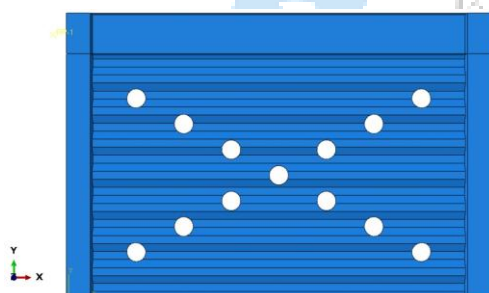
مدل A



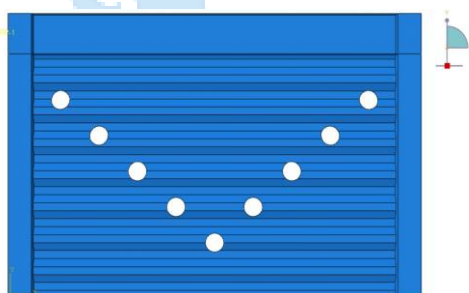
مدل C (موجدار قائم)



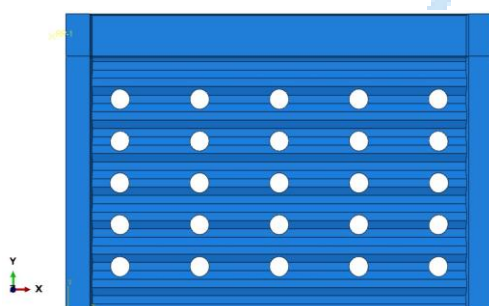
مدل B (موجدار افقی)



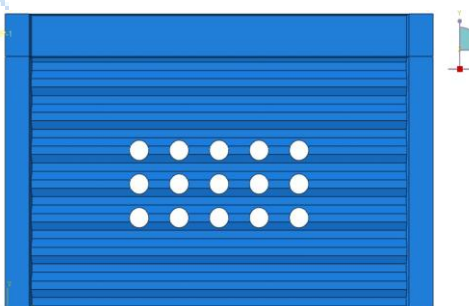
مدل E (موجدار افقی)



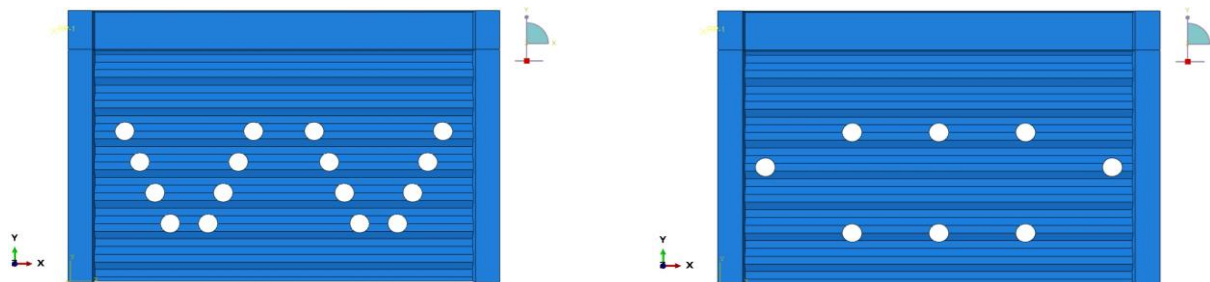
مدل D (موجدار افقی)



مدل G (موجدار افقی)



مدل F (موجدار افقی)



مدل H (موجدار افقی)

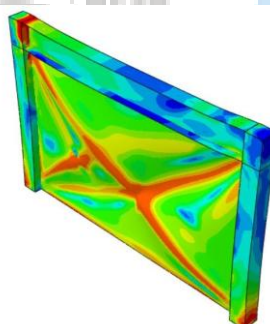
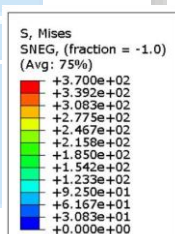
مدل I (موجدار افقی)

شکل 13: مدل‌های طراحی شده

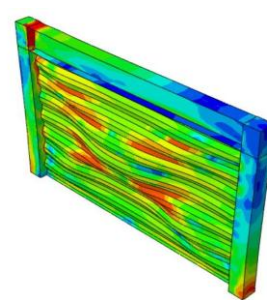
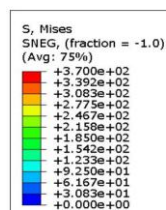
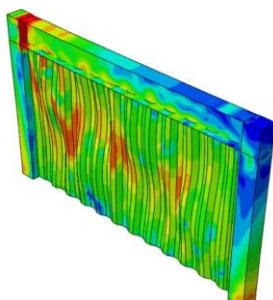
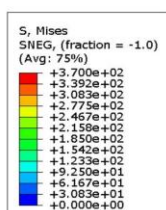
مدل‌های طراحی شده برای انجام صحیح تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت رفت و برگشتی، باید قبل از تحلیل اصلی یک تحلیل کم‌انرژی انجام شود و سپس با تغییر در ورودی مدل اصلی، تغییر شکل‌های ناشی از مدهای کم‌انرژی را با اعمال ضرایبی به‌عنوان مدل هندسی اولیه تحلیل اصلی بکار برد. در تحلیل کم‌انرژی با یک برنامه‌نویسی ساده، خروجی مدهای کم‌انرژی را به‌سادگی می‌توان استخراج کرد.

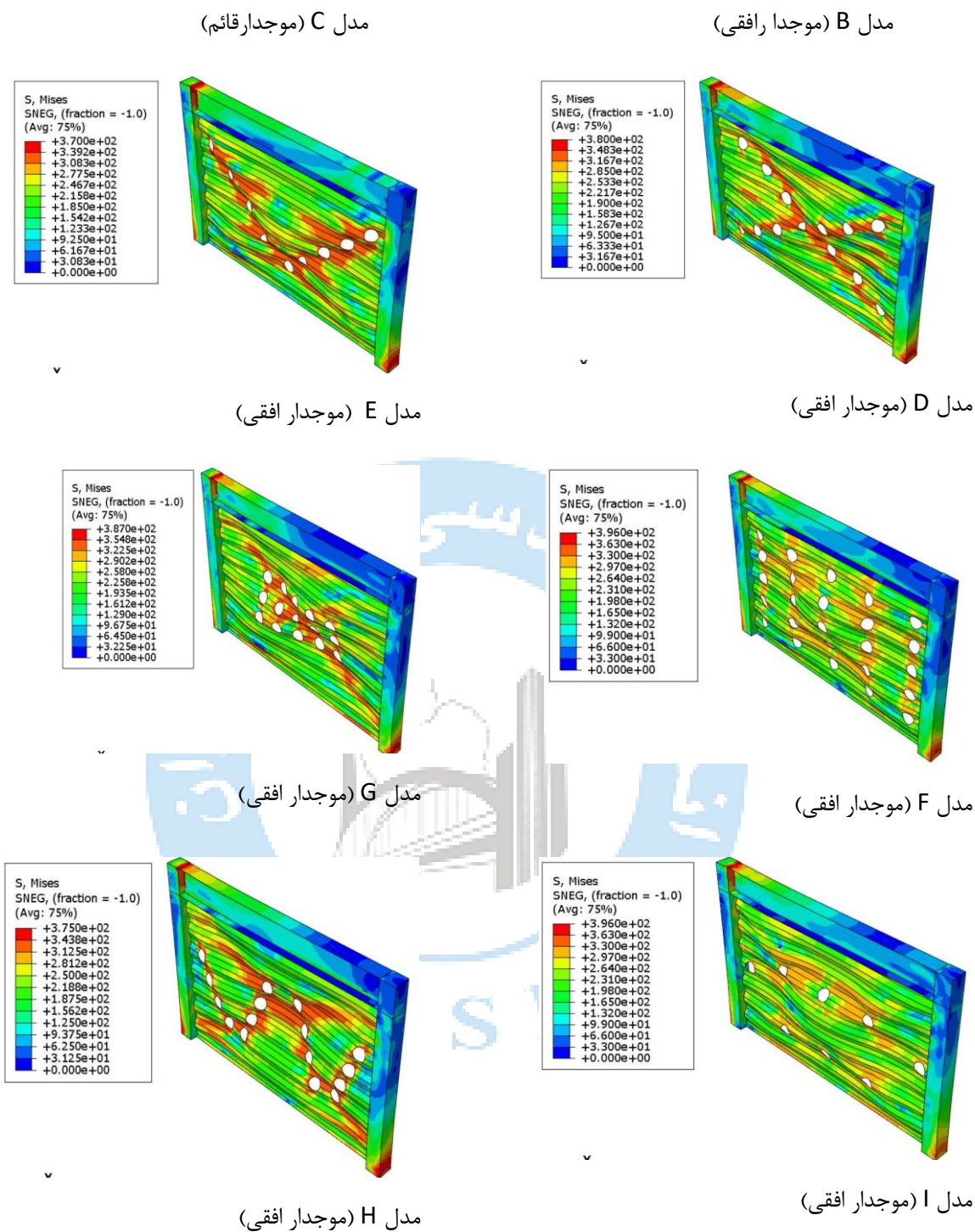
### 3- بررسی نتایج

3-1- تنش ایجاد شده در مدل‌های مختلف در شکل (14) نشان داده شده است:



مدل A

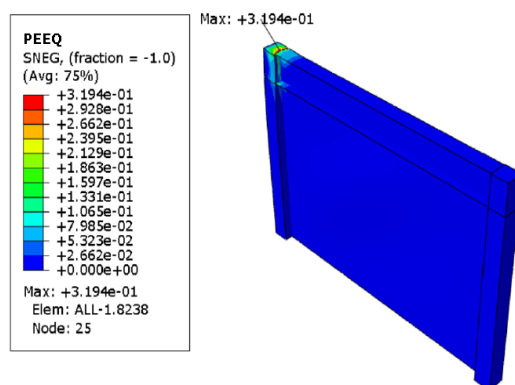




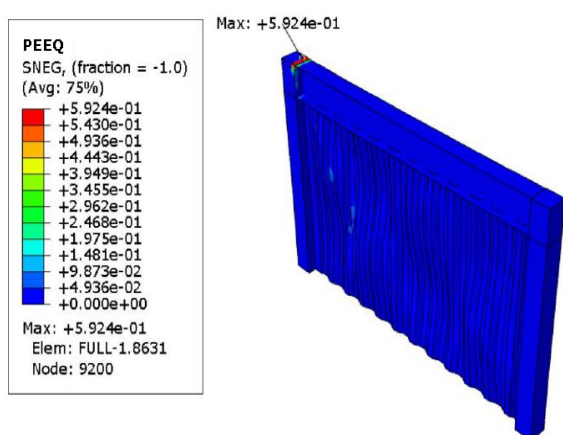
شکل 14: تنش ایجاد شده در مدل‌های مختلف مورد بررسی در این تحقیق

2-3- کرنش ایجاد شده در مدل‌های مختلف در شکل (15) نشان داده شده است.

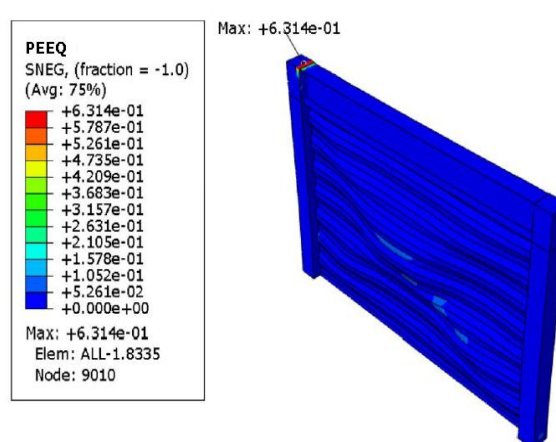




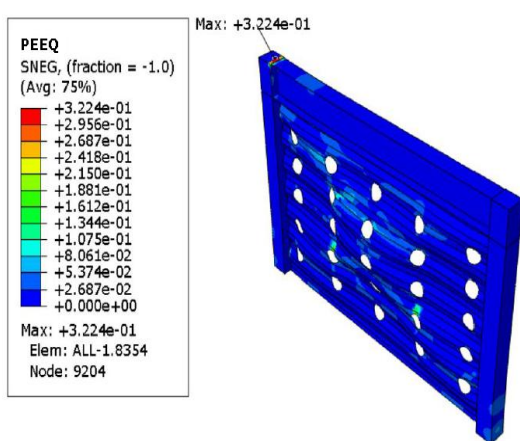
مدل A



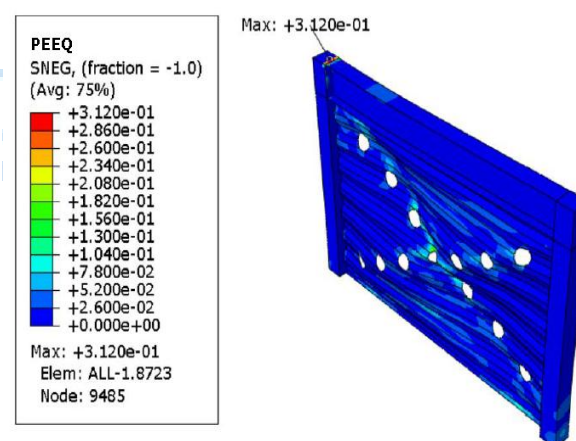
مدل C (موجدار قائم)



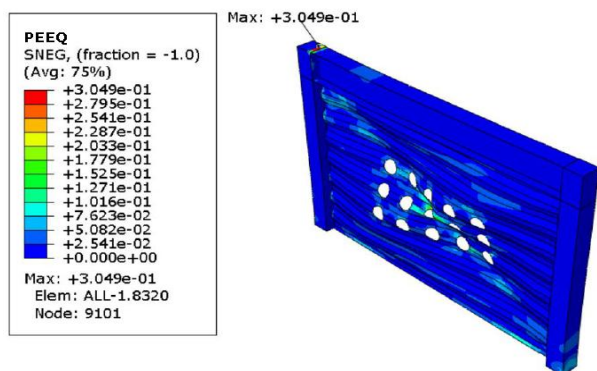
مدل B (موجدار افقی)



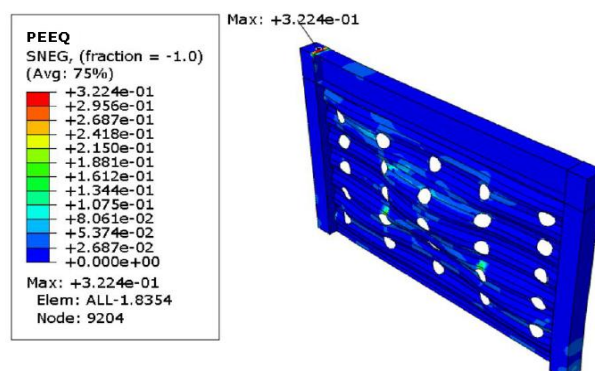
مدل E (موجدار افقی)



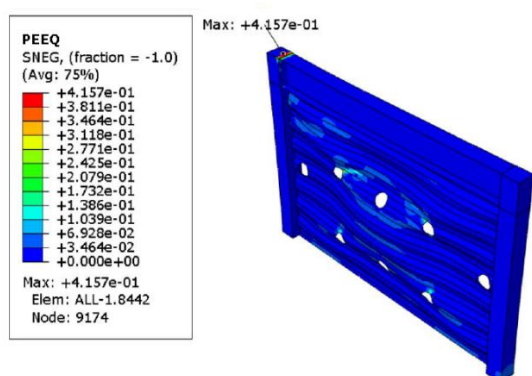
مدل D (موجدار افقی)



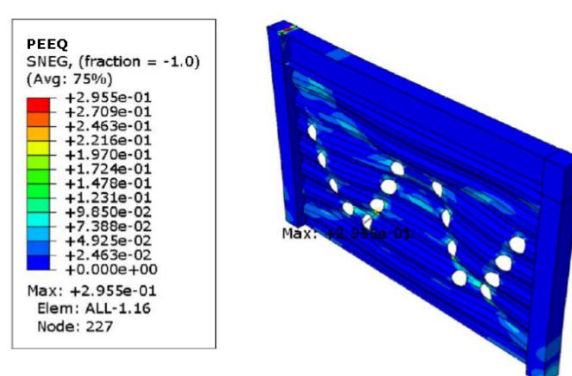
مدل G (موجدار افقی)



مدل F (موجدار افقی)



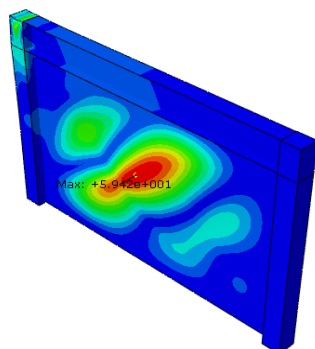
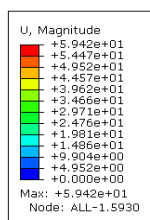
مدل I (موجدار افقی)



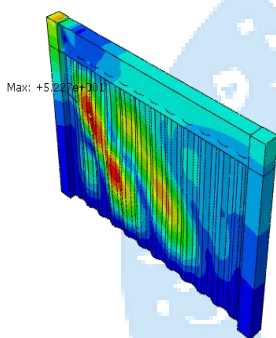
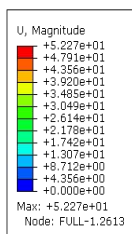
مدل H (موجدار افقی)

شکل 15: کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در مدل‌های مختلف مورد بررسی در این تحقیق

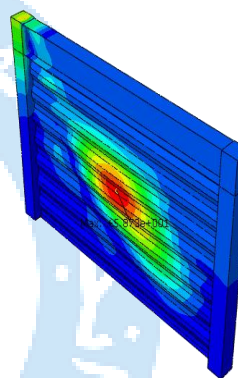
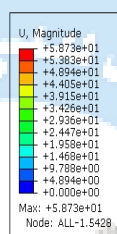
3-3- تغییر مکان ایجاد شده در مدل‌های مختلف در شکل (16) نشان داده شده است.



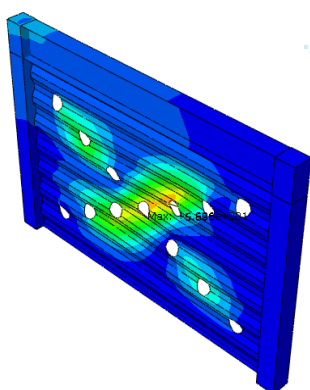
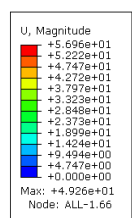
مدل A



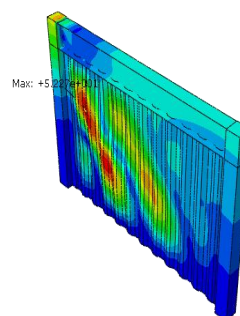
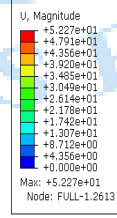
مدل C (موجدار قائم)



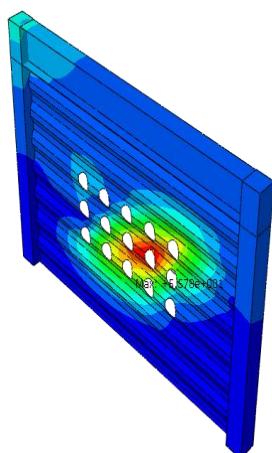
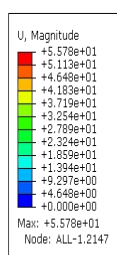
مدل B (موجدار افقی)



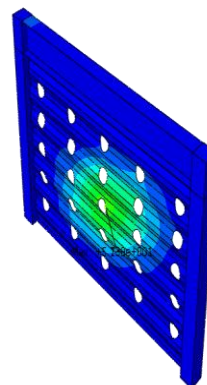
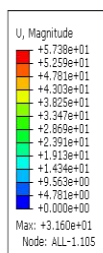
مدل E (موجدار افقی)



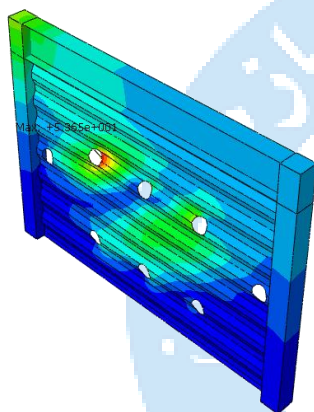
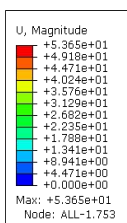
مدل D (موجدار افقی)



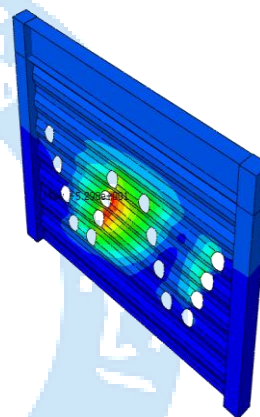
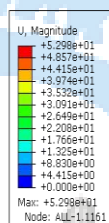
مدل G (موجدار افقی)



مدل F (موجدار افقی)



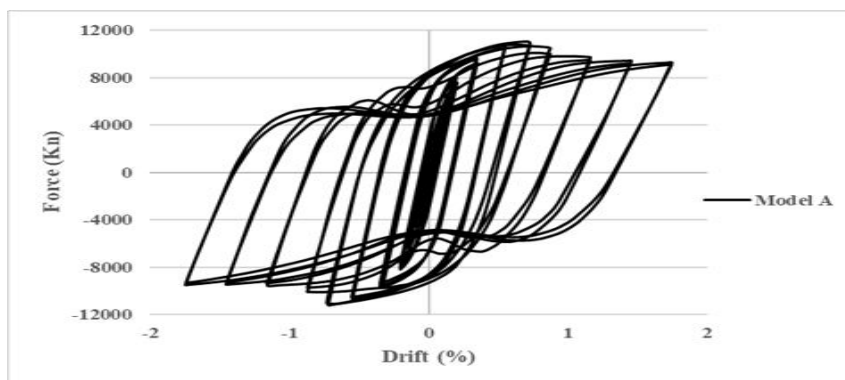
مدل I (موجدار افقی)



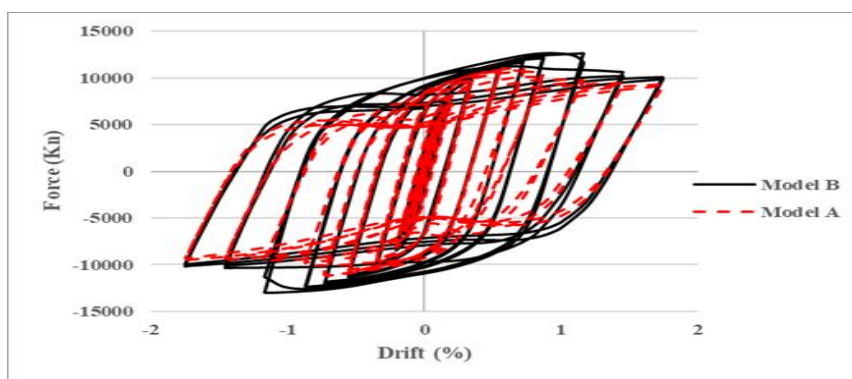
مدل H (موجدار افقی)

شکل 16: تغییر مکان ایجاد شده در مدل‌های مختلف مورد بررسی در این تحقیق

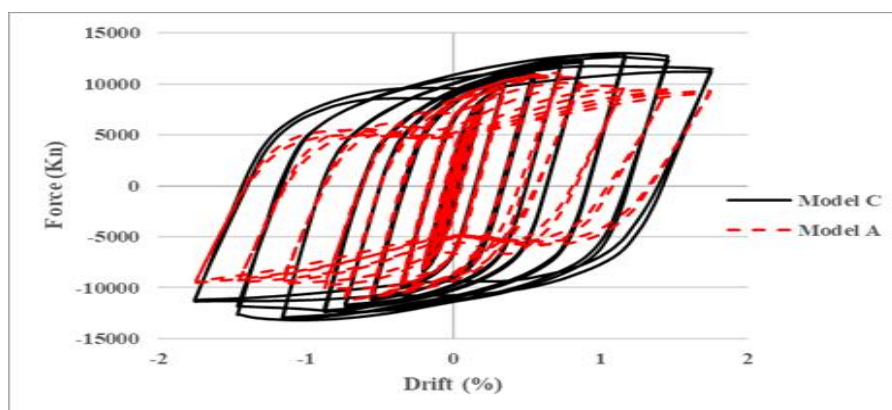
### 4-3- منحنی هیستریزس مدل‌ها:



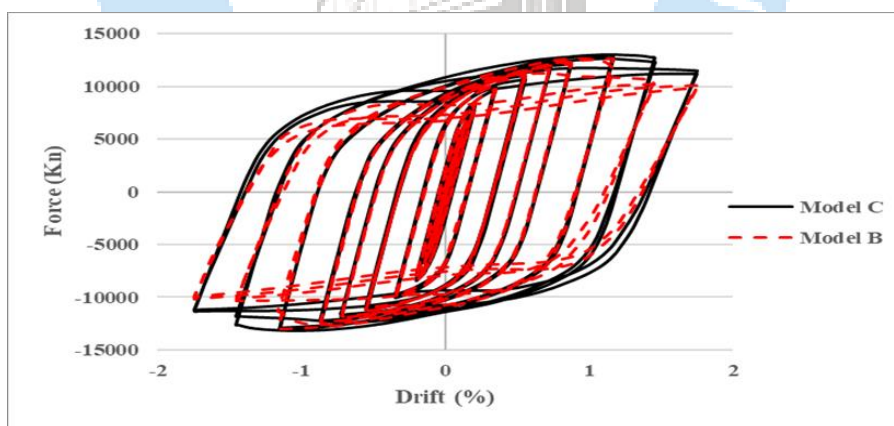
شکل 17: منحنی هیستریزس مدل (A)



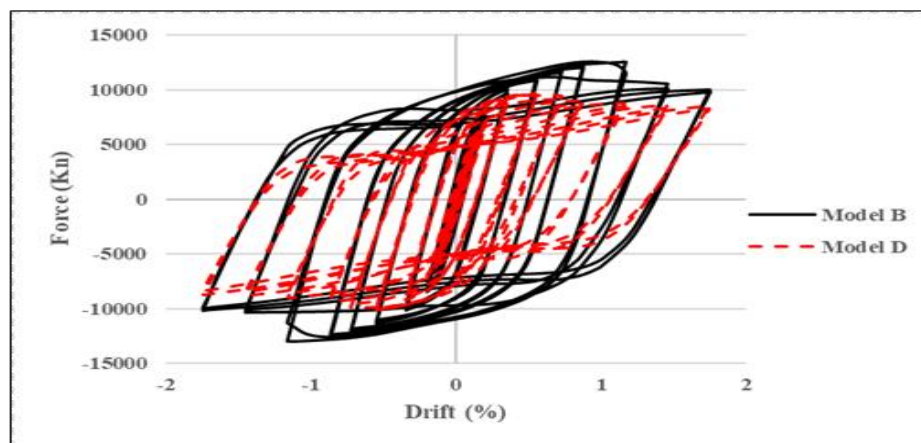
شکل 18 : مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار قائم با مدل ساده (A)



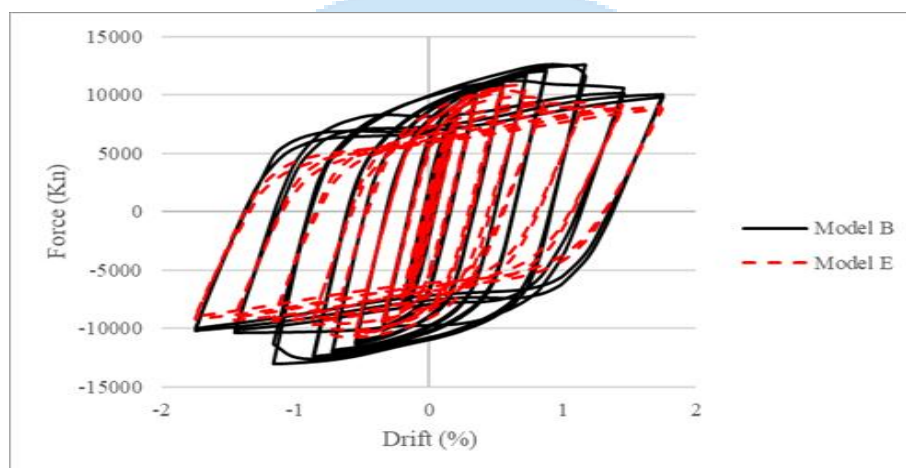
شکل 19 : مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار افقی با مدل ساده (A)



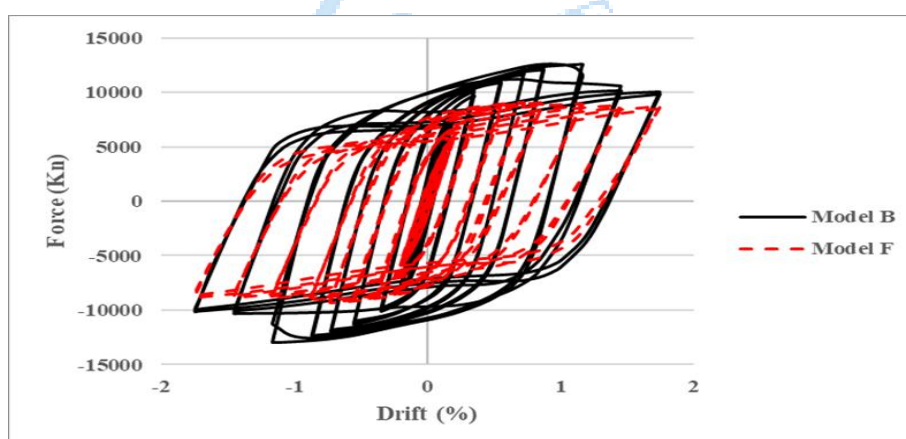
شکل 20 : مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار قائم با مدل موجدار افقی



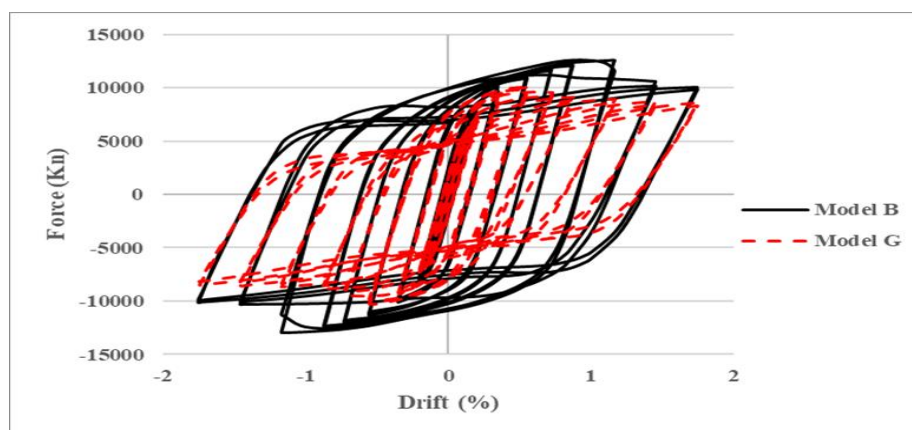
شکل 21: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (D) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)



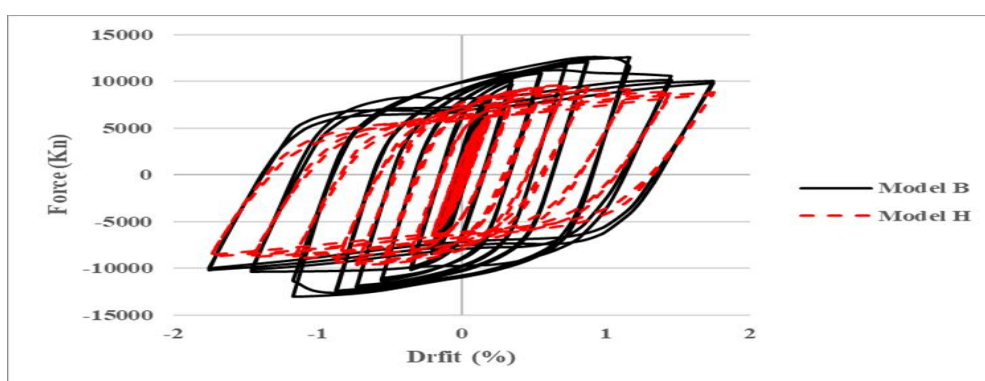
شکل 22: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (E) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)



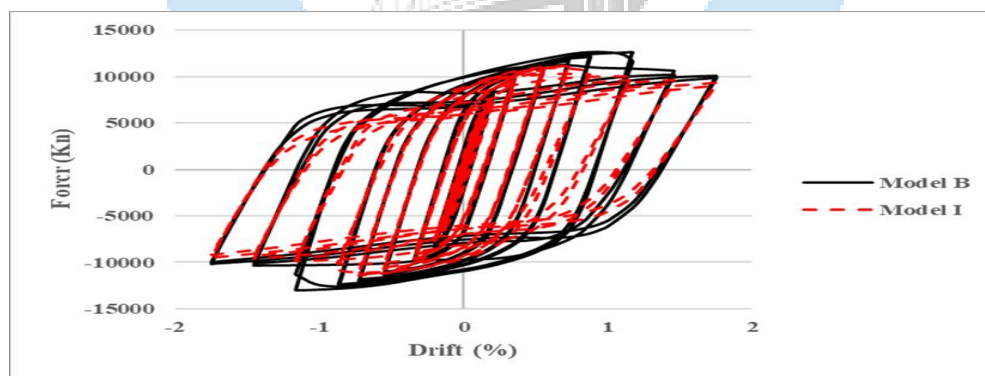
شکل 23: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (F) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)



شکل 24: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (G) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)



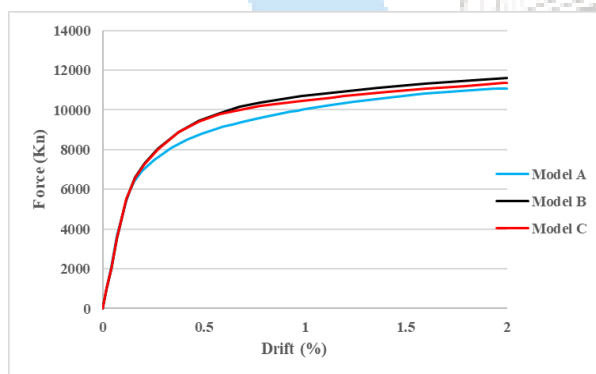
شکل 25: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (H) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)



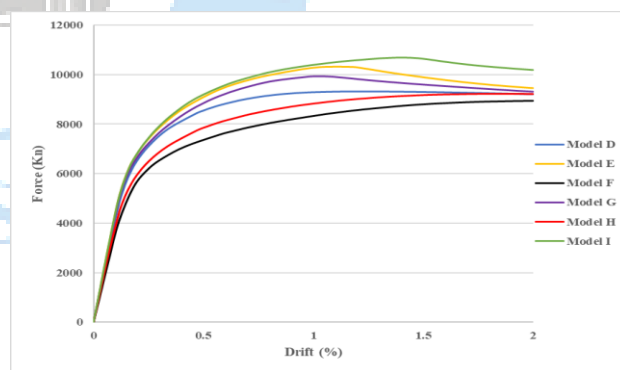
شکل 26: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل موجدار سوراخدار (I) نسبت به مدل بدون سوراخ (B)

در مدل A در پای ستون و در محل اتصال تیر به ستون تسلیم شدگی ایجاد شده است. در مدل B ورق میانی نسبت به مدل (A) کمتر کمانش کرده است. در این مدل در پای ستون و در محل اتصال تیر به ستون تسلیم شدگی حاصل شده است. در این مدل مقاومت نهایی از روی منحنی هیستریزیس برابر 12989 کیلو نیوتن می باشد. در تمام مدل های مورد مطالعه در پای ستون و در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون تسلیم شدگی ایجاد شده است. همچنین، در مدل (C) تسلیم ورق جان نسبت به مدل (B) موجدار افقی سریعتر ایجاد شده است. در مدل (C) مقاومت نهایی برابر 13186 کیلو نیوتن می باشد. با توجه به نتایج مشاهده می شود با موجدار کردن ورق در مدل (C) مقاومت

نهایی به اندازه 18٪ نسبت به مدل (A) و 2٪ نسبت به مدل (B) ورق موجدار افقی افزایش یافته است. در مدل (D) در پای ستون و در محل اتصال تیر به ستون مفصل پلاستیک تشکیل شده است. در مدل (D) مقاومت نهایی برابر 10097 کیلو نیوتن می‌باشد که این عدد از منحنی هیستریزس نشان داده شده مقاومت نهایی مدل سوراخدار، مدل (D) نسبت به مدل بدون سوراخ به اندازه 16٪ کاهش یافته است. در مدل (F) سوراخ‌ها به صورت منظم در ورق جان با قطر تمامی سوراخ‌ها 120 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. با بررسی تنش در مدل (F) مشاهده می‌شود که تنش‌های ماکزیمم در اطراف سوراخ‌ها ایجاد شده‌اند. در مدل (F) در پای ستون و در محل اتصال تیر به ستون مفصل پلاستیک تشکیل شده است. در این مدل مقاومت نهایی برابر 9300 کیلو نیوتن می‌باشد که این عدد از منحنی هیستریزس حاصل شد. مقاومت نهایی مدل سوراخدار، مدل (F) نسبت به مدل بدون سوراخ به اندازه 28٪ کاهش یافته است. در مدل (G) سوراخ‌ها به مرکز ورق جان در نظر گرفته شده‌اند. قطر تمامی سوراخ‌ها در مدل (G) 120 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مدل در پای ستون و در محل اتصال تیر به ستون مفصل پلاستیک تشکیل شده است. در مدل (G) مقاومت نهایی برابر 10293 کیلو نیوتن با توجه به منحنی هیستریزس می‌باشد. مقاومت نهایی مدل سوراخدار، مدل (G) نسبت به مدل بدون سوراخ به اندازه 21٪ کاهش یافته است. در مدل (H) سوراخ‌ها به صورت (W) در ورق جان با قطر تمامی سوراخ‌ها 120 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل مقاومت نهایی برابر 9623 کیلو نیوتن از منحنی هیستریزس می‌باشد. مقاومت نهایی مدل سوراخدار، مدل (H) نسبت به مدل بدون سوراخ به اندازه 26٪ کاهش یافته است. در مدل (I) سوراخ‌ها در اطراف ورق جان با قطر تمامی سوراخ‌ها 120 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در مدل (I) مقاومت نهایی برابر 11385 کیلو نیوتن از منحنی هیستریزس می‌باشد. مقاومت نهایی مدل سوراخدار، مدل (I) نسبت به مدل بدون سوراخ به اندازه 12٪ کاهش یافته است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده بر نمونه‌های مختلف، منحنی ظرفیت قاب‌ها که گویای تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان افقی دیوار است، ترسیم می‌شود. با استفاده از منحنی ظرفیت می‌توان در مورد پارامترهایی همچون سختی، مقاومت و شکل‌پذیری سازه اظهار نظر کرد. در شکل (27) منحنی ظرفیت مربوط به مدل‌های مختلف نشان داده شده است.



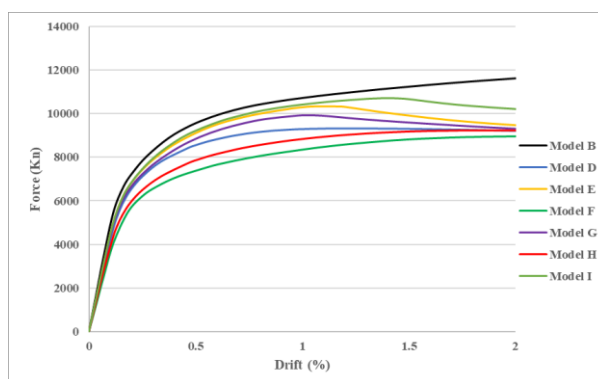
شکل 28: منحنی ظرفیت مربوط به مدل‌های بدون سوراخ



شکل 27: منحنی ظرفیت مدل‌های دارای سوراخ

در شکل (29) منحنی تغییر مکان نمونه‌های سوراخ‌دار با نمونه بدون سوراخ مقایسه شده است. با بررسی شکل (29) مشاهده می‌شود که ظرفیت دیوار در حالت بدون سوراخ بیشتر از دیوارهای با سوراخ می‌باشد.





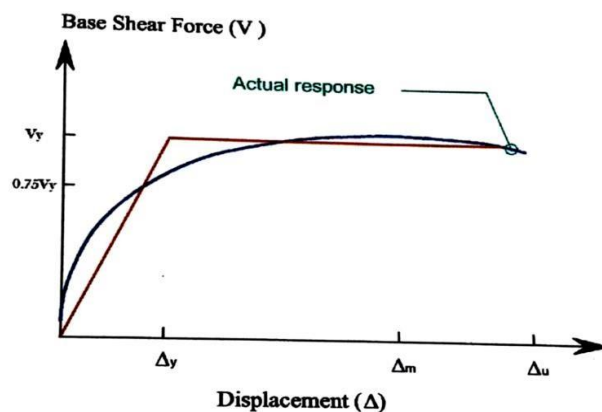
شکل 29: مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های دارای سوراخ و بدون سوراخ (ورق افقی)

جدول 7: ظرفیت برشی مدل‌ها

درصد افت ظرفیت نسبت به حالت بدون سوراخ	ظرفیت برش نهایی (KN)	مدل
---	11084	A
---	11614	B
---	11366	C
21	9201	D
18	9468	E
23	8949	F
20	9312	G
21	9216	H
12	10196	I

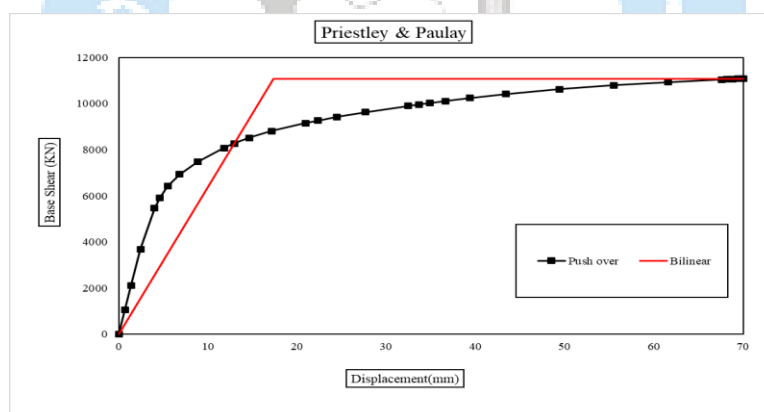
با بررسی جدول (7) مشاهده می‌شود که ایجاد سوراخ در مدل‌های دیوار برشی با موج‌های افقی ظرفیت برشی نهایی کاهش پیدا کرده است. بیشترین درصد کاهش مربوط به نمونه (F) می‌باشد که به اندازه 23٪ کاهش یافته است. همچنین کمترین درصد کاهش نیز مربوط به نمونه (I) می‌باشد که به اندازه 12٪ کاهش یافته است. با بررسی نتایج جدول (8) مشاهده می‌شود سختی دیوار برشی فولادی موجدار (قائم) نسبت به مدل افقی بیشتر می‌باشد. سختی این نوع دیوار نسبت به نوع سنتی 1٪ افزایش یافته است. ضریب اضافه مقاومت در نمونه دیوار برشی فولادی موجدار (افقی) نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر می‌باشد. ضریب اضافه مقاومت این نوع دیوار نسبت به نوع سنتی آن 6٪ افزایش یافته است. همچنین با اضافه نمودن سوراخ به نمونه موجدار افقی ضریب اضافه مقاومت در اکثر مدل‌ها کاهش یافته است. ضریب شکل‌پذیری نمونه دیوار برشی موجدار افقی نسبت به نمونه قائم بیشتر می‌باشد. در دو حالت موجدار افقی و قائم ضریب شکل‌پذیری نسبت به نمونه سنتی کاهش پیدا کرده است. با اضافه نمودن سوراخ به نمونه دیوار برشی موجدار افقی ضریب شکل‌پذیری تمام مدل‌ها افزایش پیدا کرده است. با موجدار کردن ورق دیوار برشی ضریب رفتار نسبت به نوع سنتی آن افزایش پیدا کرده است. بیشترین افزایش مربوط به دیوار برشی فولادی موجدار افقی می‌باشد که به اندازه 4٪ افزایش پیدا کرده است. با ایجاد سوراخ در مدل دیوار برشی موجدار افقی ضریب رفتار اکثر مدل‌ها نسبت به نمونه بدون سوراخ کاهش پیدا کرده است.

در روش پریستلی و پائولی (بر اساس رابطه بند 4.4 پروتکل ATC-19) [31]، یک مقدار برای  $V_y$  (مقاومت تسلیم سازه) فرض شده، سپس از مبدا به نقطه  $0.75V_y$  روی منحنی تغییر مکان-نیروی برش پایه (شکل 30) وصل نموده و تا خط  $V_y$  ادامه داده می‌شود. از محل تقاطع این دو خط منحنی مذکور افقی فرض می‌شود.

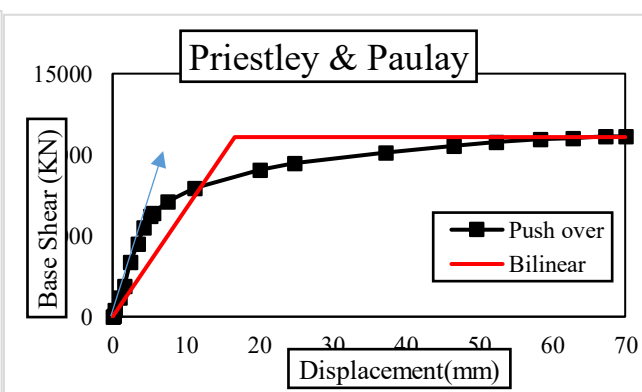
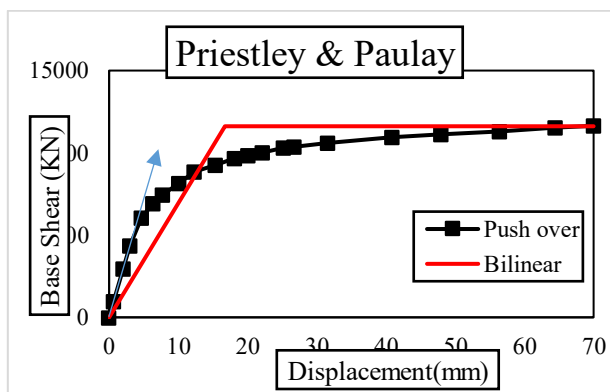


شکل 30: روش پریستلی و پائول [32]

3-5- دو خطی نمودارهای بارافزون در مدل های مختلف در شکل (31) نشان داده شده است.

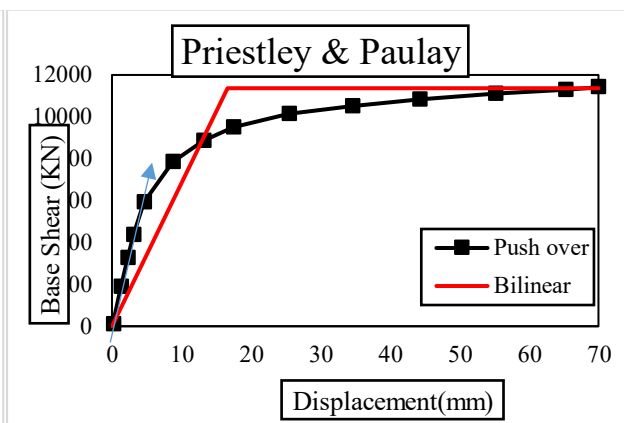
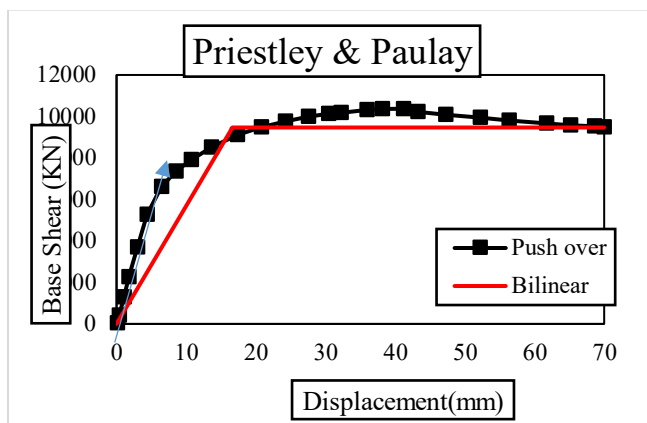


مدل A



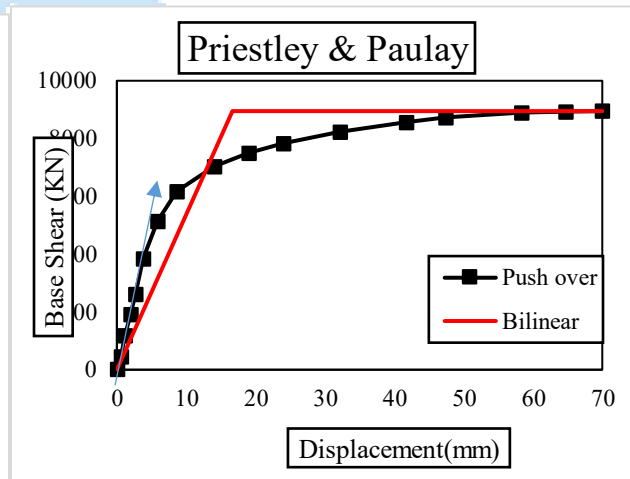
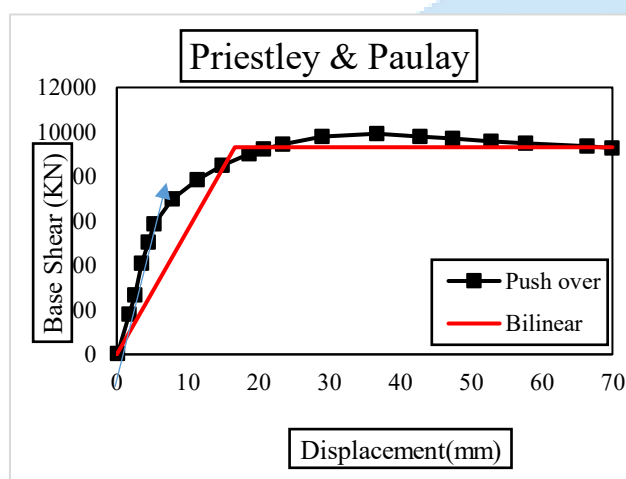
مدل C

مدل B



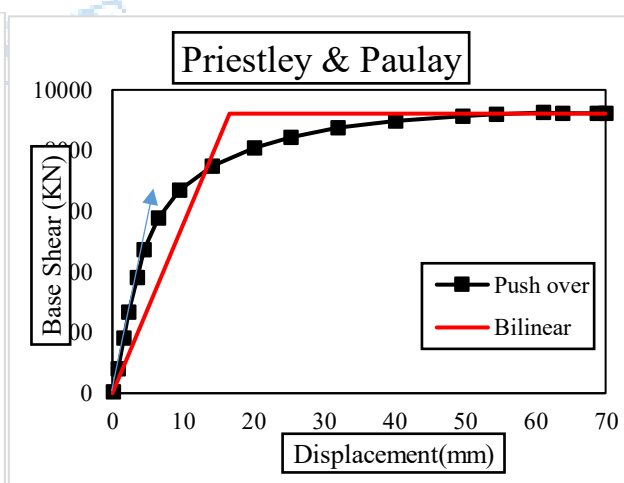
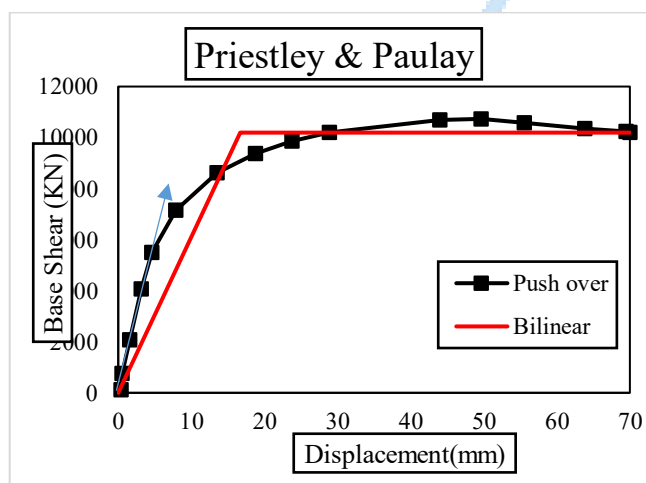
مدل E

مدل D



مدل G

مدل F



مدل I

مدل H

شکل 31: دوخطی کردن منحنی ظرفیت مربوط به مدل ها

جدول 9: پارامترهای لرزه‌ای

مدل	Ke سختی (N/mm <sup>2</sup> الاستیک)	ضریب اضافه R <sub>s</sub> مقاومت	ضریب شکل پذیری R <sub>μ</sub>	ضریب رفتار R
A	1359	2.00	3.88	7.86
B	1363	2.12	3.86	8.18
C	1372	2.05	3.85	7.93
D	1180	1.94	4.00	7.87
E	1251	1.88	4.12	7.75
F	1009	2.20	3.75	8.23
G	1228	1.88	4.15	7.80
H	1047	1.90	3.80	7.26
I	1247	2.03	3.94	8.00

## ۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه نتایج حاصل از مطالعه حاضر در ارتباط با هندسه و مشخصات نمونه های مدلسازی شده عبارتند از:

- 1- با ایجاد سوراخ در مدل دیوار برشی موجدار (افقی) مشاهده شد مقاومت نهایی نسبت به نمونه بدون سوراخ کاهش یافته است. به طوری که بیشترین درصد کاهش مربوط به مدل (F) می باشد که به اندازه 28٪ کاهش یافته است. همچنین کمترین درصد کاهش نیز مربوط به مدل (I) می باشد که به اندازه 12٪ کاهش یافته است.
- 2- با بررسی نتایج مشاهده شد که چیدمان سوراخ ها و نحوه قرارگیری سوراخ ها ظرفیت دیوار برشی تغییر پیدا می کند. به طوری که با کاهش تعداد سوراخ ها ظرفیت برشی افزایش پیدا می کند. بیشترین ظرفیت برشی مربوط به مدل (I) و کمترین ظرفیت برشی نیز مربوط به مدل (F) می باشد.
- 3- سختی دیوار برشی فولادی موج دار (قائم) نسبت به مدل افقی بیشتر می باشد. سختی این نوع دیوار نسبت به نوع سنتی 1٪ افزایش یافته است. ضریب اضافه مقاومت در نمونه دیوار برشی فولادی موجدار (افقی) نسبت به سایر مدل ها بیشتر می باشد. ضریب اضافه مقاومت این نوع دیوار نسبت به نوع سنتی آن 6٪ افزایش یافته است. همچنین با اضافه نمودن سوراخ به نمونه موجدار افقی ضریب اضافه مقاومت در اکثر مدل ها کاهش یافته است.
- 4- ضریب شکل پذیری نمونه دیوار برشی موجدار افقی نسبت به نمونه قائم بیشتر می باشد. در دو حالت موجدار افقی و قائم ضریب شکل پذیری نسبت به نمونه سنتی کاهش پیدا کرده است. با اضافه نمودن سوراخ به نمونه دیوار برشی موجدار افقی ضریب شکل پذیری تغییر پیدا کرده است. با موجدار کردن ورق دیوار برشی ضریب رفتار نسبت به نوع سنتی آن افزایش پیدا کرده است بیشترین افزایش مربوط به دیوار برشی فولادی موجدار افقی می باشد که به اندازه 4٪ افزایش پیدا کرده است.

## 5- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

✓ بررسی رفتار دیوار برشی با الگوی سوراخ های مزبور، در تعداد دهانه ها و تعداد طبقات مختلف

- ✓ بررسی بیشتر پارامترهای مدلسازی از جمله بررسی تاثیر ابعاد بال تیروورق، ابعاد بال ستون، ضخامت جان ستون و ابعاد موج ورق بر رفتار دیوار برشی فولادی موجدار با چیدمان مختلف سوراخ
- ✓ استفاده از ستون‌های کامپوزیت و تاثیر آن بر رفتار دیوار برشی موجدار دارای سوراخ

## 6- مراجع

- [1] Cheng, M.-Y., R. Fikri, and C.-C. Chen. (2015). *Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems*. Engineering Structures, **82**: p. 214-225.
- [2] Zhu, L., L. Kong, and Zhang, C. (2020). *Numerical study on hysteretic behaviour of horizontal-connection and energy-dissipation structures developed for prefabricated shear walls*. Applied Sciences, **10**(4): p. 1240.
- [3] Xiao, S., et al. (2021). *Study of effects of sleeve grouting defects on the seismic performance of precast concrete shear walls*. Engineering Structures, **236**: p. 111833.
- [4] Gholhaki, M. and Gerami, M. and Asghari Takdam, H. (2013). *Dynamic Analysis of Steel Shear Walls Using Different Spectrums in Near and Far Fields*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, Volume 45, Issue 1 - Serial Number 1, Pages 53-67.
- [5] Gholhaki, M., and Gerami, M. and Mahdipour, A. (2014). *Story Shear and Story Drift Determination of Thin Steel Plate Shear Walls with Hinge Beam to Column Connections under Far and Near Fault Earthquakes*. Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J) Vol. 14, No. 1, Page 49-63.
- [6] Yadollahi, Y. and Pakar, I. and Bayat, M. (2015). *Evaluation and comparison of behavior of corrugated steel plate shear walls*. Latin American Journal of Solids and Structures. **12**: p. 763-786.
- [7] Farzampour, A. and Yekrangnia, M. (2014). *On the behavior of corrugated steel shear walls with and without openings*. Second European conference on earthquake engineering and seismology.
- [8] Kalali, H., et al., (2016). *Numerical study on steel shear walls with sinusoidal corrugated plates*. Latin American Journal of Solids and Structures. **13**: p. 2802-2814.
- [9] Peng, X.-T., et al. (2018). *A Design Method of Corrugated Steel Shear Wall under Earthquake Motion*. in 2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). Atlantis Press.
- [10] Tong, J.-Z., and Guo, Y.-L. and Pan, W.-H. (2020). *Ultimate shear resistance and post-ultimate behavior of double-corrugated-plate shear walls*. Journal of Constructional Steel Research. **165**: p. 105895.
- [11] Mir Ghaderi, S, R. and Torabian, Sh. (2006). *Behavior and scope of application of corrugated steel shear walls*. University of Tehran, University College of Engineering, Volume 40, Issue 5, Pages 723-735.
- [12] Gholizadeh, M. and Yadoollahi, Y., (2012). *Comparison of ductility and energy dissipation of steel shear walls with corrugated sinusoidal and trapezoidal sheets*, 9th International Congress on Civil Engineering.
- [13] Rajeev, A., Jacob, B., Muhamed, S. (2016). Evaluation and Comparison of Behavior of Trapezoidally Corrugated Steel Plate Shear Walls, International Research Journal of Engineering and Technology, 3, Issue: 09.
- [14] Aghabarati, h. and Hosseini, H.R., (2014) "Investigation of the seismic behavior of corrugated steel shear wall due to the change in the wave direction of a sheet with sinusoidal, triangular and trapezoidal shapes", the second national earthquake conference, Imam Khomeini International University (RA) Qazvin.
- [15] Sudeok Shon, Mina Yoo, Seungjae Lee. (2017). An Experimental Study on the Shear Hysteresis and Energy Dissipation of the Steel Frame with a Trapezoidal-Corrugated Steel Plate. Journal of Materials (MDPI).
- [16] Leila Hosseinzadeh, Fereshteh Emami, Masood Mofid. (2017). Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate. The Structural Design of Tall and Special Buildings. <https://doi.org/10.1002/tal.1390>
- [17] CAO Qiang, HUANG Jingyu, WANG Peng, ZHANG Long, WU DI, CHEN Heng and ZHANG Yansheng. (2016). Research on Failure Modes and Key Parameters of Corrugated Steel Shear Walls. MATEC Web of Conferences, 05008. DOI: 10.1051/mateconf/20166.
- [18] Farzad Shahabian, Seyed Saeed Askariani (1395). Production of fragility curves for corrugated steel shear walls. Journal of structural and construction engineering
- [19] Abdelrahim K. Dessouki, Sherif A. Ibrahim, P.E, Ibrahim N. N. Shenouda. (2019). Ultimate capacity of steel shear Walls with corrugated plate. Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM), Vol. (41) No. (3)

- [20] Cao, Q.; Huang, J.; Gu, B. Research on Lateral Performance of Corrugated Steel Plate Shear Walls Connected with Beams Only under Horizontal Loads. *Buildings* 2023, 13, 1996.
- [21] Hosseinzadeh, L., Kontoni, DP.N. & Babaei, B. Investigation of the Behavior of Steel Plate Shear Walls Considering Double Corrugated Low-Yield-Point Steel Infill Plate. *Int J Civ Eng* 21, 1631–1642
- [22] S.M. Ghodrati-Kashan, S. Maleki, Experimental investigation of double corrugated steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 190, 2022, 107138
- [23] - Saberi, H., saberi, V., Hosseini, M., & HABIBZADEH, S. (2021). Evaluation of the performance of perforated steel shear wall with different layers and geometric shapes of holes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1), 448-473. doi: 10.22065/jsce.2020.182476.1834
- [24] - Majidinia, Zaman, Mehdizadeh, Kouros, Sadeghi, Abbasali, Hashemi, Seyede Vahide. (2020) .Investigation of the Factors affecting the Ductility of Steel Plate Shear Wall with Corrugated Sheet under Cyclic Loading .*Analysis of Structure and Earthquake* ,1 ,55-69.
- [25] Emami, F., M. Mofid, and A. Vafai, *Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls*. *Engineering Structures*, 2013. **48**: p. 750-762.
- [26] Seyyed M. Ghodrati-Kashan and Shervin Maleki, *Cyclic Performance of Corrugated Steel Plate Shear Walls with Beam-Only-Connected Infill Plates*. *Advances in Civil Engineering* Volume 2021, Article ID 5542613, 18 pages.
- [27] Adriansyah Bagus Aryanto, Aditya Rio Prabowo, Teguh Muttaqie, Nurul Muhyat, Tuswan Tuswan, Nurul Huda, and Quang Thang Do, *Investigation of the ability of steel plate shear walls against designed cyclic loadings: Benchmarking and parametric study*, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 2023; 32: 20220301.
- [28] Azadeh Forotani , Azita Asadi, Hamed Tajammolian, *Seismic Assessment of Corrugated Steel Shear Walls with Different Configurations Based on Fragility Curves*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 2022, pp. 164-184.
- [29] ANSI/AISC 341-16 An American National Standard, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, July 12, 2016.
- [30] ABAQUS (2011). ABAQUS user's manual, version 6.11. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA.
- [31] ATC-19/1995 (1995). *Structural Response Modification Factor*, Applied Technology Council, NO.
- [32] Paulay T, Priestley M (1992) *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. Wiley, New York